



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JEOVANA DA SILVA SOUTO MAIOR

MELHORAMENTO DE SOLOS EXPANSIVOS COM USO DE CAL: uma revisão

Recife

2023

JEOVANA DA SILVA SOUTO MAIOR

MELHORAMENTO DE SOLOS EXPANSIVOS COM USO DE CAL: uma revisão

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M227m	<p>Maior, Jeovana da Silva Souto. Melhoramento de solos expansivos com uso de cal: uma revisão / Jeovana da Silva Souto Maior. – 2023. 123 f.: il., fig., tab. e siglas.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023. Inclui Referências e Apêndices.</p> <p>1. Engenharia Civil. 2. Solos expansivos. 3. Estabilização dos solos. 4. Solo-cal. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (Orientador). II. Título.</p>
	<p>UFPE</p> <p>624 CDD (22. ed.)</p> <p>BCTG/2024-40</p>

JEOVANA DA SILVA SOUTO MAIOR

MELHORAMENTO DE SOLOS EXPANSIVOS COM USO DE CAL: uma revisão

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 01/11/2023.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria Odete Holanda Mariano (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco

Profa. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

À Deus, aos meus pais Suzana e Jeovane, minha irmã Juliana e esposo Victor.

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus, por ter me dado força, providenciado todo o auxílio necessário e aberto os caminhos para que conseguisse realizar mais esta etapa em minha vida, me permitindo realizar este sonho.

Em especial ao Professor Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira pela amizade, confiança, apoio, orientação, incentivo, disponibilidade e principalmente paciência. Sem dúvidas a jornada seria muito mais pesada e difícil se ele não fosse o excelente mestre que é. A sua vontade em auxiliar os seus orientandos, compartilhando tanto a sua sabedoria profissional quanto a pessoal, demonstra sua profunda compreensão do papel de um mestre. Obrigada professor, por tanto.

Agradecer imensamente aos meus pais Suzana e Jeovane, por toda dedicação, esforço e amor empenhados em minha criação, também por todos os valores ensinados e por sempre acreditarem em meus sonhos.

Ao meu esposo, Victor Fernando, por seu amor, cuidado, compreensão, incentivo e apoio que foram cruciais ao longo dessa trajetória.

Aos mestres Pedro Eugênio, Joaquim Oliveira, Fernando Jucá, por todos os ensinamentos transmitidos durante minha jornada na área Geotécnica.

Aos meus queridos amigos, Natália Milhomem, Raíssa Andrada, Laíssa Teixeira, Carlos Antônio e Lorena Coelho por todo companheirismo e incentivo.

Aos colegas do mestrado Ruth, Lucas, Anderson, Larissa, Riadny e Hanna, que me apoiaram neste período e tornaram-se peças fundamentais para a conclusão do curso.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, que forneceu a bolsa de estudos, a qual viabilizou a realização deste trabalho.

E a todos aqueles que, de alguma forma, auxiliaram na realização desta pesquisa.

RESUMO

Solos expansivos são encontrados em grandes áreas no mundo e a sua presença é considerada uma das causas mais comuns de problemas em estruturas, especialmente prédios e rodovias, causando prejuízos de ordem econômica e social todos os anos para reparar as edificações afetadas (JEFFREY, 2007). O uso de cal para estabilizar estes solos permite o reaproveitamento do solo natural e a prevenção de problemas pós-construção em estruturas. Esta pesquisa apresenta uma revisão de trabalhos publicados entre os anos de 1991 e 2022 em 25 países, sobre o melhoramento de solos expansivos com cal, servindo como base de dados da caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e geomecânica. Foram analisados 80 trabalhos, selecionados em sítios eletrônicos de publicação científica e acadêmica. A análise dos solos naturais mostra a predominância da textura fina, com a média do limite de liquidez de 80% e limite de plasticidade de 47% se tratando de solos com um potencial de expansão “muito alto”, pelos critérios de Chen (1965), Seed et al (1962), e Daksanamurthy e Raman (1973). Condicionados ao tratamento, 24 % dos casos analisados utilizaram o teor de 6% de cal para tratar a expansão. 96% dos solos tratados apresentaram um decréscimo no índice de plasticidade, 75% obtiveram um aumento da umidade ótima e 76% apresentaram redução da densidade seca máxima. Testes de difração de Raios-X, TG, DTG, CBR, expansividade e resistência a compressão simples comprovaram que o aumento do teor de cal e do tempo, são proporcionais aos resultados dos solos expansivos a serem neutralizados pelas reações pozolânicas, mesmo a um baixo teor de cal. 32 solos apresentaram resultados quanto à expansão livre, 8 deles eliminaram completamente o potencial de expansão, enquanto em 19 casos, o potencial foi reduzido a menos de 1,5%, 97% dos solos reduziram seu potencial em no mínimo 16 %. Esta análise comprovou que o tratamento químico do solo com a cal, reduz a fração argilosa, reduz a umidade ótima e aumenta a densidade máxima seca depois de curado, aumenta o pH, aumenta a presença dos óxidos de cálcio, altera a microestrutura do solo criando ligações cimentícias, reduz a expansividade, incrementa o CBR e resistência a compressão simples.

Palavras-chave: solos expansivos; estabilização dos solos; solo-cal.

ABSTRACT

Expansive soils are found in large areas worldwide, and their presence is considered one of the most common causes of problems in structures, especially buildings and highways, causing economic and social losses every year to repair the affected constructions (JEFFREY, 2007). The use of lime to stabilize these soils allows for the reuse of natural soil and prevents post-construction problems in structures. This research presents a review of papers published between 1991 and 2022 in 25 countries on the improvement of expansive soils with lime, serving as a database for physical, chemical, mineralogical, microstructural, and geomechanical characterization. Eighty works were analyzed, selected from scientific and academic publication websites. The analysis of natural soils shows a predominance of fine texture, with an average liquid limit of 80% and plastic limit of 47%, indicating soils with "very high" expansion potential according to the criteria of Chen (1965), Seed et al (1962), and Daksanamurthy and Raman (1973). Subjected to treatment, 24% of the analyzed cases used a 6% lime content to address expansion, 96% of treated soils showed a decrease in plasticity index, 75% experienced an increase in optimum moisture content, and 76% exhibited a reduction in maximum dry density. X-ray diffraction, TG, DTG, CBR, expansivity, and simple compression strength tests confirmed that the increase in lime content and time is proportional to the results of expansive soils neutralized by pozzolanic reactions, even at low lime content. Thirty-two soils provided results regarding free expansion, with eight eliminating expansion potential, while in 19 cases, the potential was reduced to less than 1.5%. 97% percent of the soils reduced their potential by at least 16%. This analysis demonstrated that chemical treatment of soil with lime reduces the clay fraction, decreases optimum moisture content, increases maximum dry density after curing, raises pH, enhances the presence of calcium oxides, alters soil microstructure by creating cementitious bonds, reduces expansivity, increases CBR, and unconfined compression strength.

Keywords: expansive soils; soil stabilization; soil-lime.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Representação das principais argilas expansivas.....	19
Figura 2 –	Representação da estrutura da montmorilonita (2:1) com penetração da água.....	21
Figura 3 –	Ocorrência de solos expansivos pelo mundo.....	27
Figura 4 –	Granulometria do solo expansivo e das misturas com areia.....	29
Figura 5 –	Carta de Atividade e Plasticidade de um solo natural e misturas com areia.....	30
Figura 6 –	Resistência do solo não tratado (a), tratado com cal (b), cimento (c), e sílica (d).....	32
Figura 7 –	Expansão livre do solo tratado com cal, cimento e sílica.....	33
Figura 8 –	Cimentação do argilomineral na presença da cal.....	37
Figura 9 –	Fluxograma da metodologia da presente pesquisa.....	40
Figura 10 –	Formato dos trabalhos escolhidos.....	41
Figura 11 –	Mapeamento de países presentes no estudo.....	41
Figura 12 –	Quantidade de trabalhos avaliados por país.....	42
Figura 13 –	Teor de cal dos solos melhorados.....	53
Figura 14 –	Granulometria dos solos: (a) solos naturais; (b) solos melhorados com cal.....	56
Figura 15 –	Curvas granulométricas dos solos naturais e tratados com cal, Silva (2018) (a), Paiva (2016) (b), e Mohammed (2015) (c).....	57
Figura 16 –	Variação dos Limites de Atterberg com o teor de cal.....	60
Figura 17 –	Carta de plasticidade dos solos naturais e tratados com a cal.....	61
Figura 18 –	Umidade Ótima dos solos naturais e melhorados (a) e (b).....	62
Figura 19 –	Densidade Máxima dos solos naturais e melhorados (a) e (b).....	63
Figura 20 –	Curva de compactação do solo natural e das misturas solo-cal do município de Ipojuca.....	65
Figura 21 –	pH do solo após mistura solo-cal, (a) Abou Korkas, Egito, (b) Ipojuca, Brasil.....	68
Figura 22 –	Evolução da CTC com o aumento do teor de cal.....	69
Figura 23 –	Evolução da CTC com o aumento do teor de cal e tempo de cura....	70

Figura 24 –	Difratogramas identificados no solo natural e tratado com 2% de cal.....	72
Figura 25 –	Difração de raios-X da cal hidratada, solo não tratado e tratado com 6, 8, 10 e 20% após 1 dia de cura.....	73
Figura 26 –	Intensidades dos principais picos de cal não consumida após um dia diferentes percentuais de cal.....	73
Figura 27 –	Difração de raios-X de solo não tratado e tratado com 20% de cal ao longo do tempo de cura.....	74
Figura 28 –	Difração de raios-X de solo não tratado e tratado com 2, 4 e 6% de cal, curado por 28 dias e 90 dias.....	74
Figura 29 –	Avaliação quantitativa dos minerais do solo após Difração de raios-X.....	75
Figura 30 –	Avaliação qualitativa dos minerais do solo - DTG.....	76
Figura 31 –	Curvas DTG solo de Belgum +6% de cal.....	77
Figura 32 –	Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para o solo natural (a) e com acréscimo de 3% (b), 5% (c) e 7% (d) de cal no solo de Paulista.....	77
Figura 33 –	Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para o solo natural (a) e com acréscimo de 7% (b), de cal no solo de Cabrobó.....	78
Figura 34 –	Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para o solo natural (a) e com acréscimo de 7% (b), de cal no solo de Ipojuca.....	79
Figura 35 –	MEV solos não tratado e tratado, Al-Kawamil. (a) Solo natural. (b) solo tratado com 6% de cal, aos 7 dias, (c) solo tratado com 6% de cal, aos 28 dias.....	80
Figura 36 –	MEV solo não tratado e tratado, Qena - Safaga. (a) Solo natural. (b) solo tratado com 6% de cal, aos 7 dias, (c) solo tratado com 6% de cal, aos 28 dias.....	80
Figura 37 –	MEV solo natural e tratado, Gulbarga. (a) Solo natural. (b) solo tratado com 6% de cal, aos 28 dias.....	81
Figura 38 –	MEV solo de Paulista, (a) solo natural, (b) solo +3% cal, (c) solo +5% cal e (d) solo +7% cal.....	81

Figura 39 –	MEV da argila sulfatada Iraniana com formação de minerais de etringita a 7% de cal, (a) 10.000×, na (b) 30.000×.....	82
Figura 40 –	Variação da tensão de expansão com o teor de cal dos municípios Agrestina, Paulista, Cabrobó e Ipojuca. Critério de Jimenez Salas (1980).....	87
Figura 41 –	Tensão de expansão com o avanço do tempo de cura e teor de cal.	88
Figura 42 –	CBR, solos naturais e tratados.....	89
Figura 43 –	Evolução do CBR e expansão com o acréscimo do teor de cal.....	91
Figura 44 –	Expansão CBR, solos naturais e tratados.....	91
Figura 45 –	Resistência a compressão simples, solos naturais e melhorados.....	94
Figura 46 –	Variação da Resistência a compressão simples ao longo do tempo.	95
Figura 47 –	Variação da Resistência a compressão simples de acordo com o teor de cal ao longo do tempo de Al-Mukhtar (2010).....	96
Figura 48 –	Variação da Resistência a compressão simples de acordo com o teor de cal ao longo do tempo de Athanasopoulou e Kollaros (2016).....	96
Figura 49 –	Variação da Resistência a compressão simples de acordo com o teor de cal de Paiva (2016).....	97
Figura 50 –	Variação da Resistência a compressão simples de acordo com o teor de cal de Pereira (2018).....	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Métodos de Identificação de Solos Expansivos.....	21
Quadro 2 –	Identificação de solos expansivos por Seed et al. (1962), Chen (1965) e Daksanamurthy e Raman (1973).....	23
Quadro 3 –	Critérios de Lambe.....	24
Quadro 4 –	Critérios de Seed et al. (1962).....	25
Quadro 5 –	Resistência do solo antes e após misturas.....	33
Quadro 6 –	Exigências químicas das cales hidratadas brasileiras.....	34
Quadro 7 –	Exigências físicas das cales hidratadas brasileiras.....	34
Quadro 8 –	Frações dos solos analisados.....	54
Quadro 9 –	Granulometria dos solos melhorados.....	55
Quadro 10 –	Grau de expansão pelos Critérios de Chen (1965), Daksanamurthy e Raman (1973) e Seed et al. (1962) dos solos naturais e tratados com a cal.....	58
Quadro 11 –	Estatística dos solos estudados (Umidade ótima e Densidade Seca máxima).....	65
Quadro 12 –	Potencial hidrogeniônico (pH) dos solos antes e após melhoramento.	66
Quadro 13 –	Classificação dos solos relativos ao pH.....	67
Quadro 14 –	Valores de pH encontrados na amostra de solo (após 1 hora de cura).	68
Quadro 15 -	CTC dos solos antes e após melhoramento químico com a adição da cal.....	69
Quadro 16 –	Valores das porcentagens de óxidos e Perda ao fogo nas misturas solo-cal.....	71
Quadro 17 –	Percentual de expansão, solos naturais e tratados.....	83
Quadro 18 –	Potencial de expansão Critério de Cuellar (1978).....	84
Quadro 19 –	Pressão de expansão dos solos naturais e melhorados.....	86
Quadro 20 –	CBR, solos naturais e tratados e teores de Cal utilizados.....	90
Quadro 21 –	Categorias de expansibilidade em função da expansão do CBR.....	91
Quadro 22 –	Resistência a compressão simples dos solos naturais e tratados com a cal.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
AS	Australian Standards
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards
CBR	California Bearing Ratio
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DTG	Termogravimetria derivada
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FRX	Fluorescência de raios-X
IS	Indian Standards
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LFP	Lime Fixation Point
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
pH	Potencial hidrogeniônico
TG	Termogravimetria
UNE	Asociacion Espanola de Normalizacion
SUCS	Sistema Unificado de Classificação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos.....	17
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	SOLOS EXPANSIVOS	19
2.1.1	Definição de solos expansivos	19
2.1.2	Mecanismo de expansão.....	20
2.1.3	Critérios de identificação dos solos expansivos.....	21
2.1.3.1	<i>Métodos indiretos</i>	22
2.1.3.2	<i>Métodos diretos</i>	24
2.1.4	Ocorrência de solos expansivos no mundo.....	27
2.2	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS.....	28
2.2.1	Estabilização mecânica	28
2.2.3	Estabilização química.....	30
2.3	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS COM CAL.....	34
2.3.1	Solo-cal.....	35
2.3.1.1	<i>Troca de íons e floculação.....</i>	36
2.3.1.2	<i>Cimentação pozolânica</i>	36
2.3.1.3	<i>Carbonatação</i>	37
2.3.1.4	<i>Métodos de dosagem para misturas</i>	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	PESQUISAS AVALIADAS	40
3.2	ANÁLISES DAS PESQUISAS	43
3.2.1	Caracterização Física	43
3.2.2	Caracterização química.....	44
3.2.3	Caracterização mineralógica e microestrutural	47
3.2.4	Caracterização mecânica	49

4	RESULTADOS E ANÁLISES	53
4.1	TEOR DE CAL	53
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	54
4.2.1	Composição granulométrica	54
4.2.2	Limites de Atterberg	58
4.2.3	Compactação	62
4.3	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	66
4.3.1	Potencial hidrogeniônico (pH)	66
4.3.2	Capacidade de troca catiônica	69
4.3.3	Óxidos	70
4.4	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	71
4.5	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	79
4.6	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	82
4.6.1	Expansão	82
4.6.1.1	<i>Expansão “Livre”</i>	83
4.6.1.2	<i>Tensão de Expansão</i>	86
4.6.2	Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Expansão	89
4.6.3	Resistência à compressão simples	92
5	CONCLUSÕES	99
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	101
	REFERÊNCIAS	102
	APÊNDICE A – RESUMO DE ANÁLISES DOS SOLOS ESTUDADOS	113
	APÊNDICE B – TEOR DE CAL IDEAL, LL, LP E IP DOS SOLOS NATURAIS E MELHORADOS	122

1 INTRODUÇÃO

Solos expansivos são solos não saturados que apresentam acréscimo de volume quando a saturação aumenta (acrécimo de água) e contraem quando a sucção cresce (perda de água devido á capacidade intrínseca dos argilos minerais do tipo 2:1 em especial as Montemorilonitas e Vermiculitas. Esse fenômeno está intrinsecamente ligado à plasticidade e retração do solo, resultante das propriedades físicas e químicas das partículas argilosas presentes em sua composição. Em contato com umidade a interação entre as moléculas de água e as partículas de argila provoca um aumento do espaçamento basal entre elas, levando a um aumento no volume total do solo. Por outro lado, em períodos de diminuição da umidade, o solo perde água e ocorre a retração, levando à diminuição de seu volume, gerando um ciclo de variações sazonais no comportamento do solo expansivo.

A origem desses solos pode estar associada a várias formações rochosas que, por meio de sua decomposição, resultam na formação dos argilominerais expansivos. Por exemplo, rochas ígneas básicas como basaltos, diabásios e gabros apresentam a decomposição do piroxênio e do feldspato, o que possibilita a formação de montmorilonita, um dos principais argilominerais expansivos. Além disso, certas formações sedimentares que permitem a acumulação de diferentes componentes também podem gerar solos expansivos, como é o caso de folhelhos, margas e calcários. Essa característica também pode ser encontrada em solos formados a partir de rochas metamórficas, (FERREIRA; VILAR, 2015).

Devido as múltiplas possibilidades de formação, esses solos são encontrados em diversos países, como: Alemanha, Australia, Estados Unidos, Etiópia, Reino Unido e China, (MAUBEC, 2010; SOLTANI ET AL., 2022; AKULA ET AL.,2021; AMENA E CHAKERI, 2022; MAVROULIDOU ET AL., 2020; MA ET AL., 2021). Causando consequências indesejáveis em estruturas e infraestruturas e exigindo técnicas adequadas de engenharia para mitigar os impactos associados a esse comportamento do solo, provocando um custo de bilhões de dólares anualmente.

A remoção e substituição dos solos expansivos são duas soluções usadas em alguns casos, porém ambas são inviáveis na maioria dos casos de obras, pois a remoção de grande volume de solo por longas distâncias é uma operação muito onerosa e que também causa um impacto ambiental elevado nas regiões de remoção e depósito. A estabilização do solo

expansivo, no próprio local, é uma alternativa mais viável, econômica e ambientalmente, (PAIVA, 2016).

De acordo com Dang et al. (2016) a estabilização do solo expansivo por meio do uso de cal é o método mais amplamente empregado para controlar o comportamento de contração e expansão causado por variações sazonais. A cal é um dos materiais de construção mais antigos, com mais de 2.000 anos de uso documentado. Os romanos, por exemplo, utilizavam misturas de solo e cal para construir estradas. No entanto, seu uso em aplicações geotécnicas era limitado até 1945, principalmente devido à falta de compreensão adequada sobre o assunto, como destacado por Herrin e Mitchell (1961). Desde então, houve um avanço significativo no conhecimento e na compreensão da estabilização do solo com cal, permitindo seu uso generalizado em projetos de engenharia para controlar os efeitos da expansão e retração de solos expansivos.

A cal tem a capacidade de alterar os solos de grão fino, mas sua eficácia é especialmente notável em solos argilosos com plasticidade moderada a alta. Esse fenômeno ocorre devido aos cátions de cálcio fornecidos pela cal hidratada, que substituem os cátions normalmente presentes na superfície dos argilominerais. Essa substituição é promovida pelo ambiente de alto pH do sistema cal-água. Consequentemente, ocorre uma modificação na mineralogia da superfície da argila, o que resulta em diversos benefícios, como a redução da plasticidade, da capacidade de retenção de umidade durante a secagem, da expansividade e, além disso, um aumento da resistência do solo.

Nesta pesquisa, é fornecida uma análise abrangente de solos estudados entre 1991 e 2022 em 25 países, abordando uma comparação dos solos naturais e melhorados após o tratamento com a cal. Foram 80 trabalhos minuciosamente examinados, selecionados a partir de plataformas online de publicações científicas e acadêmicas, servindo como a fonte dos dados para a caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e geomecânica utilizados.

1.1 JUSTIFICATIVA

Solos expansivos possuem características únicas que os tornam particularmente desafiadores tanto no âmbito agrícola quanto na construção civil. Quando esses solos ficam úmidos, tendem a aumentar de volume, tornando-se pegajosos e formando micro-relevos na superfície. Esse comportamento estimulado pela umidade cria obstáculos significativos para atividades agrícolas. Por outro lado, quando expostos a condições secas, os solos expansivos se

reestruturam, tornando-se rígidos, fendilhados e propensos a desenvolver rachaduras, fissuras e fraturas em estruturas, representando uma ameaça para a integridade de edificações.

Nas práticas de construção contemporâneas, há uma crescente preocupação com o aprimoramento das propriedades do solo em canteiros de obras. Essa preocupação é impulsionada por implicações socioeconômicas substanciais, uma vez que o custo médio anual de danos estruturais atribuídos a problemas com solos expansivos é estimado em cerca de £ 400 milhões no Reino Unido, \$15 bilhões nos Estados Unidos e bilhões de dólares globalmente (JONES; JEFFERSON, 2012). Por este motivo diversos trabalhos relacionados à melhoria deste tipo de solo são realizados, sendo de igual importância a análise e revisão destes estudos com as mais variadas soluções para esta problemática.

Para a realização deste trabalho selecionou-se estudos relacionados ao melhoramento de solos expansivos com o uso da cal nos países da Alemanha, Arábia Saudita, Austrália, Brasil, China, Egito, Escócia, Espanha, Etiópia, Estados Unidos, França, Grécia, Índia, Indonésia, Inglaterra, Irã, Iraque, Jordânia, Malásia, México, Nigéria, Omã, Sudão, Quênia e Turquia. A utilização de cal para estabilização do solo apresenta várias vantagens, permitindo principalmente a reutilização de materiais que, de outra forma, seriam descartados e substituídos. Além disso, reduz significativamente as possíveis complicações pós-construção associadas aos solos expansivos.

1.2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento físico, químico, geomecânico, mineralógico e microestrutural de solo expansivo melhorado com cal na literatura técnica–científica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Coletar e avaliar na literatura qual o teor, em percentual de peso, de cal, comumente utilizado para estabilizar os solos estudados;
- Interpretar o comportamento geomecânico e mineralógico dos solos e das misturas solo-cal e efeitos da adição da cal aos solos apresentadas nas pesquisas;
- Exibir e comparar as análises microestruturais dos estudos escolhidos;
- Comparar os resultados obtidos pelos autores para a estabilização de expansão dos solos estudados utilizando cal;

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos descritos a seguir. O Capítulo 1 apresenta a introdução com um breve resumo sobre solos expansivos, a justificativa do trabalho, os principais objetivos desta pesquisa, e a distribuição dos demais capítulos.

O Capítulo 2, referente a revisão bibliográfica, aborda sobre solos expansivos (mecanismos de expansão, os locais de ocorrência no mundo e critérios de identificação de solos expansivos, quais métodos de melhoramento com ênfase no melhoramento químico através do uso da cal, abordando os processos deste método.

No Capítulo 3, descrevem-se os Materiais e Métodos, apresentando-se a metodologia adotada na pesquisa e a escolha de estudos para análise e para obtenção dos resultados.

No Capítulo 4 são apresentadas as análises e resultados encontrados.

O Capítulo 5, apresenta as principais conclusões obtidas a partir dos resultados discutidos no capítulo anterior e sugestões para trabalhos futuros sobre o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda sobre solos expansivos (mecanismos de expansão, os locais de ocorrência no mundo e critérios de identificação de solos expansivos, quais métodos de melhoramento com ênfase no melhoramento químico através do uso da cal, abordando os processos deste método.

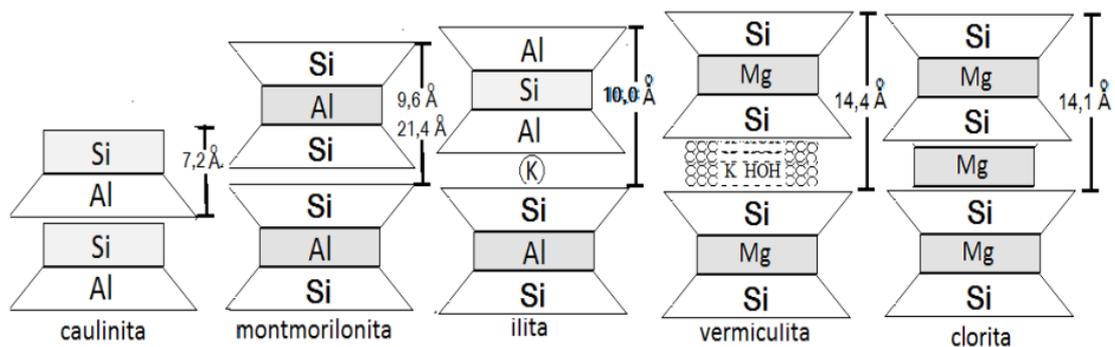
2.1 SOLO EXPANSIVOS

2.1.1 Definição de solos expansivos

A capacidade de um solo para sofrer variações em seu volume é denominada expansibilidade. Essa variação é causada pela penetração de água e está diretamente relacionada à capacidade que alguns solos possuem de sofrer mudanças em sua estrutura original devido a sua composição mineralógica existente na fração argila, especialmente nas vermiculitas, esmectitas e maiormente nas montmorilonitas.

Para que um solo seja considerado expansivo, é necessário que apresente determinadas propriedades mineralógicas, uma vez que nem todos os minerais argílicos experimentam alteração de volume. Os argilominerais com estrutura laminar do tipo 2:1, que consiste na combinação de duas folhas tetraédricas e uma folha octaédrica, apresentam essa pré-disposição a expansão. Verifica-se uma maior instabilidade volumétrica em solos que possuem montmorilonita e vermiculita, além dos interstratificados de montmorilonita como a clorita, illita e vermiculita ou até mesmo de outros minerais, como a haloisita, que apresentam capacidade de expansão, porém de forma mais limitada, (FERREIRA, 1995).

Figura 1 – Representação das principais argilas expansivas.



Fonte: Carvalho (1997).

Segundo Grim (1953), a expansão acontece porque há a absorção do íon positivo, ou seja, os minerais de argila têm a habilidade de absorver tanto ânions quanto cátions em lugares de troca. Esses íons podem ser substituídos por outros íons, provocando uma desigualdade na carga e possibilitando assim a absorção de um cátion. Isso é explicado pela ruptura das ligações da borda dos minerais.

A existência de argilominerais no solo contribui para a plasticidade, coesão e expansão de alguns solos argilosos, sendo comum esse tipo de solo é apresentar valores elevados nos limites de liquidez e nos índices de plasticidade (VARGAS, 1977).

A presença destes argilominerais é a causadora da expansividade intrínseca que está relacionada com a composição mineralógica, textura e estrutura. Esses parâmetros controlam, em nível microescalar, mecanismos que produzem a instabilidade volumétrica do solo, (FERREIRA, 1995). Existe também a expansividade provocada pelo extrínseco, estando relacionado com a climatologia, a hidrogeologia, a vegetação e a ocupação antrópica que são capazes de transferir a umidade de um ponto a outro do terreno.

2.1.2 Mecanismo de expansão

Os processos físico-químicos que permitem a expansibilidade podem ser classificados em intercristalinos, intracristalinos e osmóticos, dependendo da presença de água, do tipo e quantidade de cátions trocáveis e da forma como a água interage com esses cátions. Sendo assim, a atração entre as partículas de argila, a hidratação dos cátions e a repulsão osmótica determinam o potencial expansivo de um argilomineral (SNETHEN et al., 1977).

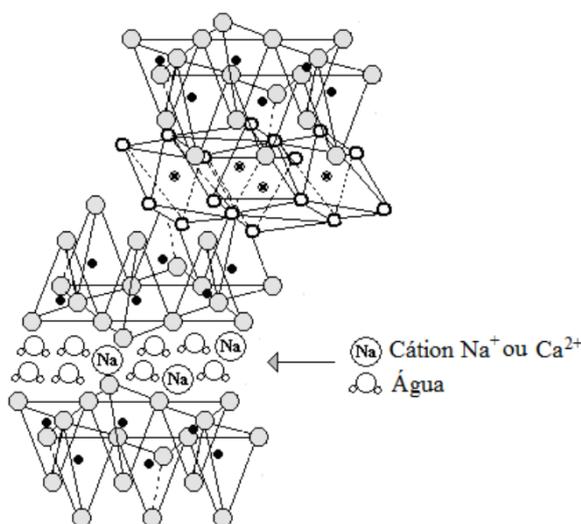
A atração aparente entre as partículas dos argilominerais é originada pelas forças eletrostáticas que resultam das cargas elétricas negativas presentes nas superfícies das partículas. Essas cargas podem ser neutralizadas por íons positivos que estão dissolvidos na água livre dos poros, e sobretudo por moléculas polares, como as de água, (PEREIRA, 2004). A mudança de volume causada por esse mecanismo é resultado do esforço para equilibrar as cargas desbalanceadas. Consequentemente, a quantidade de água na camada dupla aumentará até que haja uma mudança de volume suficiente na massa do solo (PRESA, 1984).

Segundo Presa (1984), a hidratação é resultado das substituições isomórficas e cátions adsorvidos, que geram uma alteração na carga e, por consequência, aumentam a capacidade de atrair moléculas de água (hidratação), resultando em variações de volume. Esse mecanismo influencia na expansibilidade devido ao aumento no raio iônico dos cátions à medida que são hidratados, o que resulta em um aumento de volume na massa do solo.

A repulsão osmótica desempenha um papel importante em condições de umidade e alta concentração iônica. Esse mecanismo ocorre quando moléculas de água penetram entre as camadas dos argilominerais devido às diferenças de concentração iônica na dupla camada. Esse processo constitui-se de duas fases. São admitidas duas fases no processo de expansibilidade osmótica de um solo (OLPHEN, 1963). A primeira fase está relacionada à penetração de moléculas de água entre as camadas estruturais das argilas ou entre as superfícies planas das partículas adjacentes, levando à sua separação. Durante essa fase, ocorrem forças de Van der Waals e interações eletrostáticas entre as superfícies e os cátions dispersos, além da energia de adsorção das moléculas de água. Na segunda fase, as superfícies das partículas já estão afastadas por distâncias maiores que quatro camadas monomoleculares de água, resultando em uma diminuição da energia de adsorção. Isso permite que a energia de repulsão da dupla camada elétrica predomine e se sobreponha (SOUZA, 2015).

Na Figura 2, é mostrada a representação da estrutura da montmorilonita (2:1) com penetração da água, cátions livres (Na^+ ou Ca^{++}), no espaço entre as lamelas ou placas, evidenciando o mecanismo de expansão.

Figura 2 – Representação da estrutura da montmorilonita (2:1) com penetração da água.



Fonte: Paiva (2016).

2.1.3 Critérios de identificação dos solos expansivos

Existem diferentes critérios para classificar e caracterizar solos expansíveis. Pode-se dividir esses critérios em dois grandes grupos: métodos diretos e métodos indiretos. Os métodos indiretos envolvem o uso da mineralogia, índices físicos, limites de consistência e parâmetros relacionados a textura e comportamento do solo, parâmetros estes, obtidos por meio de ensaios

de laboratório e campo. Esses métodos fornecem indicações sobre a potencialidade de expansão do solo. Por outro lado, os métodos diretos são baseados na medição do potencial de expansão do solo por meio de ensaios específicos, como ensaios edométricos, ensaios de placa ou o uso do expansocolapsômetro. Esses ensaios diretos fornecem uma avaliação mais precisa do potencial de expansão do solo em estudo. Na Quadro 1, é fornecida uma separação entre os métodos de identificação de solos expansivos (SCHREINER, 1987; FERREIRA, 1995).

Quadro 1 – Métodos de Identificação de Solos Expansivos.

Métodos	Sub-Divisões	Critério	Referência
INDIRETOS	Identificativos	Difração e raio X, Microscopia eletrônica de varredura, Análise termo-diferencial e Adsorção de etilenoglicol e glicerina.	AYALA <i>et al.</i> (1986)
		Físico-químico	FINK <i>et al.</i> (1971)
	Orientativos	Granulometria, Consistência e Índices físicos e Classificação Geotécnica	PRIKLONSKIJ (1952), SKEMPOM (1953), SEE <i>et al.</i> (1962), VAN DER MERWE (1964) CHEN (1965), VIJAYVERVIA e GHAZZALY (1973), RODRIGUEZ ORTIZ (1975), CUELLAR (1978). DAKSANAMURTHY e RAMAN (1973).
	Qualitativos	Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Identificação visual.	PATRICK e SNETHEN (1976), AYALA <i>et al.</i> (1986), FERREIRA (1990c e 1993a).
DIRETOS	Avaliativos	Ensaio de Expansão de Lambe	LAMBE (1960).
	Quantitativos	Expansão Livre e Tensão de Expansão, Ensaios Edométricos Duplos e Simples.	SEED <i>et al.</i> (1962), CHEN (1965), VIJAYVERVIYA e GHAZZALY (1973), RODRIGUEZ ORTIZ (1975), CUELLAR (1978), JIMENEZ SALAS (1980).
		Ensaios Edométricos de Sucção controlada	ESCARIO (1967 e 1969), AITCHISON <i>et al.</i> (1973), JOHNSON (1978), McKEEN (1980).

Fonte: Schreiner (1987); Ferreira (1995).

2.1.3.1 Métodos indiretos

Os critérios deste grupo se dividem em informações de caráter identificativo, qualitativo e orientativo, obtidas ensaios de laboratório e/ou campo.

Nos métodos indiretos indicativos são inclusas as análises por meio de:

- Composição da fração argilosa e textura: determina a quantidade de minerais expansíveis, como vermiculita ou montmorilonita, e está diretamente relacionado à intensidade da expansão.
- Difração de Raios-X: permite uma análise não destrutiva e rápida fornecendo informações relativas à identificação dos minerais presentes no solo.
- Microscopia eletrônica de varredura: usada para identificar minerais argilosos por meio da dispersão de elétrons ao atravessar o material.
- Análise térmica diferencial: analisa as reações de cada espécie mineral em diferentes temperaturas, permitindo a identificação dos minerais presentes.
- Adsorção de etileno glicol: determina o tipo do material argiloso pela quantidade de adsorção de etileno glicol e glicerina para cada mineral.
- Capacidade de Troca de Cátions: indica as propriedades físico-químicas das argilas, modificando suas propriedades plásticas através da facilidade de adsorção de cátions pela rede cristalina.

Nos métodos indiretos qualitativos, a expansividade do solo é definida relacionando-se aos limites de consistência do solo. (Quadro 2).

Seed et al. (1962) considera como parâmetro, o Índice de Plasticidade (IP) para a classificação do potencial expansivo dos solos argilosos, qualificando em baixo, médio, alto ou muito alto. Chen (1965) e Daksanamurthy e Raman (1973) classificam o potencial de expansividade do solo através do Limite de Liquidez.

Quadro 2 – Identificação de solos expansivos por Seed et al. (1962),
Chen (1965) e Daksanamurthy e Raman (1973).

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

Fonte: Adaptado de Ferreira e Vilar (2015) e Silva (2018).

Os métodos indiretos orientativos tomam como base a pedologia, geomorfologia e geologia com respeito à porosidade do solo, a mineralogia e o ambiente em que o solo foi formado. Elaboraões de mapas geológicos vêm sendo realizadas nos últimos anos apresentando indicações de áreas com potencialidade de encontrar solos expansivos, servindo

de indicação para um solo analisado.

2.1.3.2 Métodos diretos

Métodos diretos compreendem-se em interpretar ensaios de laboratório dos métodos de identificação do solo. As técnicas diretas são aquelas que têm como objetivo determinar a expansão e a pressão de expansão do solo por meio de metodologias que reflitam as condições às quais os materiais estarão sujeitos. Em outras palavras, essas técnicas buscam avaliar diretamente a capacidade de expansão do solo considerando as situações reais às quais ele será exposto. Dividem-se em métodos diretos avaliativos e métodos diretos quantitativos.

- Métodos diretos avaliativos:

O ensaio de expansão de Lambe (1960) determina o índice de expansividade do solo. Para obter esse índice, uma amostra do solo é tratada e remoldada para recuperar sua textura natural. Em seguida, a amostra é colocada em um anel e submetida a uma tensão nominal de 10 t/m². A amostra é inundada e, após duas horas, mede-se a pressão alcançada em kPa. Essa pressão é então considerada como o índice de expansividade ou índice de Lambe. Com base nesse índice, é possível estabelecer critérios para avaliar o potencial expansivo do solo, como exibido na Quadro 3.

