



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

SERGIO CARVALHO DE PAIVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DOS SOLOS
EXPANSIVOS DOS MUNICÍPIOS DE CABROBÓ, PAULISTA E
IPOJUCA - PE E DE SUAS MISTURAS COM CAL**

RECIFE, 2016

SERGIO CARVALHO DE PAIVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DOS SOLOS
EXPANSIVOS DOS MUNICÍPIOS DE CABROBÓ, PAULISTA E
IPOJUCA - PE E DE SUAS MISTURAS COM CAL**

Tese submetida ao Corpo Docente da
Coordenação do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal
de Pernambuco como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Doutor
em Engenharia Civil

Linha de pesquisa, Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo
Ferreira

RECIFE, 2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

- P142e Paiva, Sergio Carvalho de.
Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos Dos
Municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca - Pe e de suas misturas com cal /
Sergio Carvalho de Paiva. - 2016.
168folhas, Il.; Tabs.; Qua. e Equa.
- Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero De Melo Ferreira.
- Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, 2016.
Inclui Referências e Apêndices.
1. Engenharia Civil. 2. Solo expansivo. 3. Estabilização dos solos.
4. Solo-Cal. 5. Fluxo preferencial. I. Ferreira, Silvio Romero De Melo.
(Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-173



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DOS SOLOS EXPANSIVOS
DOS MUNICÍPIOS DE CABROBÓ, PAULISTA E IPOJUCA - PE
E DE SUAS MISTURAS COM CAL**

defendida por

Sérgio Carvalho de Paiva

Considera o candidato APROVADO

Recife, 31 de outubro de 2016

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira – UFPE
(orientador)

Prof.^a Dr.^a Stela Fucale Sukar - UPE
(examinadora externa)

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira – UNICAP
(examinador externo)

Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães – UFPE
(examinador interno)

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá – UFPE
(examinador interno)

*Dedico este trabalho à minha mãe, em memória,
Letice Carvalho de Paiva, meu pai, em memória, Ernani Canto de Paiva, minha esposa,
Maria Rogéria Leite de Paiva, minha filha, Karina Maria Leite Paiva e
Toda minha família Irmãs, Irmão, cunhados, cunhada, sobrinhos, sobrinhas e amigos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado forças, inteligência e saúde para concluir mais esse objetivo de vida, a ele eu agradeço por toda minha vida.

Aos meus pais, Ernani Canto de Paiva e Letice Carvalho de Paiva, que me deram educação e me ensinaram a viver com muito amor compreensão apesar de todo sacrifício deles, a eles meus sinceros agradecimentos com muito carinho, amor e admiração.

A minha Esposa, Maria Rogéria Leite de Paiva pelo seu espírito de dedicação e compreensão que compartilhou durante o desenvolvimento desse trabalho, a minha gratidão pelo seu carinho e amor. A minha filha, Karina Maria Leite Paiva que incentivou com carinho esse trabalho, meu agradecimento.

Aos meus familiares: irmãos, irmãs, sobrinhos sobrinhas, sobrinha-neta, cunhados, cunhadas e todos os amigos pelo incentivo e carinho de todos. Meus agradecimentos sinceros a todos.

Ao prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira, pelos ensinamentos, incentivo para formação, elaboração, correção e pela orientação tão criteriosa e brilhante deste trabalho. Meus agradecimentos.

À professora, amiga, irmã Alexandra Salgueiro, pela ajuda e incentivo sempre bastante motivador, meus agradecimentos.

À professora Dr^a. Maria das Graças de V. X. Ferreira, pela dedicação e sempre pronta para ajudar no desenvolvimento desse trabalho e na parte mineralógica dos solos. Meu sincero obrigado.

Aos profissionais dos laboratórios da UFPE, UNICAP, USP e CETENE pela ajuda no desenvolvimento desse trabalho e na execução de todas as metodologias práticas nos laboratórios e em campo. Meu agradecimento a todos, sem eles ficaria impossível a realização desse trabalho. Em especial aos técnicos Leonardo (Léo) e Francisco laboratório de solos da UNICAP e UFPE, Francisco das Chagas, Amaro Sergio Botelho Laboratório de química UNICAP.

Aos colegas do programa de mestrado e doutorado de Geotecnia da UFPE, pela união e cooperação em especial a Welington Rego, Marta Rolin, Márcia Alves, Valquíria Barbosa, Gerson Meus sinceros agradecimento a todos.

Aos professores Margarete Alheiro, Fernando Jucá, Roberto Coutinho, Leonardo José do programa de pós-graduação da área de Geotecnia da UFPE pela dedicação na transferência de conhecimento e enriquecimento profissional. Agradeço por tudo.

A Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) pelo suporte técnico dos laboratórios para os ensaios químicos, físicos e mineralógicos realizados.

Ao Centro de Tecnologia Estratégicas de Pernambuco – CETENE, pela utilização dos equipamentos na determinação da difração de raio X, na pessoa de Raphael Nascimento.

A Universidade de São Paulo – USP, pelas análises de Granulometria a Lazer, Densidade Real por Picnometria de gás Hélio e análise Termodiferencial realizadas nos seus laboratórios.

A Coordenadora da Estação de Tratamento de Efluente da COMPESA Janga-Paulista Maria de Fátima B. da Silva pela utilização da área que fica ao lado do edifício da administração da COMPESA, estação de tratamento de efluente do Janga – Paulista, próximo a PE-22, onde desenvolvemos os estudos sobre SOLO EXPANSIVO.

Aos alunos de iniciação científica da Universidade Católica de Pernambuco, que contribuíram de uma forma fundamental para o desenvolvimento da metodologias em especial Wrias, Thayse, Rafael do curso de Engenharia civil, Natalia, Munique, Rodolfo e do curso de Engenharia Química.

A Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, pela organização do programa de pós-graduação de nível excelente.

Por fim a todos que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

Argilas expansivas são solos problemáticos para edificações e obras de infraestrutura em todo o mundo, causando danos socioeconômicos e ambientais. Dois requisitos básicos são necessários para um solo exibir expansividade, um intrínseco e outro extrínseco. O intrínseco está relacionado com a composição mineralógica, textura e estrutura que devem existir e entrar em funcionamento, em nível microescala, mecanismos que produzam a instabilidade volumétrica do solo. O extrínseco está relacionado com a climatologia, a hidrogeologia, a vegetação e a ocupação antrópica que devem estar presentes e capazes de transferir a umidade de um ponto a outro do solo. A mistura da cal com solo expansivo é uma das técnicas de estabilização. Este material tem propriedades físico-químicas capazes de conferir ao solos expansivo, quando misturado, mudanças na microestrutura das partículas devido à floculação e a reações pozolânicas. Atualmente encontra-se no estado de Pernambuco a execução de grandes programas habitacionais e obras de infraestrutura. Cerca de 51,2% da área do Estado tem suscetibilidade alta e média de ocorrência de solos expansivo. Um programa de investigação geotécnica de campo e laboratório foi realizado com o objetivo de analisar o comportamento geomecânico dos solos naturais dos municípios de Cabrobó, Ipojuca, Paulista - PE e dos efeitos da adição da cal a esses nas proporções de 1%, 3%, 5%, 7%. Foram realizados ensaios de caracterização física, química mineralógica, microestrutural, ensaios para avaliar a expansão livre, tensão de expansão e a resistência à compressão simples. Os solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista apresentaram interestratificação irregular de minerais do tipo 2:1 esmectitas e vermiculitas. O solo de Cabrobó tem expansividade média e pode causar nas edificações fissuras importantes enquanto os solos de Ipojuca e Paulista têm expansividade alta e pode causar danos as edificações que levam a demolição. A avaliação da tensão de expansão depende do estado tensional. O teor de cal determinado pelo critério de Eades e Grim (1966) para estabilizar os solos foi consistente para os solos de Cabrobó e Paulista mas não foi eficaz para estabilizar o solo de Ipojuca. Os solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista foram estabilizados quanto a expansão livre, tensão de expansão para teor de cal de 3%, 11% e 5%, respectivamente. O teor de cal para estabilizar a expansão dos solos deve atender a nulidade da expansão livre e tensão de expansão simultaneamente.

Palavras - chave: Solo expansivo. Estabilização dos solos. Solo-Cal.

ABSTRACT

Expansive Clays are problematic soils for infrastructure buildings worldwide, causing socio-economic and environmental damage. Two basic requirements are necessary for a soil to show expansiveness, an intrinsic and other extrinsic. The intrinsic one is associated with the mineralogical composition, texture and structure which must be up and functioning in microscale level, mechanisms that produce the volume of soil instability. The extrinsic requirement is related to climatology, hydrology, vegetation and human occupation that must be present and able to transfer moisture from one point to another in soil. The mixing of lime with expansive soils is one of the stabilization techniques. This material has physicochemical properties capable of providing the expansive soils, when mixed, changes in microstructure of the particles due to flocculation and pozzolanic reactions. The execution of large housing programs and infrastructure work is currently happening in the state of Pernambuco. About 51.2% of the state area has high and average susceptibility occurrence of expansive soils. A geotechnical investigation program of field and laboratory was conducted with the objective of analyzing the geomechanical behavior of natural soils of the municipalities of Cabrobó, Ipojuca and Paulista - PE and the effects of adding lime to those in the proportions of 1%, 3% 5% and 7%. The soils of Cabrobó and Ipojuca have irregular interstratification of 2: 1 type minerals, mica and expansive smectite, vermiculite and chlorite and the Paulista soil features irregular interstratification type 2:1 expansive mica smectite and vermiculite with the presence of kaolinite. The soil of Cabrobó has average grade expansiveness and can cause important cracks in the buildings and the soils of Ipojuca and Paulista have high degree of expansiveness and can cause damage to buildings that lead to demolition. The evaluation of expansion tension depends on the tensional state. The lime content determined by the criterion of Eades and Grim (1966) to stabilize the soil was consistent for Cabrobó and Paulista soils but was not effective to stabilize the soil of Ipojuca. The lime content to stabilize the expansion of the soil must meet both the nullity of the free expansion and expansion tension simultaneously.

Key-word: Expansive soils. Stabilization of soils. Soil-lime.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Unidade e folha tetraédrica.	27
Figura 2.2	Unidade e folha octaédrica	27
Figura 2.3	Representação da caulinita	28
Figura 2.4	Representação da estrutura 1:1 e 2:1	29
Figura 2.5	Representação da estrutura da illita e esmectita com a penetração da água	29
Figura 2.6	Representação da estrutura da montmorilonita (2:1) com a penetração da água.	30
Figura 2.7	Representação da estrutura da caulinita do tipo 1:1	31
Figura 2.8	Representação das principais argilas expansivas	34
Figura 2.9	Mapa com indicação dos solos expansivos pelo mundo.	48
Figura 2.10	Suscetibilidade a Expansão em Pernambuco	50
Figura 2.11	Micro relevo em período seco	51
Figura 2.12	Influência do clima	52
Figura 2.13	Balanço hídrico	52
Figura 2.14	Curva de contração de um solo	53
Figura 2.15	Relação da sucção e o teor de umidade	54
Figura 2.16	Capacidade de sucção	55
Figura 2.17	Curva característica típica	55
Figura 2.18	Curva da termogravimetria com os valores das 5 amostras	65
Figura 2.19	Cristais de matéria prima não decomposta	66
Figura 2.20	Aglomerado de cristais não calcinados	66
Figura 2.21	Volume ocupado por 50 g de amostras de cal	68
Figura 2.22	Resíduo das peneiras nº 30 e nº 200 das cales C3 e C6	68
Figura 2.23	Concentração de água ao redor da partícula.	72
Figura 2.24	Cimentação do argilomineral na presença da cal.	76
Figura 2.25	Variação da umidade com teor de cal (%) a) Relaciona o percentual de umidade com umidade da amostra. Verificando os limites de consistência das misturas solo cal. b) Limites de Atterberg em função do teor de cal com um dia de cura, c) Efeito da cal sobre os limites de consistência.	80
Figura 2.26	Curvas granulométricas do solo natural sem a cal versus solo com 9% de cal.	81
Figura 2.27	Variação das frações granulométricas das misturas: (a) solo + 1% cal, (b) solo + 2% cal, (c) solo + 3% cal, (d) solo + 1% cimento, (e) solo + 2% cimento, (f) solo + 3% cimento e a influência do tempo	82

	de descanso entre a mistura e o ensaio de granulometria,	
Figura 2.28	MEV solo natural com 4% cal	84
Figura 2.29	MEV solo natural com 5% cal	84
Figura 2.30	MEV solo natural com 4% cal variando o tempo de cura	85
Figura 2.31	Curvas de compactação solo e solo-cal	86
Figura 2.32	Curvas de compactação antes e após o tratamento com cal	86
Figura 2.33	Efeito da cal e do tempo de cura na pressão de expansão,	87
Figura 2.34	Variação do Potencial de Expansão e Tensão de expansão com o teor de cal a) Potencial de expansão b) Tensão de expansão	89
Figura 2.35	Curva de compactação das amostras ensaiadas.	90
Figura 2.36	Efeito da quantidade de cal sobre a resistência a compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias,	91
Figura 2.37	Resistência à Compressão Simples (MPa) – Solo-Cal e Solo-Cal-CCA,	92
Figura 2.38	Resistência à compressão de um solo argiloso com cal,	93
Figura 2.39	Resistência à Compressão Simples (MPa) dos solos tratados com cal variando os teores de 2, 4 e 6% e com o tempo de cura de 7, 14 e 28 dias. Da Arábia Saldíta,	94
Figura 3.1	Carta de Suscetibilidade a Expansão dos solos no estado de Pernambuco com destaque para os municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista	96
Figura 3.2	Coleta de amostras indeformadas no município de Paulista.	98
Figura 3.3	Aparelho analisador de partículas por difração a laser “granulômetro”,	100
Figura 3.4	Equipamento Picnômetro Gás Hélio,	100
Figura 3.5	Método de Avaliação da Tensão de Expansão	106
Figura 3.6	Etapas do ensaio da curva característica	109
Figura 4.1	Curva granulométrica dos Solos: a) Cabrobó, Ipojuca, Paulista; Distribuição de frequência dos grãos b) Cabrobó, c) Ipojuca e d) Paulista.	111
Figura 4.2	Curva de Plasticidade e atividade do solo natural nos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.	113
Figura 4.3	Curva de Compactação do Solo de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.	115
Figura 4.4	Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para os solos naturais de: a) e d) Cabrobó, b) e e) Ipojuca e c) e f) Paulista.	120
Figura 4.5	Eletromicrografias do solo de Cabrobó compactado (a) aumentada 200X. (b) aumentada 2000 X. das microestruturas do solo expansivo de Cabrobó – PE. (c e d) Eletromicrografias em outro ângulo (aumentadas em 1000 e 5.000 X) respectivamente	122