Quadro 3 – Critérios de Lambe.

Índice de Lambe (kPa)	Potencial Expansivo
< 80	Não crítico
80 – 150	Marginal
150 – 230	Crítico
>230	Muito crítico

Fonte: Lambe (1960).

- Métodos diretos quantitativos:

Compreendem todos os métodos que permitem a determinação quantitativa das características de mudança de volume de materiais expansivos, como a expansão e pressão de expansão (PRESA, 1984). Evolvendo as seguintes determinações: expansão e colapso sob carregamento, tensão de expansão a volume constante, carregamento após expansão com diferença de sobrecarga, ensaio edométrico simples e duplo.

Os métodos quantitativos, obtidos por meio de ensaios edométricos, utilizam duas características fundamentais: a expansão "livre" e a tensão de expansão. O ensaio edométrico,

é utilizado para medir as propriedades mecânicas dos solos, avaliando a resposta do solo a uma determinada solicitação em termos de deformações verticais (FERREIRA, 1995).

Os ensaios de expansão "livre" medem a variação de espessura de uma amostra de solo após inundado. Nesses ensaios, a amostra é inserida em um edômetro e imerso com uma pequena tensão, permitindo que ela se expanda livremente. A expansão "livre" é então determinada em porcentagem após a estabilização da amostra. Para esse tipo de ensaio, existem diferentes metodologias que podem ser aplicadas, dependendo da sobrecarga utilizada. As tensões mais comumente empregadas são 1 kPa, 7 kPa e 10 kPa, enquanto a metodologia que utiliza uma tensão de 50 kPa é aplicada em amostras deformadas, como aquelas que foram compactadas ou ressecadas ao ar (CHEN, 1965).

A percentagem de expansão “livre” pode ser obtida pela Equação (1). Alguns métodos utilizam pequenas sobrecargas antes da inundação, como, por exemplo, 7 kPa (SEED ET AL., 1962).

$$E_l (\%) = \left(\frac{\Delta H}{H} \right) \times 100 \quad (1)$$

Sendo:

E_l = expansão “livre”, em percentagem;

ΔH = altura da expansão devido à saturação;

H = altura do corpo de prova antes da inundação.

Os critérios estabelecidos por Seed et al. (1962) para a expansão livre relacionam a expansão de uma amostra compactada à densidade máxima e umidade ótima a uma tensão vertical de 7 kPa. Esses critérios são associados ao nível de expansividade do solo, conforme detalhado na Quadro 4.

Quadro 4 – Critérios de Seed et al. (1962).

Expansão livre (%) Pressão 7 kPa	Grau de Expansividade
> 25	Muito Alta
5 - 25	Alta
1 - 5	Média
0 - 1	Baixa

Fonte: Seed et al. (1962).

Quanto a tensão de expansão, pode-se avaliá-la através de variados métodos e envolvendo diferentes trajetórias de tensão. Entre eles, os mais utilizados são:

Método 1 - O ensaio de Carregamento Após Expansão com diferentes sobrecargas consiste em aplicar uma tensão σ_0 na amostra confinada, lateralmente, por um anel, provocando a expansão por meio de inundação, e esta deformação da amostra é medida em intervalos de tempo até a estabilização. Em seguida, a amostra é consolidada com o aumento da sobrecarga aplicada até retornar a altura inicial. A tensão máxima alcançada durante esse processo é considerada a tensão de expansão da amostra.

Método 2 - O ensaio de Expansão e Colapso Sob Tensão compõe-se na aplicação de tensão na amostra de solo após sua consolidação, inundando-a e registrando as medidas de deformação com auxílio de um papel semilogaritmo marcando o ponto conforme a tensão aplicada e a deformação ocorrida. O procedimento deve ser repetido, no mínimo, em outros dois corpos de prova. Uma reta é traçada com esses valores e a pressão de expansão é obtida por extrapolação, que corresponde à deformação zero.

Método 3 - O Método a Volume consiste-se na utilização de um corpo de prova submetido a uma pressão vertical pré-estabelecida, que em seguida é inundado. A pressão escolhida para o ensaio pode ser apenas o suficiente para ajuste do incremento, ou, corresponder à pressão vertical estimada do material na situação real “in situ”. O objetivo do ensaio é medir a pressão axial exigida para forçar a amostra indeformada a manter a altura constante quando ensaiada.

Método 4 - O Ensaio Edométrico Duplo utiliza duas amostras indeformadas, retiradas a mesma profundidade, e as carregam progressivamente em dois edômetros distintos. Em uma das amostras se mantém o teor de umidade natural, durante todo o processo, e a outra é ensaiada sob inundação. A amostra inundada expande com a carga inicial do ensaio e após a estabilização, as duas amostras são submetidas ao aumento da carga, de acordo com o ensaio de consolidação normal. A tensão de expansão é encontrada através das curvas obtidas pelo ensaio, onde a tensão no corpo de prova inundado, corresponde ao mesmo índice de vazios inicial do corpo de prova na umidade natural.

Método 5 - O método de Rao et al. (1988), consiste na continuidade do ensaio a volume constante, entretanto, aplicam-se sucessivos e baixos incrementos de tensão no corpo de prova inundado, impedindo a variação de volume. E de forma semelhante à determinação da tensão de pré-adensamento de um solo saturado, a pressão de expansão é obtida.

Método 6 - O método de Justo et al. (1984) encontra a tensão de expansão pela interseção das curvas de inundação sob tensão e de deformação sob umidade constante.

Para minimizar ou excluir os estragos causados por esta ação, Peck et al. (1974) define três tipos de medidas para controlar o fenômeno da expansibilidade, os quais:

- I. Isolar a estrutura dos materiais expansivos;
- II. Reforçar a estrutura para resistir aos esforços provocados pela expansão;
- III. Eliminar os efeitos de expansibilidade através da estabilização do solo.

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS

Estabilizar um solo expansivo significa modificar as características geotécnicas do sistema solo, água e ar, ou seja, corrigir sua estrutura. Seja por substituição, transformando sua granulometria, ou por adição de componentes causando alterações permanentes em sua composição, o objetivo é reduzir os problemas ocasionados pela mudança de volume dos solos, evitando a expansibilidade, e por consequência aumentando a resistência do material aos esforços que nele são impostos.

Vogt (1971), define a estabilização como todo método que visa aumentar, de maneira durável, durante todas as estações do ano, a resistência de um material aos esforços desenvolvidos e aos efeitos destruidores exercidos pelas intempéries.

A estabilização dos solos expansivos é a melhor solução de engenharia quando a obra necessita de grandes movimentações de terra e muito trabalho em terraplenagem, afinal, uma forma importante de minimizar o impacto econômico e ambiental destas atividades é fazer aproveitamento do material local (FAUSTINO, 2022).

A opção pela técnica de estabilização é influenciada por uma série de fatores, dentre elas as características dos materiais, as propriedades a serem melhoradas, os custos totais da obra, além da própria finalidade da obra, (FAUSTINO, 2022). Existem muitas maneiras de melhorar o comportamento expansivo do solo, onde os métodos mais comumente utilizados são o melhoramento químico e mecânico por aditivos como cal e areia, respectivamente.

2.2.1 Estabilização mecânica

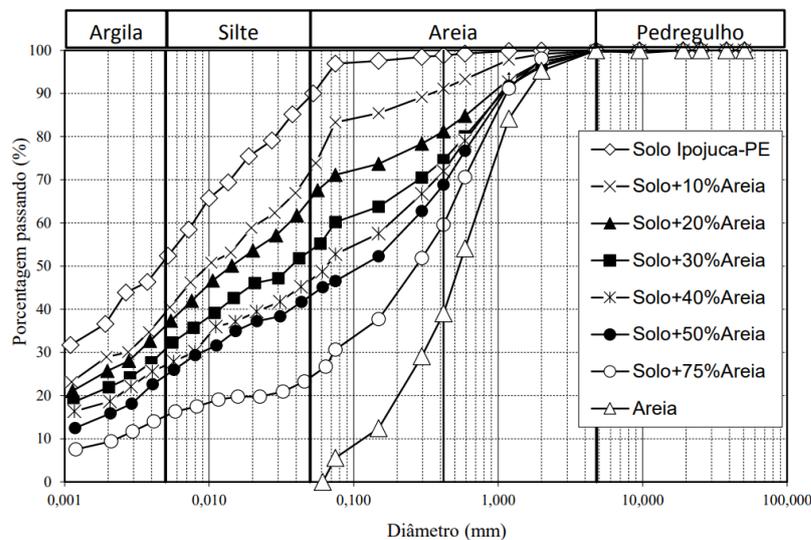
Segundo Vendruscolo (2003), a estabilização mecânica do solo é a correção da sua granulometria, através da “arrumação” das suas partículas, com o objetivo de melhorar as características do solo. Sendo assim, o solo é melhorado através da correção de sua composição granulométrica, plasticidade e disposição das partículas. Em sua generalidade, incorporando determinadas quantidades de frações do solo, e utilizando da compactação até a obtenção de

parâmetros necessários. Contudo, a compactação é considerada apenas como uma etapa do processo de estabilização depois que há a mistura com o agente estabilizante, afirma Villibor (1982) apud GONDIM (2008).

A modificação granulométrica consiste na remoção ou incremento de parte das partículas do solo além do incremento de dois ou mais solos, tornando o solo com as propriedades desejadas (PINTO, 2002).

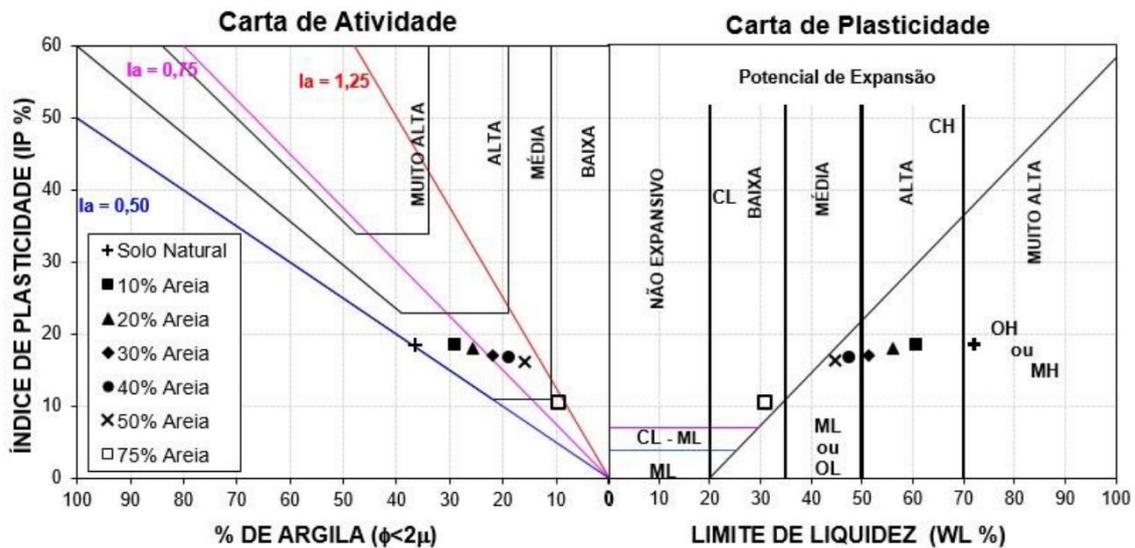
É possível ver esse comportamento de alteração da composição granulométrica e dos índices de Atterberg em um estudo realizado por Ataide (2017), que avaliou um solo expansivo de Ipojuca/PE, sendo este, predominantemente argiloso com fração de argila maior do que 78%, com baixo teor de silte e a fração areia variando de 3,20% a 22,7%, apresentando um índice de plasticidade alto entre 16% e 37%, umidade ótima elevada (27,1% a 33,7%) e peso específico aparente seco máximo de 12,70 kN/m³ a 15,10 kN/m³. Na Figura 4 são apresentadas as curvas granulométricas da argila expansiva, da areia e das misturas e na Figura 5 são apresentadas as Cartas de Plasticidade e Atividade com as indicações dos solos e das misturas.

Figura 4 – Granulometria do solo expansivo e das misturas com areia.



Fonte: Ataide, (2017).

Figura 5 – Carta de Atividade e Plasticidade de um solo natural e misturas com areia.



Fonte: Ataide, (2017).

Avaliando os resultados é possível perceber que a adição de areia (10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75%) ao solo expansivo de Ipojuca/PE, causa uma redução da fração fina das misturas, como se espera, porém, as misturas continuaram apresentando alta plasticidade ($IP > 15\%$), atividade média ($0,5 < I_a < 1,25$), e potencial expansivo alto para acréscimo de 10%, 20% 30% de areia, havendo uma melhora para potencial expansivo médio com o acréscimo de 40% e 50% e baixo apenas com acréscimo de 75% de acordo com o critério de Dakshanamvrthy e Raman (1973). Esta análise evidencia a necessidade de um alto teor de mistura para uma melhora significativa quanto a expansividade (Figura 5).

2.2.3 Estabilização química

Neste método de estabilização modifica-se permanentemente as propriedades físicas e mecânicas do solo com a utilização de aditivos que reagem quimicamente com as partículas do solo como a cal, silicatos de sódio, materiais betuminosos, cimento Portland, resinas, compostos de fósforo entre outros. O teor de aditivo utilizado deve ser suficiente para que possa modificar positivamente essas propriedades, variando de acordo com sua composição química necessitando de testes para descoberta da quantidade ideal.

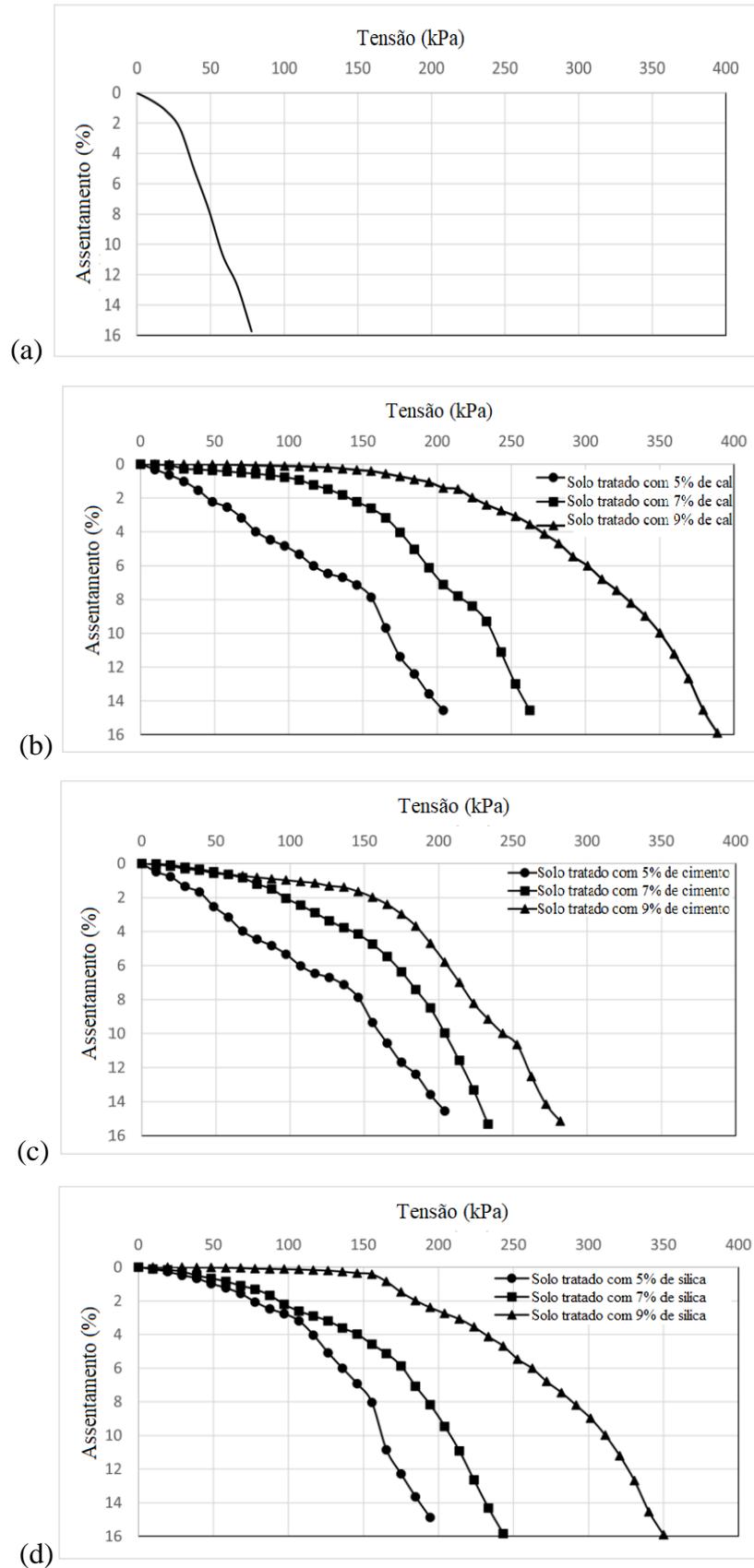
Uma análise conduzida por Medeiros et al. (2023) revisou a literatura publicada nas últimas sete décadas sobre a estabilização química em solos expansivos e constatou um crescimento significativo nos estudos relacionados a este tópico. Notavelmente, durante o período de 2010 a 2019, foi observado um aumento substancial na produção acadêmica em

comparação as décadas anteriores. Os autores apontam que esse fenômeno pode ser atribuído a diversos fatores, incluindo o avanço no entendimento da interação entre o solo e diferentes aditivos, bem como a crescente necessidade de aproveitar materiais que seriam descartados. Outro fator relevante levantado na análise é a progressiva ocupação dos terrenos com solos de alta qualidade (apresentando boas condições em resistência e trabalhabilidade) nas últimas décadas, o que tem deixado uma escassez de terrenos disponíveis para construção, geralmente caracterizados por solos problemáticos, como os solos expansivos. Aumentando a demanda por pesquisas que visem compreender o comportamento desses solos e desenvolver técnicas para estabilizar sua expansão.

Em um estudo feito por Al-Gharbawi et al. (2022), foram feitas estabilizações químicas com diferentes componentes. Ele avaliou o potencial de tratar um solo, obtido no sul da cidade de Bagdá, na Índia, altamente expansivo de acordo com a Classificação Unificada de Solos (USCS). Este solo apresentava uma fração de argila de 50%, com teor de silte de 34% e fração areia de 16%. Expressando um índice de plasticidade muito alto (95%), umidade ótima de 16,5 % e peso específico aparente seco máximo de 17,5 kN/m³. Foram utilizados cal, cimento, e uma sílica, todos com a mesma variação de teores de 5 %, 7 % e 9 %.

O solo foi preparado e misturado com bentonita e enchido em um recipiente de aço de dimensões 400 × 400 × 400 mm. Uma base de dimensões 60 × 60 × 10 mm foi usada para carregar o solo para investigar a capacidade de carga do solo não-tratado e tratado com aditivos. Os resultados, obtidos quanto a resistência a tensão, estão representados graficamente nas Figuras 6 (a), (b), (c) e (d). É percebido o relevante aumento de resistência do solo após a mistura com os três materiais utilizados. A cal mostrou o melhor desempenho mecânico na estabilização, com um aumento de resistência a tensão superior a 6 vezes do solo natural aos 9% de teor na mistura. O incremento de cimento e sílica também apresentaram expressivos resultados ao acréscimo de resistência com o mesmo teor, sendo de 192,9 kPa e 262,3 kPa, respectivamente, como pode ser visto na Quadro 5.

Figura 6 – Resistência do solo não tratado (a), tratado com cal (b), cimento (c), e sílica (d).



Fonte: Adaptado de Al-Gharbawi et al. (2022).

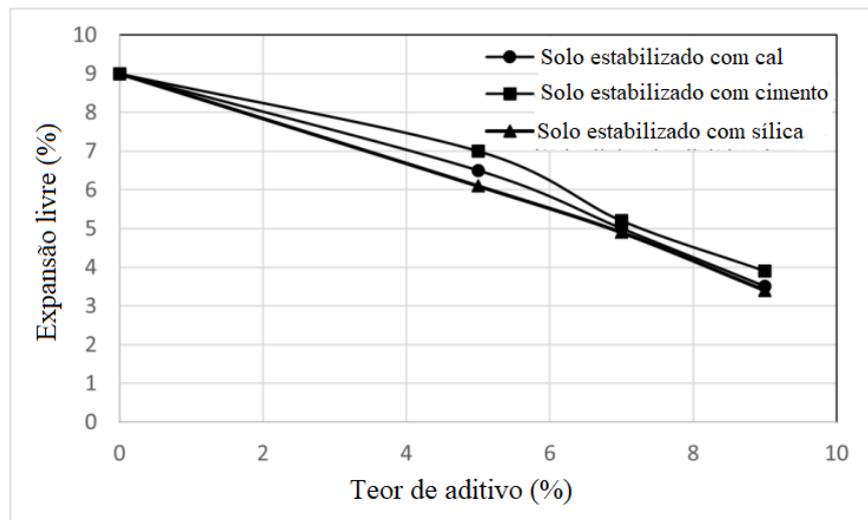
Quadro 5 – Resistência do solo antes e após misturas.

Pressão (kPa)			Tipo de solo
56,5			Não tratado
5%	7%	9%	Aditivo (%)
167,3	239,8	351,1	Tratado com cal
160,9	205,3	249,4	Tratado com cimento
164,8	210,7	318,8	Tratado com sílica

Fonte: Adaptado de Al-Gharbawi et al. (2022).

Quanto a expansão livre os resultados também foram conforme o esperado. Havendo a redução com o incremento dos três aditivos, porém de forma adversa aos resultados encontrados com relação a resistência, o solo que apresentou o melhor desempenho foi obtido através da mistura com o cimento, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Expansão livre do solo tratado com cal, cimento e sílica.



Fonte: Adaptado de Al-Gharbawi et al. (2022).

Diante dos tipos de estabilização apresentados, esta pesquisa, será centrada quanto a estabilização química em casos de estabilização de solos através da utilização da cal e seus resultados quanto ao comportamento físico, químico, geomecânico, mineralógico e microestrutural destes solos.

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS COM CAL

A Cal sob a forma de cal virgem (óxido de cálcio – CaO), cal hidratada (hidróxido de cálcio – Ca [OH]₂), ou pasta de cal podem ser usadas para tratar solos. A cal virgem é fabricada pela transformação química de carbonato de cálcio (calcário – CaCO₃) em óxido de cálcio (Equação 2). A cal hidratada é criada quando a cal virgem reage quimicamente com a água, como mostra a Equação 3.



Onde:

CaCO₃ → Carbonato de Cálcio CO₂ → Dióxido de Carbono

CaO → Óxido de Cálcio H₂O → Água

Ca(OH)₂ → Hidróxido de Cálcio

No Brasil, as cales na forma hidratada utilizadas na estabilização ou melhoria dos solos devem obedecer às exigências da norma NBR – 7175/2003. Nas Quadros 6 e 7, são mostradas algumas exigências químicas e físicas, respectivamente, contidas na norma.

Quadro 6 – Exigências químicas das cales hidratadas brasileiras.

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤5%	≤5%	≤13%
	No depósito	≤7%	≤7%	≤15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO+MgO)		≤10%	≤15%	≤5%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO _t + MgO _t) ₂		≥90%	≥88%	≥88%

Fonte: ABNT (2003).

Quadro 7 – Exigências físicas das cales hidratadas brasileiras.

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤0,5%	≤0,5%	≤0,5%
	Peneira 0,750 mm	≤10%	≤15%	≤15%
Retenção de água		≥75%	≥75%	≥70%
Incorporação de areia		≥3,0	≥2,5	≥2,2
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		

Plasticidade	≥ 110	≥ 110	≥ 110
--------------	------------	------------	------------

Fonte: ABNT (2003).

No exterior, diversos países utilizam as diretrizes da ASTM International, anteriormente conhecida como American Society for Testing and Materials, para selecionar as cales para o melhoramento dos solos. De acordo com a ASTM C977-03 a Cal virgem e cal hidratada para estabilização de solo devem estar em conformidade com a seguinte composição química:

- Óxidos de Cálcio e Magnésio (numa base não volátil, mínimo %) 90,0
- Dióxido de carbono (obtido no ponto de fabricação, máximo %) 5,0
- Umidade livre (obtida no ponto de fabricação, máximo%) 2,0

Quanto a composição física, solo devem respeitar as seguintes exigências:

- Cal hidratada - não ter mais de 3% retido em uma peneira nº 30 (590 μm) e não mais que 25% retidos em peneira nº 200 (75 μm);
- Cal virgem - Partículas passarão por um 1,0 pol. (24,4 mm).
- Cal virgem - Deve ter um aumento de temperatura de no mínimo 30°C em 20 minutos, e não deve ter mais de 10% de resíduo.

2.3.1 Solo-cal

A cal hidratada quando reage com as partículas de argila a transforma permanentemente, transformando-os em uma forte matriz cimentícia (NLA, 2004). Essas reações podem manifestar-se instantaneamente ou ao longo do tempo. No estágio inicial do processo, os efeitos imediatos, resultam das reações de troca catiônica e floculação. Já as reações de natureza progressiva, conforme observado por Thomé (1994), são responsáveis pelo aumento gradual da resistência da mistura devido à formação de silicatos ou aluminatos com características cimentantes.

A cal afeta as propriedades do solo de várias formas, em argilas não expansivas ela aumenta o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), mas diminui em argilas expansivas, resultando em uma redução no índice de plasticidade e melhorando a trabalhabilidade da mistura. Além disso, a cal reduz a expansividade, aumentando o limite de contração do solo.

Em termos de distribuição granulométrica, a cal promove a floculação e agregação em maior intensidade, especialmente quando há uma maior quantidade de finos no solo. Este fenômeno aumenta a resistência à compactação e reduz a absorção de água pela argila.

2.3.1.1 Troca de íons e floculação

Os argilominerais possuem a capacidade de reter íons em sua superfície, entre suas camadas e dentro dos canais de sua estrutura cristalina. Esses íons têm a capacidade de serem substituídos por outros íons presentes (GOMES, 1986).

Na estabilização do solo a troca de íons e a floculação com os argilominerais acontecem assim que a cal entra em contato com o material argiloso, sendo então como mencionado anteriormente, a primeira fase deste processo. As reações tornam o solo mais estável, evitando a penetração da água. A quantidade de estabilizante a ser adicionado no solo deve estar de acordo com uma fração suficiente de cálcio para que as trocas catiônicas, floculação e aglomeração, se desenvolvam (BRANDÃO et al., 2009).

A troca de íons acontece quando os cátions mais reativos e de força de valência maior substituem os íons metálicos fracos, como sódio, magnésio e hidrogênio, na superfície das partículas de argila, favorecendo a estabilização do solo pelo equilíbrio elétrico das partículas argilosas e reduzindo a distância das duplas camadas da argila. Esta reação resulta na redução da plasticidade do solo. Relativamente a estabilidade química, ao tamanho e a carga de cada cátion uma ordem de preferência natural é estabelecida entre os íons envolvidos, sendo ordenados por essa escala de substituição: $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{H}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{Al}^{+++} > \text{Fe}^{+++}$.

Na fração de argila, ocorrem a floculação e aglutinação, que propiciam condições e meios para a redução do espaçamento basal, gerando uma aglomeração das partículas, causando uma aparente mudança na textura, com as partículas de argila de maior diâmetro se unindo. Esse processo pode ser acelerado quando se acrescenta uma concentração de elétrons à valência dos íons ou com aumento da temperatura. Da mesma forma, pode ser diminuído quando se diminui a dimensão do íon, o pH e a adsorção aniônica, seja por diferença de um ou somatório destes fatores (PAIVA, 2016).

2.3.1.2 Cimentação pozolânica

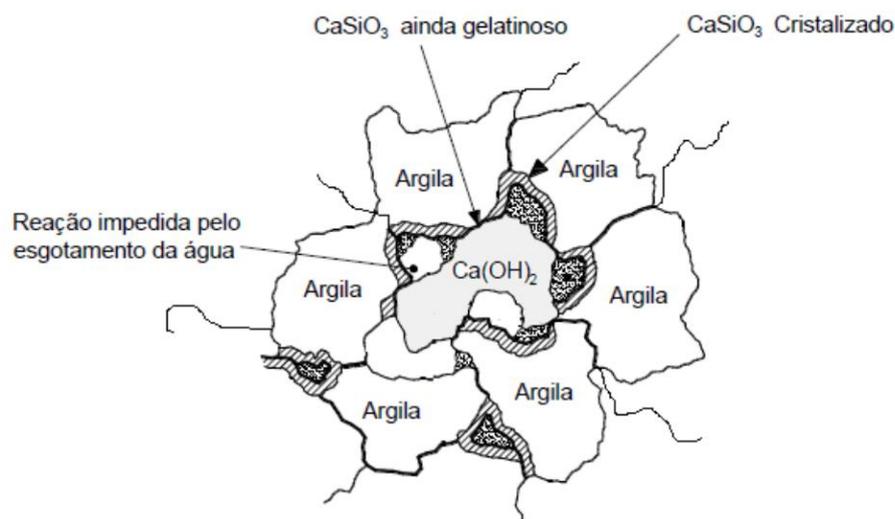
A “cimentação” ou “reação pozolânica” é a responsável pelo processo de estabilização das camadas compactadas de solos misturados com a cal, devido à formação de uma matriz resistente que é gerada lentamente, ao longo do tempo, pela ligação entre as partículas da cal e do solo que contém a partículas de argila.

Quando a quantidade de cal adequada e água é adicionada ao solo, o seu pH aumenta rapidamente acima dos 10.5, permitindo que as partículas de argila se dividam, fazendo com que a sílica e o alumínio sejam liberados e entrem em contato com o cálcio da cal, formando o silicato de cálcio hidratado (CSH) e o aluminato de cálcio hidratado (CAH), conforme as Equações 4 e 5. Os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados são produtos similares aos que se formam na cura do cimento portland (NEVES, 2009).



A Figura 8 esquematiza a forma como a argila se agrupa em torno do hidróxido de cálcio, formando o gel, e em seguida, os cristais de silicato cimentando.

Figura 8 – Cimentação do argilomineral na presença da cal.



Fonte: Silva (2012) *apud* Paiva (2016).

2.3.1.3 Carbonatação

A carbonatação da cal é o processo inverso à sua formação, causando a produção de calcário. Esta reação entre a cal e o dióxido de carbono presente na atmosfera, formam materiais cimentícios relativamente fracos, tais como o carbonato de cálcio ou de magnésio. Além da geração destes carbonatos, na carbonatação os hidróxidos de cálcio e de magnésio reagem com o anidrido carbônico, que por seu caráter ácido, gera o sal. (JUNIOR, 2010 *apud* PAIVA, 2016).

Por ser um processo fraco de cimentação, apresenta um ganho muito pequeno na resistência do solo, e isto se deve à reatividade do carbonato ser menor que a reatividade do hidróxido. Figueiredo (2011), afirma que as reações de carbonatação que são prejudiciais à composição solo-cal, são características da fase lenta do processo de estabilização e que além

de formar compostos cimentantes fracos, faz com que a cal a perda sua reatividade, pois na forma de carbonato, a cal torna-se inerte, prejudicando seu processo de estabilização.

2.3.1.4 Métodos de dosagem para misturas

A dosagem da cal tem como objetivo determinar a quantidade adequada a ser adicionada ao solo para obter os parâmetros desejados, tornando-o estável. Através de ensaios de laboratório, são definidos o teor de cal e o procedimento a ser utilizado. Diferentes métodos de dosagem para a mistura de solo e cal foram estudados, com conclusões variadas em relação aos tipos de solo, cal utilizada e reatividade dos solos.

Dentre os métodos existentes para determinar a dosagem da cal na estabilização de argilas expansivas, três são comumente utilizados, sendo eles:

- Método do pH (EADES e GRIM, 1966): Consiste na hipótese de que o teor mínimo de cal a ser adicionado ao solo é determinado quando o pH em água do solo atinge ou excede 12,42, após uma hora de realizada a mistura, pois é o pH necessário para que ocorram as reações pozolânicas. No entanto, um estudo realizado por Souto Maior (2022), analisou pesquisas em que o teor de cal necessário para estabilização do solo foi superior ao proposto no método.
- Método do Lime Fixation Point (LFP): Proposto por Hilt e Davidson (1960), este método objetiva estabelecer o teor de cal a ser adicionado para a melhorar da trabalhabilidade do solo, mas sem produzir aumentos significativos na sua resistência. Para isto, o teor de cal é aumentado no ensaio do Limite de Plasticidade (LP) até atingir um valor máximo (LFP). Caso seja utilizado um teor de cal superior ao LFP, o solo ganha resistência sem ter sua trabalhabilidade e índices plásticos (LL e LP) alterados.
- Método Thompson (1966): este método propõe procedimentos diferentes conforme o solo seja reativo ou não reativo. Considera-se que um solo é reativo quando a adição de cal resulta em um aumento na resistência à compressão simples em pelo menos 345 kPa, após 28 dias de cura a 22,8°C. Para solos reativos, o objetivo é o desenvolvimento de reações pozolânicas, que proporcionam resistência e durabilidade. Para solos não reativos, o propósito é melhorar algumas propriedades do solo como expansão, plasticidade, e Índice de Suporte Califórnia (ISC).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos estabelecidos neste projeto, foi conduzida uma investigação exploratória através de uma extensa busca bibliográfica. Para isto, optou-se por utilizar o método de revisão sistemática, com o propósito de reunir, examinar e resumir trabalhos anteriores sobre o tema estudado.

Segundo Sousa et al. (2021), a pesquisa bibliográfica está inserida principalmente no meio acadêmico com a finalidade de aprimoramento e atualização do conhecimento, através de uma investigação científica de obras já publicadas. Sendo assim, esta pesquisa foi desenvolvida em três fases distintas.

A primeira etapa envolveu a realização de pesquisas de estudos de caso e levantamento bibliográfico em diversos recursos de publicação. A pesquisa foi realizada em sites de publicação científica e acadêmica, tais como: SciELO, Web of Science, Scopus, ResearchGate, Google Scholar, Oasisbr, Periódicos CAPES/MEC, biblioteca virtual da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia (ABMS), ZoteroBib e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD). Os critérios utilizados na pesquisa foram palavras-chave relevantes para solos expansivos, cal, melhoramento e estabilização. Foram observados como critérios que as pesquisas obtivessem resultados relativos à granulometria, mineralogia, aos limites de consistência, expansividade, Índice de suporte Califórnia (CBR), compactação, a resistência a compressão simples, antes e após a mistura com a cal utilizada para melhorar solos expansivos.

A segunda etapa fundamentou-se de uma visão sistêmica com análise sobre os trabalhos selecionados em planilhas eletrônicas, alimentando-as com as informações de identificação, localização, distribuição granulométrica, índices físicos, limites de consistência, ensaios de compactação e caracterização química afim de avaliar os resultados obtidos pelos autores em variados percentuais em peso de cada mistura do solo natural com a cal e a sua eficácia contra a expansão diante dos parâmetros escolhidos e também dentre os métodos indiretos dos critérios de Chen (1965), Daksanamurthy e Raman (1973) e Seed et al. (1962), e diretos de Cuellar (1978), e Jimenez Salas (1980), revisados.

Na terceira etapa, diante desta base de dados foi possível analisar e agrupar os resultados experimentais obtidos na literatura, através da verificação de resultados de ensaios físicos, mecânicos, químicos e mineralógicos, com ensaios como de granulometria, compactação, resistência a compressão simples, CBR, Difração de raios-X e Microscopia Eletrônica de varredura, realizados antes, e após a mistura com a cal, além da classificação destes solos

quanto à expansividade por diferentes métodos. Na figura 9 é exibido o fluxograma desta metodologia.

Figura 9. Fluxograma da metodologia da presente pesquisa.

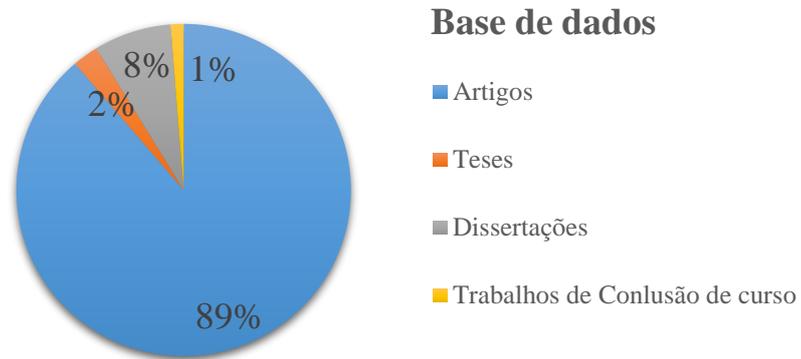


Fonte: A Autora (2023).

3.1 PESQUISAS AVALIADAS

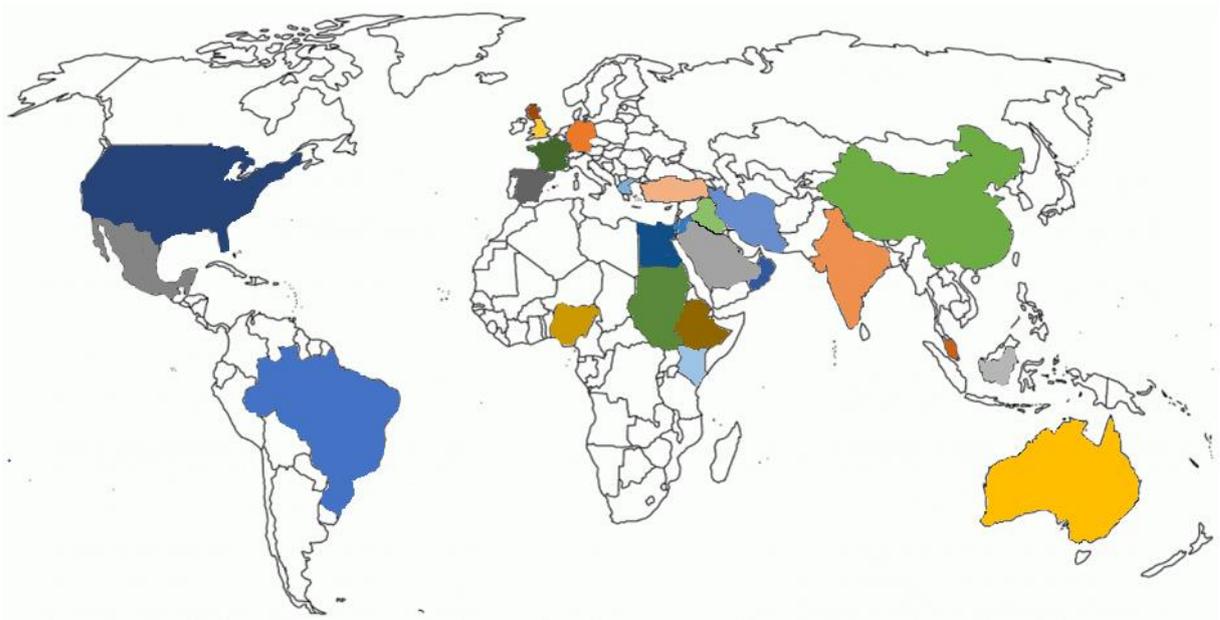
Foram analisados 80 trabalhos de diferentes estruturas, sendo eles, 2 teses de doutorado, 6 dissertações de mestrado, 71 artigos (68 de revistas/jornais e 3 de congressos/encontros) e 1 trabalho de conclusão de curso, publicados entre os anos de 1991 e 2022 em 25 países. Dentre estes trabalhos, 67 foram publicados nos últimos 10 anos. Na Figura 10 é representada, em percentagem, a base de dados relativa ao formato dos trabalhos seleccionados. Na Figura 11 é mostrado o mapeamento destes trabalhos em relação aos países e na Figura 12 é exibido graficamente o quantitativo de estudos analisados em cada país.

Figura 10 – Formato dos trabalhos escolhidos.



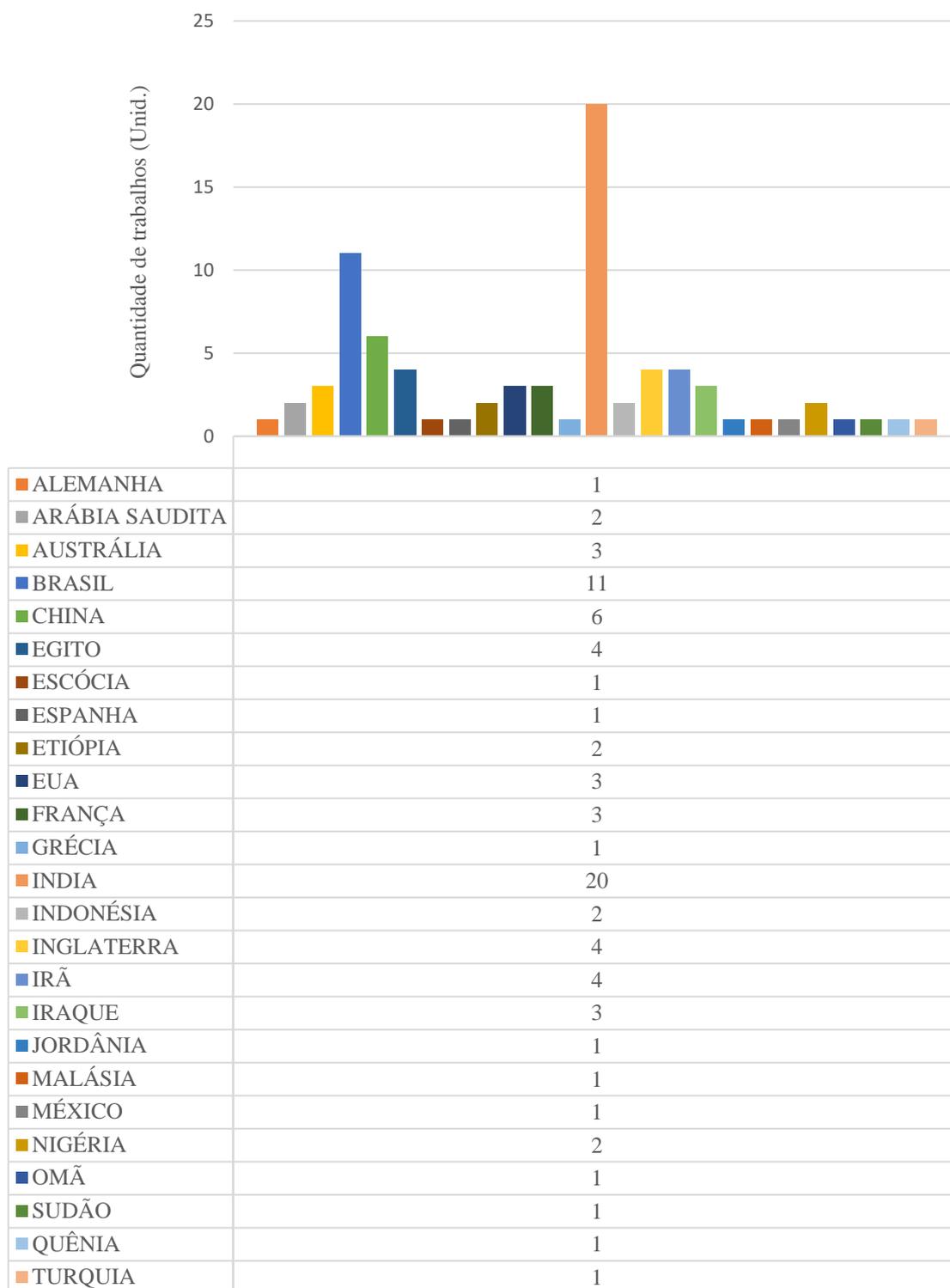
Fonte: A Autora (2023).

Figura 11 – Mapeamento de países presentes no estudo.



Fonte: A Autora (2023).

Figura 12 – Quantidade de trabalhos avaliados por país.



Fonte: A Autora (2023).

Como pode-se perceber na Figura 12, dentre os trabalhos selecionados 13% originaram-se de solos brasileiros, enquanto 25% se tratam de solos indianos e isto se dá ao fato do grande acervo de estudos relacionados ao tema nestes países.

3.2 ANÁLISES DAS PESQUISAS

O Apêndice A apresenta o resumo dos estudos e os índices escolhidos para serem analisados nesta pesquisa. Por se tratar de uma análise de estudos de diversos países, é importante esclarecer quais normas foram utilizadas em cada trabalho, para isto dividiu-se nos tópicos: caracterização física, caracterização mecânica, caracterização química, caracterização mineralógica e caracterização microestrutural, apresentados a seguir.

3.2.1 Caracterização Física

Nas pesquisas brasileiras de Abreu (2020), Corrêa (2008), Silva (2018), Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013) e Paiva (2016), os ensaios realizados seguiram para preparação do material, conforme ABNT [6457] e para análise granulométrica, conforme a ABNT [7181]. Incluindo a pesquisa de Leite et al. (2016), os ensaios para determinação do limite de liquidez, ocorreram de acordo com ABNT [6459], e para determinação do limite de plasticidade, utilizaram a ABNT [7180]. Inserindo também os casos de Rocha (2018), Pereira (2018) e Bezerra (2020), todos os estudos seguiram segundo ABNT [7182] para determinação a execução de caracterização dos solos e das massas específicas.

Os casos de Oliveira (2010), Abreu (2020) e Leite et al. (2016) também se dispuseram das normas DNER ME 087/94, DNER-ME 129/94, DNER-ME 213/94 e ME-164/2013 do DNIT, para análises físicas dos solos estudados.

Soltani et al. (2022) seguiu as premissas das normas australianas AS 1289.3.9.1e AS 1289.5.1.1 para a análise física do solo estudado, que determinam a como obter os limites de Atterberg e o ensaio de compactação, respectivamente.

Mutaz e Dafalla (2014), Emarah e Seleem (2017), Sharaby et al. (2021), Amena e Chakeri (2022), Dayioglu et al. (2017), Mahedi et al. (2020), Akula et al. (2021), Phanikumar e Raju (2020), Dash e Hussain (2012), Cheshomi et al. (2016), Pakbaz e Ganji (2018), Khattab et al. (2008), Zukri (2013), López-Lara et al. (2017), Wang et al. (2019), Mohammed (2015), Etim et al. (2021), utilizaram em suas pesquisas a norma padrão da ASTM D4318 como standard na execução dos ensaios para obtenção dos limites líquidos, limites de plasticidade e índices de plasticidade de solos.

Sharma et al. (2018), Ghobadi e Babazadeh (2013), Etim et al. (2021), Hozatlioglu e Yilmaz (2021), Amena e Chakeri (2022), Dayioglu et al. (2017), Phanikumar E Raju (2020), Al-Gharbawi et al. (2022), Khattab et al. (2008), Mohammed (2015), López-Lara et al. (2017)

seguiram a ASTM D698 (2012), para a realização do ensaio de compactação. Enquanto, Moghal et al. (2014), seguiu conforme a ASTM D2435-04. Emarah e Seleem (2017), conforme o método de (teste Proctor modificado) dado na ASTM D1557-78 e AASHTO T 180-90 e Ghobadi et al. (2015) obteve a execução do ensaio nas diretrizes da ASTM D1557-02.

Cheng et al. (2018), Cheng e Huang (2018), Ma et al. (2021), Sitepu et al. (2021), seguiram os seus padrões de ensaios de acordo com a utilizou a norma nomeada como “Métodos de teste de solos para engenharia rodoviária” (JTG E40-2007), norma chinesa de identificação dos solos que segundo os próprios autores de assemelha à ASTM D 4318, para obtenção dos limites de Atterberg. Com o mesmo propósito Ijaz et al. (2020), seguiu a GB/T50123-1999.

Cheng e Huang (2018) e Ma et al. (2021) utilizaram a JTG E51-2009, também norma chinesa, para proceder com o ensaio de compactação dos solos.

George et al. (1992) atuou em conformidade com as normas BS 1377 – 3 e BS 1377-2:1990, para a caracterização física do solo, assim como Mavroulidou et al. (2020), Muhmed e Wanatowski (2013), Otoko e Iheanyi (2015), Al-Rawas et al. (2005) e Ali et al. (2018).

Nagesh et al. (2021), Nalawade e Jadhao (2019), Randhawa et al. (2022), Bhuvaneshwari et al. (2020), Prasad et al. (2021), Nalawade e Jadhao (2019), Sharma et al. (2018), Jha e Sivapullaiah (2015), James e Pandian (2018) (B), Sahoo e Singh (2022), James e Pandian (2016), Harish (2017), Indiramma et al. (2019), Bakanar et al (2019), Thyagaraj et al. (2012), seguiram as normas indianas IS-2720-Part-3 (1980), IS-2720 - Part-4 (1985), IS 2720-Part 5 (1985), IS 2720-Part 6 (1972) e IS: 1498 (1970), IS 2911 (Part-3) e IS 4332 (Part 3) 1967.

Al-Mukhtar et al. (2010) e Al-Mukhtar et al. (2012), prosseguiram conforme a norma francesa NF P94-051 de 1993. Atualmente esta norma foi substituída pela NF EN ISO 17892-12 de 2018, chamada “Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12: determination of liquid and plastic limits”.

Seco et al. (2010), utilizou a norma da UNE 103400:1993 que especifica as orientações do teste de ruptura de compressão simples, para obtenção de sua compactação em suas amostras de solo.

3.2.2 Caracterização química

- Determinação do potencial hidrogeniônico (pH)

Dentre os casos estudados foi possível notar que os autores fizeram a escolha do teor de cal a ser testado baseada em duas opções, na bibliografia existente quanto a este método de melhoramento do solo, ou se seguia de acordo ao critério de Eades e Grim (1966), que define que o menor teor de cal que estabiliza a mistura é aquele que adicionado ao solo eleva o pH da mistura solo-cal a 12,42, após uma hora do início da mistura dos materiais. Por conseguinte, a análise química do solo é um ponto crucial para a adoção do melhoramento químico.

As análises dos solos brasileiros estudados por Silva (2018), Ferreira et al. (2017), Paiva (2016) e Barbosa (2013) seguiram a metodologia do Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (1997) e também realizaram o teste de Eades e Grim (1966) para avaliar o pH. Os resultados da análise química do solo, foram calculados, de acordo com o sistema de classificação de solos da Embrapa (1999). Sendo realizadas com a amostra do solo natural (sem cal) e acrescidas com teores de 1%, 3%, 5%, 7% de cal, nos casos dos três primeiros autores mencionados, enquanto no estudo de Silva (2018) amostras com até 13% de cal foram analisadas após 1 hora e após 120 dias de cura.

Para as pesquisas realizadas por Corrêa (2008), Al-Mukhtar et al. (2010), Muhmed e Wanatowski (2013), Zukri (2013) e o teste de Eades e Grim (1966) foi utilizado para avaliar o pH e a condutividade elétrica do solo. Isto foi conseguido através da preparação de diferentes misturas de solo e cal, com 20 g de solo seco (24 h em estufa a 105 °C) dispersos em 100 mL de água destilada e misturados com diversas quantidades de cal (de 0 a 20%). A condutividade elétrica e o pH das pastas foram medidos após 1,5 h e depois de 1, 3, 7, 28, 45 e 90 dias de cura.

Maubec (2010), suspendeu 10 g de uma mistura da cal com a argila em 100 ml de água ultrapura (L/S = 10). Foram consideradas três dosagens de cal: 2, 5 e 10% em massa. Utilizando garrafas fechadas de vidro borossilicato de 125 ml hermeticamente para evitar a carbonatação da cal durante a agitação. As suspensões foram mantidas a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ por períodos variando de 1 a 98 dias. O pH das suspensões foi medido usando um eletrodo de pH específico para soluções alcalinas.

Sitepu et al. (2021), assim como para a análise física, para avaliação química procedeu de acordo com a norma Chinesa JTG E40-2007, intitulada como “Métodos de ensaio de solos para engenharia rodoviária”, porém desta vez com a especificação T 0149-1993, “Teste de Acidez e Alcalinidade.

Os casos estadunidenses de Akula et al. (2021) e Mahedi et al. (2020) seguiram métodos diferentes para análise do pH dos solos e misturas. O primeiro autor mediu o pH da amostra misturando uma parte da amostra com cinco partes de água (Sólido/água = 1:5), enquanto o

segundo seguiu a técnica de proporção 1:1, neste método o pH do solo é medido na água usando um medidor de pH com um eletrodo combinado de vidro de referência.

➤ Capacidade de troca catiônica

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo refere-se à quantidade de íons positivos necessária para equilibrar as cargas negativas presentes em uma certa quantidade de solo, sob condições específicas. Em outras palavras, representa a habilidade do solo em segurar e intercambiar íons positivos em um pH determinado. A CTC é um indicador da eficiência de um solo; a baixa eficiência ocorre quando a CTC é inferior a 24 cmol/kg, característica comum em solos caulíníticos, pois, solos muito intemperizados geralmente apresentam uma CTC reduzida. A avaliação desse parâmetro está associada à quantidade de cálcio, magnésio, potássio e sódio disponíveis para troca no solo.

Apenas as pesquisas feitas por Corrêa (2008), Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013), Paiva (2016) e Nagesh et al. (2021), realizaram a análise da capacidade de troca catiônica dos solos antes e após melhoramento do solo. A análise desse parâmetro foi conduzida mediante a eliminação, utilizando uma solução salina de amônio, de cálcio, bário ou ácido diluído, e posteriormente medido através de técnicas de volumetria ou absorção atômica.

➤ Óxidos

Avaliar os óxidos presentes no solo auxilia na caracterização química do mesmo, pois estão estreitamente ligados aos processos de organização e aglomeração, podendo mensurar, a capacidade de absorção de água e sua resistência. Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013), Paiva (2016), Sharaby et al. (2021) e Mutaz e Dafalla (2014) realizaram esta análise em suas pesquisas.

Os solos investigados por Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013) e Paiva (2016) tiveram quantitativa da composição química do solo e das misturas solo-cal, expressa em óxidos, por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) em amostras fundidas, seguindo as diretrizes da norma NBR 15693. Essa análise permitiu a determinação das concentrações dos dez óxidos mais abundantes: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MnO, MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂ e P₂O₅. Para realizar o procedimento, uma porção de cada amostra foi previamente desidratada em estufa a 110°C e, em seguida, submetida a altas temperaturas (1000°C por 2 horas) em uma mufla para determinar a perda de massa por volatilização. Para a análise

propriamente dita, foram preparadas pérolas fundidas usando tetraborato de lítio como fundente. As pérolas foram então examinadas em um espectrômetro de fluorescência de raios-X (modelo Rigaku RIX 3000, equipado com um tubo de raios-X de ródio) utilizando um método de curvas de calibração que havia sido previamente construído com base em materiais de referência internacional.

Sharaby et al. (2021) produziu sua análise conforme realizado por Eades et al. (1962), no estudo intitulado como “Formação de novos minerais com estabilização por cal comprovada em campo experimentos na Virgínia”. Neste trabalho as amostras foram retiradas de cada um dos furos do trado feitos em 1960 para análise mineral. À medida que as amostras eram retiradas do subleito, elas eram seladas em sacos plásticos para proteger qualquer cal que não reagisse da carbonatação, até que pudessem ser transportadas para o laboratório. Porções das amostras foram trituradas para passar por uma tela de malha 200 e foram analisadas por difração de raios-X.

No estudo feito por Mutaz e Dafalla (2014) a análise química foi realizada retirando 0,2 g de solo e adicionando 2 ml de aquaregia (1:3 ácido nítrico:ácido clorídrico). Em seguida foram adicionados 10 ml de ácido fluorídrico (HF) e toda a mistura foi agitada por 2 horas e depois aquecida até 100°C por 4h. A solução foi então saturada com 100 ml de ácido perbórico (H₃BO₄), para evitar a volatilização da sílica, antes da mistura ser analisada usando espectrofotometria de chama (Fieldes et al. 1951).

3.2.3 Caracterização mineralógica e microestrutural

No estudo conduzido por Maubec (2010), foram empregados difratogramas de raios-X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) como técnicas analíticas para investigar a mineralogia e microestruturas das amostras que haviam passado pelo processo de cura de 7, 28 e 98 dias, sob condições de temperatura de 20°C e 50°C, após a adição de 10% de cal. Essa abordagem permitiu uma avaliação detalhada das mudanças que ocorreram nas amostras ao longo do tempo e sob diferentes condições térmicas.

Mutaz e Dafalla (2014) avaliou a mineralogia de suas amostras por meio de DRX as submetendo a pré-tratamento químico com MgCl, etilenoglicol, KCl bem como aquecimento a 550 C, para habilitar os diferentes minerais argilosos, distinguir entre esmectita, illita e caulinita, onde MgCl foi utilizado para a identificação inicial do mineral fases presentes. O espaçamento entre camadas da esmectita foi alterado por tratamento de maneira distinta, conforme indicado em Grim (1968).

Moghal et al. (2014) determinou a presença dos minerais predominantes no solo estudado através da realização de difração de raios-X (DRX), usando o sistema Bruker D8 Advance. As amostras de solo foram escaneadas de 2 a 60 (2 θ) usando um ânodo de Cu de 2,2 kW, foco longo e fino tubo de raios-X de cerâmica a uma taxa de varredura de 1 por minuto

Os argilominerais que estavam presentes no estudo de Corrêa (2008), tanto nas amostras de solo natural quanto nas amostras de solo-cal foram identificados por meio de análises de difratometria por raios-X. Para a realização dessas análises, foi empregado o método do pó utilizando radiação Cu K α , com um comprimento de onda (λ) de 1,54056 Å. Durante o processo de coleta de dados, procedeu-se à varredura em 2 θ , com incrementos de 0,02 graus a cada 2 segundos.

As análises mineralógicas elaboradas por Ferreira et al. (2017) e Barbosa (2013) e Paiva (2016) foram realizadas usando termogravimetria (TG), termogravimetria derivada (DTG) e difratometria de raios-X. Utilizamos um equipamento modelo NETZSCH STA 409PC com atmosfera de Nitrogênio 5,0 analítico e taxa de aquecimento de 10°C/min até 1000°C como temperatura máxima. Os resultados foram processados com o software NETZSCH Proteus - Thermal Analysis Version 4.2.1. A os três autores também utilizaram da MEV para analisar a microestrutura dos solos.

Cheng et al. (2018) e Cheng e Huang (2018) determinaram as alterações minerais e de microestrutura nos solos naturais e estabilizados usando difração de raios-X (DRX), espectroscopia de infravermelho (IR) e microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os solos foram moídos e secos durante 4 horas a 60 °C. Em seguida, os padrões de XRD foram obtidos em um difratômetro de raios X - IV (radiação Cu-ko) em um passo de varredura de 0,02° e uma velocidade de varredura de 2°/min. KBr técnica de disco (2 g de amostra, 200 g KBr) foi usada para obter os espectros de IV de amostras de solo em um pectrômetro infravermelho Bruker VERTEX70 com resolução de 4cm'. Um microscópio eletrônico de varredura (MEV), Philips PSEM-500, foi utilizado para obter as imagens de MEV de solos não tratados e tratados.

Akula et al. (2021) fez a análise termogravimétrica utilizando o equipamento SDT Q600 da TA Instruments. Inicialmente, 50 mg da amostra micronizada foram acondicionados em um dessecador contendo MgCl₂ por um período de 14 dias, a fim de atingir o equilíbrio de umidade. Posteriormente, as amostras foram submetidas à análise em uma atmosfera de nitrogênio (N₂), com uma taxa de aquecimento de 20°C/min até alcançar a temperatura máxima de 1000°C.

Al-Mukhtar et al. (2012) fez sua análise mineralógica por difratometria de raios-X (DRX) utilizando o difratômetro Siemens D5000, empregando radiação Cu-K α ($\lambda=0,15406$ nm), a qual foi filtrada através de uma folha de níquel. As medições de difração de raios-X

foram realizadas incluindo a adição de cal em concentrações de 4% e 10%, com diferentes períodos de cura variando de 1,5 horas a 10 dias, e em diferentes temperaturas de cura de 20 °C e 50 °C. Foram utilizados aparelhos de MEV (Hitachi S4500 e Philips 525 M FEI) para observar a morfologia das amostras com as ampliações 5000 mil vezes e 500 vezes.

Os estudos mineralógicos, texturais e estruturais dos solos estudados por Sharma et al. (2018) e Dash e Hussain (2012), foram realizados através da realização de difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Estas análises ajudaram os autores a compreenderem o aumento das propriedades geotécnicas do solo tratado com cal a um nível microscópico.

Da mesma forma, Jha e Sivapullaiah (2015), realizou seus testes para análise das mudanças mineralógica e microestrutural do solo expansivo não tratado e tratado por meio da Difração de raios-X (DRX) e microscópio eletrônico de varredura (MEV) em diferentes períodos de cura. Os testes de difração de raios-X (DRX) foram realizados usando o modelo avançado Bruker D8 difratômetro para identificar alterações mineralógicas. Para o teste MEV, o Hitachi SU8020 foi usado para capturar as micrografias.

As pesquisas realizadas por Jiang et al. (2019), Wang et al. (2019), Farghaly et al. (2020), Tran et al. (2014), Nagesh et al. (2021), James e Pandian (2018) (A), James e Pandian (2018) (B), Mudgal et al. (2014), Muhmed e Wanatowski (2013), Cheshomi et al. (2016) e Khattab et al. (2008), avaliaram em microscopia de varredura (MEV), a microestrutura os solos antes e após o melhoramento com a cal em diferentes percentuais.

3.2.4 Caracterização mecânica

Para obtenção das características mecânicas dos solos diferentes normas podem ser usadas como diretriz, em especial no Brasil tanto a ABNT como o DNIT apresentam normas para tal análise. Nos casos brasileiros avaliados, Abreu (2020) seguiu conforme a NBR 9895/2016, enquanto Corrêa (2008), além desta também obedeceu às recomendações da ME-049/2016 do DNIT. Oliveira (2010) e Pereira (2018), obtiveram a expansão e o CBR do solo de acordo com a DNER-ME - 049/94, o primeiro autor também utilizou da DNER-ME 180/94 para o ensaio UCS. Ferreira et al. (2017) seguiu os procedimentos da “ABNT/ NBR 7182 “solo - ensaio de adensamento unidimensional”, enquanto Silva (2018), Paiva (2016) e Barbosa (2013) trabalharam de acordo com a norma nacional ABNT NBR 12007/90 e a internacional ASTM D4829/95.

Aproximadamente 18% dos casos avaliados nesta pesquisa utilizaram a ASTM D 4546-03/90, intitulada por “Métodos de teste padrão para expansão unidimensional ou potencial de assentamento de solos coesivos” abrangendo três métodos alternativos de laboratório para determinar a magnitude de expansão ou assentamento de solo coesivo relativamente não perturbado ou compactado. Soltani et al. (2022), Dang et al. (2018), Leite et al. (2016), Emarah e Seleem (2017), Amena e Chakeri (2022), Dayioglu et al. (2017), Mahedi et al. (2020), Cheshomi et al. (2016), Pakbaz e Ganji (2018), Ghobadi et al. (2015), Khattab et al. (2008), Al-Gharbawi et al. (2022), López-Lara et al. (2017), Hozatlioglu e Yilmaz (2021), Dash e Hussain (2012), seguiram as premissas desta norma. Quanto a determinação do Índice de Suporte Califórnia, a norma internacional ASTM 1883-07 fornece as diretrizes detalhadas para a realização do ensaio CBR em laboratório e os estudos realizados por Amena e Chakeri (2022), Muntohar et al. (2013) e Ghobadi et al. (2015) atuaram em conformidade a esta.

Os pesquisadores Soltani et al. (2022), Emarah e Seleem (2017), Amena e Chakeri (2022), Teshome et al. (2022), Dayioglu et al. (2017), Mahedi et al. (2020), Muntohar et al. (2013), Ghobadi e Babazadeh (2013), Ghobadi et al. (2015), Khattab et al. (2008), Mohammed (2015), Zukri (2013), Etim et al. (2021), demonstraram o comprometimento em adotar as diretrizes estabelecidas na norma ASTM D2166, com o título "Método de teste padrão para resistência à compressão não confinada de solo coesivo" que desempenha um direcionamento preciso para a determinação da resistência à compressão não confinada de solos coesivos. Emarah e Seleem (2017) também utilizou a normatização AASHTO T 208-90 para avaliação resistência do solo estudado.

Cheng et al. (2018) e Ma et al. (2021) procederam suas análises quanto a expansão de acordo com a norma Chinesa JTG E40-2007, com as especificações T0125-1993 e T0124-1993, respectivamente, esta norma se assimila a ASTM 4546-03/90, enquanto para realização do ensaio CBR, Cheng et al. (2018) cumpriu as premissas da norma JTG E51-2009, intitulada como “Métodos de ensaio de materiais estabilizados com ligantes inorgânicos para engenharia rodoviária”. Ijaz et al. (2020), também atuou de acordo com o “Código técnico para construção em regiões de solo expansivo”, GB 50112-2013, que tem suas diretrizes voltadas para construção em solos expansivos.

Farghaly et al. (2020) e Sharaby et al. (2021) seguiram as normatizações da parte 2 da 6ª edição do Código Egípcio (2001), chamado de “Egyptian Code of Soil Mechanics, Foundations Carrying Out and Designation” para determinação da expansão, e o primeiro autor citado também obedeceu a esta norma para obtenção da resistência a compressão simples do solo.

Com a norma francesa, NFP94-091, intitulada por: “Solos: reconhecimento e ensaios - Ensaio de expansão com edômetro - Determinação de deformações através de carregamento de vários corpos de prova”, Al-Mukhtar et al. (2010) e Al-Mukhtar et al. (2012), realizaram os procedimentos e obtiveram os resultados referentes a expansão e UCS.

Bhuvaneshwari et al. (2020), Nalawade e Jadhao (2019), Indiramma et al. (2019), Jha e Sivapullaiah (2015), Sahoo e Singh (2022), James e Pandian (2016), seguiram de acordo com a condução dos experimentos para obtenção da expansão dos solos, tanto no estado natural como melhorado, nos padrões dos Códigos Indianos das Normas IS : 2720 (Part XL) – 1977 e IS 4332 (Part 3). Os casos de Nagesh et al. (2021), Harish (2017), Mudgal et al. (2014), também obedeceram aos procedimentos direcionados pelo padrão Indiano, no entanto, para realização do ensaio CBR, conforme a norma IS 2720-Part 16. É notável observar que todos os estudos de origem indiana que abordaram a avaliação da resistência do solo aderiram estritamente à norma IS 4332 (Parte 5) de 1970, incluindo os casos mencionados e as pesquisas de Thyagaraj et al. (2012), Dash e Hussain (2012).

A pesquisa conduzida por Sitepu et al. (2021), o autor adotou, em sua investigação, as diretrizes estabelecidas na norma JTG D30-2015, intitulada "Especificações para Projeto de Subleitos Rodoviários", para avaliar a expansão e o Índice de Suporte Califórnia (CBR) do solo. Este enfoque metodológico demonstra um compromisso substancial com a fundamentação técnica e a aplicação destes testes reconhecidos no campo da engenharia rodoviária. Para avaliar a resistência do solo, assim como Cheng et al. (2018), o autor seguiu a T0805-1994 (JTG E40-2007) que se assimila a norma norte-americana ASTM D1633-00, “Método de teste padrão para resistência à compressão de cilindros moldados de solo-cimento”.

Percebeu-se o emprego das diretrizes estabelecidas pela norma BS 1377 por parte dos distinguidos pesquisadores Al-Rawas et al. (2005) e Yin et al. (2022) em suas respectivas investigações, visando à obtenção de resultados relacionados à expansão do solo. A BS 1377, intitulada "Métodos de Teste para Características Geotécnicas de Solos", é uma referência consagrada internacionalmente que proporciona orientações detalhadas para a execução de ensaios e análises de solo, com o propósito de determinar suas propriedades geotécnicas, incluindo a expansão do solo. Mavroulidou et al. (2020), Elsharief et al. (2013) utilizaram da mesma norma para a consecução do Índice de Suporte Califórnia dos solos estudados. Enquanto Muhmed e Wanatowski (2013), Ali et al. (2018), Otoko e Iheanyi (2015), Elsharief et al. (2013) seguiram o padrão britânico para avaliar a resistência não confinada dos solos.

É relevante notar que Seco et al. (2010) conduziu sua análise referente à expansão do solo em consonância com as diretrizes delineadas na norma espanhola UNE 103601:1996,

intitulada "Ensayo del hinchamiento libre de un suelo en edómetro". A norma UNE 103601:1996 representa uma referência fundamental no contexto da avaliação do inchamento livre de solos através do uso de um edômetro.

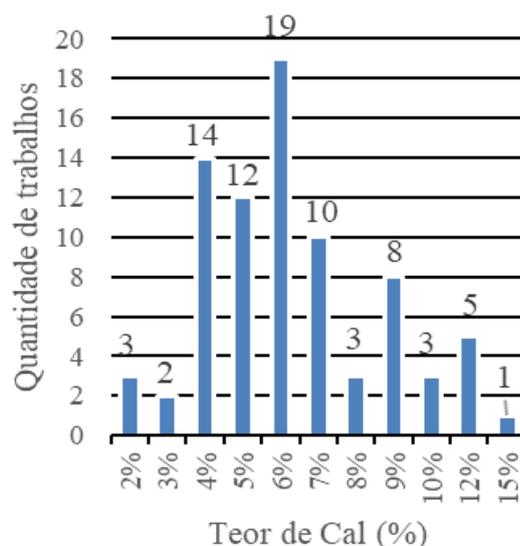
4 RESULTADOS E ANÁLISES

São apresentados os resultados obtidos mediante uma análise comparativa das características físicas, químicas, mineralógicas, microestruturais e mecânicas de solos antes e após o melhoramento químico com utilização da cal. Na seleção dos estudos, nem todos os trabalhos apresentavam os dados de ensaios realizados, portanto, em diversas análises, os quantitativos a serem considerados não abrangerão a totalidade dos solos selecionados.

4.1 TEOR DE CAL

A quantidade de cal utilizada tem um impacto significativo no processo de tratamento do solo. Ao analisar os casos investigados, observou-se que os pesquisadores selecionaram os níveis de cal a serem avaliados com base em duas abordagens: de acordo com uma revisão da literatura do método de aprimoramento do solo com a adição da cal, ou seja, utilizando os teores mais comumente testados, que são de 1 a 8%, ou a adoção dos critérios estabelecidos por Eades e Grim (1966). Na Figura 13 são apresentados os teores de cal, juntamente com a frequência em que essas concentrações foram identificadas como ideais, estabilizando o solo em parâmetros mecânicos, químicos ou mineralógicos, ou seja, aprimorando o solo em estudo.

Figura 13 – Teor de cal dos solos melhorados.



Fonte: A Autora (2023).

O apêndice B apresenta o teor para cada caso analisado nesta pesquisa. O teor de cal que apresentou os melhores resultados após a estabilização em 19 dos casos da literatura

avaliada nesta pesquisa é de 6%, representando aproximadamente 24% dos 80 trabalhos avaliados.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.2.1 Composição granulométrica

Na Quadro 8, são apresentadas as frações dos solos analisados por 36 dos trabalhos da base de dados colhidos, é possível perceber que apenas três casos, Pereira (2018), Ghobadi et al. (2015) e Otoko e Iheanyi (2015), não apresentaram uma textura fina com mais de 50% passando na peneira nº 200 de acordo com a Prática Padrão ASTM-D2487 para Classificação de Solos para Fins de Engenharia (Sistema Unificado de Classificação de Solos). Esse resultado era altamente previsível, dado que a análise envolveu a revisão de casos com solos expansivos. Esses solos, por sua própria natureza, são predominantemente compostos por uma fração fina, o que naturalmente conduziria a uma maior incidência dessa característica nas descobertas. Essa relação intrínseca entre a expansividade do solo e a presença de uma fração fina na sua composição é um padrão amplamente reconhecido na pesquisa geotécnica, reforçando ainda mais a validade desse resultado.

Quadro 8 - Frações dos solos analisados

Referência	Granulometria (%)			
	Argila	Silte	Areia	Ped.
Dang et al. (2016)	82	0	18	0
Soltani et al. (2022)	43	37	20	0
Dang et al. (2018)	82	0	18	0
Abreu (2020)	30	39	31	0
Corrêa (2008)	60	25	14	1
Silva (2018)	41	11	47	1
Ferreira et al. (2017)	47	37	16	0
Barbosa (2013)	37	34	29	0
Rocha (2018)	71	11	18	0
Paiva (2016)	67	17	0	0
Leite et al. (2016)	38	47	13	2
Pereira (2018)	22	13	59	5
Wang et al. (2019)	37	48	15	0
Ijaz et al. (2020)	21	70	9	0
Teshome et al. (2022)	45	48	7	0
Nagesh et al. (2021)	62	25	13	0
Randhawa et al. (2022)	19	76	5	1
James et al. (2022)	37	61	3	0
Phanikumar E Raju (2020)	36	42	23	0
Bhuvaneshwari et al. (2020)	70	20	10	0

Jha e Sivapullaiah (2015)	63	31	6	0
James e Pandian (2018) (B)	37	61	3	0
Sahoo e Singh (2022)	73	20	7	0
James e Pandian (2016)	37	61	3	0
Indiramma et al. (2019)	79	14	0	0
Thyagaraj et al. (2012)	56		28	16
Muntohar et al. (2013)	16	60	24	0
Ghobadi e Babazadeh (2013)	23	65	12	0
Ghobadi et al. (2015)	2	25	70	0
Khattab et al. (2008)	40	50	10	0
Mohammed (2015)	65	32	4	0
Al-Gharbawi et al. (2022)	50	34	16	0
Basma e Tuncer (1991)	70	25	5	0
Zukri (2013)	20	76	4	0
López-Lara et al. (2017)	99	1	0	0
Otoko e Iheanyi (2015)	43		40	17

Fonte: A Autora (2023).