Figura 4.6	Eletrmicrografias do solo de Ipojuca compactado (a) ampliada 70 vezes. (b) ampliada 10.000 vezes (c) ampliada 1000 vezes. (d) ampliada 5000 vezes.	122
Figura 4.7	Eletrmicrografias do solo expansivo de Paulista compactado com aumento de: a) 200X. b) 1000. Eletrmicrografias do solo expansivo de Paulista compactado em outro ângulo com aumento de: c) 2000. d) 5000	123
Figura 4.8	Relação entre o grau de umidade e o grau de saturação Cabrobó	124
Figura 4.9	Relação entre o grau de umidade e o grau de saturação Ipojuca	125
Figura 4.10	Relação entre o grau de umidade e o grau de saturação Paulista	126
Figura 4.11	Relações das fases sólidas, líquido e gasosa	127
Figura 4.12	Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Cabrobó: a - Expansão sob tensão, b) Método 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 - Expansão e colapso.	128
Figura 4.13	Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Ipojuca: a - Expansão sob tensão, b) Método 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 - Expansão e colapso.	128
Figura 4.14	Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Paulista: a - Expansão sob tensão, b) Método 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 - Expansão e colapso.	128
Figura 4.15	Resistência a Compressão Simples do solo, sem cal, em relação a deformação do município de Cabrobó.	130
Figura 4.16	Resistência a Compressão Simples do solo, sem cal, em relação a deformação do município de Ipojuca.	130
Figura 4.17	Resistência a Compressão Simples do solo, sem cal, em relação a deformação do município de Paulista.	130
Figura 5.1	Curva granulométrica da cal.	131
Figura 5.2	Curvas da TG e DTG para a cal	133
Figura 5.3.	Variação do pH em água com o teor de cal	134
Figura 5.4	Curvas granulométricas dos solos e das misturas solo-cal variando a concentração da cal de d) Cabrobó, e) Ipojuca e f) Paulista. E distribuição de frequência dos grãos de a) Cabrobó, b) Ipojuca e c)	136
Figura 5.5	Carta de plasticidade e atividade os solos e das misturas solo-cal.	137
Figura 5.6	Variação do conteúdo de água com o teor de cal	137
Figura 5.7	Peso específico real dos grãos pelos métodos com adição de cal: a) de gás Hélio e b) NBR 6508/84.	138
Figura 5.8	Curva de compactação do solo natural e das misturas solo-cal dos municípios estudados.	140

Figura 5.9	a) Umidade Ótima relacionado com o teor de cal, e b) Peso específico Aparente seco máximo relacionado com o teor de cal.	141
Figura 5.10	CTC das misturas solo-cal	143
Figura 5.11	Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para os solos com acréscimo de 3, 5 e 7% de cal nos solos de Cabrobó.	146
Figura 5.12	Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para os solos com acréscimo de 3, 5 e 7% de cal nos solos de Ipojuca.	147
Figura 5.13	Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para os solos com acréscimo de 3, 5 e 7% de cal nos solos de Paulista.	148
Figura 5.14	(a, b) Eletromicrografias (aumentadas 500 e 5.000 X) das microestruturas do solo com adição de 3% de cal. Cabrobó	150
Figura 5.15	(a, b) Eletromicrografias (aumentadas 500 e 5.000 X) das microestruturas do solo de Cabrobó com adição de 5% de cal	150
Figura 5.16	(a, b) Eletromicrografias (aumentadas 500 e 5.000 X) das microestruturas do solo de Cabrobó com adição de 7% de cal.	150
Figura 5.17	(a, b) Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 3% de cal. Ipojuca.	151
Figura 5.18	(a,b) - Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 5% de cal. Ipojuca	151
Figura 5.19	(a, b) Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 7% de cal. Ipojuca.	151
Figura 5.20	(a, b) Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 3% de cal. Paulista.	152
Figura 5.21	(a,b) - Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 5% de cal. Paulista	152
Figura 5.22	(a, b) Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 7% de cal. Paulista.	152
Figura 5.23	Variação da Tensão de Expansão com o teor de cal dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.	154
Figura 5.24	Variação de Expansão Livre com o teor de cal. Nos municípios de Cabrobó,	155
Figura 5.25	Corpo de prova de Cabrobó (a) antes do rompimento; (b) após o rompimento.	155
Figura 5.26	Evolução dos valores da RCS para as amostras de solo natural e com adição de 3% de cal, para cura de 48 horas de Cabrobó.	156
Figura 5.27	Evolução dos valores da RCS para as amostras de solo natural e com adição de 5% de cal, para cura de 48 horas de Cabrobó.	156
Figura 5.28	Evolução dos valores da RCS para as amostras de solo natural e com adição de 7% de cal, para cura de 48 horas de Cabrobó.	156
Figura 5.29	Corpo de Prova do solo do Município de Paulista após rompimento.	157
Figura 5.30	Variação da tensão axial com 3, 5 e 7% cal Ipojuca	158

Figura 5.31	Corpo de provas RCS Paulista	159
Figura 5.32	Evolução dos valores da RCS para as amostras de solo natural e com adição de 3, 5 e 7% de cal. Para cura de 48h, do solo de Paulista	160
Figura 5.33	Variação da tensão média (kPa) relacionando o teor de cal do solo de Paulista.	161
Figura 5.34	Comparação dos Principais métodos dos solos estudados	163
Figura 5.35	Comparação dos Principais métodos das misturas solo-cal	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Critérios de USBR - HOLTZ (1953)	41
Tabela 2.2	Critérios de Ranganathan (1965)	41
Tabela 2.3	Critérios de Cuellar (1978)	41
Tabela 2.4	Critérios de Lambe (1960)	42
Tabela 2.5	Critérios de Seed et al. (1962)	43
Tabela 2.6	Grau de expansividade de Celler 1978)	43
Tabela 2.7	Grau de expansividade pelos critérios de Chen (1965)	44
Tabela 2.8	Grau de expansividade pelos critérios de Rodriguez e Ortiz (1975)	44
Tabela 2.9	Possíveis danos pelos critérios de Jimenez (1980)	44
Tabela 2.10	Composição Química dos Óxidos Totais das Amostras de Cal Hidratada, Calculadas a Partir dos Resultados da Análise Química. (CINCOTTO, 1980)	64
Tabela 2.11	Valores da termogravimetria para construção do gráfico (CINCOTTO, 1980)	65
Tabela 2.12	Características físicas e químicas das cales. (ABNT, 2003 a)	67
Tabela 2.13	Resultados das análises químicas das cales do Recife (PAIVA, 2007)	67
Tabela 2.14	Valores médios de expansão e CBR do solo natural e das misturas solo-cal e solo-cimento (EMMERT, 2010).	88
Tabela 2.15	valores dos ensaios de expansão nos solos originais e nos solos tratados com cal.(SULEIMAN, 2013).	90
Tabela 4.1	Caracterizações Física dos solos.	112
Tabela 4.2	Peso Específico Real dos Grãos	114
Tabela 4.3	Caracterização química do solo natural de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.	117
Tabela 4.4	Valores das porcentagens de óxidos e Perda ao fogo dos solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.	118
Tabela 4.5	Tensão de expansão dos solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.	129
Tabela 5.1	Resultados das análises químicas da cal	132
Tabela 5.2	Resultado dos óxidos da cal por fluorescência de Raio-X.	132
Tabela 5.3	Valores de pH	134
Tabela 5.4	Caracterização granulométrica do solo e da mistura solo-cal.	137
Tabela 5.5	Resultados dos Pesos Específicos dos grãos pelos dois métodos com adição de cal comparados com as amostras originais.	138

Tabela 5.6	Valores dos Pesos Específicos dos solos naturais e com adição da cal.	139
Tabela 5.7	Resultado das análises químicas da mistura solo-cal nos solos dos três municípios.	142
Tabela 5.8	Valores das porcentagens de óxidos e Perda ao fogo nas misturas solo-cal nos três solos estudados.	142
Tabela 5.9	Resultado da Capacidade de Troca Catiônica da mistura solo-cal.	143
Tabela 5.10	Resumo de alguns parâmetros químicos e seus conceitos	144
Tabela 5.11	Valores de expansão Livre e Tensão de Expansão para as misturas solo-cal, nos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.	154
Tabela 5.12	Teores de cal que estabilizaram os solos de Cabrobó Ipojuca e Paulista.	154
Tabela 5.13	Valores de deformação, tensão e módulo de elasticidade dos ensaios de Cabrobó.	157
Tabela 5.14	Valores de deformações, Tensões e módulo de elasticidade dos ensaios no solo de Ipojuca.	158
Tabela 5.15	Valores de deformações, Tensões e módulo de elasticidade dos ensaios no solo de Paulista.	159
Tabela 5.16	Resumo da caracterização física química e mineralógica dos solos	164
Tabela 5.17	Principais conclusões da mistura solo-cal	166

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	Estruturas químicas dos principais argilominerais	31
Quadro 2.2	Identificação dos solos expansivos (Ferreira 1995)	38
Quadro 2.3	Fatores que influenciam a expansão dos solos, (NELSON; MILLER,1992 apud PAIVA, 2009)	45
Quadro 2.4	Situação em que o solo se encontra e que influenciam na expansão (NELSON; MILLER,1992 apud PAIVA, 2009)	46
Quadro 2.5	Ocorrência de solos expansivos no mundo	48
Quadro 2.6	Ocorrência de solos Expansivos no Brasil Fonte (FERREIRA et. al. 2012)	49
Quadro 2.7	Presença da cal no mundo	62
Quadro 3.1	Tipos de ensaios e local de realização	96

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	Sódio trocável	40
Equação 2.2	Classificação dos solos critérios Priklonskij	40
Equação 2.3	Classificação dos solos critérios Skempton	40
Equação 2.4	Reação hidratação silicato	59
Equação 2.5	Reação hidratação silicato	59
Equação 2.6	Reação da cal na hidratação do cimento	59
Equação 2.7	Reação da cal na hidratação do cimento	59
Equação 2.8	Reação formação da cal	60
Equação 2.9	Reação formação da cal hidratada	60
Equação 2.10	Reação formação da cal dolomitica	60
Equação 2.11	Reação formação da cal dolomitica hidratada	60
Equação 2.12	Reação pozolânicas	75
Equação 2.13	Reação pozolânicas	75
Equação 2.14	Reação carbonatação	77
Equação 3.1	Equação de Bragg	103

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Considerações iniciais	22
1.2	Justificativa do trabalho	23
1.3	Objetivos	24
1.3.1	Objetivo geral	24
1.3.2	Objetivos específicos	24
1.4	Estrutura do trabalho	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	Mineralogia de solos	26
2.2	Principais argilominerais e suas estruturas	31
2.2.1	Ilita	31
2.2.2	Montmorilonita	32
2.2.3	Vermiculita	32
2.2.4	Caulinita	33
2.3	Solos expansivos	34
2.3.1	Definição de solos expansivos	35
2.3.2	Identificação de solos expansivos	37
2.3.2.1	<u>Métodos indiretos</u>	39
2.3.2.2	<u>Métodos indiretos - identificativos</u>	39
2.3.2.3	<u>Métodos indiretos - qualitativos</u>	40
2.3.2.4	<u>Métodos indiretos - orientativos</u>	42
2.3.2.5	<u>Métodos diretos</u>	42
2.3.2.6	<u>Métodos diretos -avaliativos</u>	42
2.3.2.7	<u>Métodos diretos -qualitativos</u>	43
2.3.3	Ocorrência de solos expansivos no mundo	47
2.3.4	Registro de solos expansivos no Brasil	48
2.4	Perfis de solos expansivos no estado de Pernambuco	50
2.5	Curva de retenção de solo	53
2.6	Estabilização de solos expansivos	56
2.6.1	Tipos e formas de estabilização	56

2.6.1.1	<u>Estabilização mecânica</u>	56
2.6.1.2	<u>Estabilização granulométrica</u>	57
2.6.1.3	<u>Estabilização físico-química</u>	57
2.7	Solo-cal	59
	a) Reação formação da cal	60
	b) História da utilização da cal	61
	c) A cal no Brasil	61
2.7.1	Estabilização de solos expansivos com cal	64
2.7.2	Reação do solo com a cal	71
	a) Troca Iônica	73
	b) Floculação e aglomeração das partículas	74
	c) Reações de cimentação	75
	d) Reações de carbonatação	76
	e) Critérios da dosagem de cal para estabilização do solo	78
2.8	Alterações das características do solo estabilizados com cal	79
2.8.1	Alteração da plasticidade	79
2.8.2	Alteração da granulometria	81
2.8.3	Alteração da compactação	85
2.8.4	Alteração na expansão	87
2.8.5	Resistencia a compressão	90
3	MATERIAIS E MÉTODOS	95
3.1	Identificação das áreas de estudo	95
3.2	Investigação de campo	98
3.2.1	Coleta das amostras indeformadas e deformadas	98
3.3	Investigações de laboratório	98
3.3.1	Caracterização da cal	99
3.3.2	Preparação das misturas solo-cal	99
3.3.3	Ensaio de caracterização física do solo e da mistura solo-cal	99
3.3.4	Ensaio de caracterização química	101
3.3.5	Caracterização da microestrutura	102
3.3.6	Caracterização mineralógica	102
3.3.7	Caracterização termogravimétrica	104
3.3.8	Caracterização da expansividade	105