O solo estudado por López-Lara et al. (2017), apresentou a maior fração fina (98,67%). Trata-se de um solo argiloso com presença significativa de montmorilonita. O clima semiárido, faz com que o solo fique sujeito a alterações significativas de umidade – desidratação.

Em contrapartida, o estudo de Ghobadi et al. (2015) conteve mais areia em sua fração do solo (30% de solos finos). De acordo com a classificação, o solo é atribuído ao grupo areia siltosa (SM). Mais de 70% dos grãos deste solo passaram pela peneira nº 40 (tamanho de abertura 425 µm), contendo 25% de silte e 2% de argila.

Dentre os 80 casos seleccionados, apenas 7 deles avaliaram a granulometria do solo após o melhoramento do solo (Abreu, 2020; Corrêa, 2008; Silva, 2018; Ferreira et al., 2017; Barbosa, 2013; Paiva, 2016; Mohammed, 2015), como mostrado na Quadro 9 e Figura 14.

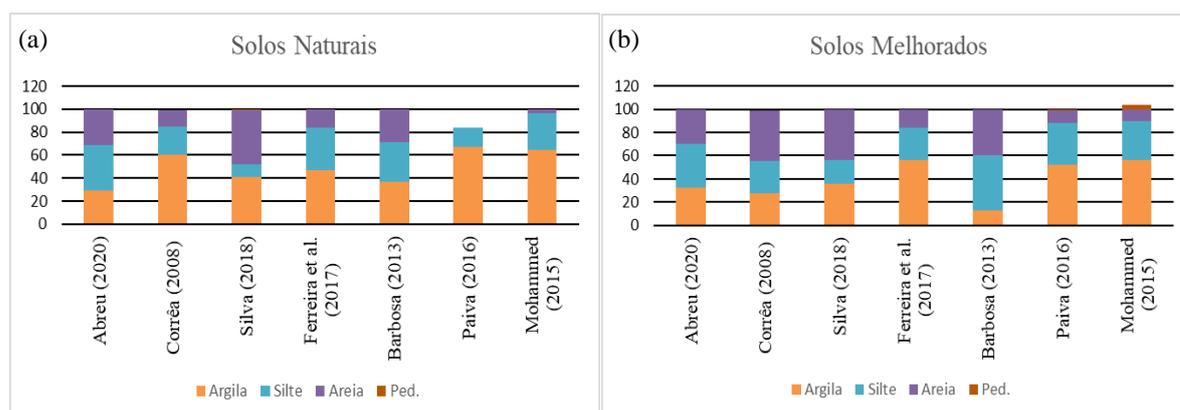
Quadro 9 – Granulometria dos solos melhorados

Referência	Teor de Cal (%)	Granulometria (%)							
		Solo Natural				Solo Melhorado			
		Argila	Silte	Areia	Ped.	Argila	Silte	Areia	Ped.
Abreu (2020)	4	30,0	39,0	31,0	0,0	32,9	37,1	30,0	0,0
Corrêa (2008)	2	60,0	25,0	14,0	0,0	27,3	28,1	43,1	0,0
Silva (2018)	9	41,0	11,0	47,0	1,0	36,0	20,0	44,0	0,0
Ferreira et al. (2017)	5	47,0	37,0	16,0	0,0	56,0	28,0	16,0	0,0
Barbosa (2013)	7	37,0	34,0	29,0	0,0	13,0	47,0	40,0	0,0

Paiva (2016)	7	67,0	17,0	0,0	0,0	52,0	36,0	11,0	1,0
Mohammed (2015)	4	65,0	31,5	3,5	0,0	56,0	34,0	10,0	4,0

Fonte: A Autora (2023).

Figura 14 – Granulometria dos solos: (a) solos naturais; (b) solos melhorados com cal.

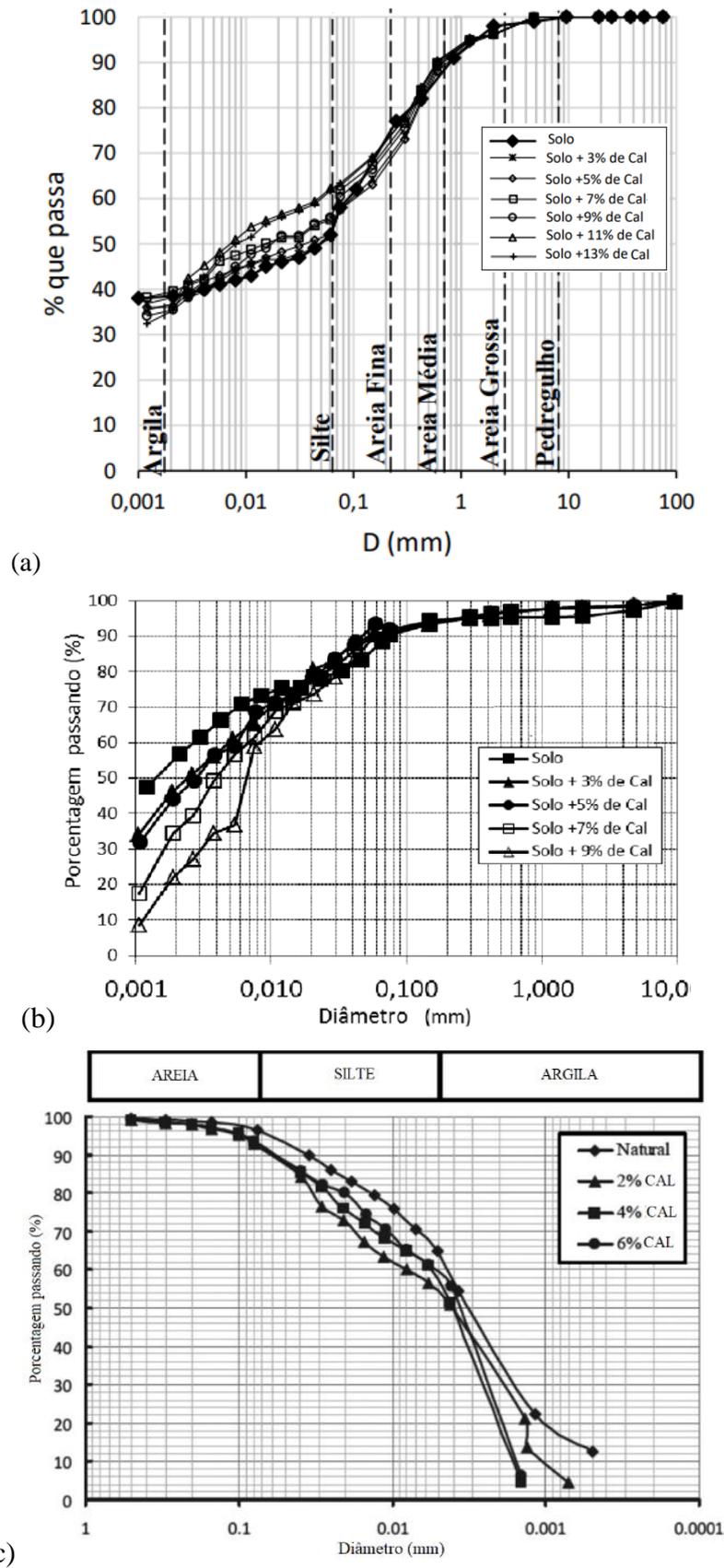


Fonte: A Autora (2023).

As frações dos solos antes e após o melhoramento com o uso do defloculante, ficou evidente que o tratamento dos solos com a cal aumentou as texturas dos solos, com exceção dos casos de Abreu (2008) e Ferreira (2017) que a adição da cal provocou um pequeno acréscimo da fração argila e praticamente não modificou a fração silte e areia fina. O acréscimo da fração silte e areia com adição de cal confirma o que é apresentado na literatura, que a adição de cal eleva o percentual de partículas da textura mais grossa. Isso ocorre devido à ação de uma reação química que começa imediatamente após a mistura do solo com a cal, conhecida como troca catiônica, que reduz a distância entre as camadas, promovendo a floculação do material. Como resultado, as partículas floculadas exibem dimensões maiores.

Nas curvas granulométricas dos estudos de Silva (2018), Paiva (2016) e Mohammed (2015), respectivamente, a alteração na fração de solo fica bem definida, indicando os deslocamentos das curvas à medida que a cal foi adicionada (Figuras 15 (a), (b) e (c)).

Figura 15 – Curvas granulométricas dos solos naturais e tratados com cal, Silva (2018) (a), Paiva (2016) (b), e Mohammed (2015) (c).



Fonte: adaptado de Silva (2018); Paiva (2016); adaptado de Mohammed (2015).

4.2.2 Limites de Atterberg

Os limites de consistência do solo natural foram avaliados em 53 dos 80 estudos considerados. A média do limite de liquidez (LL) destes casos é de 80%, enquanto o limite de plasticidade (LP) tem uma média de 47%. É possível afirmar que pelos critérios de Chen (1965), Seed et al (1962), e Daksanamurthy e Raman (1973), tratam-se de solos com um potencial de expansão “muito alto” (Quadro 10).

Quadro 10 – Grau de expansão pelos Critérios de Chen (1965), Daksanamurthy e Raman (1973) e Seed et al. (1962) dos solos naturais e tratados com a cal.

País	Referência	Teor de Cal (%)	Grau de expansão					
			Critério de Classificação					
			Chen (1965)		Daksanamurthy e Raman (1973)		Seed et al (1962)	
			Natural	Tratado	Natural	Tratado	Natural	Tratado
ARÁBIA SAUDITA	Mutaz e Dafalla (2014)	8.0	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Médio
BRASIL	Abreu (2020)	4.0	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
	Corrêa (2008)	2.0	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Alto	Muito alto	Alto
	Silva (2018)	9.0	Alto	Alto	Médio	Alto	Alto	Médio
	Ferreira et al. (2017)	5.0	Muito alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Médio
	Barbosa (2013)	7.0	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
	Paiva (2016)	7.0	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto
	Leite et al. (2016)	6.0	Alto	Alto	Alto	Médio	Alto	Médio
	Bezerra (2020)	5.0	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto
CHINA	Cheng et al. (2018)	6.0	Muito alto	Muito alto	Alto	Alto	Alto	Médio
	Cheng e Huang (2018)	9.0	Muito alto	Muito alto	Alto	Alto	Alto	Baixo
	Ma et al. (2021)	6.0	Alto	Alto	Alto	Médio	Alto	Médio
EGITO	Farghaly et al. (2020)	6.0	Muito alto	Baixo	Alto	Baixo	Muito alto	Baixo
	Emarah e Seleem (2017)	7.0	Muito alto	Alto	Muito alto	Médio	Muito alto	Alto
	Sharaby et al. (2021)	12.0	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto
ESCÓCIA	George et al. (1992)	6.0	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Médio
ETIÓPIA	Amena e Chakeri (2022)	5.0	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Alto	Muito alto	Alto
EUA	Dayioglu et al. (2017)	12.0	Alto	Médio	Alto	Médio	Alto	Baixo

	Mahedi et al. (2020)	5.0	Alto	Alto	Alto	Médio	Alto	Baixo
INDIA	Nagesh et al. (2021)	6.0	Muito alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
	Phanikumar E Raju (2020)	12.0	Muito alto					
	Bhuvaneshwari et al. (2020)	4.0	Muito alto	Alto				
	Prasad et al. (2021)	4.0	Muito alto	Alto				
	Sharma et al. (2018)	5.0	Alto	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
	Jha e Sivapullaiah (2015)	6.0	Muito alto	Alto	Muito alto	Alto	Muito alto	Baixo
	James e Pandian (2018) (B)	3.0	Muito alto	Muito alto	Alto	Alto	Muito alto	Alto
	Sahoo e Singh (2022)	15.0	Muito alto	Alto	Muito alto	Médio	Muito alto	Médio
	James e Pandian (2016)	7.0	Muito alto	Alto	Alto	Médio	Muito alto	Médio
	Harish (2017)	6.0	Muito alto	Alto	Alto	Médio	Alto	Médio
	Indiramma et al. (2019)	8.0	Alto	Médio	Alto	Médio	Muito alto	Médio
	Bakanar et al (2019)	6.0	Muito alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Médio
	Thyagaraj et al. (2012)	4.2	Muito alto	Alto	Muito alto	Médio	Muito alto	Baixo
	Dash e Hussain (2012)	9.0	Muito alto	Alto				
	INDONÉSIA	Sitepu et al. (2021)	5.0	Muito alto	Muito alto	Alto	Alto	Alto
INGLATERRA	Mavroulidou et al. (2020)	4.0	Muito alto					
	Muhmed e Wanatowski (2013)	5.0	Muito alto	Muito alto	Alto	Muito alto	Alto	Alto
	Bell (1996)	4.0	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Médio
IRÃ	Cheshomi et al. (2016)	7.0	Muito alto					
IRAQUE	Khattab et al. (2008)	4.0	Alto	Médio	Médio	Médio	Alto	Baixo
	Mohammed (2015)	4.0	Alto	Médio	Médio	Médio	Alto	Alto
JORDÂNIA	Basma e Tuncer (1991)	12.0	Muito alto	Alto	Muito alto	Alto	Muito alto	Médio
MÉXICO	López-Lara et al. (2017)	6.0	Muito alto	Alto	Muito alto	Médio	Muito alto	Médio
NIGÉRIA	Etim et al. (2021)	8.0	Alto	Médio	Médio	Médio	Médio	Baixo
OMÃ	Al-Rawas et al. (2005)	6.0	Alto	Alto	Médio	Alto	Alto	Médio
SUDÃO	Elsharief et al. (2013)	6.5	Muito alto	Alto	Alto	Alto	Muito alto	Médio

QUÊNIA	Yin et al. (2022)	4.0	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Alto	Alto	Alto
--------	-------------------	-----	------------	------------	------------	------	------	------

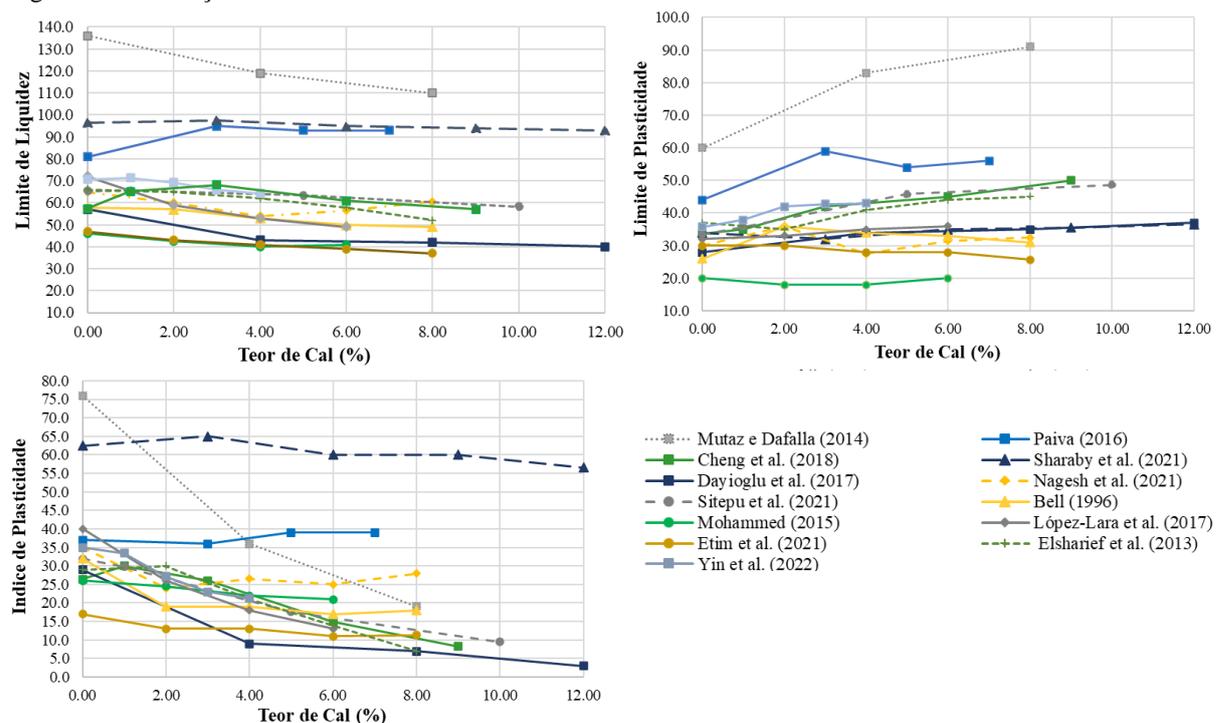
Fonte: A Autora (2023).

Ao examinar esses resultados, é evidente que todos os casos atendiam aos critérios necessários para a estabilização com cal. Isso se deve ao fato de que eles estavam em conformidade com as diretrizes da National Lime Association (2004). Todos os casos apresentaram uma porcentagem de partículas que passaram pela peneira n. °200 (ASTM) igual ou superior a 25%, um (IP) igual ou superior a 10%, e uma porcentagem de matéria orgânica inferior a 1% (NLA, 2004).

Os Limites de consistência das misturas solo-cal- foram avaliados em 47 estudos. Após o tratamento, 96% dos solos apresentaram um decréscimo no IP. Este resultado já era esperado de acordo com a literatura, em que autores como Hilt e Davidson, (1960), e Goosen e Al-Rawas (2006), relataram este mesmo feito. As rápidas mudanças nos valores dos limites de Atterberg com adição de cal devem-se às transformações estruturais e floculação do material.

Na Figura 16 são mostrados os gráficos da variação de LL, LP e IP com o acréscimo da cal. Paiva (2016) obteve um resultado adverso dos demais, sendo o único que a apresentou um acréscimo nos limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade, partindo de 81%, 44% e 37% para 93%, 46% e 39% respectivamente.

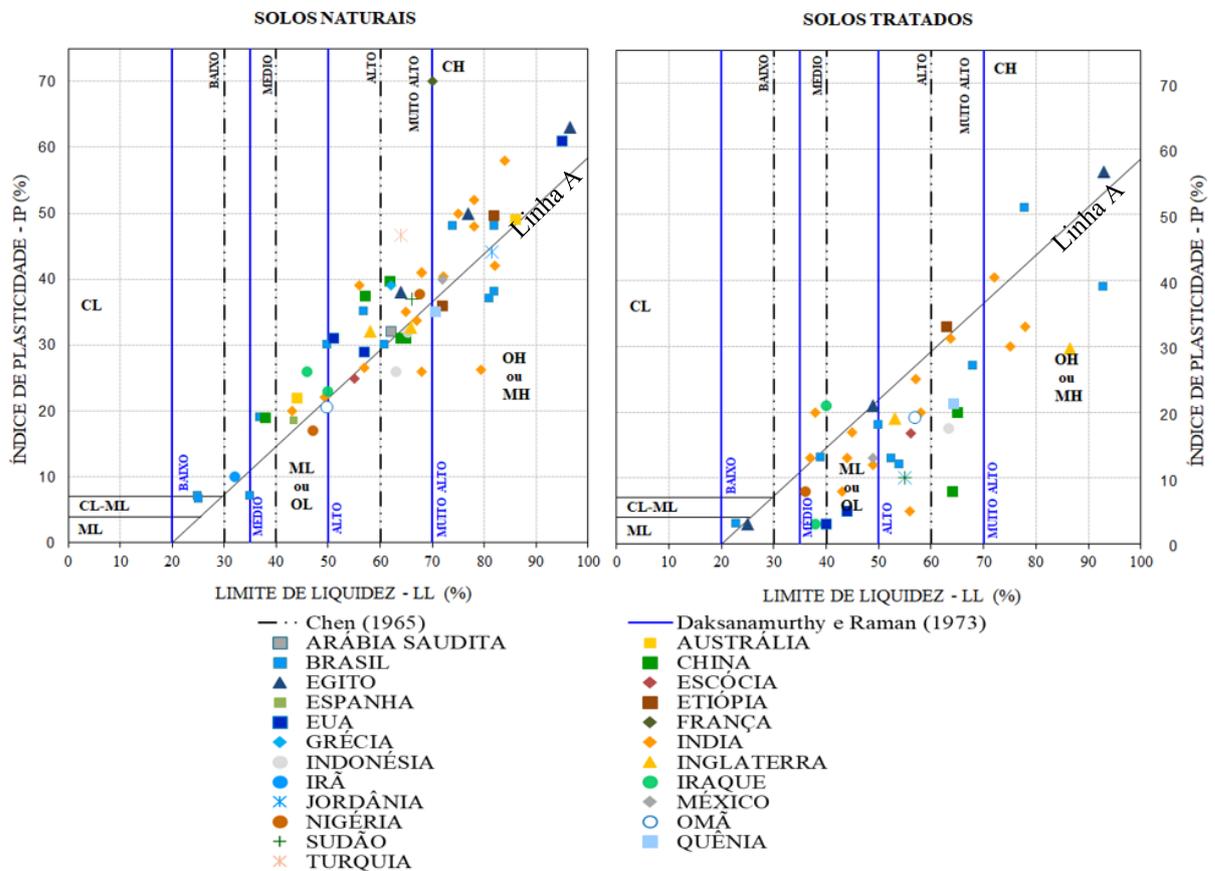
Figura 16 – Variação dos Limites de consistência com o teor de cal.



Fonte: A Autora (2023).

Avaliando as mudanças nos Limites de Atterberg, foi possível obter a carta de plasticidade dos casos antes e após o tratamento (Figura 17), sendo constatada a redução do LP e IP nos solos. Tasthan et al (2011), explica que a diminuição ocorre devido ao processo de troca catiônica na matriz do solo, pois os cátions trocados entre solo e a cal, torna o tecido das misturas mais floculado e agregado, causando a diminuição da plasticidade. Também é notável a mudança na classificação dos solos, sendo coerente com o que se espera na alteração da granulometria do solo após a mistura.

Figura 17 – Carta de plasticidade dos solos naturais e tratados com a cal.



Fonte: A Autora (2023).

Percebe-se que segundo os critérios de Chen (1965) e Daksanamurthy e Raman (1973), 20% dos casos apresentaram redução no grau de expansão. Segundo o critério de Seed et al. (1962) 19% dos casos não apresentariam mais expansão após o melhoramento realizado e 40% teriam um potencial médio, reduzindo em 5 vezes o potencial que anteriormente se classificaria com potencial “muito alto”, como é mostrado na Quadro 10. Apenas o solo analisado por Muhmed e Wanatowski (2013), aumentou o seu potencial de expansão após a mistura com a cal segundo o critério de Daksanamurthy e Raman (1973), e este aumento pode se explicar por

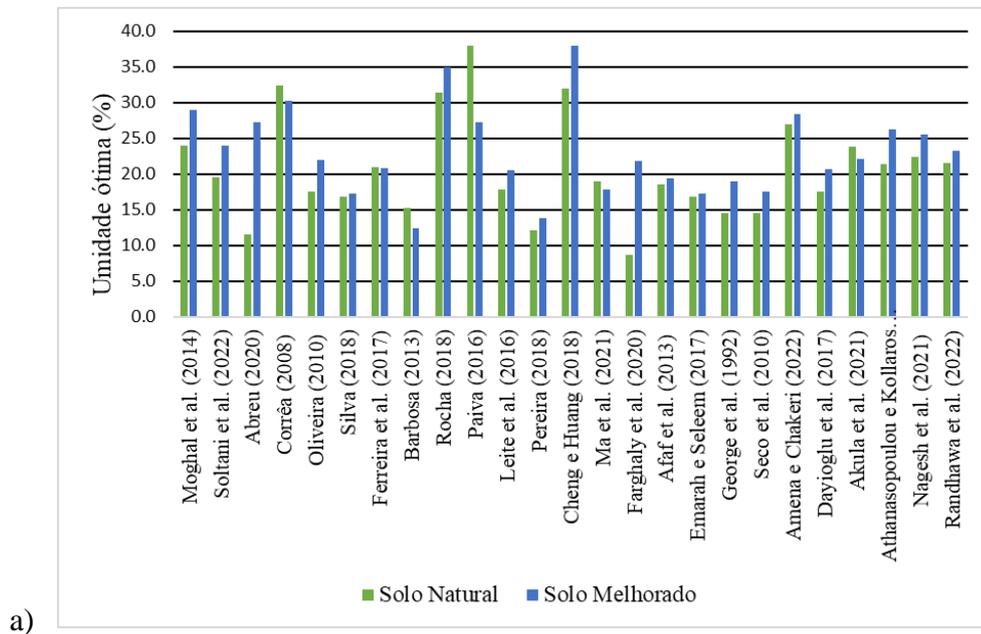
o limite de liquidez do solo ter aumentado de 66% para 86,5%, o autor justificou este resultado afirmando que os limites de liquidez de solos ricos em caulinita aumentam quando misturado com a cal.

Os valores de LL e IP dos solos expansivos naturais, em sua maioria (42 solos), encontram-se distribuídos acima da Linha A e após o melhoramento 35 destes deslocaram-se para a posição abaixo da Linha A. Isto é devido em especial pela diminuição do IP com a adição da cal, como comentado anteriormente.

4.2.3 Compactação

Nas Figuras 18 (a), (b) e 19 (a), (b), são exibidos os resultados obtidos quanto as umidades ótimas e densidades seca máxima dos 52 casos em que fizeram a análise destes parâmetros, representando 65% dos casos avaliados nesta pesquisa. Após a mistura com a cal 75% dos estudos obtiveram um aumento da umidade ótima e 76% apresentaram uma redução da densidade seca máxima.

Figura 18 – Umidade Ótima dos solos naturais e melhorados (a) e (b).



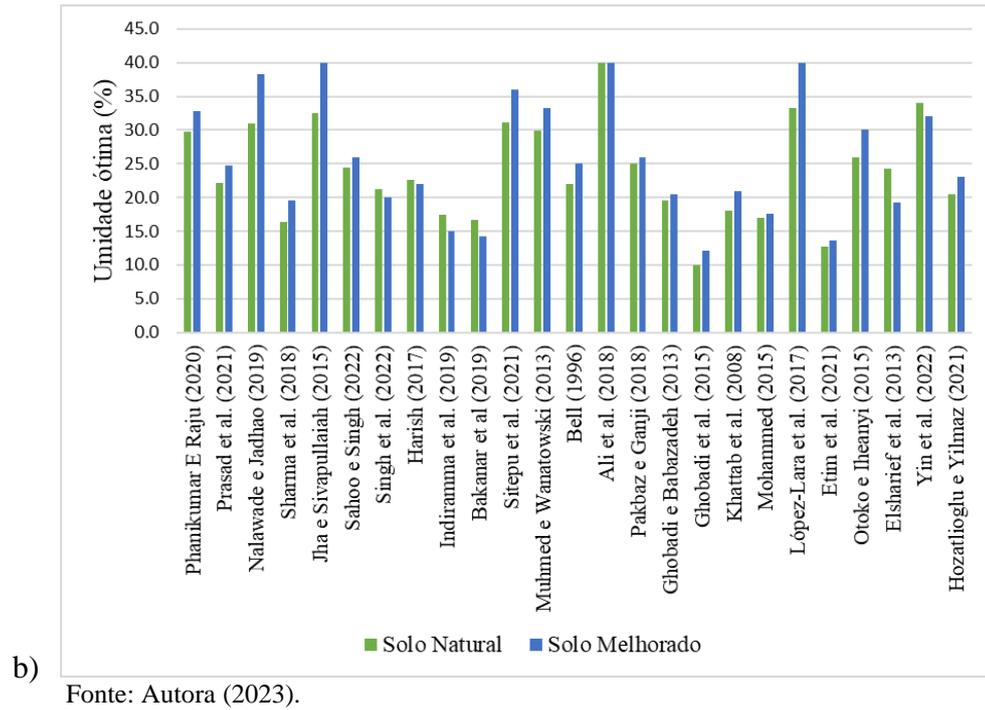
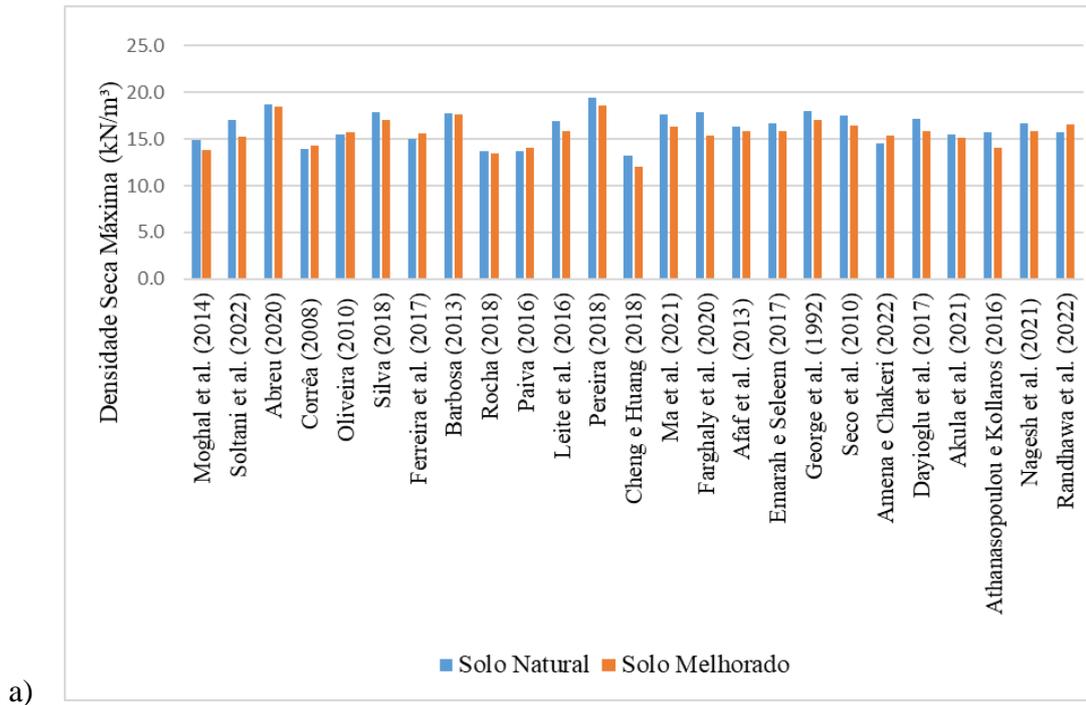
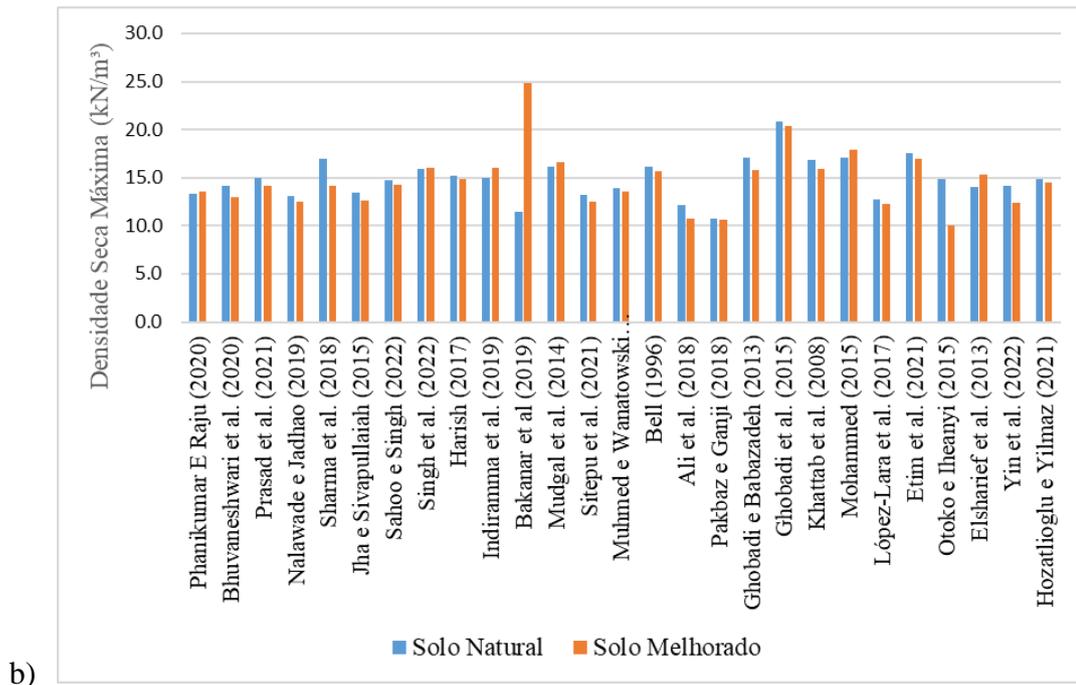


Figura 19 – Densidade Máxima dos solos naturais e melhorados (a) e (b).



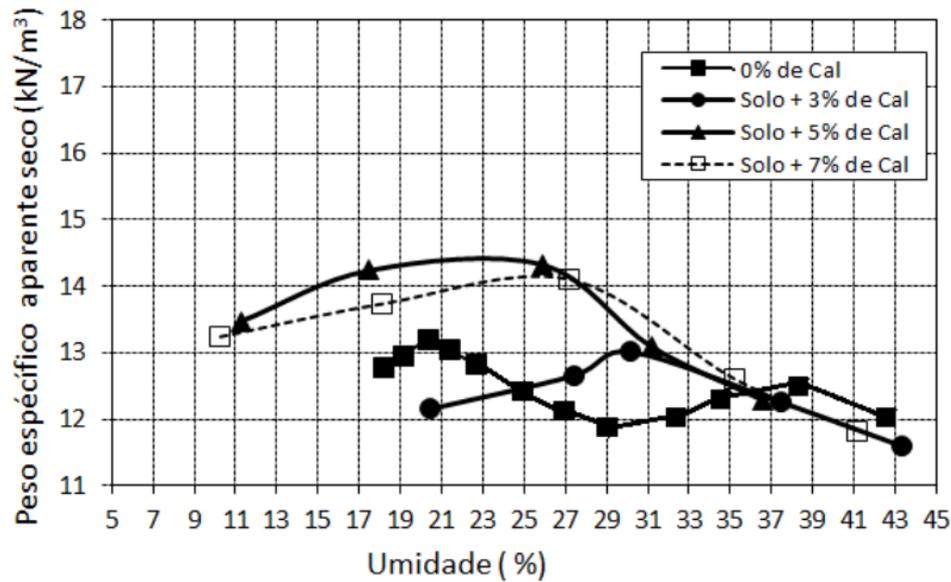


Fonte: Autora (2023).

Essa observação é comum de ocorrer quando os solos recebem a cal hidratada durante o ensaio. De acordo com Lovato (2004) à medida que o solo recebe a cal e determinada quantidade de água, é gerada a floculação de forma mais rápida, do que na ausência do fluido. E por isso, o número de vazios na mistura é aumentado e a composição necessitará de uma maior quantidade de água para que seja realizada a compactação. O solo em que apresentou o maior aumento em relação a umidade do solo foi avaliado por Abreu (2020), que cresceu de 11,5% para 27,3%. O autor estudou o solo brasileiro da cidade de Cajazeiras no estado da Paraíba, para o SUCS, o solo é um silte argiloso inorgânico com baixa plasticidade ou uma areia fina siltosa (ML).

Quanto a massa específica, apesar de mostrar uma tendência a redução na adição cal, a diferença é insignificativa, sendo a média entre os casos inferior a 0,37 kN/m³. Essa predisposição está diretamente relacionada ao teor de cal utilizado. Pode-se evidenciar o solo de Ipojuca, estudado por Paiva (2016), que ao teor de 7% de cal teve um resultado inverso da maioria quando comparado ao solo natural, sua umidade ótima diminuiu de 38% para 27,2% e a densidade máxima aumentou de 13,7 kN/m³ para 14,1 kN/m³, como mostra a Figura 16, mas nota-se que umidade ótima decresceu com o acréscimo do teor de cal até 5% e cresce quando o teor de cal aumenta para 7% (Figura 20).

Figura 20 – Curva de compactação do solo natural e das misturas solo-cal do município de Ipojuca.



Fonte: Paiva (2016).

Quando à redução da umidade ótima, pode-se associar ao aumento dos cátions intercambiáveis fornecidos pelo cálcio (Ca^{++}) e à coagulação simultânea das partículas de argila. À medida que o solo coagula, mais agregados se desenvolvem na matriz do solo, levando à diminuição da capacidade de retenção de água. Isso, por sua vez, resulta na redução da umidade ótima e no aumento do peso específico máximo.

Conforme a Quadro 11, é perceptível a inviabilidade de determinar uma faixa comum de umidade ótima e densidade dos solos expansivos e para sua melhora. Os valores de máximos e mínimos tem uma discrepância grande, tornando o desvio padrão e a variância altos para a precisão necessária para o estudo geotécnico.

Quadro 11 – Estatística dos solos estudados (Umidade ótima e Densidade Seca máxima).

	Umidade Ótima (%)		Densidade Seca Máxima (kN/m^3)	
	Solo Natural	Solo Melhorado	Solo Natural	Solo Melhorado
Média	22,95	24,28	15,48	15,18
Máximo	40,50	40,00	20,84	24,85
Mínimo	8,71	12,10	10,79	10,00
Desvio Padrão	7,34	7,72	2,01	2,46
Variância	53,10	58,45	16,56	3,98

Fonte: A Autora (2023).

4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

4.3.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

Para a análise do melhoramento do solo expansivo a definição do pH pode ser um aliado, já que de acordo com o método de Eades e Grim (1966), o teor mínimo de cal a ser incorporado ao solo é estabelecido quando o pH do solo, medido em água, atinge ou ultrapassa o valor de 12,42 após uma hora da mistura, uma vez que esse pH é fundamental para desencadear as reações pozolânicas necessárias. Os trabalhos de Maubec (2010), Corrêa (2008), Silva (2018), Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013), Paiva (2016), Mahedi et al. (2020), Akula et al. (2021), Al-Mukhtar et al. (2010) Sitepu et al. (2021), Zukri (2013) e Muhmed e Wanatowski (2013), consideraram este método para avaliar o teor mínimo a ser utilizado no melhoramento.

Sharaby et al. (2021), Thyagaraj et al. (2012) e Otoko e Iheanyi (2015) fizeram avaliação do pH do solo, porém não consideraram o método para estabelecer o teor mínimo de cal. Ao todo 15 trabalhos fizeram análise do pH do solo antes e após o melhoramento químico, como exhibe a Quadro 12, representando 18,75% dos casos estudados nesta pesquisa.

Quadro 12 – Potencial hidrogeniônico (pH) dos solos antes e após melhoramento.

Referência	Teor de Cal (%)	pH	
		Solo Natural	Solo Melhorado
Maubec (2010)	2	8,80	12,7
Corrêa (2008)	4	5,50	9,3
Silva (2018)	13	7,49	12,4
Ferreira et al. (2017)	5	4,93	12,4
Barbosa (2013)	3	8,60	11,9
Paiva (2016)	3	5,09	12,4
Sharaby et al. (2021)	12	7,45	10,0
Mahedi et al. (2020)	3	5,70	12,4
Akula et al. (2021)	5	7,00	11,0
Al-Mukhtar et al. (2010)	4	10,6	12,4
Thyagaraj et al. (2012)	4,2	8,00	11,8
Sitepu et al. (2021)	5	8,10	13,0
Muhmed e Wanatowski (2013)	2	5,43	12,4
Zukri (2013)	4	4,00	12,0
Otoko e Iheanyi (2015)	6	8,00	9,0

Fonte: A Autora (2023).

Considerando a divisão do solo em função do pH de Guimarães (2002) (Quadro 13), 40% dos solos listados classificam-se como alcalinos, na condição natural, significando a maior parcela da análise. Em segunda posição a classificação ácida, representa 26,6% dos solos avaliados.

Dos 12 estudos citados anteriormente que fizeram avaliação do teor mínimo da cal pelo método de Eades e Grim (1966), dois deles mostraram que o teor ideal de cal a ser utilizado divergia do valor mínimo requerido. São os casos de Corrêa (2008) e Silva (2013), de acordo com o método, o solo de Florianópolis/PR estudado por Corrêa (2008) necessitaria de pelo menos 4% de cal, enquanto o solo de Agrestina/PE analisado por Silva (2013), demandaria 13% do defloculante para alcançar os 12,4 de Potencial hidrogeniônico, no entanto os solos foram estabilizados com as misturas de 2% e 9% de cal, respectivamente. No caso do solo de Ipojuca estudado por Paiva (2016), com apenas 3% de cal foi alcançado o pH para estabilização, no entanto os resultados obtidos por outros parâmetros necessitaram um teor maior. Evidenciando a necessidade de analisar outros aspectos do solo para escolha do teor ideal.

Quadro 13 – Classificação dos solos relativos ao pH.

pH	Classificação
$\text{pH} \leq 4,3$	Extremamente ácido
$4,3 < \text{pH} < 4,4$	Fortemente ácido
$5,4 < \text{pH} < 4,5$	Ácido
$5,5 < \text{pH} < 5,9$	Moderadamente ácido
$6,0 < \text{pH} < 6,5$	Levemente ácido
$6,6 < \text{pH} < 7,3$	Neutro
$7,4 < \text{pH} < 8$	Alcalino
$\text{pH} > 8,0$	Fortemente Alcalino

Fonte: Guimarães (2002).

Após a mistura com a cal todos os solos alteraram seu pH para fortemente alcalino, mesmo os casos em que não consideraram o método de Eades e Grim (1966) para estabelecer o teor mínimo de cal utilizado.

Foi percebido que o pH do solo é diretamente proporcional ao teor de cal inserido, pois à medida que o teor é aumentado o pH também cresce. A Quadro 14 foi elaborada por Barbosa (2013), e esta tendência fica clara. A Autora determinou o pH em H₂O, em solução normal de

KCl e em solução de 0,01M de CaCl_2 , sendo o maior valor obtido em H_2O . Os gráficos elaborados por Sharaby et al. (2021) e Paiva (2016) também mostram essa propensão, como mostra as Figuras 20 (a) e (b).

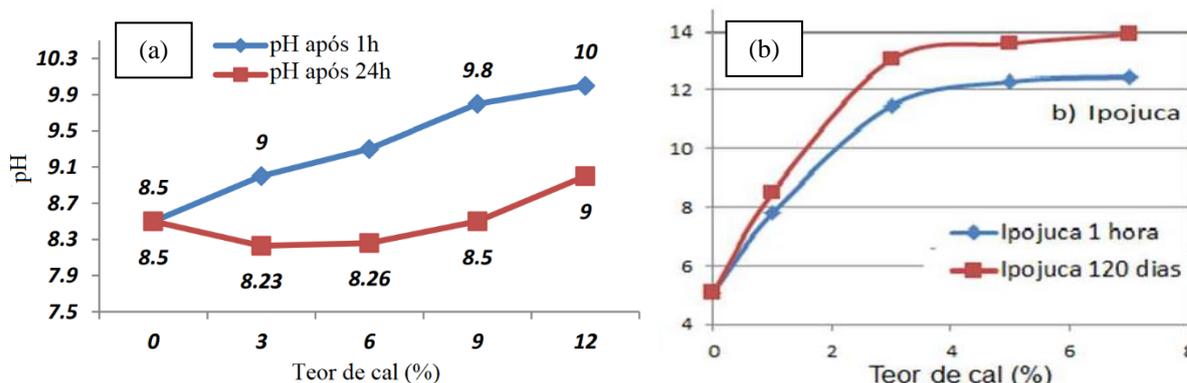
Quadro 14 – Valores de pH encontrados na amostra de solo (após 1 hora de cura).

Amostra	pH em H_2O	pH em KCl	pH em CaCl_2	RESULTADO
Solo sem Cal	8,6	6,45	7,92	Fortemente Alcalino(*)
Solo + 1% de Cal	11,37	10,09	10,95	Fortemente Alcalino
Solo + 3% de Cal	12,43	12,34	10,95	Fortemente Alcalino
Solo + 5% de Cal	12,52	12,44	12,42	Fortemente Alcalino
Solo + 7% de Cal	12,55	12,5	12,48	Fortemente Alcalino

* Exceto o pH em KCl no solo sem cal que é considerado levemente ácido.

Fonte: Barbosa (2013).

Figura 21 – pH do solo após mistura solo-cal, (a) Abou Korkas, Egito, (b) Ipojuca, Brasil.



Fonte: Adaptado de Sharaby et al. (2021) e Paiva (2016).

Ao analisar as Figuras 21 (a) e (b), é possível notar a diferença no comportamento do pH dos solos. O estudo de Sharaby et al. (2021) demonstra uma queda no pH após 24 horas, enquanto no solo examinado por Paiva (2016), o pH aumenta ao longo de 120 dias. Essas variações podem ser explicadas pelo efeito da aplicação de cal ao solo, que instantaneamente altera o pH devido ao desencadeamento das reações químicas imediatas, relativas a troca catiônica. Após 24 horas, a intensidade dessas reações químicas tende a diminuir, o que pode resultar em uma redução subsequente no valor do pH. Com o passar dos dias, entram em ação reações químicas mais lentas (pozolânicas). Esses processos contribuem para o aumento gradual do pH do solo ao longo do tempo. Portanto, a oscilação no pH do solo observada nos estudos dos autores pode ser atribuída às diferentes fases das reações químicas desencadeadas pela aplicação de cal.

4.3.2 Capacidade de troca catiônica

Corrêa (2008), Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013), Paiva (2016) e Nagesh et al. (2021), realizaram a análise da capacidade de troca catiônica dos solos antes e após melhoramento químico com a adição da cal (Quadro 15).

Quadro 15 – CTC dos solos antes e após melhoramento químico com a adição da cal.

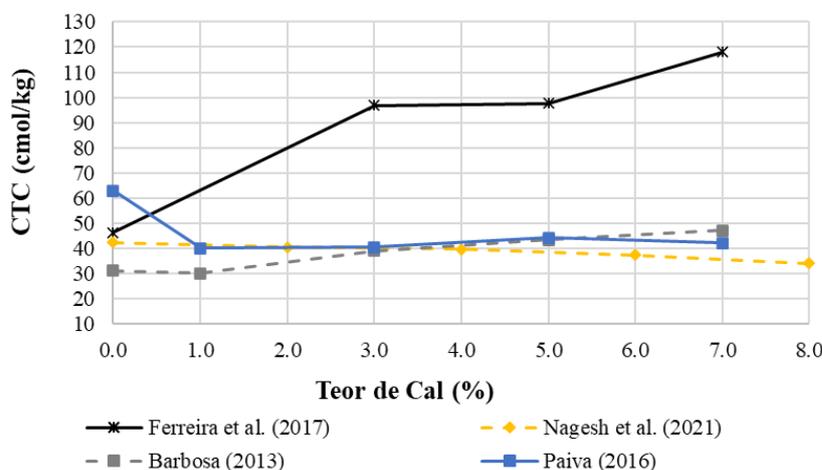
Referência	Teor de Cal (%)	CTC (cmol _c /kg)	
		Solo Natural	Solo Melhorado
Corrêa (2008)	2	12,12	17,86
Ferreira et al. (2017)	5	46,30	97,60
Barbosa (2013)	7	31,13	47,13
Paiva (2016)	7	63,00	42,20
Nagesh et al. (2021)	6	42,33	37,44

Fonte: A Autora (2023).

A EMBRAPA designa que solos com valor igual ou superior a 27 cmol_c/kg apresenta atividade alta e para aqueles com valor inferior, atividade baixa. Com base nessas referências os solos estudados apresentaram uma alta Capacidade de Troca Catiônica, com exceção do solo avaliado por Corrêa (2008), fato que não o desqualifica como solo expansivo, pois o solo apresenta alta liquidez e plasticidade.

Na Figura 22 é mostrado o gráfico com a trajetória do valor da CTC ao adicionar a cal nos solos. Os solos avaliados por Paiva (2016) e Nagesh et al. (2021) apresentaram uma redução da CTC após o incremento da cal de 63 cmol_c/kg para 44,2 cmol_c/kg e de 42,3 cmol_c/kg para 37,44 cmol_c/kg aos teores de estabilização de 5% e 6% respectivamente.

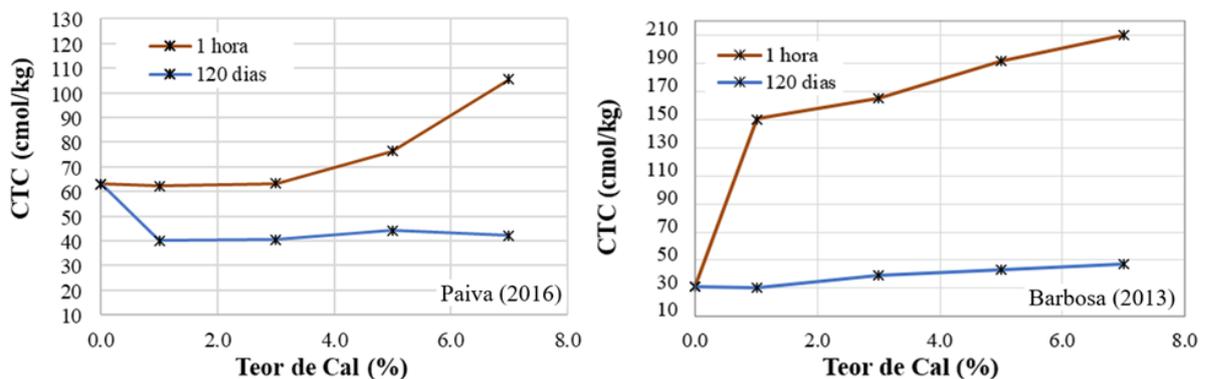
Figura 22 – Evolução da CTC com o aumento do teor de cal.



Fonte: A Autora (2023).

Há uma grande diferença nos valores apresentados por Ferreira et al. (2017) e os outros autores, e esta discrepância se justifica através do período de cura, pois os resultados apresentados pelo autor são relativos a 1h de cura após a mistura e os demais apresentam seus resultados após 120 dias. A Figura 23, apresenta os gráficos com o comparativo dos solos avaliados por Paiva (2016) e Barbosa (2013), com 1h e 120 dias de cura.

Figura 23 – Evolução da CTC com o aumento do teor de cal e tempo de cura.



Fonte: A Autora (2023).

Verifica-se que houve um aumento significativo da capacidade de troca catiônica a curto prazo, devido a adição de cal ao solo, evidenciando o desencadeamento das reações químicas imediatas (a troca catiônica e a floculação) para posteriormente as reações químicas lentas (cimentação e carbonatação). Após os 120 dias de cura, os solos analisados apresentaram comportamentos mais brandos, em aumento ou redução da CTC. Este comportamento condiz com o processo de reações lentas de interação do argilomineral quando misturado com a cal.

4.3.3 Óxidos

Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013), Paiva (2016), Mutaz e Dafalla (2014) e Sharaby et al. (2021), apresentaram resultados quanto aos óxidos dos solos antes e após o melhoramento, significando 6,25% dos casos. Na Quadro 16, são mostradas as concentrações de R_2O_3 e dos dez óxidos mais abundantes: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MnO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 e P_2O_5 , dos solos naturais e tratados com os respectivos teores de estabilização.

Quadro 16 – Valores das porcentagens de óxidos e Perda ao fogo nas misturas solo-cal.

Referência	Ferreira et al. (2017)		Barbosa (2013)		Paiva (2016)		Mutaz e Dafalla (2014)		Sharaby et al. (2021)	
	Natural	Solo + 5% de cal	Natural	Solo + 7% de cal	Natural	Solo + 7% de cal	Natural	Solo + 8% de cal	Natural	Solo + 12% de cal
R ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	9,26	11,10
SiO ₂	65,54	62,94	60,75	56,86	39,45	36,8	17,30	26,00	62,00	60,00
Al ₂ O ₃	15,27	14,64	12,97	11,96	21,17	19,95	6,30	9,20	0	0
Fe ₂ O ₃	5,05	4,72	4,39	3,96	18,62	16,76	0	0	0	0
MgO	0,68	0,72	0,75	0,85	1,28	1,28	0	0	1,20	2,00
MnO	0	0	0,06	0,05	0,14	0,13	0	0	0	0
CaO	0,14	2,80	2,93	6,80	0,14	4,30	0,90	4,40	6	10,60
Na ₂ O	0	0	0,94	0,88	0	0	0	0	0	0
K ₂ O	1,77	1,70	2,24	2,10	0,21	0,19	2,20	3,30	0	0
TiO ₂	0,87	0,83	0,82	0,76	4,74	4,24	0	0	0	0
P ₂ O ₅	0,02	0,02	0,02	0,02	0,31	0,29	0	0	0	0
PF	11,88	13,00	10,37	11,85	15,83	16,73	0	0	0	0
Total	101,22	101,37	96,24	96,09	101,89	100,67	26,7	42,90	78,46	83,70

Fonte: A Autora (2023).

Com exceção do solo de Al-Qatif (Arábia Saudita), estudado por Mutaz e Dafalla (2014), a adição de cal aos solos causou a redução dos óxidos de silício, alumínio, ferro, sódio, potássio e dióxido de titânio, e o acréscimo do óxido de magnésio. E para todos os solos ocorreu um aumento significativo no óxido de cálcio, sendo um resultado esperado pelo incremento do óxido de cálcio da cal.

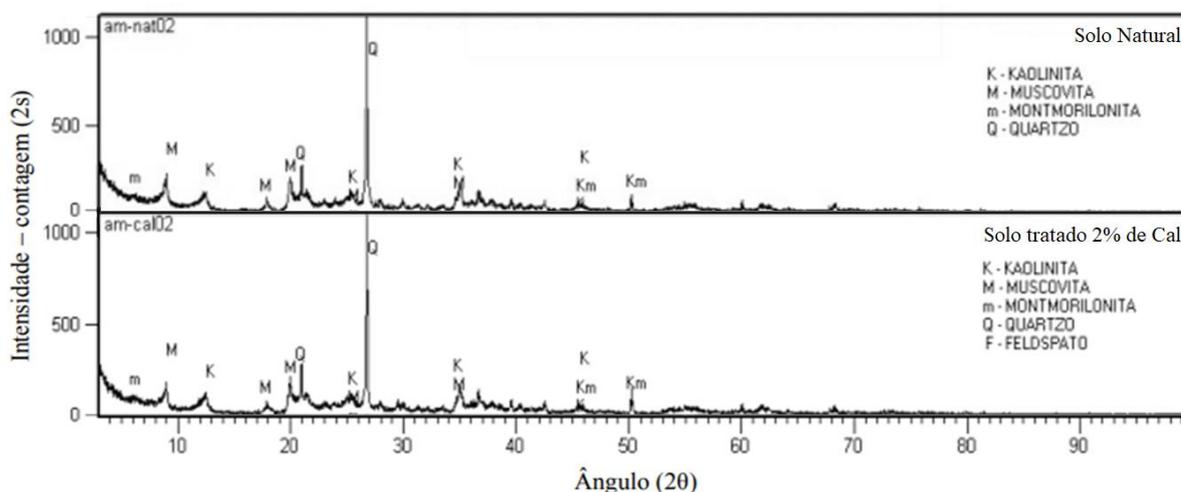
4.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Treze pesquisas avaliaram a mineralogia dos solos naturais e tratados com a cal, por meio de testes de difratometria de raios-X, termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG). São estes: Corrêa (2008), Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013), Paiva (2016), Al-Mukhtar et al. (2010), Mutaz e Dafalla (2014), Moghal et al. (2015), Bhuvaneshwari et al. (2020), Akula et al. (2021), Sharma et al. (2018), Jha e Sivapullaiah (2015), Al-Mukhtar et al. (2012), Dash e Hussain (2012), Hozatlioglu e Yilmaz (2021).

O solo natural de Florianópolis estudado por Corrêa (2008) apresentou na difratometria por raios-X os minerais de quartzo, caolinita, caolinita-montmorilonita, muscovita e montmorilonita. Após misturado a um teor de 2% de cal pouco foi modificado, o teste apontou os minerais de quartzo, caolinita, caolinita-montmorilonita, muscovita, mica e clorita-vermiculita-montmorilonita. De acordo com os resultados, não se observou a presença do

carbonato de cálcio. O autor explica que o fato pode ser explicado pela pequena quantidade de cal adicionada nas amostras, causando apenas as reações primárias. Seria esperado a formação do carbonato de cálcio e o consumo de caolinita, pois a formação de novas fases é resultante da reação da cal com produtos amorfos (sílica e alumina) do solo e, quando há a presença destes, a cal só irá atacar a estrutura cristalina após tê-lo consumido. Na Figura 24 são mostradas as imagens obtidas no teste.

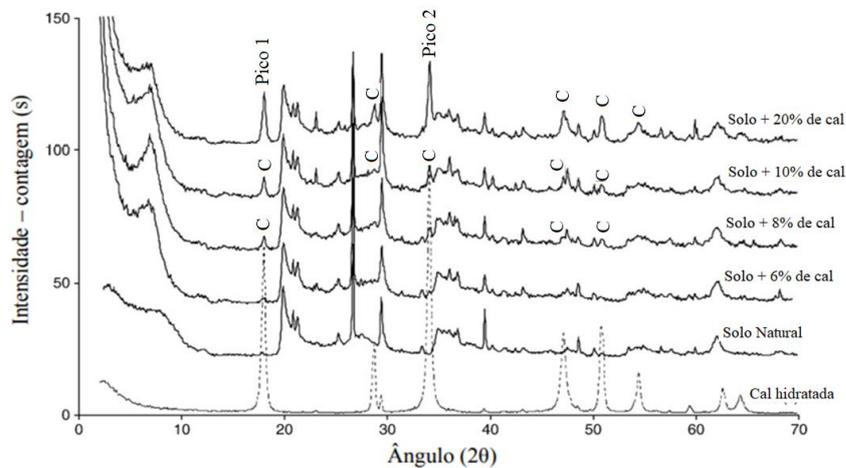
Figura 24 – Difratomogramas identificados no solo natural e tratado com 2% de cal.



Fonte: Adaptado de Corrêa (2008).

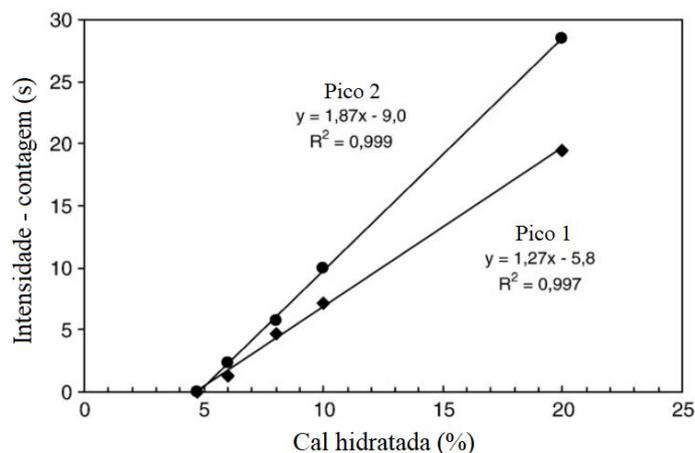
Em sua pesquisa, Al-Mukhtar et al. (2010) mostra os padrões de difração de raios-X do solo não tratado e tratado após um dia com 6, 8, 10 e 20% de cal (Figura 25). Os reflexos para cal (não consumida) estavam presentes em toda as amostras, com as intensidades características de picos com a quantidade de cal adicionada. A Figura 26, mostra a relação entre as intensidades dos dois picos principais do calcário, em 2θ iguais a $18,0$ e $34,1^\circ$ (picos 1 e 2 respectivamente na Fig. 25), com a quantidade de cal adicionada. Estatisticamente, há uma relação linear altamente significativa, com fator de correlação de 0,99 e a quantidade média de cal necessária para o curto termo da reação é de cerca de 4,7%.

Figura 25 – Difração de raios-X da cal, solo não tratado e tratado com 6, 8, 10 e 20% após 1 dia de cura.



Fonte: Adaptado de Al-Mukhtar et al. (2010).

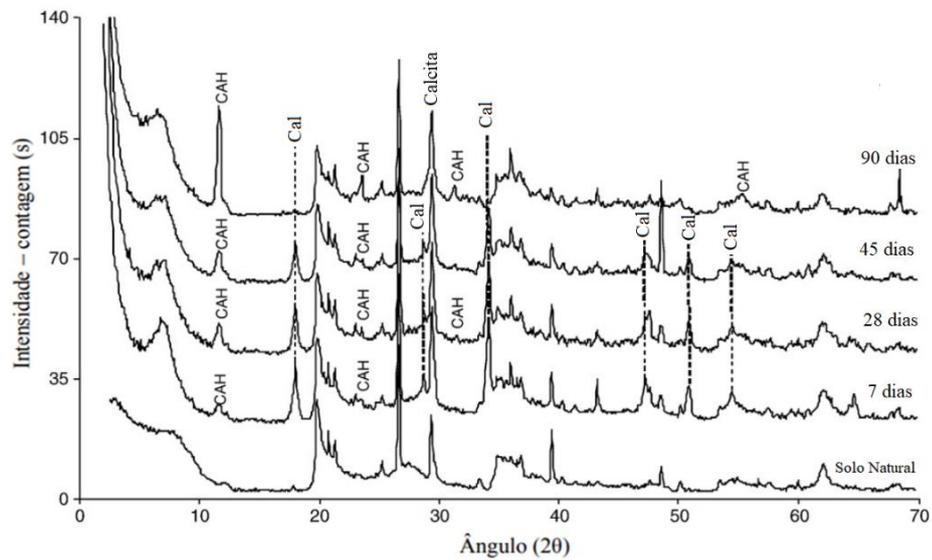
Figura 26 – Intensidades dos principais picos de cal não consumida após um dia diferentes percentuais de cal.



Fonte: Adaptado de Al-Mukhtar et al. (2010).

O autor realizou o teste do solo com 20% de cal durante 7, 28, 45 e 90 dias de cura (Figura 27) e os resultados mostram novas reflexões no espaçamento de todas as amostras tratadas. A intensidade dos picos aumentou ao longo do tempo de cura. Essas reflexões correspondem ao carbonato de cálcio (CAH) que formou $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (02-0083, J.C.P.D.S). Esse resultado demonstra que a quantidade do produto da reação aumenta com tempo de cura e que as reações pozolânicas começam imediatamente. O consumo de cal adicionada demonstra o progresso da reação entre cal e argila para produzir um novo mineral (Hidrato de Aluminato de Cálcio). Os padrões de difração de raios-X indicam que as intensidades de reflexões características da caulinita das camadas de argila, diminui com o tratamento com cal.

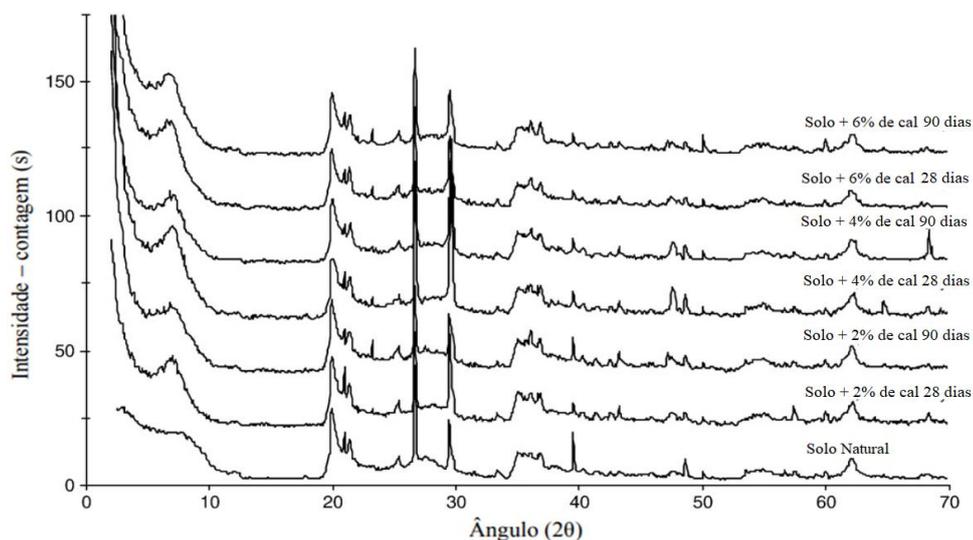
Figura 27 – Difração de raios-X de solo não tratado e tratado com 20% de cal ao longo do tempo de cura.



Fonte: Adaptado de Al-Mukhtar et al. (2010).

A Figura 28, mostra os padrões obtidos do solo tratado com adição de 2, 4 e 6% de cal, curado por 28 dias e 90 dias. No entanto, nenhum destes difratogramas mostra os principais picos de cal. Segundo o autor, isto pode ser explicado pelo fato de que todo o cálcio da cal adicionado ser adsorvido pelas partículas de esmectita para a troca catiônica. Ele observou que a percentagem mínima de cal para esta reação é de cerca de 5%. Este resultado confirma o que Corrêa (2008) comenta em seu estudo, que o baixo teor de cal utilizado justifica a ausência da formação do carbonato de cálcio.

Figura 28 – Difração de raios-X de solo não tratado e tratado com 2, 4 e 6% de cal, curado por 28 dias e 90 dias.

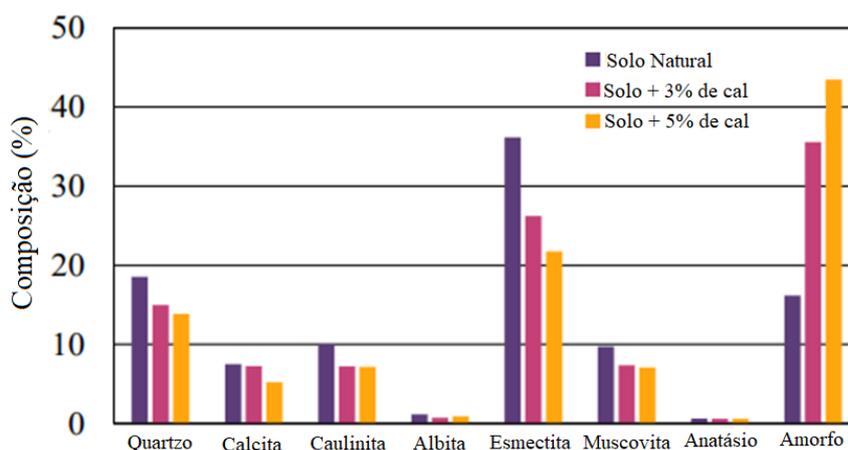


Fonte: Adaptado de Al-Mukhtar et al. (2010).

Resultados semelhantes ao do autor foram encontrados por Mutaz e Dafalla (2014), Moghal et al. (2015), Sharma et al. (2018), Al-Mukhtar et al. (2012), Dash e Hussain (2012), onde ao aumento do teor de cal e do tempo as reações foram mais evidentes e os minerais expansivos foram neutralizados pelas reações pozolânicas.

Akula et al. (2021), também utilizou a difração de raios-X para investigar a reatividade de minerais e o desenvolvimento de produtos pozolânicos. A avaliação quantitativa (Figura 29) indica a presença dos minerais no solo, incluindo esmectita, albita, caulinita, quartzo e muscovita. Vê-se que o solo tratado apresenta uma redução significativa no teor de esmectita, quartzo e caulinita. A Albita e muscovita não mostraram reatividade significativa devido à estabilidade relativamente alta do feldspato e da mica grupo de minerais. O autor afirma que em regiões de pH alcalino ($\text{pH} > 10$), a estabilidade dos argilominerais reduz significativamente causando dissolução parcial e posterior liberação de alumina e silício da estrutura argilosa, fato evidenciado no Item 4.3.1. Assim como visto nos casos anteriores, neste solo, a cal também reagiu com a alumina e o silício para formar os produtos pozolânicos C-S-H e C-A-H, respectivamente. A formação destes produtos também apresentou um aumento proporcional à dosagem de cal.

Figura 29 – Avaliação quantitativa dos minerais do solo após Difração de raios-X.

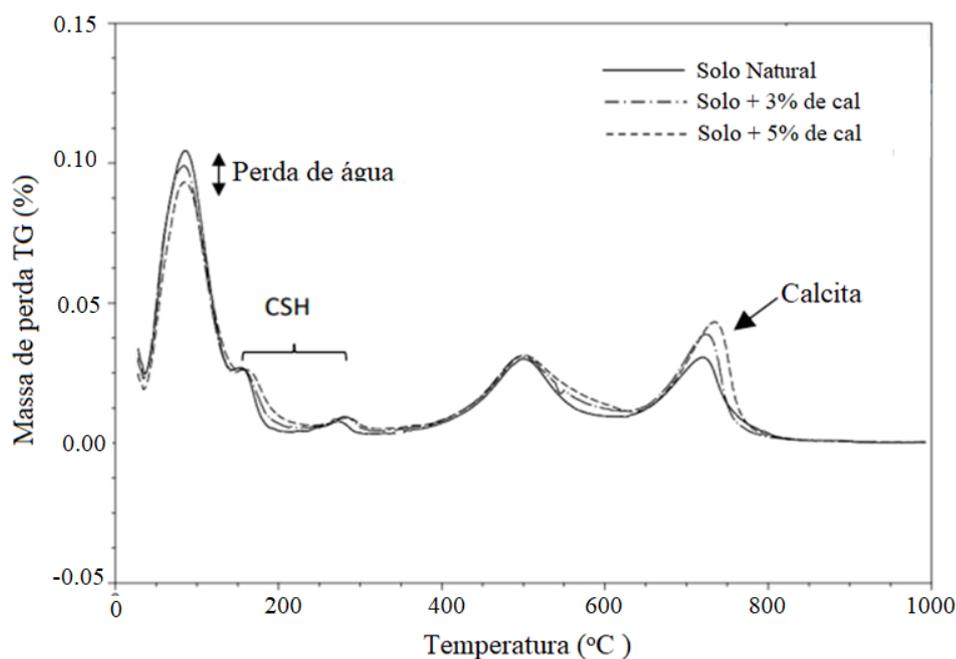


Fonte: Adaptado de Akula et al. (2021).

Para validar qualitativamente a modificação mineralógica e estabilização do solo tratado, Akula et al. (2021), realizou a análise termogravimétrica como técnica complementar. Os picos observados no diferencial termograma (Figura 30) foi utilizado para identificar as alterações mineralógicas. O pico em 100°C corresponde a perda de água da camada intermediária de esmectita. Percebe-se que as amostras tratadas têm um pico mais baixo a 100°

C em comparação com a amostra não tratada, indicando que a amostra tratada tem menos água intercalar devido a inserção de íons de cálcio na superfície da esmectita e subsequente redução na dupla camada de água. O pico de perda de peso devido à remoção de água do C-S-H ocorre de 50°C a 600°C. Os picos de referência para C-S-H indicam o pico endotérmico mais alto a 150°C.

Figura 30 – Avaliação qualitativa dos minerais do solo - DTG.

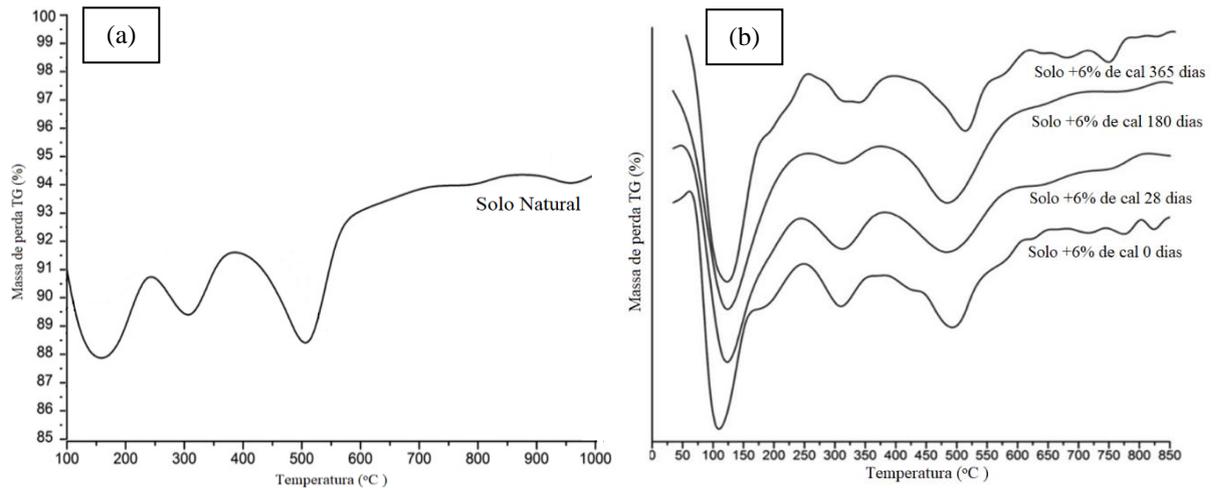


Fonte: Adaptado de Akula et al. (2021).

Segundo o pesquisador, o pico adicional a 450°C corresponde à desidroxilação (remoção de OH) de caulinita e esmectita. O pico em 700°C pode ser atribuído à presença de calcita (pico de descarboxilação).

No caso de Jha e Sivapullaiah (2015), as curvas do DTG do solo de Belugum na Índia, tratado com 6% de cal em diferentes períodos de cura mostram três picos endotérmicos principais na faixa de 100–150 °C, 275–325 °C e 475–525 °C (Figura 31). No entanto, comparando os resultados com solo natural, as posições das bandas são alteradas e deslocadas para o lado esquerdo, confirmando a alteração dos minerais de origem e a formação de novos compostos após a adição de cal.

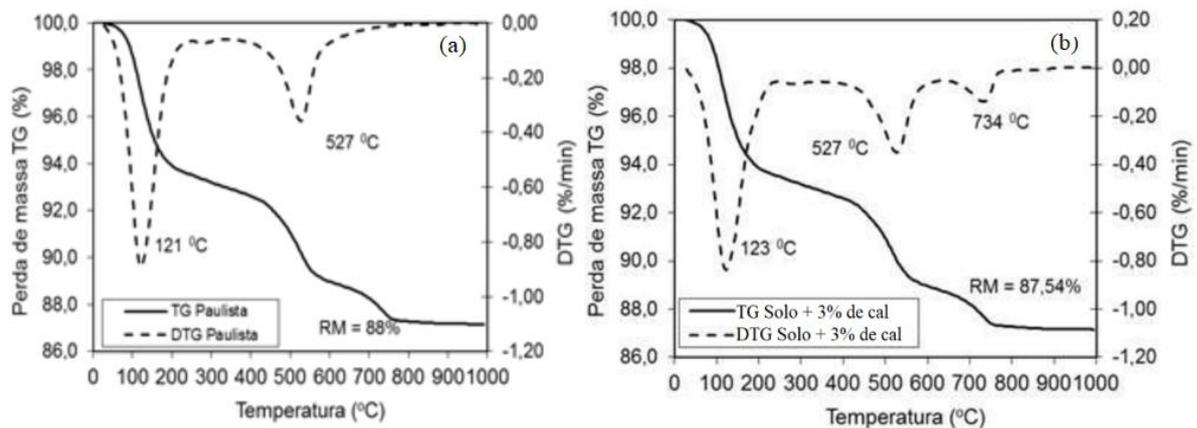
Figura 31 – Curvas DTG solo de Belgum Natural (a) e com 6% de cal (b).