3.3.8.1	<u>Ensaio de Expansão “Livre”</u>	105
3.3.8.2	<u>Ensaio de Tensão de Expansão</u>	105
3.3.9	Ensaio de Resistência À compressão simples	107
3.3.10	<u>Ensaio da curva característica – sucção</u>	107
4	CARACTERIZAÇÕES E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS SOLOS EXPANSIVOS	110
4.1	Caracterizações física do solo	110
4.1.1	Composição granulométrica	110
4.1.2	Pesos Específicos Real dos Grãos	112
4.1.3	Consistência	112
4.1.4	Compactação	114
4.2	Caracterizações química	116
4.3	Caracterizações mineralógica	119
4.4	Caracterizações das microestruturas	121
4.5	Relações entre umidade grau de saturação índice de vazios e sucção	123
4.6	Avaliação da expansão livre e tensão de expansão	127
4.6.1	Expansão "livre"	127
4.6.2	Tensão de expansão	127
4.6.3	Resistencia a compressão simples	129
5	CARACTERIZAÇÕES E ANÁLISES DO COMPORTAMENTO DA CAL E DAS MISTURAS SOLO-CAL	131
5.1	Cal	131
5.1.1	Análise física da cal	131
5.1.2	Análise química da cal	132
5.1.3	Análise termogravimétrica da cal	133
5.2	Mistura solo-cal	133
5.2.1	Dosagem da mistura solo-cal	134
5.2.2	Caracterização física da mistura solo-cal	135
5.2.2.1	<u>Granulometria e limite de Atterberg</u>	135
5.2.2.2	<u>Pesos específicos dos grãos da mistura solo-cal</u>	138
5.2.2.3	<u>Compactação da mistura solo-cal</u>	138
5.2.3	Caracterização química da mistura solo-cal	141
5.2.4	Caracterização mineralógica das misturas solo-cal	145
5.2.5	Caracterização da microestrutura da mistura solo-cal	149

5.2.6	Caracterização da expansão livre e tensão de expansão	153
5.2.7	Resistencia à compressão simples	155
5.3	Síntese dos principais resultados	162
5.3.1	Síntese dos principais resultados solo	162
5.3.2	Síntese dos principais resultados solo-cal	165
6	CONCLUSÕES	168
6.1	Caracterizações físicas dos solos	168
6.2	Caracterizações da cal	169
6.3	Caracterizações químicas, mineralógica e microestrutural dos solos	169
6.4	Influencia da adição da cal nos solos	169
6.5	Sugestões para futuras pesquisas	170
	REFERÊNCIAS	171
	APENDICE - A	190

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Solo é a base para toda obra de edificação de engenharia, sendo sua utilização também considerada como um material de construção. A presença de solos expansivos ocasionam sérios problemas na segurança de obras e prejuízos econômicos, causados pela variação do volume quando inundado, perdendo a estabilidade, com desabamento da edificação e túneis, danos nas estradas e canais de irrigação. No mundo, foram registradas ocorrências desses solos em países como: Argentina, Chile, Cuba, Estados Unidos, Marrocos, México e Turquia (Chen, 1975; Costa e Craizer, 1978; Ferreira, 1995; Klamt, et al. 2013; Elkady et al. 2015a e Elkady et al. 2015b).

No Brasil, há ocorrências de solos expansivos nos estados de Bahia, Ceará, Santa Catarina, São Paulo, Pernambuco, entre outros (Sobral, (1956); Simmes e Costa Filho, (1981); Vargas (1981); Jucá et al. (1992); Bastos (1994); Justino, (2001); Paiva (2009); Ferreira, (2012); Paiva et al. (2012); Suleman, et al. (2013); Lima, (2014) e Paiva et al. (2016)). Sendo, uma área de estudos pelos profissionais e pesquisadores da geotecnia, visando corrigir os efeitos expansivos, minorando os prejuízos causados.

A tomada de medidas com a finalidade de diminuir ou, até mesmo, anular os efeitos da expansividade de um solo, é de grande importância na execução de um projeto, evitando, assim, ações indesejadas emergenciais, devido às tensões de expansão, durante o umedecimento do solo, deslocando ou levantando as estruturas, ou contraindo quando for desidratado, causando grandes transtornos.

A remoção e substituição dos solos expansivos vêm sendo a solução, em alguns casos, emergenciais, porém é inviável para a maioria das grandes obras, devido à remoção de grande volume de solo por grandes distâncias, tornando uma operação muito onerosa que causa um impacto ambiental elevado na região de depósito do solo e na região de remoção. A estabilização do solo expansivo, no próprio local, e na alternativa mais viável, econômica e ambientalmente, evitando a remoção, o transporte e o desequilíbrio ambiental de outros locais.

A expansão e contração do solo são ocasionadas à entrada ou saída da água, gerando uma tensão nas construções, devido ao tipo de mineral expansivo existente na fração argila do solo. Esse mineral é do tipo 2:1, como no caso da vermiculita, mica, esmectita e a montmorilonita. A mudança do volume do solo é um fator bastante complexo com várias variáveis, como o tipo de solo, o estado de tensão que o solo se apresenta e o clima da região.

As técnicas de estabilização utilizadas, com a finalidade de reduzir ou eliminar a expansão do solo, estão concentrados em dois grupos: a estabilização mecânica e a estabilização química. A escolha do método é segundo vários fatores, inicialmente o econômico, em seguida as características dos materiais, o tipo da obra e a intensidade que deve ser corrigida.

Um método utilizado para a correção dos solos expansivos é a adição de um percentual de cal hidratado (hidróxido de cálcio) ao solo. A cal que é produzida, calcinando o calcário (carbonato de cálcio), que é dissociado, produzindo o óxido de cálcio (CaO) e, logo após, hidratado, formando o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que, quando aplicado ao solo, altera de imediato o pH do solo, fazendo com que o cálcio evite a penetração da água entre as placas dos argilominerais, preenchendo os vazios e neutralizando as cargas negativas.

Aumentando a troca catiônica e formando flóculos, aumenta o tamanho dos grânulos, concluindo com as reações de cimentações com a adição do dióxido de carbono (CO_2) no solo, formando os aluminatos, os silicatos e os aluminosilicatos de cálcio hidratado que estabilizam o solo com as propriedades cimentantes, dando maior resistência mecânica e menos deformação e permeabilidade.

1.2 Justificativa do trabalho

Para a realização dessa pesquisa foram selecionados os solos dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista, considerando apresentarem: Cabrobó, está situado no semiárido de Pernambuco onde está localizado o ponto de partida do eixo norte da Transposição do Rio São Francisco, na região integrada de desenvolvimento (RIDE), estudado por Paiva et al. (2012); Ipojuca está situado na zona da mata onde está localizado o complexo industrial de Suape, no litoral sul do Estado de Pernambuco, local estudado por Silva júnior (2010) e Paiva et al.(2012); Paulista situado na zona da mata do estado de Pernambuco e a coleta do solo foi

realizada na estação de tratamento de esgoto do Janga da companhia de saneamento do estado de Pernambuco (COMPESA), local onde foram desenvolvidos estudos de: Jucá et al. (1992); Bastos (1994); Justino (2001); Paiva (2009); entre outros.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a expansividade dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista – PE e analisar suas estabilizações, compactando com e sem adição de cal.

1.3.2 Objetivos específicos

- caracterizar física, química, mineralógica, estruturalmente e a variação de volume nos solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista e das misturas solo-cal;
- obter a relação entre umidade e sucção, índice de vazios;
- analisar o comportamento geomecânico nos solos e nas misturas solo-cal e os efeitos da adição da cal aos solos.
- determinar o menor percentual de cal para estabilizar química e mecanicamente os solos com relação à expansão livre e à tensão de expansão, nos solos compactados;

1.4 Estrutura do trabalho

A Tese está organizada em seis capítulos, estando apresentados da seguinte forma:

Capítulo 1 inclui a apresentação do trabalho com a introdução, a justificativa, citando os problemas dos solos expansivos, a ocorrência no Brasil e no mundo, os métodos de adição de cal e o objetivo do trabalho.

Capítulo 2 apresenta revisão de literatura, citando as reações dos solos expansivos com os argilominerais e a estabilização de solos expansivos com a adição da cal, mostrando as modificações das propriedades dos solos com essas adições.

Capítulo 3 contém a caracterização dos materiais e a metodologia utilizada nessa pesquisa, relatando o programa de investigação, detalhando as atividades realizadas em campo e laboratório. Descreve-se sobre os ensaios de caracterizações físicas, químicas mineralógicas, microestrutural e mecânicos realizados no solo natural e nas misturas solo-cal.

Capítulo 4 exhibe a análise, comparando os resultados obtidos experimentalmente com a literatura estudada dos solos sem a adição da cal nos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.

Capítulo 5 retrata e analisa os resultados da análise da cal e das misturas solo-cal, comparando os resultados obtidos experimentalmente com os resultados observados na literatura estudada.

Capítulo 6 apresenta as conclusões e as sugestões para futuros trabalhos.

.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foi realizado um levantamento sobre a formação, constituição e os tipos de solo, mostrando as estruturas químicas dos argilominerais e suas propriedades físicas, o mecanismo de expansão dos solos com apresentação dos principais argilominerais e suas constituições, apresentando as formas de identificação dos solos expansivos e os fatores determinantes para essa expansão. São mostrados os tipos de estabilização de solo expansivo e as formas de correção do solo, utilizando cal em diversas concentrações, mostrando as características e propriedades do solo, após a estabilização do sistema solo-cal e as vantagens e desvantagens do método de correção.

2.1 Mineralogia de solos

A classificação do solo quanto à constituição mineralógica está relacionada diretamente à constituição da rocha matriz. O quartzo que está presente na maioria das rochas por apresentar uma dureza elevada é um mineral de difícil degradação, portanto sempre formando grãos maiores de areias e siltes. Esse mineral é estável, de baixa atividade e constituído de dióxido de silício (SiO_2) (SHRIVER e ATKINS, 2003). Os elementos do grupo 14 da tabela periódica C, Si, Ge e Sn ocorrem todos com estrutura do diamante, formando uma estrutura empilhada uma sobre as outras. O silício além da estrutura tipo diamante apresenta propriedades de semicondutores (HOUSECROFT, 2013).

Certos argilominerais apresentam uma formação de uma camada tetraédrica do SiO_2 e uma outra camada octaédrica do $\text{Al}(\text{OH})_3$; essas estruturas encontram-se empacotadas firmemente, presas com ligações de hidrogênio, denominadas estrutura de camada 1:1, impedindo o ingresso de moléculas de água entre as estruturas e tornando mais estáveis volumetricamente, com dimensões fixas de espessura e longitudinal.

Os argilominerais apresentam arranjos constituídos de átomos distribuídos no mesmo plano. São arranjos formados por átomos pertencentes a mais de um plano atômico, formando vários retículos laminares dos tipos tetraédricos ($\text{Si}(\text{OH})_4$) e octaédricos ($\text{Al}_2(\text{OH})_6$) ou ($\text{Mg}_3(\text{OH})_6$). Cada unidade estrutural corresponde ao menor volume de cristais limitados por três pares de lados paralelos e com simetria ao cristal como um todo. As estruturas formam empilhamento

das camadas estruturais, originando as estruturas do tipo 1:1, sendo uma camada tetraédrica e uma octaédrica unidas por ligações iônicas entre o oxigênio da estrutura tetraédrica com o alumínio da octaédrica, portanto, uma estrutura mais fixa e não expansiva. Estruturas de tipo 1:2, uma camada octaédrica e duas tetraédricas, dando uma estrutura rígida como a 1:1 como a junção entre camadas se dá por meio de lâminas iguais e apolar os minerais com esta constituição podem expandir quando umedecidos como a vermiculita e esmectita (CARVALHO, et al. 2015).

Os argilominerais são minerais que apresentam estrutura bastante complexa, tendo comportamento diferente na presença da água. A composição química das argilas apresenta duas estruturas, a primeira de tetraedros organizados num plano com o silício ligado a quatro átomos de oxigênio, formando o SiO_2 e a segunda, de octaedros formados com alumínio ligados em volta com átomos de oxigênios ou hidroxilas, formando o íon $[\text{Al}(\text{OH})_3]^-$ (PINTO, 2013; MELLO et al. 2011). Como pode ser verificado na Figura 2.1, uma unidade estrutural tetraédrica e o esquema de uma folha tetraédrica de silício e oxigênio e na Figura 2.2, uma unidade estrutural octaédrica e o esquema de uma folha octaédrica de alumínio e íons hidroxilas.

Figura 2.1 Unidade e folha tetraédrica (CRISTELO, 2001).

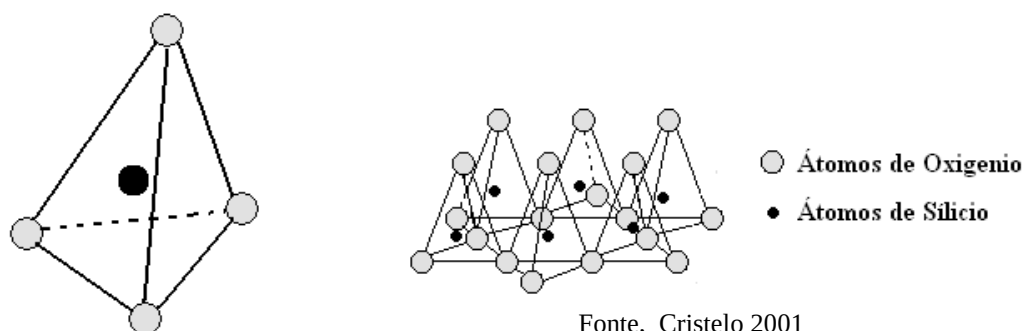
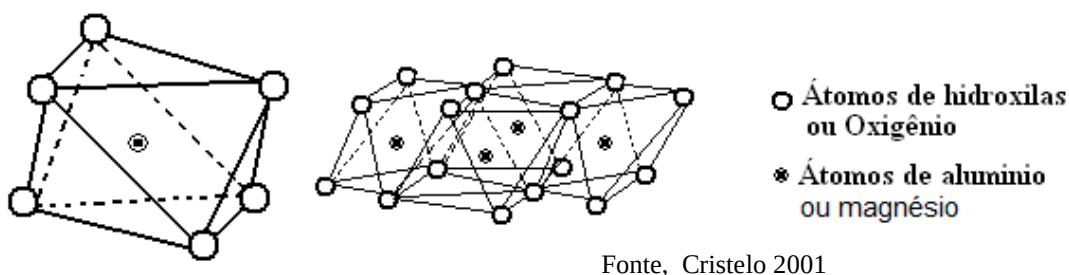


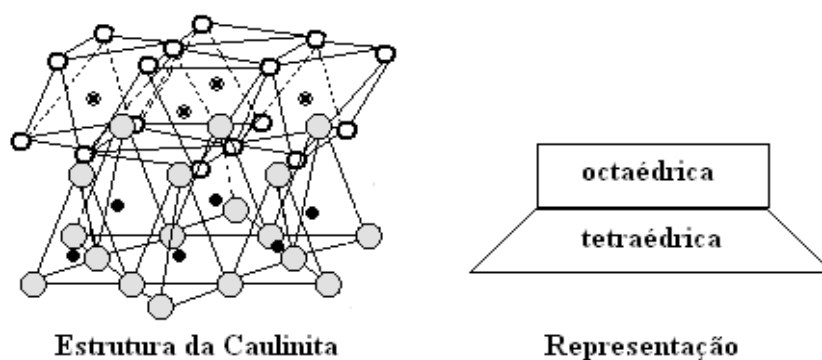
Figura 2.2 Unidade e folha octaédrica (CRISTELO, 2001).



Estruturas com duas camadas são constituídas de uma tetraédrica e uma octaédrica, servindo como base para a formação dos minerais de camada dupla, com uma ligação de hidrogênio

entre as estruturas para unir, como a caulinita representada na Figura 2.3. Essa ligação apresenta uma distância entre as placas (distância basal) de 7 Å (1 Angstrom (Å) = 10^{-10} m), com ligações entre as placas com hidrogênio, que são ligações mais fortes, tornando a estrutura mais estável e mais próxima uma da outra, evitando, assim, a entrada de água entre as estruturas (LAMBE E WHITMAN 1969 ; MELLO et al. 2011; PINTO, 2013).

Figura 2.3 Representação da caulinita (LAMBE E WHITMAN 1969 ; CRISTELO, 2001; PINTO, 2013)

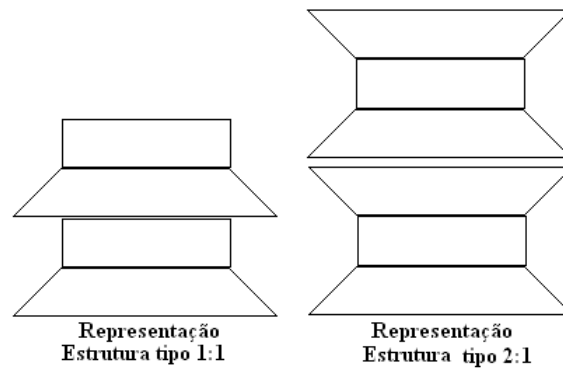


Fonte, (LAMBE e WHITMAN 1969)

Estruturas com uma camada octaédrica entre duas camadas tetraédrica (2:1) (Figura 2.4) apresentam um comportamento diferente, pois, dessa vez, as ligações são feitas pelos íons O^{2-} e O^{2+} das estruturas tetraédricas desses minerais argilosos. A distância entre os conjuntos de placas é maior que 10 Å, tornando uma ligação mais fraca, facilitando a entrada de água entre as camadas.

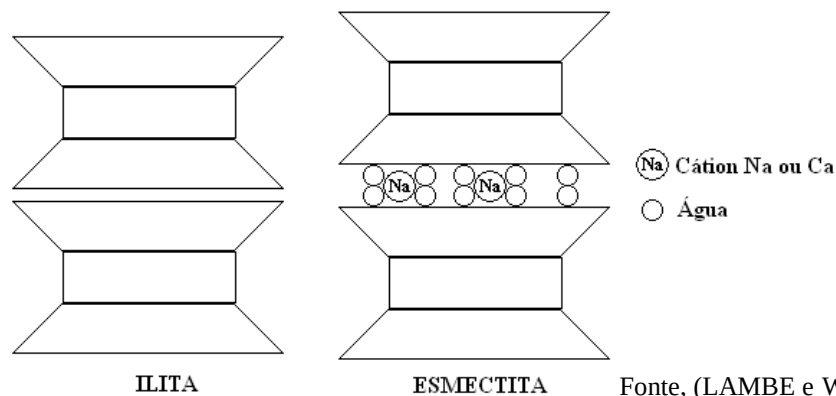
Nas argilas acontece várias imperfeições, tornando estruturas complexas principalmente quando acontecem substituições dos átomos de alumínio pelo silício da outra estrutura e na estrutura octaédrica, onde o alumínio é substituído por cátion de menor valência, ficando a estrutura com uma carga negativa, não alterando o arranjo dos átomos na estrutura, (PINTO, 2013). Essa carga negativa é neutralizada com cátions livres no solo, principalmente de sódio e cálcio, ficando aderida nas extremidades das estruturas, não impedindo a entrada de água entre as camadas. Essas cargas negativas do solo aumentam com a elevação do pH do solo, aumentando a concentração das cargas negativas com formação de associações de prótons e adsorção de cátions e ânions. As cargas que dependem do pH, são positivas e negativas, ocorrendo formação de ambas, ao mesmo tempo no solo (MARQUES, 2012). A Figura 2.5 apresenta representação da ilita e da esmectita com impregnação de cátions de sódio com as moléculas de água, que penetraram entre as estruturas.

Figura 2.4 Representação da estrutura 1:1 e 2:1 (LAMBE E WHITMAN 1969 ; CRISTELO, 2001; PINTO, 2013)



Fonte, (LAMBE e WHITMAN 1969)

Figura 2.5 Representação da estrutura da ilita e esmectita com a penetração da água (LAMBE E WHITMAN 1969)

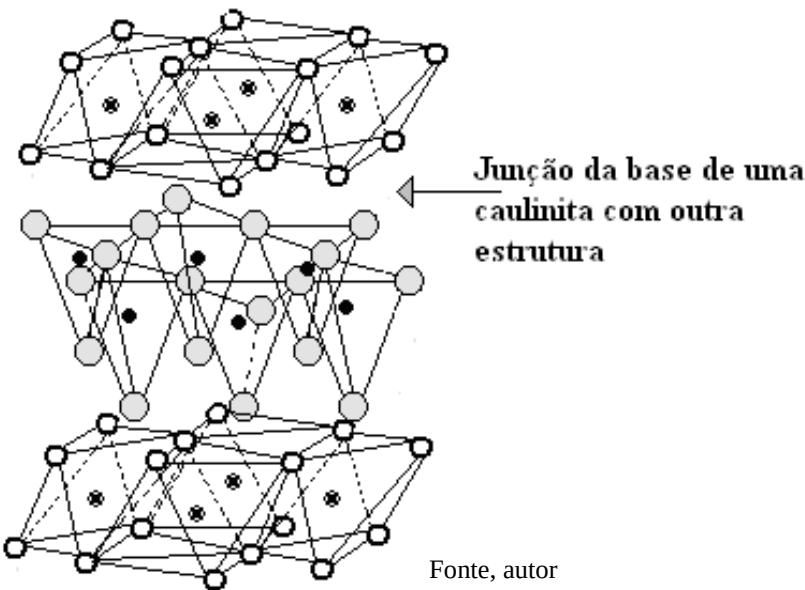


Fonte, (LAMBE e WHITMAN 1969)

As variedades dos comportamentos de uma argila estão diretamente relacionadas aos cátions inseridos e internos. Uma argila esmectita, por exemplo, apresenta comportamento diferente quando impregnada com sódio e com cálcio; a sensibilidade à água é muito mais elevada com o sódio. Essa impregnação por cátion pode ser trocável no solo por percolação de soluções químicas (PINTO, 2013). A Figura 2.6 mostra o esquema de um argilomineral, a montmorilonita (tipo 2:1), com cátions trocáveis e adição de água na sua base, aumentando assim a distância entre as duas bases, e a Figura 2.7, a estrutura de uma caulinita tipo 1:1 (PEREIRA, 2004).

Segundo CAMAPUM (2014), nos solos expansivos quando se estabelece o contato mineral-mineral diminui a retração mais não totalmente, pois o mineral retrai por desidratação. Esse contato tende a corrigir o solo para não saturado. Nos solos expansivos a energia interna se divide em energia interna aos minerais e energia entre os minerais, sempre as duas energias busca um equilíbrio com a diminuição da distância interplanar basal até um valor mínimo, anulando a expansão (CAMPOS et al. 2008).

Figura 2.7 Representação da estrutura da caulinita do tipo 1:1(PINTO, 1967; MONIZ, 1975)



2.2 Principais argilominerais e suas estruturas

Pode-se destacar os argilominerais formados no solo como sendo principais: Ilita, Montmorilonita, Vermiculita, Caulinita, entre outras. Suas estruturas estão detalhadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 Estrutura química dos principais argilominerais (HOUSECROFT e SHARPE, 2013)

Argilomineral	Estrutura
Ilita	$(OH)_4K_y(Al_4Fe_4Mg_4)(Si_{8y}Al_y)O_{20}$
Montmorilonita	$(OH)_4Al_4Si_8O_{20} \cdot nH_2O$
Vermiculita	$(Mg,Ca)_{0,7}(MgFeAl)_{0,6}[(AlSi)_8O_{20}](OH)_4 \cdot 8H_2O$
Caulinita	$(OH)_8Al_4Si_4O_{10}$

Onde y = varia de 1 a 15 n = água intermolecular

Fonte HOUSECROFT e SHARPE, (2013)

2.2.1 Ilita

O grupo da ilita ou mica hidratada apresenta uma forma cristalina semelhante á montmorilonita (1:2), diferenciando na forma química. Contém um filamento octaedro de gibsite entre dois tetraédricos de sílica, apresentando rigidez das ligações entre camadas e dificuldades da penetração de águas e íons, presença de potássio na estrutura, ocasionando

uma baixa expansão, absorção de água e plasticidade (OLIVEIRA, 2011; HOUSECROFT e SHARPE, 2013).

2.2.2 Montmorilonita

Os argilominerais do grupo da montmorilonita apresentam diferenças dessa fórmula devido às substituições isomórficas (é comum o Al^{3+} substituir um átomo de Si^{4+} da estrutura tetraédrica e, na estrutura octaédrica, o alumínio ser substituído por cátion de menor valência como o Mg^{2+} , não alterando o arranjo dos átomos e modificando a carga da partícula que fica negativa), que ocorrem no retículo cristalino e nos cátions trocáveis. A montmorilonita é formada pelo empacotamento de duas estruturas tetraédricas de silicato, com uma estrutura octaédrica de alumínio, ligadas pelo oxigênio. As ligações entre as camadas ocorrem, levando em consideração as forças de Van der Waals onde ligações entre moléculas apolares apresentam uma força, momentânea bastante fraca justificando a penetração da água e a distância entre as camadas (OLIVEIRA, 2011; HOUSECROFT e SHARPE, 2013).

As montmorilonita são pequenos cristais com grandes capacidades de reter íons, são encontrados em regiões temperadas e áridas, solo pouco intemperizado apresentam elevado poder de contração e expansão, quando secos, consistência dura e fendilhada e, quando úmidos alta pegajosidade e plasticidade.

2.2.3 Vermiculita

Vermiculita é um argilomineral tipo 2:1 expansivo, apresenta potássio e moléculas de água entre as camadas com elevadas capacidades de expansão e contração, quando úmido; apresenta alta pegajosidade e plasticidade, quando seco, apresenta fendas e alta dureza, sendo originado da alteração da mica. A vermiculita aluminosa é quando acontece a formação de um polímero de alumínio entre as camadas de vermiculita diminuindo a capacidade de expansão e contração (OLIVEIRA, 2011; HOUSECROFT e SHARPE, 2013).

A vermiculita é um grupo de mineral formado da modificação da mica e clorita do tipo 2:1, a estrutura apresenta uma carga líquida negativa devido à substituição do silício pelo alumínio, sendo neutralizado pelos cátions hidratados; consequentemente a vermiculita não se expande como a esmectita, sua distância basal varia de 10 a 15 Å (CARVALHO et al. 2015)

2.2.4 Caulinita

Caulinita é um argilomineral do tipo 1:1, formado por camadas, todas com uma estrutura tetraédrica de SiO_4 e uma estrutura octaédrica de $\text{Al}_2(\text{OH})_6$, ligadas pelo oxigênio entre as camadas, produzindo um pequeno espaço entre elas. Apresenta uma estrutura bastante estável com alta resistência à penetração da água, essa baixa absorção, quase neutra apresenta uma baixa ou nenhuma substituição isomórfica (PEREIRA, 2004). Sendo uma estrutura não expansiva no processo de saturação. Frequente e abundante na maioria dos solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais. Na Figura 2.8, estão representados os principais argilominerais dos solos expansivos com suas respectivas distâncias basais (CARVALHO, 1997).