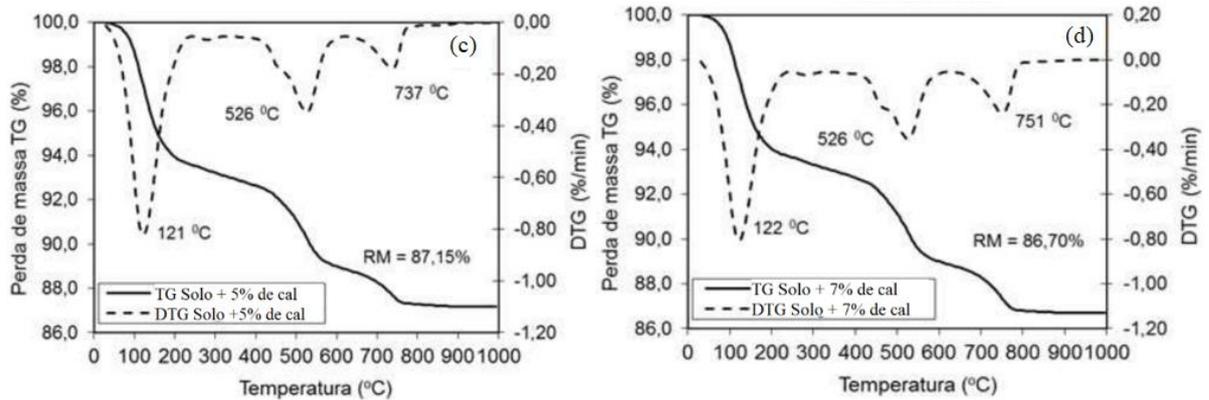


Fonte: Adaptado de Jha e Sivapullaiah (2015).

Na análise TG/DTG do solo de Paulista estudado por Ferreira et al. (2017), Figura 32 (a), o pico endotérmico intenso de perda de água ocorre entre 100°C até 250°C, e apenas a 400°C, inicia-se a reação de desidroxilação do hidróxido de esmectita, que é se completando a 700°C. Nas curvas características dos ensaios de TG/DTG do solo misturado com a cal (Figuras 32 (b),(c) e (d)), verificam-se, nas concentrações de 3, 5 e 7% a perda da água na temperatura por volta de 120°C. Na temperatura entre 400 e 650°C ocorreu um pico correspondendo à perda da hidroxila do hidróxido de montmorilonita nas três concentrações de cal e na temperatura entre 650 e 750°C houve um pico correspondente à formação de óxido de cálcio pela decomposição da calcita.

Figura 32 – Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para o solo natural (a) e com acréscimo de 3% (b), 5% (c) e 7% (d) de cal no solo de Paulista.

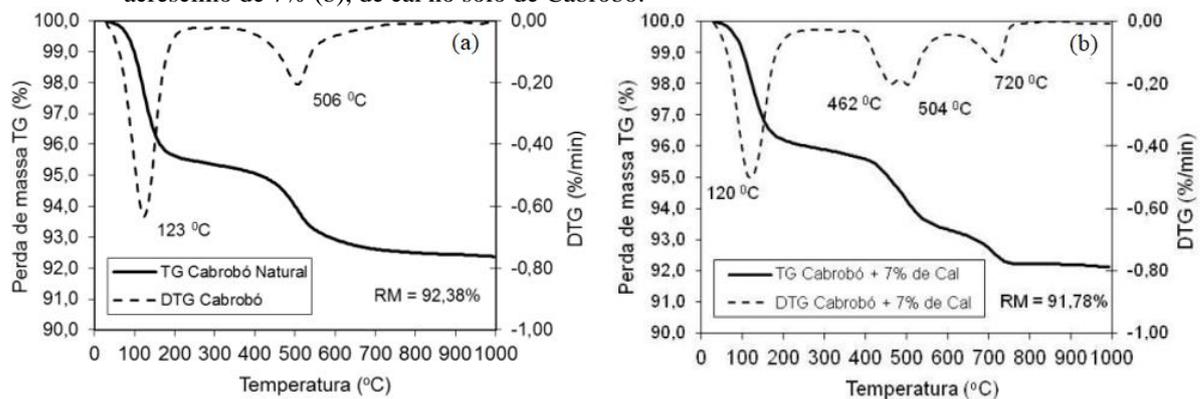




Fonte: Ferreira et al. (2017).

No Solo de Cabrobó, estudado por Barbosa (2013), as transformações térmicas da montmorilonita (Figura 33 (a)), mostra que entre 100°C até 250°C há um pico endotérmico intenso de perda de água adsorvida e a 400°C, inicia-se a reação de desidroxilação do hidróxido de montmorilonita que é completada a 700°C. Na curva referente ao solo melhorado pela cal ao teor de 7% (Figura 33 (b)) verifica-se que até a faixa de 120 °C, há perda de água, que entre 400,00 °C e 600°C vê-se os picos que representam a desidroxilação do hidróxido da montmorilonita e que entre 600°C e 800°C há a descarbonatação (processo de calcinação) da calcita.

Figura 33 – Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para o solo natural (a) e com acréscimo de 7% (b), de cal no solo de Cabrobó.

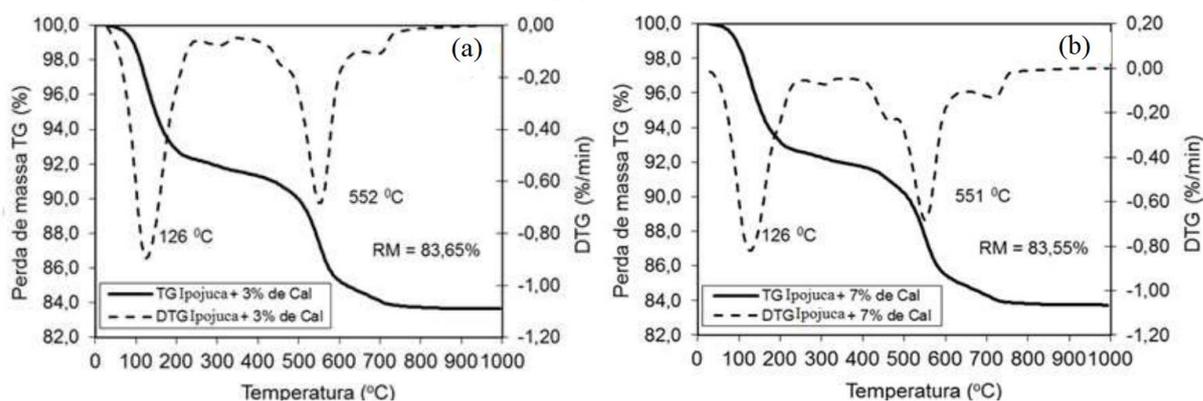


Fonte: Barbosa (2013).

Paiva (2016), encontrou um resultado muito semelhante no solo de Ipojuca após o tratamento com a cal a 7% (Figura 34 (b)), onde as variações de temperatura na montmorilonita indicam o seguinte padrão: entre 100°C e 250°C, observa-se um pico de perda de água adsorvida, caracterizado por uma intensa reação endotérmica. A partir de 400°C, começa a ocorrer a desidroxilação do hidróxido de montmorilonita, processo que se completa por volta

de 700°C. Na faixa de temperatura entre 400°C e 650°C, ocorre um pico correspondente à desidroxilação do hidróxido de montmorilonita. Por fim, na faixa de temperatura entre 650°C e 750°C, há um pico relacionado à formação de óxido de cálcio, resultante da decomposição da calcita.

Figura 34 – Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para o solo natural (a) e com acréscimo de 7% (b), de cal no solo de Ipojuca.



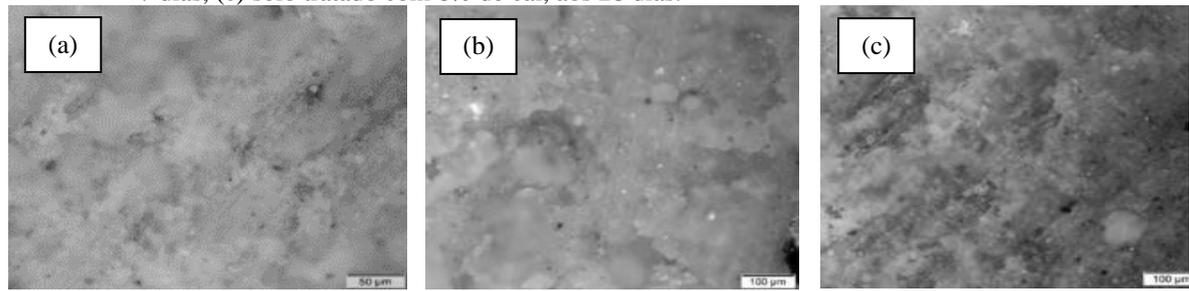
Fonte: Paiva (2016).

4.5 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As alterações na estrutura microscópica do solo desempenham um papel de grande relevância na evidenciação da melhoria das propriedades geotécnicas, tanto antes quanto depois da incorporação de cal. A magnitude dessa importância é notável, considerando que mais de 25% dos estudos selecionados para esta pesquisa enfatizaram essa análise. No total, 22 autores conduziram avaliações minuciosas dos solos, tanto na condição inicial sem adição de cal como nas misturas solo-cal, utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

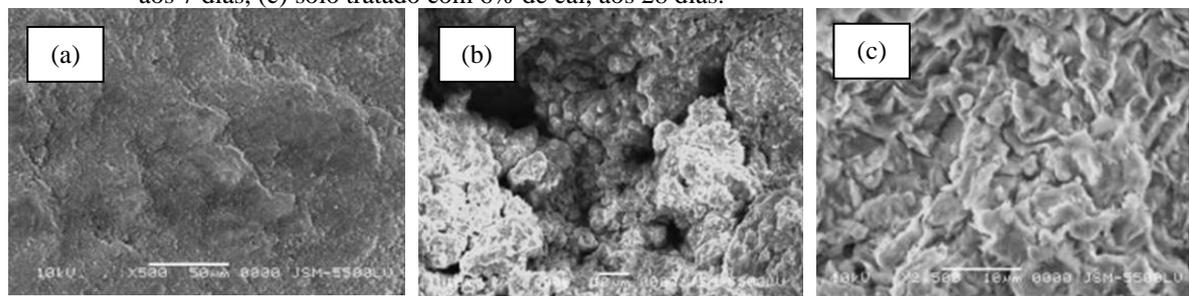
Nas Figuras 35 (a) e 36 (a), são exibidas imagens microscópicas dos solos estudados por Farghaly et al. (2020) e Afaf et al. (2013), respectivamente, em seu estado natural, revelando a organização das partículas de argila, silte e areia fina. As Figuras 35 (b) e 36 (b), apresentam as imagens microscópicas da estabilidade dos solos após 7 dias da adição de cal com o teor de 6%. É possível observar a interação da cal com a argila, resultando na formação de partículas de diferentes tamanhos e, como consequência, no aumento da porosidade dos solos.

Figura 35 – MEV solos não tratado e tratado, Al-Kawamil. (a) Solo natural. (b) solo tratado com 6% de cal, aos 7 dias, (c) solo tratado com 6% de cal, aos 28 dias.



Fonte: Farghaly et al. (2020).

Figura 36 – MEV solo não tratado e tratado, Qena - Safaga. (a) Solo natural. (b) solo tratado com 6% de cal, aos 7 dias, (c) solo tratado com 6% de cal, aos 28 dias.

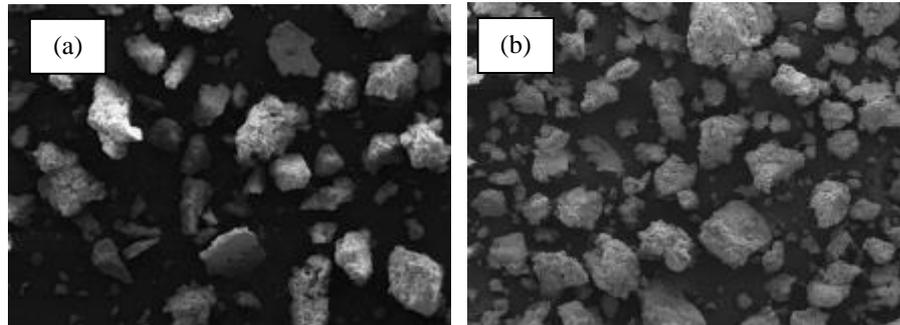


Fonte: Afaf et al. (2013).

Nas Figuras 37 (c) e 38 (c), visualiza-se uma micrografia do tratamento dos solos após 28 dias da incorporação de cal. Elas ilustram a formação de agregados devido ao processo de floculação e à criação de produtos resultantes da reação de hidratação, que revestem e cimentam as partículas do solo. Esse fenômeno conduz à redução da porosidade no sistema, por sua vez deixando o solo menos susceptível a expansão. Jha e Sivapullaiah (2015), Muhmed e Wanatowski (2013), Sharma et al. (2018), James e Pandian (2018) (B), Sahoo e Singh (2022), Khattab et al. (2008), Mudgal et al. (2014), Tran et al. (2014), Al-Mukhtar et al. (2012), Sahoo e Singh (2022), Wang et al. (2019) e Bhuvaneshwari et al. (2020), apresentaram esta mesma alteração microestrutural, após o tratamento com seus respectivos teores de cal. Formações semelhantes foram observados para vários tipos de solos expansivos na literatura, (Lemaire et al., 2013; Rajasekaran e Rao, 1997).

Nagesh et al. (2021), também utilizou 6% como teor da cal no tratamento do solo de Gulbarga, na Índia, e assim como os autores anteriores, realizou imagens da microestrutura do solo natural e melhorado aos 28 dias de cura (Figuras 37 (a) e (b)). As imagens do autor de 200 μm exibe com mais clareza a floculação dos grãos do solo após o tratamento químico.

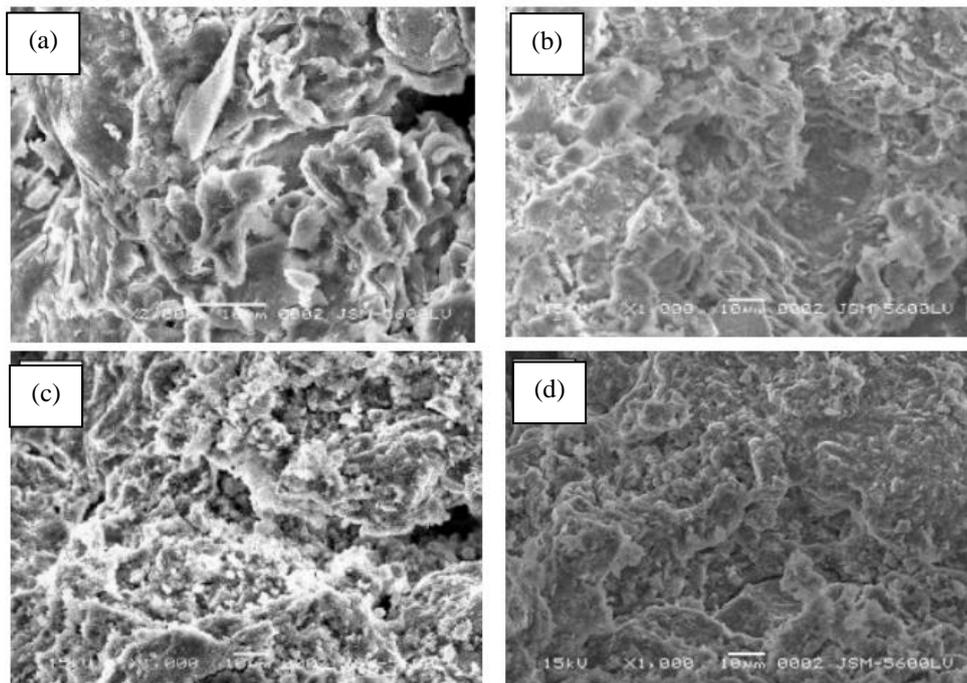
Figura 37 – MEV solo natural e tratado, Gulbarga. (a) Solo natural. (b) solo tratado com 6% de cal, aos 28 dias.



Fonte: Nagesh et al. (2021).

Ferreira et al. (2017), em sua análise fez imagens referentes ao tratamento em diferentes teores de cal, com 3%, 5% e 7%, como exhibe a Figura 38 (a), (b) e (c). Com a introdução da cal, as superfícies tornaram-se mais uniformes (planas), exibindo a formação de flocos como resultado das reações imediatas desencadeadas pela adição de cal. Percebe-se que a medida que a quantidade de cal aumenta, há modificações no tamanho das partículas argilosas em comparação com o solo não tratado. Esse fenômeno marca o início das reações da cal com a sílica presente nas estruturas dos argilominerais, bem como o início das reações pozolânicas, um resultado que também foi observado por James e Pandian (2018), Jiang et al. (2019), Paiva (2016) e Barbosa (2013).

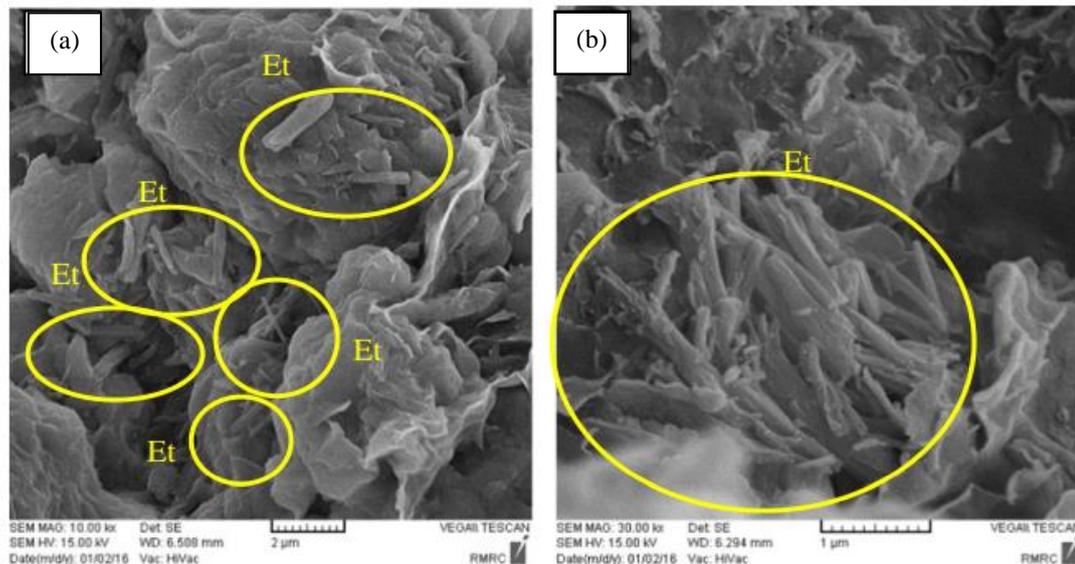
Figura 38 – MEV solo de Paulista, (a) solo natural, (b) solo +3% cal, (c) solo +5% cal e (d) solo +7% cal.



Fonte: Ferreira et al. (2017).

Contrariando os resultados obtidos pelos solos mencionados, argila sulfatada Iraniana estudada por Cheshomi et al. (2016) não obteve a formação microestrutural esperada com a aplicação da cal. A análise MEV das amostras estabilizadas em diferentes teores de cal expõem que o tratamento formou etringitas em forma de agulha e barras no material, cuja quantidade aumentou com o aumento do teor de cal (Figuras 39 (a) e (b)). A Formação de etringita na presença de cal em argilas sulfatadas também foi relatado por Wild et al. (1999). O autor explica que depois de adicionar cal à argila, Ca^{2+} e OH^- íons serão liberados com a decomposição do hidróxido de cálcio. Isso aumenta o pH ambiental e dissolve os minerais de argila. Essas reações, juntamente com a dissolução de minerais de sulfato, são fatores que afetam a formação de etringita.

Figura 39 – MEV da argila sulfatada Iraniana com formação de minerais de etringita a 7% de cal, (a) 10.000×, na (b) 30.000×.



Fonte: Cheshomi et al. (2016).

4.6 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.6.1 Expansão

A análise da expansividade dos solos foi abordada de diferentes formas pelos autores, avaliando a expansão livre, tensão de expansão e expansão por meio do teste do CBR. Dos 80 trabalhos selecionados, 45 apresentaram resultados relativos à expansão, representando 56,25% dos casos. Embora o ensaio de CBR seja utilizado para aferir a expansão do solo, em especial em infraestruturas de pavimento, há de se considerar que estes ensaios avaliam a expansão do solo compactado com estrutura diferente de campo e umidade também diferente da de campo

e próxima a umidade ótima. O que indica que é um solo diferente de campo em seu estado de tensão inicial.

4.6.1.1 Expansão “Livre”

32 trabalhos avaliaram o percentual de expansão do solo antes e após o melhoramento do solo, a Quadro 17 apresenta os resultados obtidos pelos autores.

Quadro 17 – Percentual de expansão, solos naturais e tratados.

Referência	Cal (%)	Tempo de Cura (dias)	Expansão “livre” (%)			
			Solo Natural	Solo Melhorado	Redução em vezes	Redução (%)
Hozatlioglu e Yilmaz (2021)	5	28	90,1	0,2	450.5	99.8
Dash e Hussain (2012)	9	28	97,1	0,7	134.9	99.3
Mahedi et al. (2020)	5	28	18,0	0,2	90.0	98.9
Paiva (2016)	11	28	14,0	0,3	46.7	97.9
Mavroulidou et al. (2020)	4	14	10,2	0,2	46.4	97.8
Leite et al. (2016)	6	7	20,0	1,0	20.0	95.0
Silva (2018)	9	28	20,0	0,0	20.0	100.0
López-Lara et al. (2017)	6	7	10,6	0,6	18.2	94.5
James e Pandian (2016)	7	28	100,0	8,0	12.5	92.0
Cheng et al. (2018)	6	28	15,8	1,3	12.2	91.8
Bhuvaneshwari et al. (2020)	4	3	110,0	70,0	11.0	100.0
Ferreira et al. (2017)	5	28	10,7	0,0	10.7	100.0
Al-Rawas et al. (2005)	6	30	9,4	0,0	9.4	100.0
Farghaly et al. (2020)	6	7	8,5	1,0	8.8	88.6
Ghobadi et al. (2015)	5	30	7,8	0,9	8.7	88.5
Barbosa (2013)	7	28	7,5	0,0	7.5	100.0
Basma e Tuncer (1991)	12	28	6,0	0,0	6.0	100.0
Dang et al. (2018)	2,5	7	11,0	2,3	4.8	79.1
Ijaz et al. (2020)	5	28	85,0	20,0	4.3	76.5
Sitepu et al. (2021)	5	28	4,2	0,0	4.2	100.0
Seco et al. (2010)	4	28	4,7	1,3	3.6	72.3
Soltani et al. (2022)	6	28	7,5	2,8	2.7	62.7
Al-Gharbawi et al. (2022)	9	28	9,0	3,5	2.6	61.1
Khattab et al. (2008)	4	7	2,4	0,0	2.4	100.0
Nalawade e Jadhao (2019)	10	4	80,0	33,0	2.4	58.8
Ma et al. (2021)	6	7	53,1	25,7	2.1	51.6
Sharaby et al. (2021)	12	7	210,0	100,0	2.1	52.4
James e Pandian (2018) (B)	3	28	100,0	50,0	2.0	50.0
Indiramma et al. (2019)	8	28	142,0	72,0	2.0	49.3
Phanikumar e Raju (2020)	12	28	125,0	72,0	1.7	42.4

Amena e Chakeri (2022)	5	28	103,0	86,0	1.2	16.5
Cheshomi et al. (2016)	7	7	4,5	6,0	0.8	-33.3

Fonte: A Autora (2023).

Pode-se afirmar que, com exceção do solo estudado por Cheshomi et al. (2016), a adição da cal resultou em uma redução brusca no potencial de expansividade dos solos, chegando a reduzir em 450 vezes no caso de Hozatlioglu e Yilmaz (2021), 134 vezes no solo Indiano de Dash e Hussain (2012) e 46 vezes nos solos avaliados por Paiva (2016) e Mavroulidou et al. (2020).

O resultado adverso do solo Iraniano avaliado por Cheshomi et al. (2016) condiz com o que foi apresentado no Item 4.5, onde a mistura da cal com a argila rica em íons de sulfato formou etringitas em forma de agulha e barras em sua microestrutura, e este mineral que tem alta afinidade para absorver água, desta forma agravando ainda mais a expansividade do solo.

O desvio padrão dos resultados é de aproximadamente 82%, e isto se dá pelo fato de cada caso apresentar métodos de análises muito diferentes, visto que em cada país segue uma normatização e elaboração de ensaios distinta. Deste modo, não podemos correlacionar todos para um critério de análise único.

A expansão "livre" determinada nas análises do solo natural de Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013), Paiva (2016), foram respectivamente de 10,7%, 7,5% e 14%. Pelo critério de Cuellar (1978), inundação a 10 kPa no solo de Cabrobó tem um grau de expansividade alto e nos solos de Paulista e Ipojuca, muito alto (Quadro 18).

Quadro 18 – Potencial de expansão Critério de Cuellar (1978).

Potencial de expansão	Classificação
>10%	Muito Alta
5 a 10%	Alta
1,5 a 5 %	Média
<1,5 %	Baixa

Fonte: Cuellar (1978).

Após a mistura com a cal os solos de Ferreira et al. (2017) e Barbosa (2013), estabilizaram chegando a anular o potencial de expansão aos teores de 5% e 7%, respectivamente. O solo de Ipojuca estudado por Paiva (2016) necessitou de um incremento maior de cal para estabilizar completamente. Nele a estabilização química (Eades e Grim, 1966) ocorre para o teor de cal de 3% e a estabilização mecânica (critério de Cuellar, 1978) para 11%, sendo assim, superior à estabilização química.

Os casos de Soltani et al. (2022) e Silva (2018) avaliaram a expansão “livre” dos solos compactados a uma baixa tensão de 7kPa. Diante de seus resultados, pode-se afirmar que pelos critérios de Seed et al. (1962), o solo natural Australiano com 7,5% possui uma alta expansão, enquanto o solo Brasileiro com 20%, classifica-se com uma expansividade muito alta. No entanto, após o melhoramento, apenas o solo estudado por Silva (2018) é totalmente estabilizado. Com 2,8% de potencial de expansão, o solo de Soltani et al. (2022), apresenta uma classificação média a expansão pelo método.

Bhuvaneshwari et al. (2020), Nalawade e Jadhao (2019), James e Pandian (2018) (B), James e Pandian (2016), Indiramma et al. (2019) e Dash e Hussain (2012) apresentaram valores de potencial muito altos, 110,0%, 80,0%, 100,0%, 100,0%, 142,0% e 97,1%, respectivamente. Os autores testaram a expansão “livre” do solo de acordo com a norma Indiana IS: 2720 (Part XL) – 1977.

O método adotado pelos autores para avaliar este parâmetro pode justificar o alto valor obtido. Diante esta metodologia o solo avaliado por Dash e Hussain (2012), apresentou a melhora mais significativa. Em contrapartida, o solo Indiano de Tirupati, estudado por Indiramma et al. (2019) continuou com um alto índice de expansividade. Não foi possível fazer correlação a este resultado, visto que o de Dash e Hussain (2012) comparado aos outros casos que seguiram a mesma norma, manteve o maior índice de plasticidade após melhoramento (Apêndice B).

O solo Egípcio estudado por Sharaby et al. (2021) apresentou o maior potencial de expansão, e este resultado condiz com o apresentado na Figura 15 (Item 4.2.2 Limites de Atterberg), que evidencia a pouca variação dos limites de consistência deste solo após o melhoramento, deste modo mantendo a alta classificação a expansão dentre os métodos indiretos dos critérios de Chen (1965), Daksanamurthy e Raman (1973) e Seed et al. (1962), como mostrado na Quadro 10.

Entre os 32 casos analisados quanto à expansão livre, observou-se que 8 deles eliminaram completamente o potencial de expansão, enquanto em 19 casos, o potencial foi reduzido a menos de 1,5%. Isso representa uma significativa parcela de 60% dos estudos que avaliam esse parâmetro, e 97% dos casos reduziram no mínimo em 16% do potencial de expansão, essa estatística indica de maneira notável o impacto positivo da utilização de cal na estabilização de solos expansivos.

4.6.1.2 Tensão de Expansão

A tensão de expansão foi avaliada por 22,5% dos casos presentes nesta pesquisa. Na Quadro 19 são listados os resultados antes e após o melhoramento químico do solo. Silva (2018), Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013), Paiva (2016), Afaf et al. (2013), Dayioglu et al. (2017), Al-Mukhtar et al. (2010), Khattab et al. (2008), Basma e Tuncer (1991) e Al-Rawas et al. (2005), estabilizaram totalmente a expansão dos solos, anulando a tensão de expansão, significando mais de 50% dos casos que avaliaram a tensão de expansão.

O único solo que não reagiu bem ao tratamento foi a argila sulfatada estudada por Cheshomi et al. (2016), apresentando um aumento em sua pressão de expansão de 9,9 para 15,4 kPa, esta decorrência era esperada diante dos resultados obtidos através da avaliação química e da expansão “livre” do solo, nos itens 4.5 e 4.6.1.1.

Quadro 19 – Pressão de expansão dos solos naturais e melhorados.

Referência	Cal (%)	Tempo de cura (dias)	Pressão de expansão (kPa)	
			Solos Naturais	Solos Melhorados
Pakbaz e Ganji (2018)	3	28	367,0	91,0
Khattab et al. (2008)	3	7	60,0	0,0
Afaf et al. (2013)	4	28	650,0	0,0
Dayioglu et al. (2017)	4	28	240,0	0,0
Mavroulidou et al. (2020)	4	14	905,0	50,0
Leite et al. (2016)	6	7	200,0	32,0
Farghaly et al. (2020)	6	7	355,0	75,0
Al-Rawas et al. (2005)	6	30	249,0	0,0
Ferreira et al. (2017)	7	28	275,0	0,0
Barbosa (2013)	7	28	87,0	0,0
Cheshomi et al. (2016)	7	7	9,9	15,4
Silva (2018)	9	28	100,0	0,8
Paiva (2016)	9	28	248,0	0,0
Al-Gharbawi et al. (2022)	9	28	90,0	23,0
Al-Mukhtar et al. (2010)	10	28	1060,0	0,0
Al-Mukhtar et al. (2012)	10	28	150,0	15,0
Basma e Tuncer (1991)	12	28	400,0	0,0
Sahoo e Singh (2022)	15	30	210,0	63,0

Fonte: A Autora (2023).

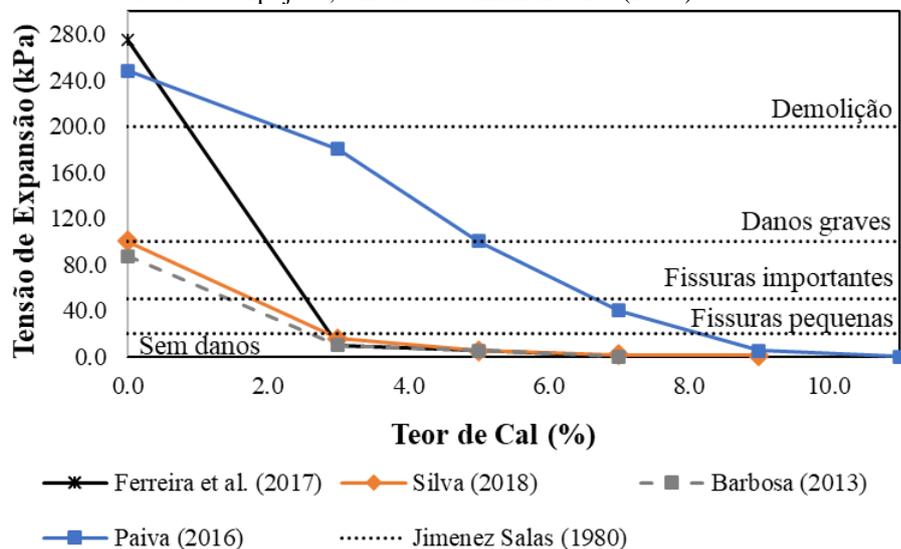
O solo argiloso avaliado por Al-Mukhtar et al. (2010) apresentou a maior pressão de expansão no estado natural, mas quando misturado com 6% cal houve uma diminuição de 1060 kPa para 106 kPa e 33 kPa após 1,5 h e 7 dias, respectivamente. Com a adição de 10% de cal a

pressão de expansão caiu rapidamente para zero. Esse comportamento pode ser atribuído à quantidade reduzida de absorção de água da argila cálcica devido à reação de troca catiônica. De acordo com o autor, 6% de cal é suficiente para uma reação de curto prazo.

Silva (2018), Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013) e Paiva (2016) encontraram resultados semelhantes, onde o teor de cal e o tempo de cura foram proporcionais a redução da tensão de expansão. Os autores avaliaram a pressão de expansão pelo método ao Volume Constante nos solos compactados, na umidade ótima e peso específico seco máximo. As variações das tensões são apresentadas na Figura 40.

A tensão de expansão obtida pelos solos naturais foram de 100 kPa, 275 kPa, 87 kPa e 248 kPa, para os solos de Agrestina, Paulista, Cabrobó e Ipojuca, respectivamente. Indicando a possibilidade de ocorrência de demolições das edificações nos solos de Paulista e Ipojuca e fissuras importantes no solo de Agrestina e Cabrobó, segundo o critério de Jimenez Salas (1980). Para reduzir a tensão de expansão a valores inferiores a 10 kPa (sem danos as edificações), foi necessário adicionar 3% de cal aos solos de Agrestina, Paulista e Cabrobó, e Paulista e 9% ao solo de Ipojuca.

Figura 40 – Variação da tensão de expansão com o teor de cal dos municípios Agrestina, Paulista, Cabrobó e Ipojuca, Critério de Jimenez Salas (1980).

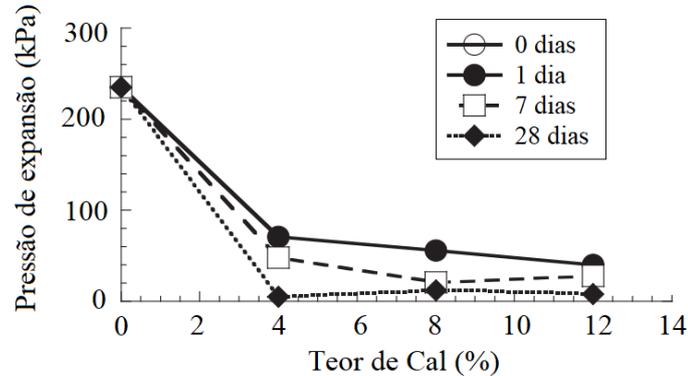


Fonte: A Autora (2023).

Os 17 solos que tiveram a redução da tensão de expansão apresentam a tendência proporcional com o avanço do tempo de cura e teor de cal, porém, de forma curiosa, a argila da Dakota do Sul, analisada por Dayioglu et al. (2017), com o teor de 4% de cal aos 28 dias chegou a anular a tensão e com o incremento da cal mostrou um pequeno aumento da mesma, até voltar

a zero com 12% do floculante, como é mostrado na Figura 41. Esse comportamento não aconteceu com 1 e 7 dias de cura.

Figura 41 – Tensão de expansão com o avanço do tempo de cura e teor de cal.



Fonte: Adaptado de Dayioglu et al. (2017).

Leite et al. (2016) e Farghaly et al. (2020) com o mesmo teor de cal a 6%, reduziram a tensão de expansão dos solos em 6 e 5 vezes, respectivamente, demonstrando uma melhoria significativa na estabilidade do solo. Al-Mukhtar et al. (2012), alcançou uma redução ainda mais substancial, diminuindo a tensão de expansão em 10 vezes com um teor de 10% de cal. Sahoo e Singh (2022) embora tenha usado um teor de cal superior aos demais (15%) alcançou uma redução de 3 vezes na tensão de expansão, ou seja, menor em comparação com outros estudos. No caso de Mavroulidou et al. (2020), ao teor de Cal de 4%, reduziu em 18 vezes na tensão de expansão, representando um avanço notável no comportamento do solo expansivo. Pakbaz e Ganji (2018) e Al-Gharbawi et al. (2022) chegaram a uma redução de 4 vezes na tensão de expansão, aos teores de 3% e 9% de cal. Embora tais reduções não tenham anulado completamente a expansão, é importante notar que esses estudos apresentaram significativas alterações na mecânica dos solos avaliados.