A presença do grupo da caulinita está associada à decomposição de uma série de minerais silicatados pela remoção de cátions e silício. Esse grupo é bastante estável não expansivo com uma distância interplanar basal constante (7,2 Å). A haloisita do mesmo grupo é menos estável que a caulinita, apresentando uma estrutura cristalina neutra, a haloisita quando hidratada apresenta uma distância interplanar de 10,1 Å, e quando desidratada essa distância reduz para 7,2 Å, sendo instável quanto ao seu volume (CARVALHO et al., 2015).

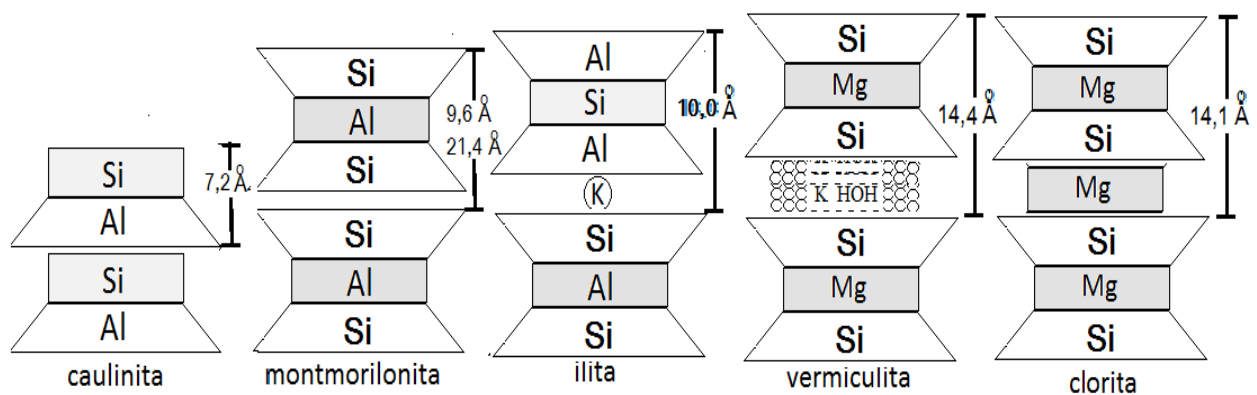
As partículas de argila apresentam cargas negativas nas faces e positivas nas extremidades. E devido as cargas negativas, as argilas combinam com as cargas positivas dos cátions do solo, as quais são, provenientes de sais dissolvidos na água, percolando pelo solo. As moléculas de água mais próximas da superfície das partículas ficam envolvidas com tensões elevadas; cada superfície vai atrair várias camadas de água e cátions até o equilíbrio e neutralidade das cargas. Essa água é chamada de água adsorvida.

A dupla camada elétrica ou camada difusa ocorre envolvendo as partículas de argila. Quando a partícula está eletronegativa ela forma um campo magnético eletropositivo forte na sua superfície que atua afastando por repulsão o campo eletropositivo das partículas vizinhas dispersando isto é frequente nas argilas do tipo 1:2 (UEHARA e GILLMAN, 1981). O estado de tensões, originado da carga negativa da superfície da partícula e da carga positiva distribuída na face adjacente, dá origem a chamada camada dupla difusa (de Gouy-Chapman). Essa existe do lado externo da camada adsorvida. Sua espessura é a distância até a superfície que neutraliza as cargas da partícula (SANTOS, 2008).

A camada dupla influi na capacidade de retenção da água dos solos argilosos, principalmente os que têm elevado teor de esmectita. Segundo Lambe (1960), quando o argilo-mineral é a montmorilonita, o volume de água da camada dupla corresponde a 40 vezes a de sólidos, enquanto que, para a caulinita, o volume de água é apenas 0,8 vezes o volume de sólidos. Isto indica que teoricamente a montmorilonita possui um potencial de variação volumétrica 50 vezes superior ao da caulinita, desde a condição seca até a completa saturação (SCHREINER, 1987).

A interação entre as partículas de argila não ocorre pelo contato sólido-sólido, mas através da camada dupla. Se a distância entre duas partículas de argila em suspensão aquosa é superior à espessura de suas respectivas camadas duplas, não ocorre interferência entre os íons de cada camada. Entretanto, diminuindo essa distância ocorrem forças de repulsão, pois, os íons são de mesmo sinal. Essas forças decrescem exponencialmente com o aumento da distância entre partículas. As variações na espessura das camadas, adsorvida e dupla, causam a expansão e contração dos solos (SCHREINER, 1987).

Figura 2.8 Representação das principais argilas expansivas (CARVALHO, 1997)



Fonte CARVALHO (1997)

2.3 Solos expansivos

Todo solo pode apresentar aumento de volume. Os solos aumentam de volume quando há um alívio de tensão, podendo está saturado ou não e não ser solo expansivo; solos compactados ou argilas pré-adensados aumentam de volumes, (dilatância) durante o processo de cisalhamento, podendo está saturado ou não e não são solos expansivos. Portanto, para definir solos expansivos é necessário primeiramente entender expansibilidade intrínseca e extrínseca (FERREIRA, 1995).

2.3.1 Definição de solos expansivos

A expansividade intrínseca é a capacidade de um argilomineral de absorver água, sendo uma propriedade intrínseca da argila que não é alterada pela umidade ou sucção existente em um tempo. Definida como sendo uma propriedade resultante de sua composição mineralógica e a quantidade de argila que interage com a água. Não há metodologia de ensaio desenvolvido para medir esta propriedade, devendo-se isto ao fato da Geotecnia não fazer distinção adequada entre expansividade intrínseca, expansão e inchamento.

A expansão de um solo expansivo intrinsecamente pode ser definida como sendo a mudança de volume resultante da mudança de umidade ou sucção, podendo ocorrer em todos os solos devido à redução da tensão efetiva ou, em alguns solos devido á mudanças químicas. E o inchamento é definido como o deslocamento vertical de um ponto do solo ou de uma fundação, resultante de um solo expansivo intrinsecamente. É um parâmetro usualmente medido em campo (FERREIRA, 1995).

Segundo Campos et al. (2008), a expansão de um solo pode ser devido a alterações estruturais ou devido a sua composição mineralógica. A primeira geralmente devido a um alívio de carga ou pelo aumento da umidade, ocorrendo em solos ricos em minerais não expansivos como a caulinita ou em solos ricos em minerais expansivos como a montmorilonita. Ocorrendo a expansão em consequência da entrada de água entre as camadas do mineral influenciadas pelas variações de energia externa como interna e principalmente, pela composição química e arranjo estrutural que é característica de cada mineral de argila expansivo.

Paiva (2009) afirma que alguns solos não saturados, ao se aumentar o teor de água em seus vazios, ou ao serem solicitados por carga e posteriormente umedecidos, experimentam uma variação de volume. Estes solos têm seu comportamento relacionado à instabilidade volumétrica, quando a umidade é alterada: expansão e contração em argilas expansivas e redução volumétrica em solos de estruturas metaestáveis. Termos como "expansão" e "colapso" são associados a estes solos. É importante diferenciar algumas terminologias e definições associadas à expansividade do solo. A expansividade intrínseca é considerada como a capacidade do argilomineral de absorver água. É uma propriedade resultante de sua composição mineralógica e da quantidade de argila que interagem com a água. Expansão de um solo expansivo intrinsecamente pode ser definida como a mudança de volume resultante da mudança de umidade ou sucção.

Causas dos solos expansivos

A capacidade de um argilomineral de absorver água é dito expansividade intrínseca, sendo a propriedade intrínseca da argila a que não é alterada pela umidade ou sucção, existente em um tempo (FERREIRA, 1995; ANTUNES et al, 2015). É definida como sendo uma propriedade resultante da mineralogia, da quantidade de argila em contato e a que reage com a água. A expansão intrínseca é definida como a mudança de volume resultante da mudança da umidade, podendo acontecer em outros solos devido à redução das tensões ou mudanças químicas.

Sandroni e Consoli (2010) afirmam que é importante o conhecimento de alguns resultados quanto à caracterização do solo para se definir quanto a sua expansividade, sendo importante o uso não só de ensaios de caracterização e os mineralógicos, mas também os de sucção com o solo indeformado ou compactado (ANTUNES et al. , 2015).

A presença dos argilominerais no solo favorece a plasticidade, coesão e no comportamento expansivo de certos solos argilosos (VARGAS, 1977), a expansão ocorre devido à adsorção do cátion, ou seja, os argilominerais apresentam capacidade de sorção de ânions e cátions em posições de troca. Tais íons podem ser substituídos por outros íons, devido à quebra das ligações de borda dos minerais, gerando desequilíbrio de cargas, o que possibilita a adsorção de um cátion (GRIN, 1953).

Silva, (2010) justifica a eletronegatividade das partículas argilosas, afirmando que a superfície das faces das estruturas argilosas é maior que as bordas e que a participação no total das cargas negativas na estrutura é maior. Em geral, há predominância de cargas negativas sobre as cargas positivas devido à presença de argilas silicatadas mais ativas, que tendem a diminuir nos solos mais intemperizado das regiões tropicais. As cargas negativas são originadas pela dissociação do grupo hidroxila das terminações tetraédricas ou octaédricas, gerando cargas negativas, com a elevação do pH do solo e deslocamento do equilíbrio para a neutralização dos íons H^+ , liberados na dissociação de grupo hidroxila.

As substituições isomórficas nas argilas do tipo 2:1, com alguns átomos de silício dos tetraedros podem ser substituídos por alumínio e também, a substituição do alumínio do octaedro pelo magnésio ou outro cátion. A substituição do Si^{4+} por Al^{3+} favorece a sobra de

uma carga negativa. O número de cargas geradas por esse processo não é variável com alterações do pH do meio.

Os solos expansivos podem causar sérios danos às obras de engenharia principalmente quando esses materiais não são tratados de forma adequada. Os fatores que levam à expansividade desses solos são de grande importância a fim de se tomar medidas que minimizem a ação ou anulem os efeitos negativos (CAMPOS BURGOS, 2004).

2.3.2 Identificação dos solos expansivos

A identificação da expansividade de um solo pode ser avaliada de duas formas: a primeira é uma pesquisa no local, verificando vários fatores como topografia, vegetação, sinais de contração no solo, fissuras nas edificações e dados com os moradores da região. A segunda forma é interpretar os ensaios de laboratório dos métodos de identificação que pode ser na forma de ensaios mineralógicos, métodos diretos e indiretos (PAIVA, 2009). Solos expansivos são de natureza argilosa ou argilo-siltosa, com percentual de material passando na peneira 200, freqüentemente acima de 80%. Os argilominerais encontrados com maior freqüência em solos expansivos são pertencentes ao grupo das montmorilonitas, mais especificamente as esmectitas e vermiculitas. O Quadro 2.2 mostra os métodos diretos e indiretos usados na geotécnica para identificar os solos expansivos (RIBEIRO et al. 2014).

Argilas expansivas podem controlar o comportamento de praticamente qualquer tipo de solo se a porcentagem de argila é mais que 50 %, do peso. Solos com argilas minerais de esmectita tais como montmorilonita, apresentam as propriedades de entumescimento mais profundas.

Potencialmente solos expansivos podem tipicamente ser reconhecidos em laboratório, por suas propriedades plásticas. Argilas inorgânicas de alta plasticidade geralmente as que excedem os limites líquidos de 50% índice de plasticidade indexada maior de 30%, possui usualmente uma grande capacidade inerente de expansão. Expansão de solos também pode ser medida diretamente em laboratório pela imersão de uma amostra de solo remoldado com medição da alteração de volume (ROGERS et al, 2014).

Quadro 2.2 Identificação dos solos expansivos (FERREIRA, 1995)

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

Fonte FERREIRA (1995)

No campo, solos expansivos argilosos podem ser facilmente reconhecidos em estações secas do ano através de profundas rachaduras em formas geralmente poligonais, na superfície dos terrenos. A zona que contém flutuação de umidade sazonal pode ser estendida de três até quarenta pés de profundidade. Isso cria um comportamento em um processo cíclico de

encolher/estender na porção superior da coluna do solo e rachaduras podem ser estendidas em profundidades muito maiores do que a maioria das previstas pelos engenheiros (ROGERS et al. , 2014).

2.3.2.1 Métodos indiretos

Os métodos indiretos consistem em identificação mineralógica de alguns índices físicos, limite de consistência, parâmetros ligados à textura, à composição e ao comportamento do solo. Os métodos diretos baseia-se na medida de expansão que é induzida ao solo ou da tensão fornecida ao solo para impedir a expansão (ensaio endométrico) (FERREIRA, 1995).

2.3.2.2 Métodos indiretos - identificativos

Os métodos indiretos – identificativos são aqueles que identificam os solos expansivos pela mineralogia, pelos índices físicos, limites de consistência ou parâmetros ligados á textura e ao comportamento do solo.

- Composição da fração argilosa e sua textura determina a percentagem de minerais da rede cristalina expansiva, vermiculita ou montmorilonita que está diretamente relacionada sua quantidade com a intensidade da expansão (CARCEDO et al. , 1986).
- Difração de Raio-X identifica os minerais argilosos baseado no espectro característico da sua difração por Raio-X.
- Microscopia eletrônica, utilizado para identificar os minerais argilosos baseado na dispersão que um feixe de elétrons experimenta ao atravessar o material.
- Análise térmico diferencial analisa as reações de cada espécie mineralógica apresenta em determinada temperatura, identificando as espécies mineralógicas.
- Adsorção de etileno glicol; a determinação do tipo do material argiloso é feita pela quantidade de adsorção de etileno glicol e glicerina diferentes para cada mineral.
- Capacidade de Troca de Cátions, indica as propriedades físico-químicas das argilas, modificando suas propriedades plásticas, pela facilidade de adsorverem cátions pela rede cristalina; a capacidade de expansão é maior nos cátions do grupo dos alcalinos (monovalentes positivos).