Chen (1975) enfatiza que a cal é o agente mais favorável para reduzir o potencial de expansão dos solos, demonstrando seu impacto significativo. Evans e Bell (1981) corroboram essa ideia, argumentando que as maiores reduções no comportamento expansivo do material ocorrem nos primeiros incrementos de cal adicionados ao solo.

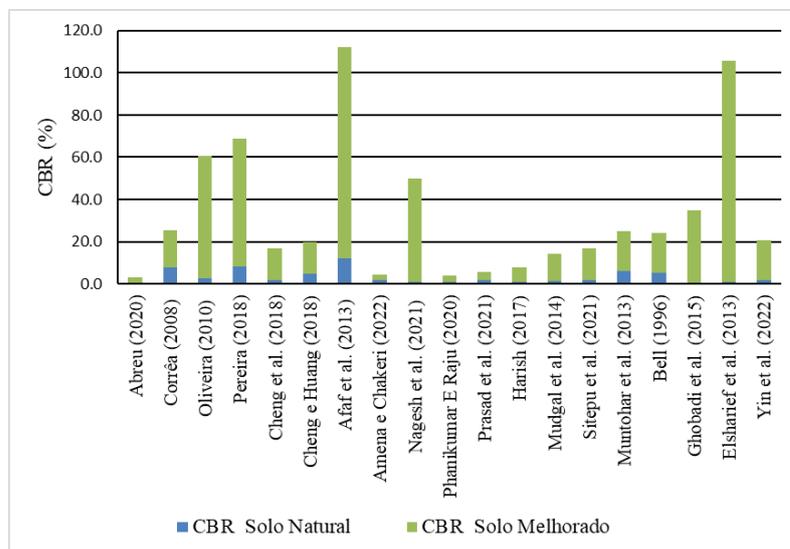
A redução nas características de expansão dos solos geralmente é atribuída a uma diminuição da afinidade com a água quando esses solos estão saturados com íons de cálcio. Isso resulta na diminuição da presença de água, já que a cal fornece cátions para equilibrar a superfície do argilomineral e, como consequência, reduz a espessura da camada dupla difusa.

Além disso, a formação de uma matriz cimentante também desempenha um papel crucial, resistindo à expansão volumétrica do solo (Blandl, 1981).

4.6.2 Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Expansão

Dezenove estudos avaliaram o Índice de Suporte Califórnia dos solos naturais e tratados, significando 23,75% dos casos. Na Figura 42 é exibido o crescimento dos valores de CBR para diferentes teores de cal nos estudos.

Figura 42 – CBR, solos naturais e tratados.



Fonte: A Autora (2023).

Todos os solos avaliados apresentaram uma melhora no CBR após misturados com a cal (Quadro 20). O caso mais significativo foi do solo de Alfao, no Sudão, estudado por Elsharief et al. (2013), onde o CBR aumentou mais de 100 vezes ao teor de 6,5 % de cal, o mesmo solo ao teor de 3% de cal já alcançava 89,6% de CBR. Por sua vez, Afaf et al. (2017) também constatou que a incorporação de cal resultou em um relevante aumento nos valores de CBR das amostras de solo de Qena – Safaga no Egito, passando de 12,21% para 100% em apenas 7 dias de cura.

No entanto, é importante ressaltar que a relação entre a variação do CBR e a quantidade de cal adicionada ao solo não é linear. Nagesh et al. (2021) observou que em seu solo, classificado como A-7-6 de acordo com a AASHTO, apresentando 62% de argila com alta atividade (1,41) o CBR máximo foi alcançado com o teor de cal de 6%, com o valor de 49,2% e ao aumentar o teor de cal para 8%, verificou-se uma redução no CBR para 36,4%.

Quadro 20 – CBR, solos naturais e tratados e teores de Cal utilizados.

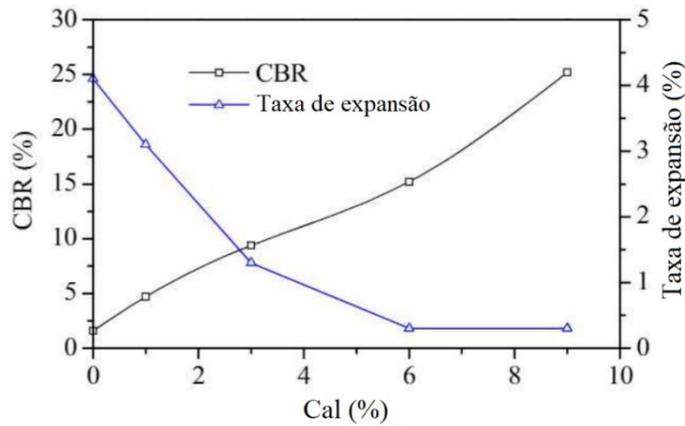
Referência	Cal (%)	CBR	
		Solos Naturais	Solos Melhorados
Corrêa (2008)	2	7,8	17,4
Pereira (2018)	2	8,0	60,7
Abreu (2020)	4	0,4	2,8
Prasad et al. (2021)	4	1,8	3,9
Bell (1996)	4	5,0	19,0
Yin et al. (2022)	4	1,7	19,0
Amena e Chakeri (2022)	5	2,0	2,3
Sitepu et al. (2021)	5	1,6	15,0
Oliveira (2010)	6	2,7	58,0
Cheng et al. (2018)	6	1,6	15,0
Afaf et al. (2013)	6	12,2	100,0
Nagesh et al. (2021)	6	0,7	49,2
Harish (2017)	6	0,8	7,0
Ghobadi et al. (2015)	7	0,0	35,0
Cheng e Huang (2018)	9	4,7	15,0
Mudgal et al. (2014)	9	1,5	12,8
Elsharief et al. (2013)	6,5	1,0	104,7
Phanikumar e Raju (2020)	12	0,9	3,2
Muntohar et al. (2013)	12	6,2	18,6

Fonte: A Autora (2023).

O CBR superior a 5,0% é considerado satisfatório para o subleito em projetos de pavimentos flexíveis com uma intensidade de tráfego variando de 1 a 10 milhões de eixos padrão (msa). É possível notar que dos 19 casos, 14 não se enquadravam na classificação satisfatória e depois de misturado com a cal apenas os casos de Abreu (2020), Phanikumar e Raju (2020), Amena e Chakeri (2022) e Prasad et al. (2021), mesmo melhorando seus valores, ainda não alcançam o mínimo esperado para a construção de subleitos de estradas com baixo volume de tráfego.

Cheng et al. (2018) representam graficamente a evolução dos valores do CBR e da taxa de expansão do solo após o teste com o teor de cal de 1% a 9% (Figura 43). O Índice de Suporte Califórnia obteve um aumento de 1,6% para 25,2% na adição de 9%, enquanto a taxa de expansão reduziu de 4,1% para 0,3%. Esta modificação varia a categoria do solo de expansivo para não expansivo de acordo com a classificação de Sandroni e Consoli (2010), exibida na Quadro 21.

Figura 43 – Evolução do CBR e expansão com o acréscimo do teor de cal.



Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2018).

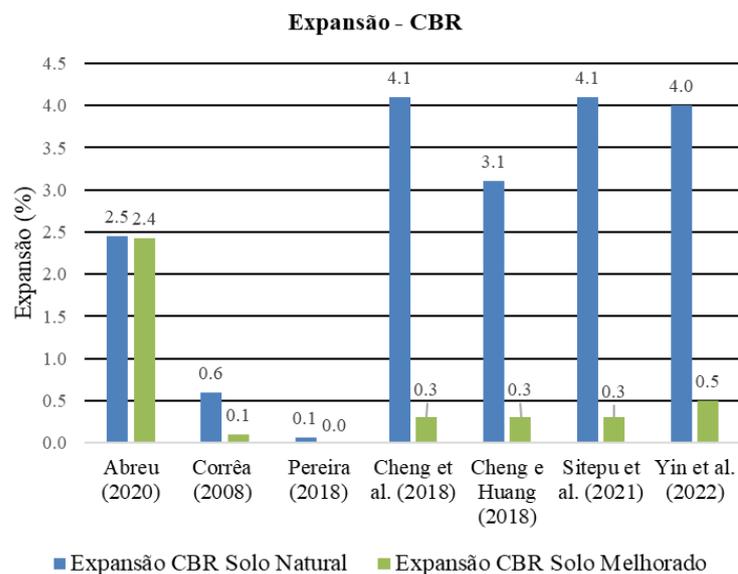
Quadro 21 – Categorias de expansibilidade em função da expansão do CBR.

Categoria	Expansão CBR (%)
Não expansivo	< 1%
Intermediário	1% a 2%
Expansivo	2% a 5%
Muito Expansivo	> 5%

Fonte: Sandroni e Consoli (2010).

Assim como Cheng et al. (2018), os autores Abreu (2020), Corrêa (2008), Oliveira (2010), Pereira (2018), Cheng e Huang (2018), Sitepu et al. (2021), Yin et al. (2022), avaliaram a expansividade do solo através do ensaio do CBR. Na Figura 44, é mostrada a redução da expansividade dos solos ao mesmo teor de cal da Quadro 21, apresentada anteriormente.

Figura 44 – Expansão CBR, solos naturais e tratados.



Fonte: A Autora (2023).

Seguindo a classificação de Sandroni e Consoli (2010), todos os solos reduziram seu grau de expansividade, porém o solo de Cajazeiras avaliado por Abreu (2020) apresentou uma baixa alteração comparado aos demais, mantendo sua classificação de expansivo.

Este resultado obtido por Abreu (2020) comprova a necessidade de avaliar o solo por diferentes tipos para análise, pois, de acordo com o método indireto dos critérios de Chen (1965), Seed et al (1962), e Daksanamurthy e Raman (1973), este solo se classifica com baixo potencial de expansão (Quadro 10).

4.6.3 Resistência à compressão simples

O incremento da resistência a compressão do solo é um dos principais fatores de interesse após o melhoramento químico, e isto fica evidente quando se percebe que 63% dos estudos avaliaram este parâmetro. Na Quadro 22 é exibida a alteração da capacidade de resistência dos solos em kPa dos 51 casos avaliados nesta pesquisa e os teores de cal utilizados por cada um deles nas misturas para estes resultados. Na Figura 45 é apresentado graficamente estes incrementos de resistência.

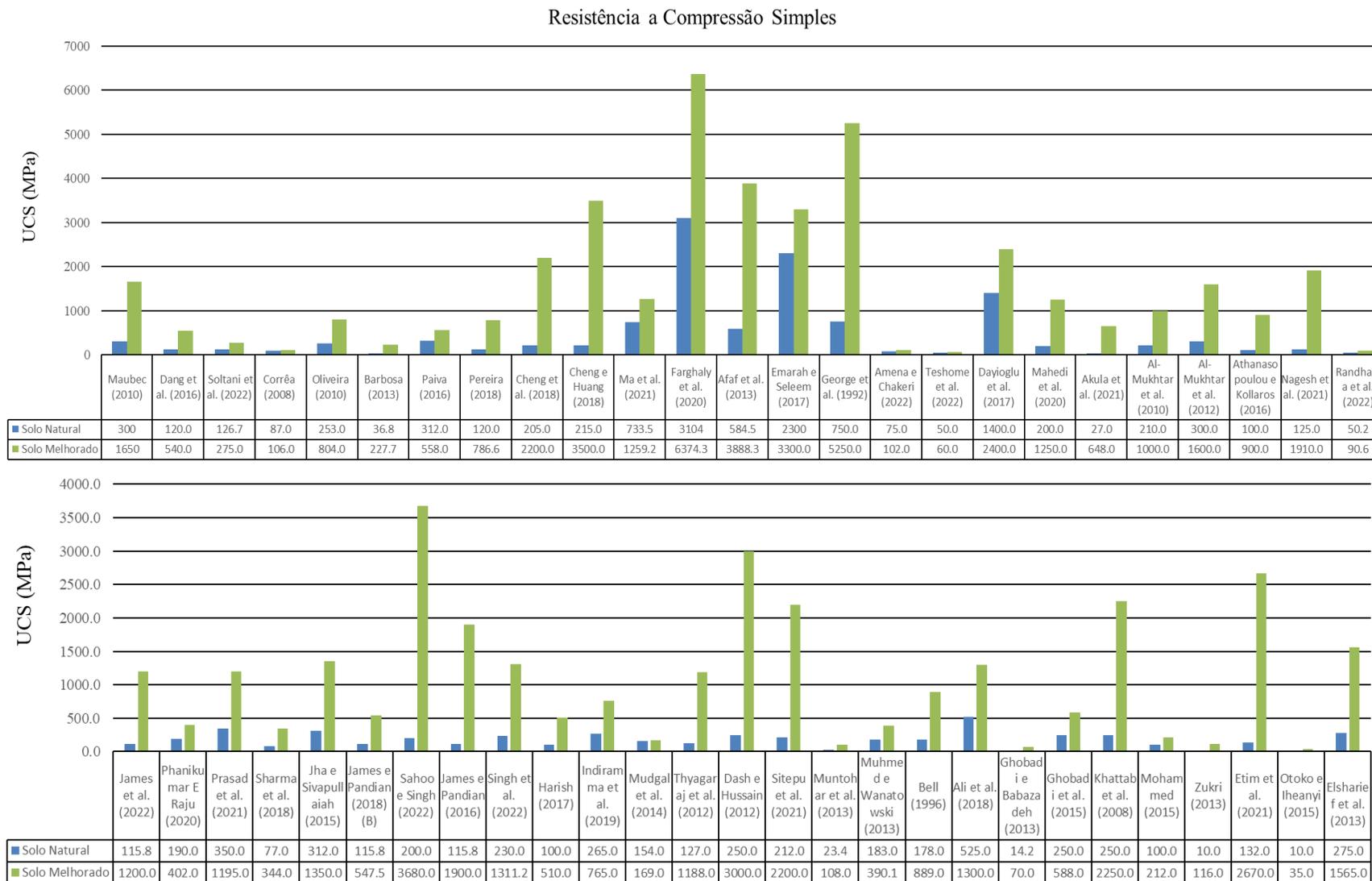
Quadro 22 - Resistência a compressão simples dos solos naturais e tratados com a cal.

Referência	Teor de cal (%)	UCS (kPa)	
		Solo Natural	Solo Melhorado
Farghaly et al. (2020)	6	3103,8	6374,3
George et al. (1992)	6	750,0	5250,0
Afaf et al. (2013)	6	584,5	3888,3
Sahoo e Singh (2022)	15	200,0	3680,0
Cheng e Huang (2018)	9	215,0	3500,0
Emarah e Seleem (2017)	7	2300,0	3300,0
Dash e Hussain (2012)	9	250,0	3000,0
Etim et al. (2021)	8	132,0	2670,0
Dayioglu et al. (2017)	12	1400,0	2400,0
Khattab et al. (2008)	4	250,0	2250,0
Cheng et al. (2018)	6	205,0	2200,0
Sitepu et al. (2021)	5	212,0	2200,0
Nagesh et al. (2021)	6	125,0	1910,0
James e Pandian (2016)	7	115,8	1900,0
Maubec (2010)	10	300,0	1650,0
Al-Mukhtar et al. (2012)	10	300,0	1600,0
Elsharief et al. (2013)	6.5	275,0	1565,0
Jha e Sivapullaiah (2015)	6	312,0	1350,0
Singh et al. (2022)	9	230,0	1311,2
Ali et al. (2018)	7	525,0	1300,0

Ma et al. (2021)	6	733,5	1259,2
Mahedi et al. (2020)	5	200,0	1250,0
James et al. (2022)	7	115,8	1200,0
Prasad et al. (2021)	4	350,0	1195,0
Thyagaraj et al. (2012)	4,2	127,0	1188,0
Al-Mukhtar et al. (2010)	6	210,0	1000,0
Athanasopoulou e Kollaros (2016)	9	100,0	900,0
Bell (1996)	4	178,0	889,0
Oliveira (2010)	6	253,0	804,0
Pereira (2018)	2	120,0	786,6
Indiramma et al. (2019)	8	265,0	765,0
Akula et al. (2021)	5	27,0	648,0
Ghobadi et al. (2015)	5	250,0	588,0
Paiva (2016)	7	312,0	558,0
James e Pandian (2018) (B)	3	115,8	547,5
Dang et al. (2016)	6,25	120,0	540,0
Harish (2017)	6	100,0	510,0
Phanikumar E Raju (2020)	12	190,0	402,0
Muhmed e Wanatowski (2013)	5	183,0	390,1
Sharma et al. (2018)	5	77,0	344,0
Soltani et al. (2022)	6	126,7	275,0
Barbosa (2013)	7	36,8	227,7
Mohammed (2015)	4	100,0	212,0
Mudgal et al. (2014)	9	154,0	169,0
Zukri (2013)	4	10,0	116,0
Muntohar et al. (2013)	12	23,4	108,0
Corrêa (2008)	2	87,0	106,0
Amena e Chakeri (2022)	5	75,0	102,0
Randhawa et al. (2022)	9	50,2	90,6
Ghobadi e Babazadeh (2013)	7	14,2	70,0
Teshome et al. (2022)	4	50,0	60,0
Otoko e Iheanyi (2015)	6	10,0	35,0

Fonte: A Autora (2023).

Figura 45 – Resistência a compressão simples, solos naturais e melhorados.



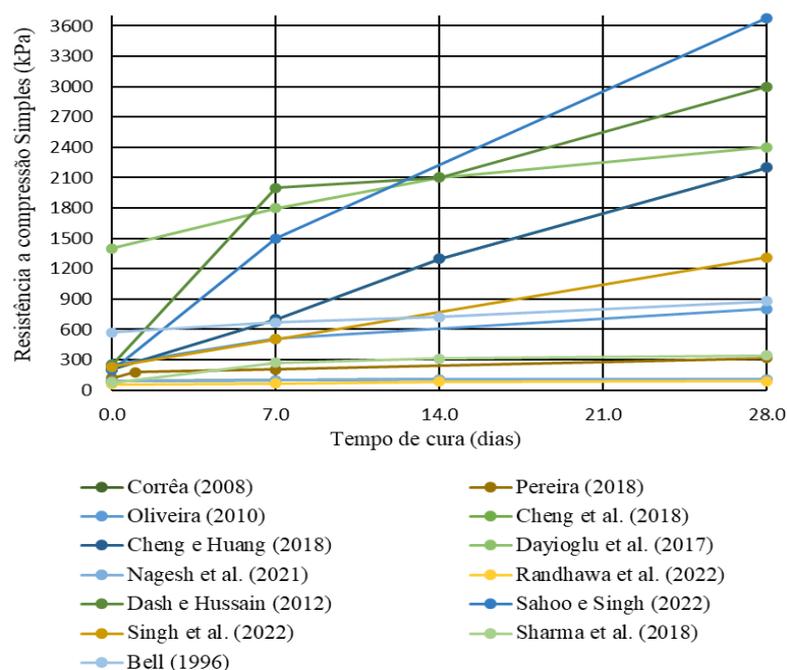
Fonte: A Autora (2023).

Todos os solos apresentaram uma melhora na resistência a compressão, o solo indiano da cidade de Rourkela Steel, estudado por Sahoo e Singh (2022), apresentou o maior aumento, variando de 200 kPa para 3680 kPa, ao teor de 15% de cal com 30 dias de cura, significando um incremento de mais de 18 vezes ao solo natural. Apesar desse resultado tão relevante após o tratamento com a cal, de acordo com o método indireto do critério de Chen (1965), o solo continua com um potencial de expansão alto. Nos métodos de Daksanamurthy e Raman (1973) e Seed et al (1962) o solo reduziu de um potencial muito alto para médio.

Em contrapartida, o solo de Mudgal et al. (2014) apresentou a menor diferença no acréscimo da resistência, aumentando de 154 kPa para 169 kPa com o teor de 9% de cal aos 28 dias. Este mesmo solo mostrou um uma grande melhora no CBR, como exibido no item 4.6.2, onde partiu de 1,5 para 12,8%. O autor não averiguou o potencial expansivo do solo após o incremento da cal de forma direta, e não forneceu dados para uma análise indireta.

Corrêa (2008), Oliveira (2010), Pereira (2018), Cheng et al. (2018), Cheng e Huang (2018), Dayioglu et al. (2017), Nagesh et al. (2021), Randhawa et al. (2022), Dash e Hussain (2012), Sahoo e Singh (2022), Singh et al. (2022), Sharma et al. (2018), Bell (1996), em seus trabalhos apresentaram a evolução da resistência ao longo do tempo até o tempo de cura de 28 dias, a resistência a compressão simples nestes casos apontou a tendência de crescimento de acordo com o aumento do tempo de cura. Como é mostrado na Figura 46.

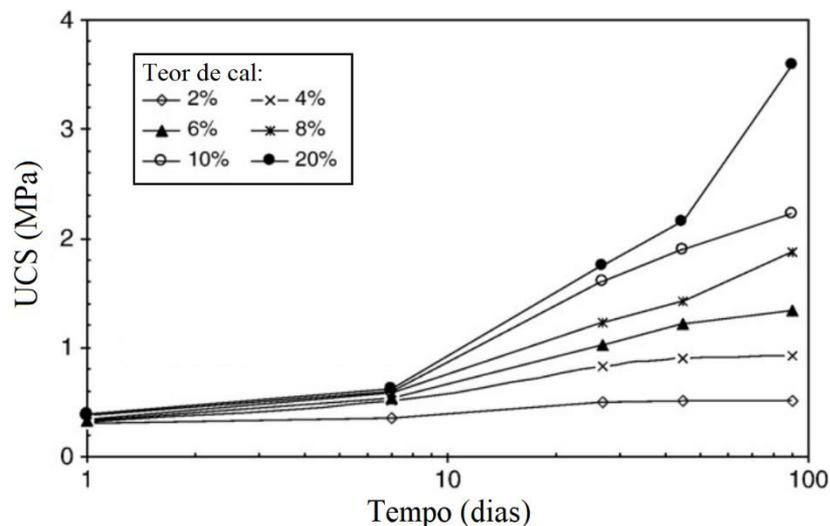
Figura 46 – Variação da Resistência a compressão simples ao longo do tempo.



Fonte: A Autora (2023).

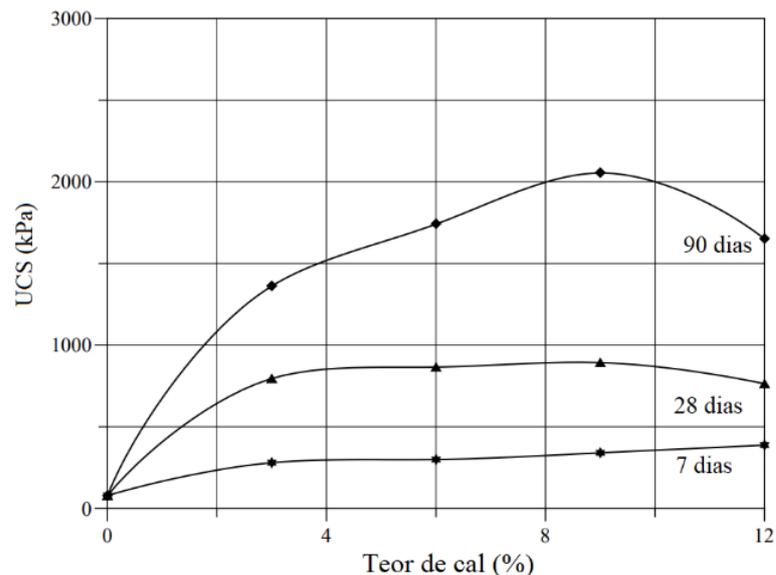
Athanasopoulou e Kollaros (2016), Al-Mukhtar (2010), mostraram o progresso da resistência ao longo do tempo até 90 e 100 dias, respectivamente. O solo francês avaliado por Al-Mukhtar (2010), assim como os demais comentados anteriormente, apresentou um incremento da resistência ao longo do tempo e de acordo com o teor de cal (Figura 47), no entanto, a argila estudada por Athanasopoulou e Kollaros (2016) apresentou uma resistência menor ao teor de 12% de cal após os 28 dias quando comparado ao teor de 9%, como é exibido na Figura 48.

Figura 47 – Variação da Resistência a compressão simples de acordo com o teor de cal ao longo do tempo de Al-Mukhtar (2010).



Fonte: Adaptado de Al-Mukhtar (2010).

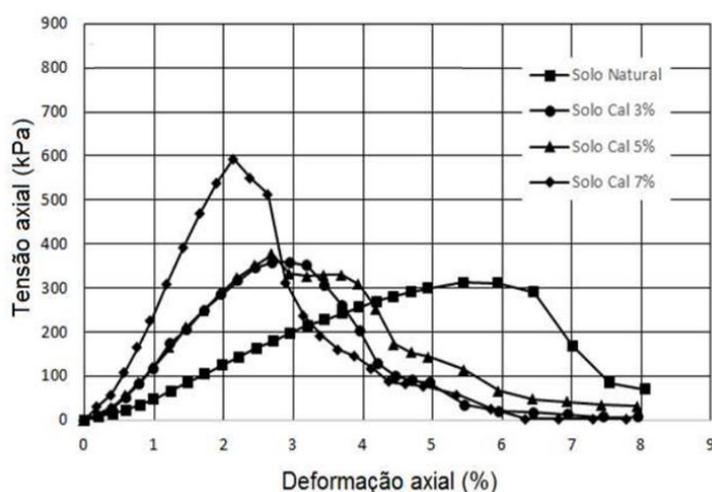
Figura 48 – Variação da Resistência a compressão simples de acordo com o teor de cal ao longo do tempo de Athanasopoulou e Kollaros (2016).



Fonte: Adaptado de Athanasopoulou e Kollaros (2016).

Paiva (2016), realizou o ensaio de compressão simples do solo natural e com os teores de 3, 5 e 7% de cal, submetidas a um período de cura de 48 horas. O autor relatou que a adição de 7% de cal ao solo aumentou a resistência em 1,9 vezes, de 312 kPa para 558 kPa. Também foi possível observar que a adição da cal alterou o comportamento das curvas do ensaio, que apresentava um pico-friável com o solo natural e passou a acentuar a inclinação para um comportamento de pico. Na Figura 49 é mostrado esse cenário com as curvas médias dos corpos de provas testados no estudo.

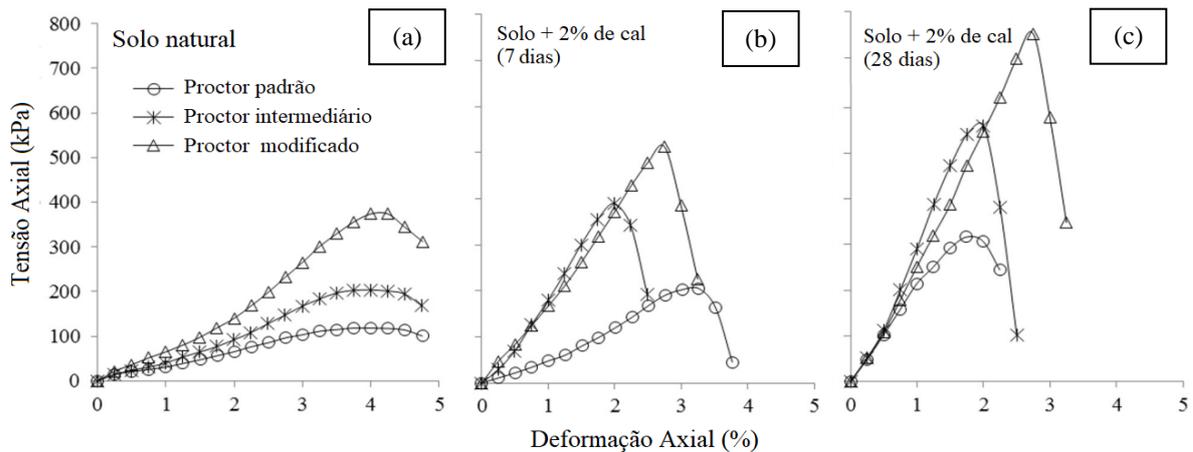
Figura 49 – Variação da Resistência a compressão simples de acordo com o teor de cal de Paiva (2016).



Fonte: Adaptado de Paiva (2016).

Este comportamento de pico também foi observado por Pereira (2018) na adição de apenas 2% de cal no solo de Niquelândia, no estado do Goiás. As Figuras 50 (a), (b) e (c), mostram os valores médios de UCS extraídos das curvas de tensão-deformação com diferentes esforços de compactação. A tendência de bico na curva foi revelada ao proctor modificado a partir dos 7 dias de cura. É interessante observar que dentro do mesmo tempo de cura, a compactação no esforço modificado resultou nos melhores resultados de UCS para a mistura de solo-cal. Mesmo a um baixo teor de cal o solo aumentou sua resistência em mais de 6 vezes, crescendo de 120 kPa para 786 kPa aos 28 dias de cura (Figura 50 (c)).

Figura 50 – Variação da Resistência a compressão simples de acordo com o teor de cal de Pereira (2018).



Fonte: Adaptado de Pereira (2018).

Com base nos resultados observados nos ensaios, fica evidente o aumento da resistência à compressão simples. Esses aumentos são notáveis já aos 7 dias de idade, com aumentos significativos observados em ambos os tipos de solo estudados, mesmo nos casos com apenas 2% de teor de cal. Na verdade, esse aumento quase imediato na resistência já havia sido observado de acordo com o (TRB 5, 1987), em alguns casos, os aumentos imediatos podem ser superiores a 100%.

5 CONCLUSÕES

Nesta seção, destaca-se as conclusões fundamentais derivadas desta pesquisa, juntamente com sugestões para direcionar pesquisas futuras.

- O teor de cal utilizado em 19 dos casos da literatura avaliados nesta pesquisa é de 6%. Representando 24% dos 80 trabalhos avaliados.
- Solos de apenas três (Pereira (2018), Ghobadi et al. (2015) e Otoko e Iheanyi (2015)), não apresentaram uma textura fina com mais de 50% passando na peneira nº 200 de acordo com a Prática Padrão ASTM-D2487 para Classificação de Solos para Fins de Engenharia (Sistema Unificado de Classificação de Solos).
- Abreu (2020), Corrêa (2008), Silva (2018), Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013), Paiva (2016) e Mohammed (2015) avaliaram a granulometria do solo após o melhoramento do solo. O tratamento dos solos com a cal aumentou as texturas dos solos, com exceção dos casos de Abreu (2008) e Ferreira (2017) que a adição da cal provocou um pequeno acréscimo da fração argila e praticamente não modificou a fração silte e areia fina.
- 53 dos 80 estudos selecionados avaliaram os limites de consistência do solo natural. A média do limite de liquidez é de 80%, do limite de plasticidade é 47% e considerando estes valores é possível afirmar que pelos critérios de Chen (1965), Seed et al (1962), e Daksanamurthy e Raman (1973), se trata de solos com um potencial de expansão “muito alto”. Os Limites de Atterberg após a adição de cal foram examinados em 47 casos. 96% dos solos apresentaram um decréscimo no índice de plasticidade.
- Após a mistura com a cal 75% dos solos analisados obtiveram um aumento da umidade ótima e 76% apresentaram uma redução da densidade seca máxima.
- 15 trabalhos fizeram análise do pH do solo antes e após o melhoramento químico, 40% deles classificam-se como alcalinos e 26,6% têm classificação ácida na condição natural. Após a mistura com a cal todos os solos alteraram seu pH para fortemente alcalino. Foi percebido que o pH do solo é diretamente proporcional ao teor de cal inserido, à medida que o teor é aumentado o pH também cresce.
- Houve um aumento significativo da capacidade de troca catiônica a curto prazo, dos solos de Corrêa (2008), Ferreira et al. (2017) e Barbosa (2013) de 12,12 cmol_c/kg para 17,86, cmol_c/kg de 46,30 cmol_c/kg para 97,60 cmol_c/kg e de 31,13 cmol_c/kg para 47,13 cmol_c/kg, respectivamente. Devido a adição de cal aos solos, evidenciando o desencadeamento das reações químicas imediatas (a troca catiônica e a floculação) para posteriormente as reações químicas lentas (cimentação e carbonatação).

- Após o melhoramento químico, todos os solos apresentaram um aumento significativo no óxido de cálcio, sendo um resultado esperado pelo incremento do óxido de cálcio da cal.
- Ao aumento do teor de cal e do tempo, as reações foram mais evidentes e os minerais expansivos foram neutralizados pelas reações pozolânicas.
- Nas MEV após 7 dias da adição de cal observa-se a interação da cal com a argila, resultando na formação de partículas de diferentes tamanhos e aumento da porosidade dos solos. Após 28 dias ilustram a formação de agregados devido ao processo de floculação e à criação de produtos resultantes da reação de hidratação, que revestem e cimentam as partículas do solo.
- A argila sulfatada estudada por Cheshomi et al. (2016) foi o único solo que não obteve a formação microestrutural esperada com a aplicação da cal, apresentando formação de etringita. Desta forma também sendo o único solo a não apresentar diminuição da expansão e tensão de expansão.
- A expansão "livre" dos solos naturais de Ferreira et al. (2017), Barbosa (2013), Paiva (2016), foram respectivamente de 10,7%, 7,5% e 14%. Pelo critério de Cuellar (1978), grau de expansividade alto e nos solos de Paulista e Ipojuca, muito alto. Após a mistura com a cal, estabilizaram mecanicamente, anulando o potencial de expansão aos teores de 5%, 7% e 11%.
- Entre os 32 casos analisados quanto à expansão livre, 8 deles eliminaram completamente o potencial de expansão, enquanto em 19 casos, o potencial foi reduzido a menos de 1,5%. 31 dos casos reduziram seu potencial em no mínimo 16%.
- A tensão de expansão foi avaliada por 22,5% dos casos presentes nesta pesquisa. Com exceção do solo avaliado por Cheshomi et al. (2016), todos os demais apresentaram redução da tensão após o melhoramento com a adição da cal.
- 19 estudos avaliaram o Índice de Suporte Califórnia dos solos naturais e tratados. Quatorze não apresentavam um CBR superior a 5,0% e depois de misturado com a cal todos aumentaram seus índices, apenas os casos de Abreu (2020), Phanikumar e Raju (2020), Amena e Chakeri (2022) e Prasad et al. (2021) não ultrapassaram o CBR indicado para subleito de rodovias.

- 63% dos estudos avaliaram a resistência a compressão simples, o solo estudado por Sahoo e Singh (2022), apresentou o maior aumento, variando de 200 kPa para 3680 kPa, ao teor de 15% de cal com 30 dias de cura. O solo de Mudgal et al. (2014) apresentou a menor diferença no acréscimo da resistência, aumentando de 154 kPa para 169 kPa com o teor de 9% de cal aos 28 dias.
- Todos os trabalhos que apresentaram a evolução da resistência ao longo do tempo até o tempo de cura de 28 dias.
- A adição da cal pode alterar o comportamento das curvas do ensaio de UCS, de um pico-friável para um comportamento de pico.
- O tratamento químico do solo com a cal, reduz a fração argilosa, reduz a umidade ótima e aumenta a densidade máxima seca depois de curado, aumenta o pH, aumenta a presença dos óxidos de cálcio, altera a microestrutura do solo criando ligações cimentícias, reduz a expansividade, incrementa o CBR e resistência a compressão simples.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Explorar técnicas de mistura mais avançadas, como o uso de aditivos químicos em combinação com a cal, para melhorar as propriedades do solo e reduzir custos;
- Avaliar o desempenho a longo prazo das misturas de solo-cal, considerando variações sazonais e condições climáticas adversas;
- Analisar os custos e benefícios do uso de cal no melhoramento de solos expansivos em diferentes cenários e contextos geográficos;
- Realizar estudos sobre o comportamento das estruturas construídas sobre solos tratados com cal ao longo do tempo, com ênfase na durabilidade das propriedades do solo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM):

_____. ASTM D4318 – 17e1 – **Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils**. 2019.

_____. ASTM C977 – 03 – **Standard Test Method for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization**. 2009.

_____. ASTM D2487 – 17 – **Classification of Soils for Engineering Purposes -Unified Soil Classification System**. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

_____.NBR 7175: **Cal hidratada para argamassas – Requisitos**. Rio de Janeiro, 4 p., 2003.

ABREU, A. A. DE; SANTOS, R. A. DOS; SILVA, C. S. DA. Estabilização do subleito com adição de cal e resíduos do polimento do porcelanato. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, 2023.

AKULA, P.; NAIK, S. R.; LITTLE, D. N. Evaluating the durability of lime-stabilized soil mixtures using soil mineralogy and computational geochemistry. **Transportation research record**, v. 2675, n. 9, p. 1469–1481, 2021.

AL-GHARBAWI, A. S. A.; NAJEMALDEN, A. M.; FATTAH, M. Y. Expansive soil stabilization with lime, cement, and silica fume. **Applied sciences (Basel, Switzerland)**, v. 13, n. 1, p. 436, 2022.

ALI, H.; MOHAMED, M. The effects of lime content and environmental temperature on the mechanical and hydraulic properties of extremely high plastic clays. **Applied clay science**, v. 161, p. 203–210, 2018.

AL-MUKHTAR, M.; KHATTAB, S.; ALCOVER, J.-F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. **Engineering geology**, v. 139–140, p. 17–27, 2012.

AL-MUKHTAR, M.; LASLEDJ, A.; ALCOVER, J.-F. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C. **Applied clay science**, v. 50, n. 2, p. 191–198, 2010.

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

AMENA, S.; CHAKERI, D. A study on the effects of plastic waste strips and lime on strength characteristics of expansive soil. **Advances in civil engineering**, v. 2022, p. 1–6, 2022.

ASMA MUHMED, A. M. Effect of lime stabilisation on the strength and microstructure of clay. **IOSR journal of mechanical and civil engineering**, v. 6, n. 3, p. 87–94, 2013.

ATAÍDE, S.O.F. **Análise o comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

ATHANASOPOULOU, A.; KOLLAROS, G. **Improvement of soil engineering characteristics using lime and fly ash.** Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/236416795.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2023.

BANAKAR, U. et al. **Behaviour of black cotton soil by using lime as admixture.** Disponível em: <<https://www.irjet.net/archives/V6/i5/IRJET-V6I5682.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2023.

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

BASMA, A. A.; TUNCER, E. R. **Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays.** Disponível em: <<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1295/1295-007.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2023.

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

BEZERRA, I. M.L. **Análise da interação interpartículas e do processo de fissuração de um solo expansivo tratado com areia, cal e cinza de casca de arroz.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

BHUVANESHWARI, S.; ROBINSON, R. G.; GANDHI, S. R. Effect of functional group of the inorganic additives on index and microstructural properties of expansive soil. **International journal of geosynthetics and ground engineering**, v. 6, n. 4, 2020.

BLANDL, H. Alteration of soil parameters dy stabilization with line. In International Conference on Soil Machanics on Foundation Engenrring, 10., Stokholm. Proceeding Rotterdam: A. A. Balkema, v.1, 1981.

BRANDÃO, D. M.; LEITE, A. F.; JACINTHO, E. C.; GUIMARÃES, R. C. Análise da mistura solo-cal-emulsão para fins de pavimentação rodoviária. I Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região do Centro-Oeste, 2009.

BUOL, S.W., HOLE, F.D., MCCRACKEN, R.J., SOUTHARD, R.J. Soil Genesis and Classification, 4th edn. Iowa State Univ. Press, Ames, 1997.

CHEN, F. H. The use of piers to prevent the uplifting of lightly loaded structures founded on expansive soil. Proc. Eng. Effects of Moistures Changes in Soils, Int. Res. Eng. Conf. Expansive Clays Soils. Supplementing the Symposium in Print, Texas, 1965.

CHEN, F. H. Foundation on expansive soils. Developments in Geotechnical Engineering, Amsterdam, Elsevier, 1975.

CHEN, F. H. Foundations on expansive soil. Elsevier Science Publishing Company Inc., New York. 1988.

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

CHENG, Y.; HUANG, X. Effect of mineral additives on the behavior of an expansive soil for use in highway subgrade soils. **Applied sciences (Basel, Switzerland)**, v. 9, n. 1, p. 30, 2018.

CHESHOMI, A.; ESHAGHI, A.; HASSANPOUR, J. Effect of lime and fly ash on swelling percentage and Atterberg limits of sulfate-bearing clay. **Applied clay science**, v. 135, p. 190–198, 2017.

CORRÊA, J. F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2018.

CUELLAR, V. Análisis Crítica de los Métodos Existentes para el Empleo de Arcillas Expansivas em obras de Carreteras y Recomendaciones Sobre las Técnicas Más Idóneas Para se Uso habitual en España Laboratório del Transporte y Mecanica del suelo, Madrid. 1978.

DAKSANAMURTHY, V.; RAMAN, V. A simple method of identifying an expansive soil. Soil and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 13 (1), Pp. 97 – 104, 1973.

DANG, L. C.; FATAHI, B.; KHABBAZ, H. Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres. **Procedia engineering**, v. 143, p. 658–665, 2016.

DANG, L. C.; KHABBAZ, H.; FATAHI, B. **Evaluation of swelling behaviour and soil water characteristic curve of bagasse fibre and lime stabilised expansive soil.** PanAm Unsaturated Soils 2017. **Anais**.Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2018.

DASH, S. K.; HUSSAIN, M. Lime stabilization of soils: Reappraisal. **Journal of materials in civil engineering**, v. 24, n. 6, p. 707–714, 2012.

DAYIOGLU, M.; CETIN, B.; NAM, S. Stabilization of expansive Belle Fourche shale clay with different chemical additives. **Applied clay science**, v. 146, p. 56–69, 2017.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. Highway Research, Washington, D. C. n 139, 1966. P61-72.

ELSHARIEF, A. M. Lime stabilization of tropical soils from Sudan for road construction. **International journal of GEOMATE**, 2013.

EMARAH, D. A.; SELEEM, S. A. Swelling soils treatment using lime and sea water for roads construction. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 4, p. 2357–2365, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos. 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro. 1999.

ETIM, R. K. et al. Evaluation of lateritic soil stabilized with lime and periwinkle shell ash (PSA) admixture bound for sustainable road materials. **Innovative infrastructure solutions**, v. 7, n. 1, 2022.

EVANS, G. L.; BELL, D. H. Chemical stabilization of loess New Zealand. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 10. Stockhoim. Proceedings. Rotterdam: A. A. Balkema, v.3, 1981.

FARGHALY et al. **Advances in computational design**, v. 5, n. 1, p. 1–11, 2020.

FATTAH, M. Y.; AL-SAIDI, À. A.; JABER, M. M. Characteristics of clays stabilized with lime-silica fume mix. **Italian Journal of Geosciences**, v. 134, n. 1, p. 104–113, 2015.

FAUSTINO, O. W. C. **Análise do comportamento hidromecânico e o Processo de Formação de fissuras de solo expansivo reforçado com fibras do coco verde**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

FERREIRA, S. R. DE M. et al. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. suppl 1, 2018.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 401 p. 1995.

FERREIRA, S. R. M.; VILAR, O. M. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Capítulo 15: Solos colapsíveis e expansivos. São Paulo: ABMS, 2015.

FIGUEIREDO, S. S. **Estudo da durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

GEORGE, S. Z.; PONNIAH, D. A.; LITTLE, J. A. Effect of temperature on lime-soil stabilization. **Construction and building materials**, v. 6, n. 4, p. 247–252, 1992.

GHOBADI, M. H.; ABDILOR, Y.; BABAZADEH, R. Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. **Bulletin of engineering geology and the environment**, v. 73, n. 2, p. 611–619, 2014.

GHORBANI, A. et al. Stabilization of problematic silty sands using microsilica and lime. **The Baltic journal of road and bridge engineering**, v. 10, n. 1, p. 61–70, 2015.

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

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do baixo Jaguaribe/CE**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2008.

GOOSEN, F. A. M.; AL-RAWAS, A. A. Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment, London: Taylor & Francis Group, 544 p. 2006.

GRIM, R. E. Clay Mineralogy: McGraw-Hill Book Co., Inc., 384 pp. 1953.

GUIMARÃES, J. E. P. A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. 2ª ed. São Paulo: PINI. 2002

H, AFAF A; H., H. A.; A. ELH., A. Improvement of expansive subgrade by lime addition. **JES. Journal of Engineering Sciences**, v. 41, n. 5, p. 1778–1795, 2013.

HARISH, G. R. **Studies on stabilization of black cotton soil using lime**. Disponível em: <<https://www.irjet.net/archives/V4/i6/IRJET-V4I6326.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2023.

HERRIN, M. I; MITCHELL, H. Lime-soil mixtures. Highway Research Board Bulletin, Washington, n. 304, p. 99-121. 1961.

HILT, G.H.; DAVIDSON, D.T. Lime Fixation in Clayey Soils. Highway Research Board, Washington, D.C., n.262, p.20-32. 1960.

IJAZ, N. et al. Integrating lignosulphonate and hydrated lime for the amelioration of expansive soil: A sustainable waste solution. **Journal of cleaner production**, v. 254, n. 119985, p. 119985, 2020.

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

IS 2720-XL. Indian Standard code of practice for method of test for soils—Determination of free swell index of soils. 1977.

JAMES, J. et al. Strength and microstructure of micro ceramic dust admixed lime stabilized soil. **Revista de la construcción**, p. 5–22, 2018.

JAMES, J.; PANDIAN, P. K. Bagasse ash as an auxiliary additive to lime stabilization of an expansive soil: Strength and microstructural investigation. **Advances in civil engineering**, v. p. 1–16, 2018a. 2018.

JAMES, J.; PANDIAN, P. K. Select geotechnical properties of a lime stabilized expansive soil amended with bagasse ash and coconut shell powder. **Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering**, v. 13, n. s1, p. 45–60, 2018b.

JAMES, J.; ROSHNA, R.; SANTHIYA, S. Cashew nutshell ash as a supplementary additive in lime stabilized expansive soil composites. **Materials today: proceedings**, v. 62, p. 644–649, 2022.

JEFFREY, K. What are Expansive soil, 2007. Disponível em: http://www.bensonpc.com/downloads/public/What_Are_Expansive_Soils.pdf, Acesso em: 20 out. 2022.

JHA, A. K.; SIVAPULLAIAH, P. V. Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil. **Engineering geology**, v. 198, p. 53–64, 2015.

JIANG, X. et al. Analysis of strength development and soil-water characteristics of rice husk ash-lime stabilized soft soil. **Materials**, v. 12, n. 23, p. 3873, 2019.

JIMENEZ, S. J. A. Cimentaciones em terrenos expansivos o cola sables. in: Geotecnia Y Cimentos 111, Vol. 1, ED. Rueda, Madrid. PP533-650. 1980.

JONES, D.E.; JONES, K. Treating expansive soils, ASCE, Civil Engineering, Vol. 57, No.8, 1987.

JONES, L. D.; JEFFERSON, I. Expansive soils. ICE manual of geotechnical engineering, ICE Publishing, London, pp. 413-41. 2012.

JUSTO ALPAÑES, J. L.; DELGADO, A. E RUIZ, J. “The influence of stress-path in the collapse – swelling of soils at the laboratory”. Proceedings 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide, pp. 67-71. 1984.

LAMBE, T. W. A mechanistic Picture of. Sher strength in clay. Research Conf. On Shear Strength of coh Ensivf soils, Boulder, Colorado, pp 555-580. 1960.

LEITE, R. et al. Lime stabilization of expansive soil from Sergipe - Brazil. **E3S web of conferences**, v. 9, p. 14005, 2016.

Lemaire, K., Deneele, D., Bonnet, S., Legret, M. Effects of lime and cement treatment on the physicochemical, microstructural and mechanical characteristics of a plastic silt. Eng. Geol. 166, 255–261. 2013.

LÓPEZ-LARA, T. et al. Expansion reduction of clayey soils through Surcharge application and Lime Treatment. **Case studies in construction materials**, v. 7, p. 102–109, 2017.

LOVATO, S. L. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado a pavimentação**. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

M. A. AL-KIKI, I.; A. K. AL-JUARI, K.; A. A. KHATTAB, D. S. Strength, durability and hydraulic properties of clayey soil stabilized with lime and industrial waste lime. **AL-Rafdain Engineering Journal (AREJ)**, v. 16, n. 1, p. 102–116, 2008.

MA, B. et al. Experimental study on physical-mechanical properties of expansive soil improved by multiple admixtures. **Advances in civil engineering**, v. 2021, p. 1–15, 2021.

MAHEDI, M.; CETIN, B.; WHITE, D. J. Cement, lime, and fly ashes in stabilizing expansive soils: Performance evaluation and comparison. **Journal of materials in civil engineering**, v. 32, n. 7, p. 04020177, 2020.

MAUBEC, N. **Approche Multi-Echelle du Traitement des Sols à la Chaux - Etudes des Interactions avec les Argiles**. Tese de doutorado, Matériaux. Université de Nantes, 2010.

MAVROULIDOU, M. et al. A comparative assessment of chemical stabilisers including waste materials, for the treatment of swelling-shrinking soils. **E3S web of conferences**, v. 195, p. 03028, 2020.

MEDEIROS, L. D.; FERREIRA, S. R. M.; BELLO, M. I. M. C.V. Evolução da estabilização química em solos expansivos. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 8, p. 123-139, 2023.

MOGHAL, A. A. B. et al. Compressibility and durability characteristics of lime treated expansive semiarid soils. **Journal of testing and evaluation**, v. 43, n. 2, p. 20140060, 2015.

MUDGAL, A. Effect of lime and stone dust in the geotechnical properties of black cotton soil. **International journal of GEOMATE**, 2014.

MUNTOHAR, A. S. et al. Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber. **Journal of materials in civil engineering**, v. 25, n. 9, p. 1260–1270, 2013.

MUTAZ, E.; DAFALLA, M. A. Chemical analysis and X-ray diffraction assessment of stabilized expansive soils. **Bulletin of engineering geology and the environment**, v. 73, n. 4, p. 1063–1072, 2014.

NAGESH, S.; JAGADEESH, H. S.; NITHIN, K. S. Study on effect of laboratory roller compaction on unconfined compressive strength of lime treated soils. **International journal of geo-engineering**, v. 12, n. 1, 2021.

NALAWADE, R. D. et al. **Effects of hydrated lime in stabilization of black cotton soil**. Disponível em: <<https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v8i5/E7311068519.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2023.

NATIONAL LIME ASSOCIATION, Lime-Treated Soil Construction Manual - **Lime Stabilization & Lime Modification, Bulletin**. 2004.

NEVES, E. N. S. A. C. **Estudo Laboratorial de Solos Tratados com Cal Modelos de Comportamento**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2009.

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 de

Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2010.

OLPHEN, H. V. An introduction to clay colloid chemistry. Willey Interscience, New York, 301p. 1963.

OTOKO, G. Lime stabilization of deltaic Chikoko soils ARTICLE in ELECTRONIC JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING · JANUARY 2015. 2016.

PAIVA, S. C. **Estudo do Comportamento Geomecânico dos Solos Expansivos dos Municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca – PE e de Suas misturas com cal.** Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

PAKBAZ, M. S.; SEYEDALIZADEH GANJI, S. Effect of rice husk ash on the swelling pressure of bentonite soil stabilized with lime in the presence or lack of sulfate. **Journal of Hydraulic Structures**, v. 4, n. 2, p. 17–26, 2018.

PECK, R.B.; HANSON, W.E.; THORNBURN, T.H. **Foundation Engineering**, John Wiley & Sons, 514p, 1974.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

PEREIRA, R. S. et al. Soil stabilization with lime for the construction of forest roads. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 2, 2018.

PHANIKUMAR, B. R.; RAMANJANEYA RAJU, E. Compaction and strength characteristics of an expansive clay stabilised with lime sludge and cement. **SOILS AND FOUNDATIONS**, v. 60, n. 1, p. 129–138, 2020.

PINTO, S. P. E. Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. 2 ed. Rio de Janeiro: copiararte. 269 p. Isbn 85-902537-1-6. 2002.

PRASAD, D. S. V.; SIVANNARAYANA, C.; SUNITHA, P. Effect of bamboo fibres and lime on engineering properties of expansive soil. **IOP conference series. Materials science and engineering**, v. 1025, n. 1, p. 012010, 2021.

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

RAJASEKARAN, G., RAO, S.N., 1997. The microstructure of lime-stabilized marine clay. *Ocean Eng.* 24.

RAO, R. R.; RAHARDJO, H.; FREDJUND, D. G. Close from Heave Solutions for Expansive Soils. *Journ. Geotech. Eng. A.S.C.E.* Vol. 114, nº 5, 1988. pp. 573-588.

ROCHA, G. S. **Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito**

da cura acelerada na resistência mecânica. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

SAHOO, S.; PRASAD SINGH, S. Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymer and conventional stabilizers. **Construction and building materials**, v. 328, n. 127078, p. 127078, 2022.

SANDRONI S.S., CONSOLI, N.C. Sobre o Prática brasileira com dois solos difíceis: extremamente macios e solos expansíveis. XIII Brasileiro Congresso Geotécnico. 2010.

SCHREINER, H.D. State of the art review on expansive soils. Imperial College, London, 1987.

SCHREINER, H.D. **Volume change of compacted highly plastic African clays.** Tese de doutorado, Imperial College of Science and Technology, University of London, Londres, Inglaterra, 1988.

SECO, A. et al. Stabilization of expansive soils for use in construction. **Applied clay science**, v. 51, n. 3, p. 348–352, 2011.

SEED, H. B.; WOODWARD; R. J.; LUNDGREN, R. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE*, Vol. 88 (SM3), Pp. 53 – 87. 1962.

SHARABY, C. M. et al. Utilization of lime sludge activated by salt in Egyptian expansive soil improvement. **Asian journal of applied sciences**, v. 9, n. 2, 2021.

SHARMA, L. K. et al. Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study. **Applied clay science**, v. 152, p. 183–195, 2018.

SILVA, J. A. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SINGH RANDHAWA, K.; CHAUHAN, R.; KUMAR, R. An investigation on the effect of lime addition on UCS of Indian black cotton soil. **Materials today: proceedings**, v. 50, p. 797–803, 2022.

SINGH, D.; MANOJKUMAR, D.; KUMAR, S. Strength characteristics of kaolin clay mixed with RHA, sand and lime. **Materials today: proceedings**, v. 60, p. 328–335, 2022.

SITEPU, F. et al. Behaviour of mixed expansive soil and additive minerals as subgrade layer. **IOP conference series. Earth and environmental science**, v. 841, n. 1, p. 012009, 2021.

SKEMPTON, A. W. The colloidal activity of clays. *In: International Conference on Soil Mechanics And Foundations*. 3rd., 1953 Zurich, Proceeding. Zurich, 1953. v.1, 1953.

SNETHEN, D. R.; JOHNSON, L. D.; PATRICK, D. M. An evaluation of expedient methodology for identification of potentially expansive soils. Federal Highway Administration, Washington, FHWARD., p. 77 – 94. 1977.

SOLTANI, A. et al. Stabilization of a highly expansive soil using waste-tire-derived aggregates and lime treatment. **Case studies in construction materials**, v. 16, n. e01133, p. e01133, 2022.

SOUSA, A. S.; OLIVEIRA, S. O.; ALVES, L H. A pesquisa bibliográfica: princípios e Fundamentos. Cadernos da Fucamp, v.20, n.43, p.64-83. 2021.

SOUZA, R. F. C. **Estudo da influência da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com a técnica de transferência de vapor**, Tese de doutorado, Programada de geotcniia. Escola de engenharia de São Paulo, São Carlos. 2014.

SOUZA, R. F. C. **Estudo da influência da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com a tecnica da transferencia de vapor**. Tese de doutorado em Geotecnia, Universidade de São Paulo. 2015.

SOUTO MAIOR, J.S. **Melhoramento de Solos Expansivos com uso da Cal e Areia para Obras de infraestrutura: uma revisão**. COBRAE 2022. ABMS.

SRIDHARAN, A., RAO, A.S., SIVAPULLAIAH, P.V. Swelling pressure of clays. Geotech. Test. J. 9 (1), 24–33, 1986.

TASTAN, E., EDIL, T., BENSON, C., AYDILEK, A. Stabilization of organic soils with fly ash. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.** 137 (9), 819–833. 2011.

TESHOME, S.; CHEMEDA, Y. C. Experimental investigation on the effect of teff straw fiber and lime on strength and compressibility of black cotton soil. 2022.

THOMÉ, A. **Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando Seu Uso em Fundações Superficiais**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

THOMPSON, M. R. Lime Reactivity of Illinois Soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, v. 92, n. SM5, p. 67-92. 1966.

THYAGARAJ, T. et al. Laboratory studies on stabilization of an expansive soil by lime precipitation technique. **Journal of materials in civil engineering**, v. 24, n. 8, p. 1067–1075, 2012.

TOKSÖZ HOZATLIOĞLU, D.; YILMAZ, I. Shallow mixing and column performances of lime, fly ash and gypsum on the stabilization of swelling soils. **Engineering geology**, v. 280, n. 105931, p. 105931, 2021.

TRAN, T. D. et al. Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of Héricourt clay. **Journal of rock mechanics and geotechnical engineering**, v. 6, n. 5, p. 399–404, 2014.

TRB Report 5. Transportation Research Board - State of the Art Report 5. Lime Stabilization: Reactions, Properties, Design and Construction. Washington, USA. 1987.

VARGAS, M. Introdução a Mecânica dos Solos. McGraw-Hill do Brasil: Universidade de São Paulo, São Paulo. pp 25 – 33. 1977.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais.** Tese de doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2003.

VOGT, J. C. Estabilização Betuminosa. In: 7º Simpósio sobre pesquisas rodoviárias, Rio de Janeiro, 1971.

WANG, Y. et al. Behavior of fiber-reinforced and lime-stabilized clayey soil in triaxial tests. **Applied sciences (Basel, Switzerland)**, v. 9, n. 5, p. 900, 2019.

Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I., Higgins, D.D. Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized sulphate bearing clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag. *Eng. Geol.* 51 (4), 257–277. 1999.

WILLIAMS, A. A. B.; DONALDSON, G. W. Building on expansive soils in South Africa: 1973-1980. Proceedings 4th International Conference on Denver, Colorado, p. 834-844. 1980.

YIN, Z.; LEKALPURE, R. L.; NDIEMA, K. M. Experimental study of Black cotton soil stabilization with natural lime and pozzolans in pavement subgrade construction. **Coatings**, v. 12, n. 1, p. 103, 2022.

ZUKRI, A. Pekan soft clay treated with hydrated lime as a method of soil stabilizer. **Procedia engineering**, v. 53, p. 37–41, 2013.

APÊNDICE A – RESUMO DE ANÁLISES DOS SOLOS ESTUDADOS

Referência	País	Percentual de Cal Analisado (%)	Caracterização Física			Caracterização Química			Caracterização Mineralógica
			Caracterização Granulometria	Limites de Atteberg	Compactação	PH	CTC	Óxidos	
Maubec (2010)	ALEMANHA	0-10				X			X
Mutaz e Dafalla (2014)	ARÁBIA SAUDITA	4 e 8		X				X	X
Moghal et al. (2014)		2 e 4			X				X
Dang et al. (2016)	AUSTRÁLIA	2.5, 4.5, 6.25 e 9							
Soltani et al. (2022)		3 e 6		X	X				
Dang et al. (2018)		2.5							
Abreu (2020)	BRASIL	4	X	X	X				
Corrêa (2008)		2	X	X	X	X	X		X
Oliveira (2010)		2, 4 e 6			X				
Silva (2018)		0-13	X	X		X			
Ferreira et al. (2017)		0-7	X	X	X	X	X	X	X
Barbosa (2013)		3, 5 e 7	X	X	X	X	X	X	X
Rocha (2018)		1-6			X				
Paiva (2016)		3, 5 e 7	X	X	X	X	X	X	X
Leite et al. (2016)		3, 6 e 9		X	X				
Pereira (2018)		2			X				
Bezerra (2020)		5		X					

Cheng et al. (2018)	CHINA	0-9		X					X
Cheng e Huang (2018)		0-9		X	X				X
Jiang et al. (2019)		5							
Wang et al. (2019)		2, 4 e 6							
Ma et al. (2021)		6		X	X				
Ijaz et al. (2020)		1-6		X					
Farghaly et al. (2020)	EGITO	6			X	X			
Afaf et al. (2013)		6			X	X			
Emarah e Seleem (2017)		7		X	X	X			
Sharaby et al. (2021)		3, 6, 9 e 12		X		X		X	
George et al. (1992)	ESCÓCIA	3, 6, 9 e 12		X	X				
Seco et al. (2010)	ESPANHA	2 e 4			X				
Amena e Chakeri (2022)	ETIÓPIA	5		X	X				
Teshome et al. (2022)		4							
Dayioglu et al. (2017)	EUA	4, 8, 12		X	X				
Mahedi et al. (2020)		3, 5 e 7		X		X			
Akula et al. (2021)		1, 3 e 5		X			X		X
Al-Mukhtar et al. (2010)	FRANÇA	4, 6, 10 e 20		X		X	X		X

Tran et al. (2014)		5						
Al-Mukhtar et al. (2012)		4 e 10		X				X
Athanasopoulou e Kollaros (2016)	GRÉCIA	3, 6, 9 e 12			X			
Nagesh et al. (2021)		2, 4, 6 e 8		X	X	X		
Randhawa et al. (2022)		3, 6, 9 e 12		X	X			
James e Pandian (2018) (A)		3, 5.5 e 7						
James et al. (2022)		3, 5.5 e 7						
Phanikumar E Raju (2020)		0-12		X	X			
Bhuvaneshwari et al. (2020)		4		X	X			
Prasad et al. (2021)	INDIA	2, 4, 6 e 8		X	X			
Nalawade e Jadhao (2019)		2, 4, 6, 8 e 10		X	X			
Sharma et al. (2018)		1, 3, 5, 7 e 9		X	X			X
Jha e Sivapullaiah (2015)		2, 4 e 6		X	X			X
James e Pandian (2018) (B)		3		X				
Sahoo e Singh (2022)		4, 12 e 15		X	X			

James e Pandian (2016)		3, 5.5 e 7		X					
Singh et al. (2022)		6, 9 e 12			X				
Harish (2017)		3, 6 e 9		X	X				
Indiramma et al. (2019)		4 e 8		X	X				
Bakanar et al (2019)		3, 6 e 9		X	X				
Mudgal et al. (2014)		3, 6, 9 e 12			X				
Thyagaraj et al. (2012)		4.2		X		X			
Dash e Hussain (2012)		1, 3, 5, 9 e 13		X					X
Sitepu et al. (2021)	INDONÉSIA	1, 5 e 10		X	X	X	X		
Muntohar et al. (2013)		12							
Mavroulidou et al. (2020)	INGLATERRA	4		X					
Muhmed e Wanatowski (2013)		5		X	X	X			
Bell (1996)		2, 4, 6 e 8		X	X				
Ali et al. (2018)		5, 7, 9, 11 e 13			X				
Cheshomi et al. (2016)	IRÃ	3, 5 e 7		X					
Pakbaz e Ganji (2018)		3			X				

Ghobadi e Babazadeh (2013)		1, 3, 5 e 7			X				
Ghobadi et al. (2015)		1, 3 e 5			X				
Khattab et al. (2008)	IRAQUE	2, 4 e 6		X	X				
Mohammed (2015)		2, 4 e 6	X	X	X				
Al-Gharbawi et al. (2022)		5, 7 e 9							
Basma e Tuncer (1991)	JORDÂNIA	0-12		X					
Zukri (2013)	MALÁSIA	4		X		X			
López-Lara et al. (2017)	MÉXICO	2, 4 e 6		X	X				
Etim et al. (2021)	NIGÉRIA	2, 4, 6, 8 e 10		X	X				
Otoko e Iheanyi (2015)		2, 4, 6 e 8			X	X			
Al-Rawas et al. (2005)	OMÃ	3, 6 e 9		X					
Elsharief et al. (2013)	SUDÃO	3 e 6.5		X	X				
Yin et al. (2022)	QUÊNIA	1, 2, 3 e 4		X	X				
Hozatlioglu e Yilmaz (2021)	TURQUIA	5			X				

Referência	País	Percentual de Cal Analisado (%)	Caracterização Microestrutural	Caracterização Mecânica		
				Expansão	CBR	UCS
Maubec (2010)	ALEMANHA	0-10	X			X

Mutaz e Dafalla (2014)	ARÁBIA SAUDITA	4 e 8					
Moghal et al. (2014)		2 e 4					
Dang et al. (2016)	AUSTRÁLIA	2.5, 4.5, 6.25 e 9				X	
Soltani et al. (2022)		3 e 6		X		X	
Dang et al. (2018)		2.5		X			
Abreu (2020)	BRASIL	4		X	X		
Corrêa (2008)		2		X	X	X	
Oliveira (2010)		2, 4 e 6		X	X	X	
Silva (2018)		0-13		X			
Ferreira et al. (2017)		0-7	X	X			
Barbosa (2013)		3, 5 e 7	X	X		X	
Rocha (2018)		1-6					
Paiva (2016)		3, 5 e 7	X	X			
Leite et al. (2016)		3, 6 e 9		X			
Pereira (2018)		2		X	X	X	
Bezerra (2020)		5					
Cheng et al. (2018)		CHINA	0-9		X	X	X
Cheng e Huang (2018)			0-9		X	X	X
Jiang et al. (2019)	5		X				
Wang et al. (2019)	2, 4 e 6		X				
Ma et al. (2021)	6			X		X	
Ijaz et al. (2020)	1-6			X			
Farghaly et al. (2020)	EGITO	6	X	X		X	
Afaf et al. (2013)		6		X	X	X	
Emarah e Seleem (2017)		7		X		X	

Sharaby et al. (2021)		3, 6, 9 e 12		X			
George et al. (1992)	ESCÓCIA	3, 6, 9 e 12				X	
Seco et al. (2010)	ESPAÑA	2 e 4		X			
Amena e Chakeri (2022)	ETIÓPIA	5		X	X	X	
Teshome et al. (2022)		4				X	
Dayioglu et al. (2017)	EUA	4, 8, 12		X		X	
Mahedi et al. (2020)		3, 5 e 7		X		X	
Akula et al. (2021)		1, 3 e 5					X
Al-Mukhtar et al. (2010)	FRANÇA	4, 6, 10 e 20		X		X	
Tran et al. (2014)		5	X				
Al-Mukhtar et al. (2012)		4 e 10	X	X		X	
Athanasopoulou e Kollaros (2016)	GRÉCIA	3, 6, 9 e 12				X	
Nagesh et al. (2021)	INDIA	2, 4, 6 e 8	X		X	X	
Randhawa et al. (2022)		3, 6, 9 e 12				X	
James e Pandian (2018) (A)		3, 5.5, 7	X				
James et al. (2022)		3, 5.5, 7				X	
Phanikumar E Raju (2020)		0-12			X	X	
Bhuvaneshwari et al. (2020)		4			X		
Prasad et al. (2021)		2, 4, 6 e 8				X	X
Nalawade e Jadhao (2019)		2, 4, 6, 8 e 10			X		
Sharma et al. (2018)		1, 3, 5, 7 e 9	X				X

Jha e Sivapullaiah (2015)		2, 4 e 6	X	X		X
James e Pandian (2018) (B)		3	X	X		X
Sahoo e Singh (2022)		4, 12 e 15		X		X
James e Pandian (2016)		3, 5.5 e 7		X		X
Singh et al. (2022)		6, 9 e 12				X
Harish (2017)		3, 6 e 9			X	X
Indiramma et al. (2019)		4 e 8		X		X
Bakanar et al (2019)		3, 6 e 9				
Mudgal et al. (2014)		3, 6, 9 e 12	X		X	X
Thyagaraj et al. (2012)		4.2				X
Dash e Hussain (2012)		1, 3, 5, 9 e 13		X		X
Sitepu et al. (2021)	INDONÉSIA	1, 5 e 10		X	X	X
Muntohar et al. (2013)		12			X	X
Mavroulidou et al. (2020)	INGLATERRA	4		X		
Muhmed e Wanatowski (2013)		5	X			X
Bell (1996)		2, 4, 6 e 8			X	X
Ali et al. (2018)		5, 7, 9, 11 e 13				X
Cheshomi et al. (2016)	IRÃ	3, 5 e 7	X	X		
Pakbaz e Ganji (2018)		3		X		
Ghobadi e Babazadeh (2013)		1, 3, 5 e 7				X
Ghobadi et al. (2015)		1, 3 e 5		X	X	X
Khattab et al. (2008)	IRAQUE	2, 4 e 6	X	X		X
Mohammed (2015)		2, 4 e 6				X
Al-Gharbawi et al. (2022)		5, 7 e 9		X		

Basma e Tuncer (1991)	JORDÂNIA	0-12		X		
Zukri (2013)	MALÁSIA	4				X
López-Lara et al. (2017)	MÉXICO	2, 4 e 6		X		
Etim et al. (2021)	NIGÉRIA	2, 4, 6, 8 e 10				X
Otoko e Iheanyi (2015)		2, 4, 6 e 8				X
Al-Rawas et al. (2005)	OMÃ	3, 6 e 9		X		
Elsharief et al. (2013)	SUDÃO	3 e 6.5			X	X
Yin et al. (2022)	QUÊNIA	1, 2, 3 e 4		X	X	
Hozatlioglu e Yilmaz (2021)	TURQUIA	5		X		

APÊNDICE B – TEOR DE CAL IDEAL, LL, LP E IP DOS SOLOS NATURAIS E MELHORADOS

Referência	TEOR DE CAL IDEAL (%)	SOLO NATURAL			SOLO MELHORADO		
		LL	LP	IP	LL	LP	IP
Maubec (2010)	10						
Mutaz e Dafalla (2014)	8	136	60	76	110	91	19
Moghal et al. (2014)	4	62	30	32			
Dang et al. (2016)	6	86	37	49			
Soltani et al. (2022)	6	44	22	22			
Dang et al. (2018)	3	86	37	49			
Abreu (2020)	4	25	18	7	23	20	3
Corrêa (2008)	2	82	34	48	68	41	27
Oliveira (2010)	6	35	28	7			
Silva (2018)	9	50	20	30	53	40	13
Ferreira et al. (2017)	5	61	31	30	54	42	12
Barbosa (2013)	7	37	18	19	39	26	13
Rocha (2018)	6	82	44	38			
Paiva (2016)	7	81	44	37	93	56	39
Leite et al. (2016)	6	57	22	35	50		18
Pereira (2018)	2	25	19	7			
Bezerra (2020)	5	74	26	48	78	27	51
Cheng et al. (2018)	6	65	34	31	65	45	20
Cheng e Huang (2018)	9	64	33	31	64	56	8
Jiang et al. (2019)	7	38	19	19			
Wang et al. (2019)	4	57	20	37			
Ma et al. (2021)	6	52	24	28	43	27	17
Ijaz et al. (2020)	5	62	22	40			30
Farghaly et al. (2020)	6	64	26	38	25	22	3
Afaf et al. (2013)	6			10			4
Emarah e Seleem (2017)	7	77	27	50	49	28	21
Sharaby et al. (2021)	12	97	34	63	93	37	57
George et al. (1992)	6	55	30	25	56	39	17
Seco et al. (2010)	4	44	25	19			
Amena e Chakeri (2022)	5	72	36	36	63	30	33
Teshome et al. (2022)	4	82	32	50			
Dayioglu et al. (2017)	12	57	28	29	40	37	3
Mahedi et al. (2020)	5	51	20	31	44	39	5
Akula et al. (2021)	5	95	34	61			20
Al-Mukhtar et al. (2010)	6	235	55	180			60
Tran et al. (2014)	5	70	44	26			
Al-Mukhtar et al. (2012)	10			70			4
Athanasopoulou e Kollaros (2016)	9	62	23	39			
Nagesh et al. (2021)	6	65	30	35	57	32	25
Randhawa et al. (2022)	9	79	53	26			
James e Pandian (2018) (A)	7						

James et al. (2022)	7	68	27	41			
Phanikumar E Raju (2020)	12	84	26	58	72	113	41
Bhuvaneshwari et al. (2020)	4	78	30	48	78	45	33
Prasad et al. (2021)	4	82	40	42	75	45	30
Nalawade e Jadhao (2019)	10			25			4
Sharma et al. (2018)	5	43	23	20	37	25	13
Jha e Sivapullaiah (2015)	6	72	32	40	56	51	5
James e Pandian (2018) (B)	3	68	27	41	64	35	31
Sahoo e Singh (2022)	15	78	26	52	44	31	13
James e Pandian (2016)	7	68	27	41	49	37	12
Singh et al. (2022)	9	49	27	22			
Harish (2017)	6	68	42	26	45	62	17
Indiramma et al. (2019)	8	56	17	39	38	19	20
Bakanar et al (2019)	6	67	33	34	58	38	20
Mudgal et al. (2014)	9	57	31	27			
Thyagaraj et al. (2012)	4	75	25	50	43	35	8
Dash e Hussain (2012)	9	460	54	406	200	165	35
Sitepu et al. (2021)	5	65	34	32	63	46	18
Muntohar et al. (2013)	12	63	37	26			
Mavroulidou et al. (2020)	4	200	29	171	110	64	46
Muhmed e Wanatowski (2013)	5	66	33	33	87	57	30
Bell (1996)	4	58	26	32	53	34	19
Ali et al. (2018)	7	330	43	287			
Cheshomi et al. (2016)	7	120	36	84	104	53	51
Pakbaz e Ganji (2018)	3						
Ghobadi e Babazadeh (2013)	7	32	22	10			
Ghobadi et al. (2015)	5						
Khattab et al. (2008)	4	50	27	23	38	35	3
Mohammed (2015)	4	46	20	26	40	19	21
Al-Gharbawi et al. (2022)	9	121	121	0			
Basma e Tuncer (1991)	12	82	37	44	55	45	10
Zukri (2013)	4			22			19
López-Lara et al. (2017)	6	72	32	40	49	36	13
Etim et al. (2021)	8	47	30	17	36	28	8
Otoko e Iheanyi (2015)	6	68	30	38			
Al-Rawas et al. (2005)	6	50	30	21	57	38	19
Elsharief et al. (2013)	7	66	29	37	55	45	10
Yin et al. (2022)	4	71	36	35	64	43	21
Hozatlioglu e Yilmaz (2021)	5	64	17	47			