Segundo Fink et al. (1971), um sistema com montmorilonita Na^+ e Ca^{2+} a expansão é função da percentagem de sódio trocável, definido pela Equação 2.1 a seguir (AITCHINSON e WOOD, 1965; INGLES e AITCHISON, 1969).

$$\text{ESP} = \frac{\text{Na}^+ \text{ trocável}}{\text{Capacidade de Troca de Cátions}} \times 100 \quad \text{Equação (2.1)}$$

Quando:

ESP > 50% sugere o comportamento de montmorilonita

ESP 10% a 50% redução da expansão e da quantidade de argilo mineral.

2.3.2.3 Métodos indiretos qualitativos

- Critérios Priklonskij (1952), nesse critério citados por Feda (1966), a classificação do solo (Kd), é definida relacionando o limite de liquidez (WL) com o limite de plasticidade (WP) e o teor de umidade (W) Equação 2.2.

$$\text{Kd} = \frac{\text{WL} - \text{W}}{\text{WL} - \text{WP}} \quad \text{Equação (2.2)}$$

Quando:

$\text{Kd} < 0$	Solo altamente colapsível
$\text{Kd} \leq 0,5$	Solo não colapsível
$\text{Kd} > 1$	Solo expansível

- Critérios de Skempton (1953), definiu a atividade coloidal de uma argila com o Índice de Atividade (Ia), quanto maior a quantidade de argila mais alto é o potencial de expansão Equação 2.3.

$$\text{Ia} = \frac{\text{IP}}{\% < 0,002\text{mm}} \quad \text{Equação (2.3)}$$

Quando:	ATIVIDADE	QUALITATIVO
	$\text{Ia} > 2,00$	Muito ativo
	Ia entre 1,15 e 2,00	Ativo
	Ia entre 0,75 e 1,25	Pouco ativo
	$\text{Ia} > 0,75$	Inativo

- Critérios de USBR – HOLTZ (1953) apresentam uma classificação baseada no Índice de Plasticidade (IP) e no limite de contração (WC) e o percentual de colóides menores que 0,001mm, apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Critérios de USBR – HOLTZ (1953)

Percentual de Colóides <0,001mm	Índice de Plasticidade (IP)	Limite de Contração (WC)	Grau de Expansividade
> 28	> 35	< 11	Muito alta
20-31	25-41	7-12	Alta
13-23	15-28	10-16	Média
< 15	< 18	> 15	Baixa

Fonte USBR – HOLTZ (1953)

-Critérios de Ranganathan e Satynarayana (1965) relacionam o grau de expansividade em função do índice de contração (IC), sendo a diferença entre o limite de liquidez (WL) e o limite de contração (WC) (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 Critérios de Ranganathan e Satynarayana (1965)

IC = WL – WC (%)	Grau de Expansividade
> 60	Muito alta
entre 30 e 60	Alta
entre 20 e 30	Média
< 20	Baixa

Fonte Ranganathan e Satynarayana (1965)

- Critérios de Cuellar (1978), através de argilas expansivas da Espanha, relacionam o limite de contração (WC) e o índice de plasticidade (IP), apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Critérios de Cuellar (1978)

Limite de Contração (WC)	Índice de Plasticidade (IP).	Grau de Expansividade
< 10	> 35	Muito alta
>8 e <11	>25 e <35	Alta
>11 e <15	>15 e <25	Média
> 15	< 15	Baixa

Fonte CUELLAR (1978)

- Critério da classificação unificada, baseado nas classificações geotécnicas, os solos expansivos que na maioria dos casos estão nos grupos CL e CH mais nem todos os solos deste grupo manifestam expansividade.

2.3.2.4 Métodos indiretos orientativos

- Geológicos, os solos expansivos gerados sob rochas ígneas básicas, rochas vulcânicas ou rochas sedimentares argilosas. Locais onde a geologia é bem definida os solos expansivos vem sendo muito estudados. Mapas geológicos vêm sendo elaborados com indicações de áreas que apresentam potencialidade de encontrar solos expansivos são mostrados por Patrick e Snethew (1976).
- Geomorfologia, as condições físicas e químicas onde o intemperismo ocorre é um fator tão importante na formação do argilo mineral expansivo como da rocha de origem. A geomorfologia apresenta uma maior precisão na localização de solos expansivos por interpretar o tipo de intemperismo que acontece no solo.
- Pedologia, um método de identificação de solos expansivos foi proposto por Ferreira (1990) baseado nas classes pedológicas e levantamentos de solos relacionando a características de solos potencialmente expansivos.
- Identificação visual, reconhecimento em campo, reconhecimento em obras, reconhecimento em estradas, reconhecimento em taludes,

2.3.2.5 Métodos diretos

Métodos **DIRETOS** consistem em interpretar os ensaios de laboratório dos métodos de identificação.

2.3.2.6 Métodos diretos avaliativos

- Ensaio de expansão de Lambe, uma amostra do solo é tratada, remoldada a textura natural do solo, colocada no anel e carregada com uma tensão nominal de 10 t/m². A amostra é inundada e no final de duas horas, mede-se a pressão alcançada em kPa. Essa pressão é o índice de expansividade ou índice de Lambe. Associando o índice com o potencial expansivo do solo temos os critérios de Lambe (1960) (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 Critérios de Lambe (1960)

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

Fonte LAMBER (1960)

2.3.2.7 Métodos diretos qualitativos

Os métodos quantitativos de expansividade dos solos estão baseados principalmente em dois parâmetros básicas, a Expansão Livre e Tensão de Expansão que envolve as determinações: ensaio edométrico simples e duplo, determinação da pressão de expansão, a volume constante, carregamento após expansão com diferença de sobrecarga, expansão e colapso sobre carregamento, ensaio edométrico duplo segundo Rao et al. (1988).

- Critérios da expansão Livre segundo Seed et al. (1962), correlacionam a expansão livre, referente à amostra compactada à densidade máxima e umidade ótima, com uma tensão vertical de 7 kPa, com o grau de expansividade do solo, descrito na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 Critérios de Seed et al. (1962)

Inchamento livre (%) pressão 7 kPa	Grau de Expansividade
> 25	Muito alta
5 – 25	Alta
1 – 5	Média
0 – 1	Baixa

Fonte SEED et al. (1962)

- Critério de Cuellar (1978) baseado em análises de argilas expansivas, é realizada uma relação entre a tensão de expansão e o inchamento livre da amostra compactada à densidade máxima e umidade ótima, sendo a amostra ressecada ao ar. Cuellar emitiu uma tabela para avaliar o grau de expansividade (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 Grau de expansividade Cuellar (1978)

Pressão de Expansão (kPa)	Inchamento Livre (1) amostra compactada a densidade máxima e umidade ótima	Inchamento Livre (2) amostra ressecada ao ar	Grau de Expansividade
>300	> 10	> 30	Muito alta
125 - 300	5 - 10	20 - 30	Alta
25 - 125	1,5 - 5	10 - 20	Média
< 25	< 1,5	< 10	Baixa

Fonte CUELLAR (1978)

- Critério de Chen (1965). os solos expansivos são classificados pelas correlações entre o limite de liquidez, à resistência, a penetração a percentagem de solo que passa na peneira nº200 e a expansão de amostras indeformadas à pressão vertical de 50 kPa. A Tabela 2.7 mostra a relação e o grau de expansão.

Tabela 2.7 Grau de expansividade pelos critérios de Chen (1965)

Pressão de Expansão (kPa)	Expansão (tensão de 50 kPa)	Grau de Expansividade
> 1000	> 10	Muito alta
250 - 1000	5 - 10	Alta
50 - 250	1 - 5	Média
< 50	< 1	Baixa

Fonte CHEN (1965)

- Critérios de Rodriguez (1975) recopilado a partir dos critérios práticos de expansividade de diferentes autores, sendo apresentado na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 Grau de expansividade pelos critérios de Rodriguez e Ortiz (1975)

Potencial de Inchamento SEED	Índice de Lambe	Tensão de Expansão	Inchamento Provável em sup.	% de Inchamento Provável	Grau de Expansividade
0 – 1,5	< 80	> 30	0 - 1	< 1	Baixa
1,5 – 5	80 - 150	30 - 120	1 - 3	1 – 5	Méddia
5 – 25	150 - 230	120 - 300	3 – 7	5 – 10	Alta
> 25	> 230	> 300	> 7	> 10	Muito Alta

Fonte RODRIGUEZ E ORTZ (1975)

- Critérios de Jimenez (1980), foram classificados possíveis danos que podem acontecer se não tomar precauções especiais. Sendo utilizado para essa classificação a pressão de expansão das amostras de solo extraídas no final do verão em Andaluzia na Espanha. Os critérios estão na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 Possíveis danos pelos critérios Jimenez (1980)

Tensão de Expansão (kPa)	Possíveis Danos
> 200	Demolição
Entre 100 e 200	Danos Graves
Entre 50 e 100	Fissuras Importantes
Entre 20 e 50	Fissuras Pequenas
< 20	Sem Danos

Fonte JIMENEZ (1980)

A expansão de um solo é a resultante de vários fatores relacionados a combinações importantes e específicos para cada tipo de solo. Para Taylor e Smith (1986), os mecanismos de expansão podem ser mecânicos e/ou físico-químicos. A expansão mecânica ocorre em resposta às forças de descompressão elástica e estão relacionadas ao fator tempo; na prática, podem ser devidas às escavações feitas pelo homem, à ação dos movimentos tectônicos e a erosão. Os fatores que controlam os mecanismos de expansão e contração do solo estão

apresentados nas Quadros 2.3 e 2.4 situações do solo que influenciam a expansão (NELSON; MILLER, (1992) apud PAIVA, (2009).

Quadro 2.3 Fatores que influenciam a expansão dos solos (NELSON; MILLER,1992 apud PAIVA, 2009)

FATOR	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
Mineralogia da argila	Os argilominerais que tipicamente causam variações de volume no solo são: montmorilonitas, vermiculitas e algumas camadas mistas de minerais. Ilitas e caulinitas não são freqüentemente expansivas, mas podem causar variações de volume quando o tamanho das partículas são extremamente pequenos.	Grim,(1968); Mitchell,(1973,1976) Snethen et al.,(1977)
Química da água no solo	A expansão é reduzida pelo aumento da concentração e valência de cátion. Por exemplo, cátions de Mg^{2+} na água do solo resulta em menor expansão do que os cátions de Na^{+} .	Mitchell, (1976)
Sucção do solo	A sucção do solo é uma variável que independe da tensão efetiva, representada pela pressão negativa em solos não saturados. A sucção do solo está relacionada com o grau de saturação, gravidade, tamanho e forma de poros, tensão superficial, características químicas e elétricas das partículas do solo e da água.	Snethen,(1977); Fredlund e Morgenstern, (1977); Johnson, (1978); Aitchison et al., (1965)
Plasticidade	Em geral, solos que exibem comportamento plástico sobre larga variação de umidade e que tem alto limite de liquidez possuem maior potencial de expansão e de contração. Plasticidade é um indicador do potencial de expansão.	Nelson, et al., (1992)
Estrutura e Textura do solo	Argilas floculadas tendem ser mais expansivas do que as argilas dispersas. Partículas cimentadas reduzem a expansão. A textura e estrutura são alteradas pela compactação, maior teor de umidade ou remoldagem.	Johnson; (1978); Seed et al.,(1962)
Densidade Seca	Elevada densidade usualmente indica espaçamento menores entre partículas, o que pode significar grandes forças repulsivas entre elas e elevado potencial de expansão.	Chen, (1975);

Fonte (NELSON; MILLER,1992 apud PAIVA, 2009)

Quadro 2.4 Situação em que o solo se encontra e que influenciam na expansão (NELSON; MILLER,1992 apud PAIVA, 2009)

FATOR	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
1.0 -Condições de umidade inicial	Um solo expansivo ressecado terá uma elevada afinidade por água ou sucção elevada, enquanto o mesmo com elevado teor de umidade diminuirá a sucção. De modo inverso, um perfil de solo úmido perderá umidade mais rápido quando exposto à secagem e contrairá mais do que um perfil de solo inicialmente seco.	-----
2.0 -Variações de umidade	Variações de umidade na parte superior do perfil próximo a zona ativa definem principalmente os levantamentos. É nestas camadas que ocorrerão extensas variações de umidade e volume.	Johnson, (1978)
2.1 – Clima	A quantidade e variação de precipitação e evapo transpiração influenciam fortemente a umidade e o perfil devido às variações climáticas. Em climas semi-áridos ocorrem levantamentos periódicos devido aos curtos períodos de chuva.	Holland; Lawrence, (1980)
2.2 – Água do subsolo	Lençóis rasos de água fornecem uma fonte de umidade e lençóis de águas superficiais contribuem para o aumento da umidade.	-----
2.3 - Drenagem e fontes de águas superficiais	Estruturas de drenagem superficiais, como por exemplo, tubulações, canaletas, etc., próximas a fundações de casas, podem se tornar uma fonte de água superficial. Vazamento de tubulações pode umidificar o solo até grandes profundidades.	Donaldson, (1965)
2.4 –Vegetação	Árvores, arbustos e gramas retiram a umidade do solo por transpiração, e tornam diferentemente úmido o solo para os variados tipos de vegetação.	Bucley, (1974)
2.5 Permeabilidade	Camadas com elevada permeabilidade, particularmente devido a fissuras e rachaduras na massa de solo, permitem uma rápida migração de água e promove uma rápida velocidade de expansão.	Wise; Hudson,(1971); Debruijn,(1965)
2.6 – Temperatura	Aumentos de temperatura causam a difusão de umidade para áreas mais frias abaixo de pavimentos e edifícios.	Johnson, (1978); Hamilton, (1969)
3.0 - Condições de Tensão		
3.1 - História de tensões	Um solo sobreadensado é mais expansivo que um solo com igual índice de vazios, porém normalmente adensado. Pressões de expansão podem aumentar com o envelhecimento de argilas compactas, mas o valor de expansão sob pequenos carregamentos não tem demonstrado ser afetado pelo envelhecimento de argilas compactas. Repetidos ciclos de umedecimento e secagem tendem a reduzir a expansão em amostras de laboratório, mas após um certo número de ciclos, a expansão não é afetada.	Mitchell, (1976); Kassif; Baker, (1971)

Fonte (NELSON; MILLER,1992 apud PAIVA, 2009)

Quadro 2.4 Situação em que o solo se encontra e que influencia na expansão NELSON; MILLER,1992 apud PAIVA, 2009. (Continuação)

FATOR	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
3.2 Condições in situ	O estado de tensão inicial no solo pode ser estimado a fim de avaliar as prováveis conseqüências do carregamento sob a massa de solo e/ou alteração do ambiente inerente a umidade. As tensões efetivas iniciais podem ser grosseiramente determinadas através de amostragem e testes em laboratório, ou por medidas e observações in situ.	-----
3.3 – Carregamento	A grandeza de sobrecarga aplicada influi quantitativamente na mudança de volume que ocorrerá, para um dado teor de umidade e densidade. Uma carga externa aplicada atua para balanceando das forças repulsivas entre partículas e reduzindo a expansão.	Holtz, (1953)
3.4 - Perfil do solo	A espessura e posição da camada potencialmente expansiva influência consideravelmente no movimento do solo. Os maiores movimentos ocorrem em perfis que tem argilas expansivas desde a superfície até a região abaixo da zona ativa. Movimentos menores ocorrerão se o solo expansivo for recoberto por material não expansivo ou leito rochoso superficial.	Holland; Lawrence, (1980)

Fonte NELSON; MILLER,1992 apud PAIVA, 2009

2.3.3 Ocorrência de solos expansivos no mundo

Solos expansivos, em muitas partes dos Estados Unidos representam um significativo perigo para fundações de edifícios. Argilas expansivas derivadas de solos residuais podem exercer elevação de tensões de até 5,500 PSF (263,4 kPa) que podem causar consideráveis danos para leves estruturas de madeira (ROGERS et al. 2014).

Companhias de seguro gastam milhões de dólares todos os anos para reparar lares afetados por solos expansivos. Solos expansivos devem suas características à presença de minerais expansivos de argila. Como elas absorvem umidade, as argilas minerais absorvem moléculas de água e expandem; reciprocamente como elas secam, elas encolhem, deixando grandes vazios no solo.

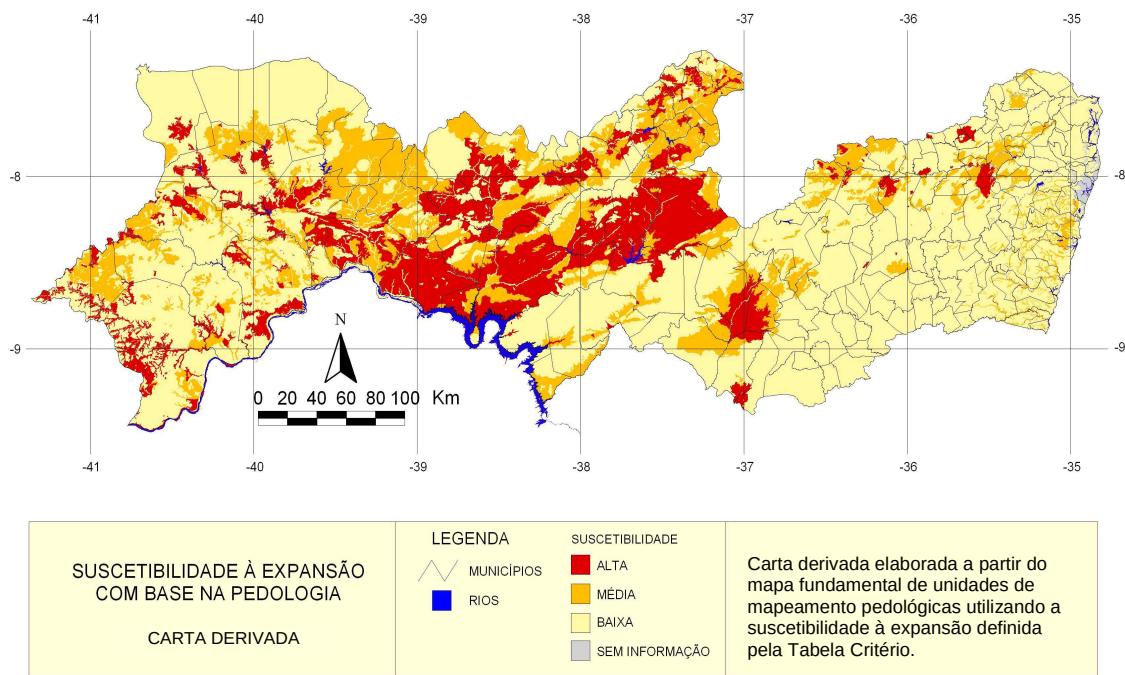
Solos expansivos são predominantes no Brasil devido à deposição generalizada de cinzas e materiais vulcânicos. Grande parte da literatura existente associada em estudos sobre solos expansivos são de fontes oriundas dos Estados Unidos ou da África do Sul, particularmente, onde esses tipos de solo ocorrem em regiões de clima seco e desértico, e a ocorrência de solos

Quadro 2.6 Ocorrência de solos expansivos no Brasil (FERREIRA et. al. 2012)

Nº	LOCAL	REFERÊNCIA	ORIGEM / TIPO DO SOLO / CLASSE PEDOLÓGICA
01	Paulo Dutra - MA	FERREIRA (1988)	-----
02	Parelhas - RN	LINS et. al.(1986)	Formação Seridó
03	Carnaíba - PE	FERREIRA (1988)	Complexo Monteiro / Bruno não Cálculo
04	Afrânio - PE	FERREIRA (1989)	Grupo Salgueiro/Cachoeirinha/ Areia Quartzosa/ Bruno Não Cálculo
05	Petrolina - PE	FERREIRA (1989)	Grupo Salgueiro / areia Quartzosa/ Bruno Não Cálculo
06	Cabrobó - PE	FERREIRA (1989)	Complexo Presidente Juscelino / Bruno não Cálculo
07	Salgueiro – PE	FERREIRA (1989)	Bruno não Cálculo
08	Serra Talhada - PE	FERREIRA (1989)	Complexo Monteiro/ Bruno não Cálculo
09	Petrolândia - PE	FERREIRA (1989)	Areia Quartzosa
10	Ibimirim - PE	FERREIRA (1989)	Bruno Não Cálculo
11	Pesqueira - PE	SILVA e FERREIRA (2007)	Bruno não Cálculo
12	Nova Cruz – PE	FERREIRA (1997)	Formação Barreira
13	Paulista - PE	FERREIRA (1989)	Formação Maria Farinha
14	Olinda - PE	COSTA NUNES et.al. (1982)	Formação Maria Farinha / Silticos
15	Olinda - PE	JUCA et.al. (1992)	Formação Maria Farinha
16	Cabo - PE	COSTA NUNES et.al. (1982)	Rochas Extrusivas Básicas
17	São Francisco - PE	LEITE e FERREIRA (2012)	Sedimento do Recôncavo, Tucano e Jatobá
18	Suape - PE	FERREIRA et.al (2012)	Formação Maria Farinha do Grupo Barreiras
19	Reservatório de Itaparica– PE - BA	SIGNER et.al.(1989), VARGAS et.al. (1989)	Silticos e Argilitos
20	Reservatório de Itaparica– PE - BA	SANTOS e MARINHO (1990)	Sedimentos da Bacia do Jatobá da Formação Aliança
21	Maceió - AL	FERREIRA (1988)	Bruno não Cálculo
22	Aracajú - SE	CAVALCANTE (2007)	Formação Calimbi
23	Juazeiro - BA	FERREIRA (1989)	Grupo Salgueiro
24	Recôncavo Baiano - BA	SIMÕES e COSTA FILHO (1981)	Grupos ilha de Santo Amaro e Formação São Sebastião/ Vertissolo
25	Baia de Aratu- BA	BARRETO et.al. (1982)	Vertissolo
26	Feira de Santana - BA	PRESSA (1986)	Vertissolo
27	Recôncavo Baiano - BA	SIMÕES (1986)	Grupos ilha de Santo Amaro e Formação São Sebastião/ Vertissolo
28	Salvador - BA	PRESA (1986)	-----
29	Cuiabá - MT	RIBEIRO JUNIOR et.al. (2006)	Grupo Cuiabá / Filito
30	Campinas - SP	SÂMARA (1981)	Podzólico
31	Sudeste de São Paulo e Paraná	VARGAS et.al. (1989)	Formação Tubarão
32	Curitiba – PR	PEREIRA E PEJON (2004)	Formação Guabirotuba
33	Porto Alegre - RS	VARGAS et.al. (1989)	Formação Rosário do Sul
34	Laranjeiras - SE	GUSMÃO FILHO et.al. (2002)	Formação Barreiras
35	N. S. do Socorro - SE	GUSMÃO FILHO et.al. (2002)	Formação Barreiras
36	Grajaú - MA	GUSMÃO FILHO et.al. (2002)	-----

Fonte FERREIRA et al. (2012)

Figura 2.10 Suscetibilidade a expansão no estado de Pernambuco (AMORIN, 2004)

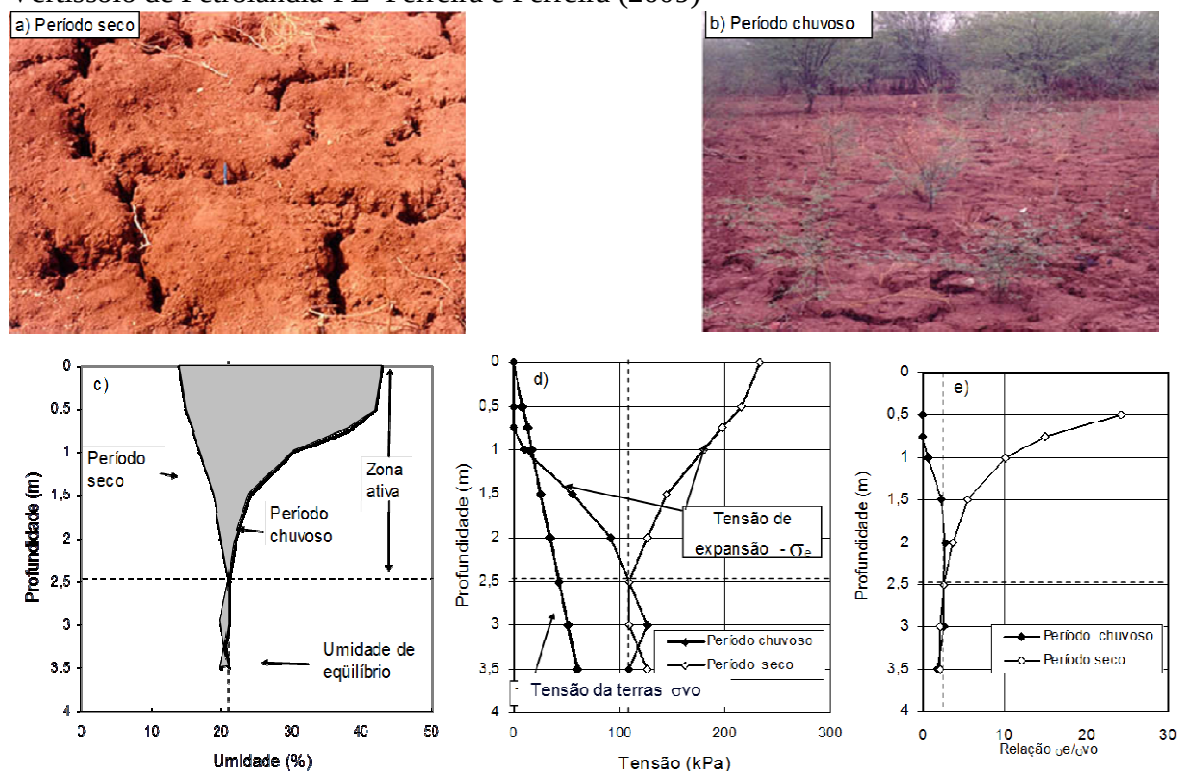


Fonte AMORIN. (2004)

2.4 Perfis de solos expansivos no estado de Pernambuco

Dois perfis típicos de solos expansivos do estado de Pernambuco, um de Petrolândia e outro de Paulista é apresentado nas Figuras 2.11e 2.12. No Vertissolo de Petrolândia-PE Ferreira e Ferreira (2009) observaram em campo, no período seco, fissuras na superfície do solo, tinham espessuras que variavam de poucos milímetros a 120 mm, Figura 2.11 a), reduzindo de dimensão com a profundidade, e a extensão chegando a atingir 2,0 m (observado no poço). Observaram, também, no período de chuva, que a intensidade foi suficiente para causar o desaparecimento completo de algumas fissuras na superfície (Figura 2.11 b). A umidade do solo, medida da superfície a uma profundidade de 3,5m, variou, no período seco, entre 14,54% e 21,03% e, no período chuvoso, de 42% a 20,90%. A partir de 2,50m de profundidade, praticamente não houve, nos dois anos de observação, variação do teor de umidade do solo entre o período seco e o chuvoso, indicando ser esta a Zona Ativa de mudança do teor de umidade, (Figura 2.11 c) e também de variação de tensão de expansão (Figuras 2.11 d) e 2.11 e).

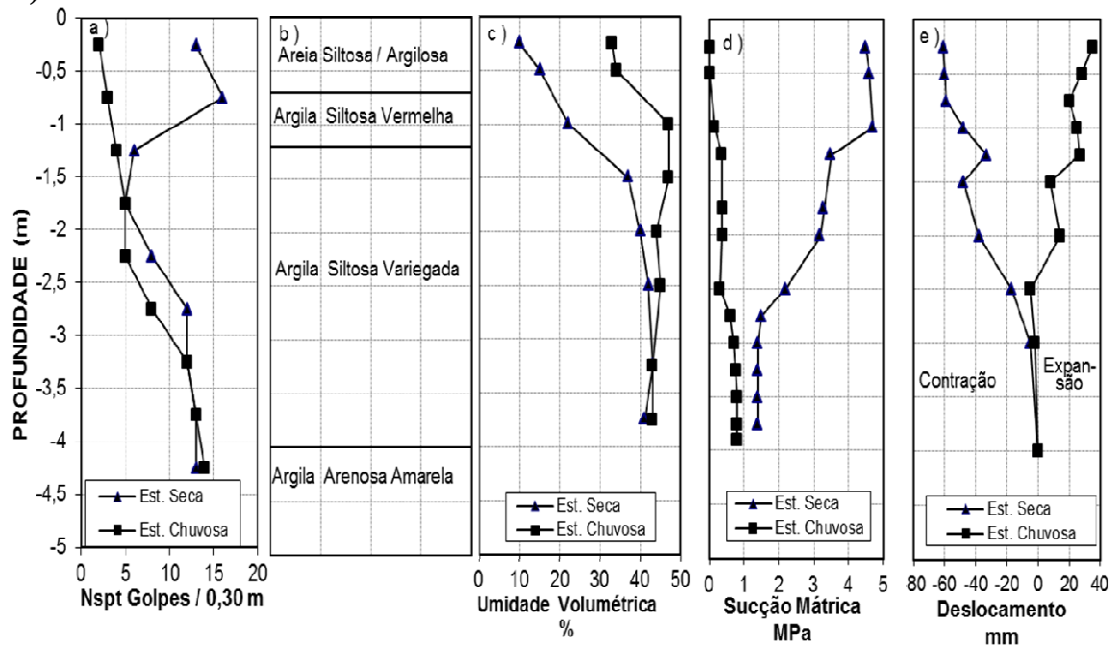
Figura 2.11 a) Microrelevo em período seco, b) Microrelovo em período chuvoso, c) Zona ativa, d) Tensões das terras e de expansão e) Razão entre tensões das terras e de expansão em Vertissolo de Petrolândia-PE Ferreira e Ferreira (2009)



Fonte, Ferreira e Ferreira (2009)

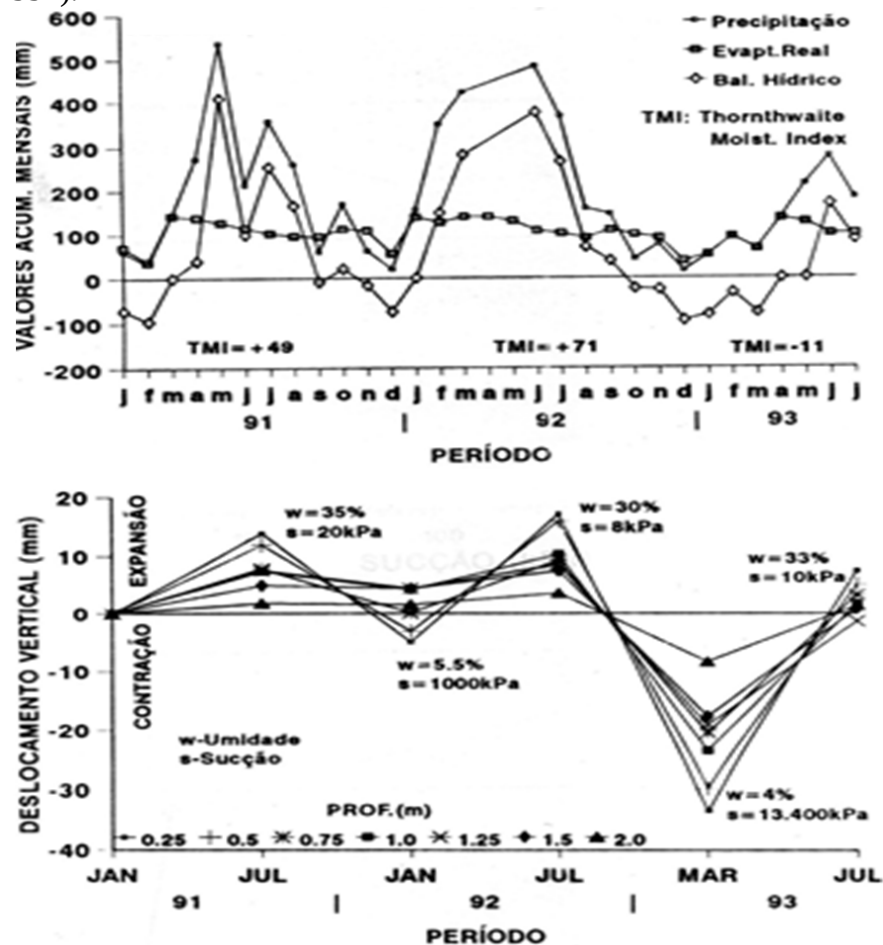
Bastos (1994), Jucá et al (1997) e Da Silva (2001) investigaram o solo de Paulista-PE em período chuvoso e seco. O solo é constituído de 4 camadas até o limite de investigação (Figura 2.12). Os valores do N_{SPT} variam de 2 a 14 golpes/0,3m na estação chuvosa, e de 12 a 16 golpes/0,30m na estação seca, nota-se que na época de chuva ocorre um grande decréscimo na resistência a penetração. Os condicionantes climatológicos influenciam significativamente no perfil de umidade, de sucção e na variação dos deslocamentos dos solos até a profundidade de 3,5 m caracterizando a camada ativa do solo. No período chuvoso a sucção a sucção variou de 0 a 1 mPa e no período seco de 4,8 mPa a 1,5 mPa com a profundidade. A Figura 2.13 mostra a variação do deslocamento vertical, medido em períodos chuvosos e de secas de 1991 a 1993, com a umidade e a sucção matricial avaliada através do papel filtro na profundidade de 0,50m. Os deslocamentos são fortemente influenciados pelas variações climáticas, na estação seca, ocorre contração no solo e na estação chuvosa expansão.

Figura 2.12 Influência do clima: a) Nspt, b) Camada do solo, c) Umidade volumétrica, d) Sucção mátrica e e) Deslocamento. Adaptado de Bastos (1994), Jucá et al (1997) e Da Silva (2001).



Fonte, Adaptado de Bastos (1994), Jucá et al (1997) e Da Silva (2001).

Figura 2.13 – Balanço hídrico e perfil de expansão- contração na argila expansiva de Paulista-PE, Bastos (1994).



Fonte, BASTOS (1994)

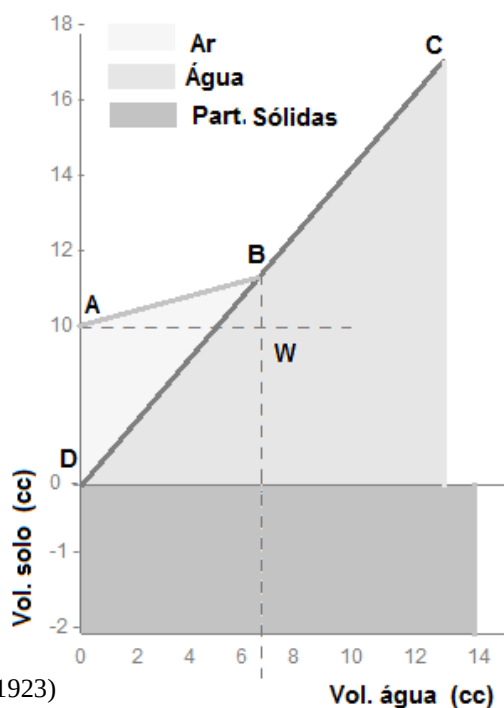
2.5 Curva de retenção do solo

A quantidade de água num solo pode ser expressa através da umidade gravimétrica ou volumétrica, ou utilizando o grau de saturação. A sucção depende da quantidade e distribuição da água no solo. Para um solo homogêneo pode ser relacionado a sucção com a umidade. A relação sucção / umidade é denominada curva característica do solo, dependendo da trajetória de tensões e distribuição dos pontos analisados. A capacidade de retenção de líquidos pelo solo não pode ser analisada apenas pela curva característica devendo obter as relações entre sucção e grau de saturação e índice de vazios.

Embora a relação entre a umidade do solo e a sua sucção seja fácil de obter, os aspectos físicos que envolvem a sua interpretação são complexos, porém torna compreensível o comportamento dos solos não saturados (Marinho, 1997)

O solo por ser um material poroso possui um determinado volume de vazios, podendo estar saturado, cheio de água ou outro líquido, secos ou cheio de ar, ou com ar e líquido sendo classificado por solo não saturado. A Figura 2.14 corresponde a uma curva de contração de um solo representando o volume de água de uma amostra de solo em função do seu volume.

Figura 2.14 Curva de contração de um solo (modificado de Haines, 1923)



Fonte, modificado de Haines, (1923)

A curva de contração é representada por duas retas (CB e BA), sendo a contração normal a reta CB onde nesse estágio, o volume de água que evapora é igual à redução de volume da

amostra. Na segunda fase (reta BA), contração residual, parte da água evaporada é substituída por ar. O limite de contração do solo é verificado no gráfico pela intercessão da linha horizontal para o teor de umidade zero e o prolongamento da reta de grau de saturação.

A curva característica relação entre a quantidade de água do solo em função da sucção, sendo utilizada a umidade gravimétrica e volumétrica e o grau de saturação. A forma da curva depende diretamente da história de tensões que a amostra foi submetida quando saturada e a trajetória de secagem e umidificação. Na Figura 2.15 observam-se algumas relações entre sucção e umidade gravimétrica. Todas as correlações são aproximações lineares. Existe uma relação entre as camadas moleculares de água que cada um dos materiais indicados possuem numa dada sucção.

A inclinação da curva característica ($C = \Delta w.(\Delta \log(\text{sucção}))^{-1}$), Figura 2.16 provavelmente definida pela primeira vez por Richards (1931) o qual a denominou de capacidade capilar, mais tarde Mitchell e Avalle (1984) a chamou de característica de umidade. Alonso et al. (1987) a definiu como termo de armazenamento. Juca (1990) chamou de capacidade diferencial de teor de umidade. Ho et al. (1992) a chamou de índice de teor de umidade e Marinho e Chandler (1993) segundo Richards (1931) e adaptando-a aos tempos atuais chamou de Capacidade de sucção (C).

Figura 2.15 Relação entre sucção e teor de umidade gravimétrico (modificado de Mc Keen 1981).

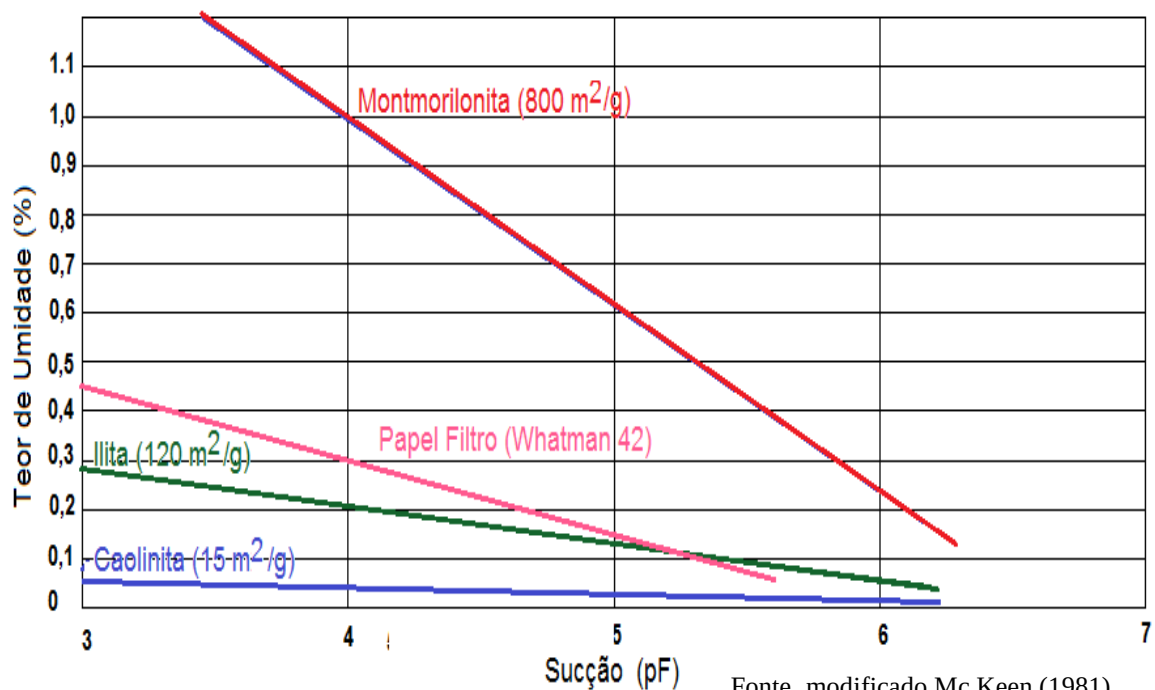
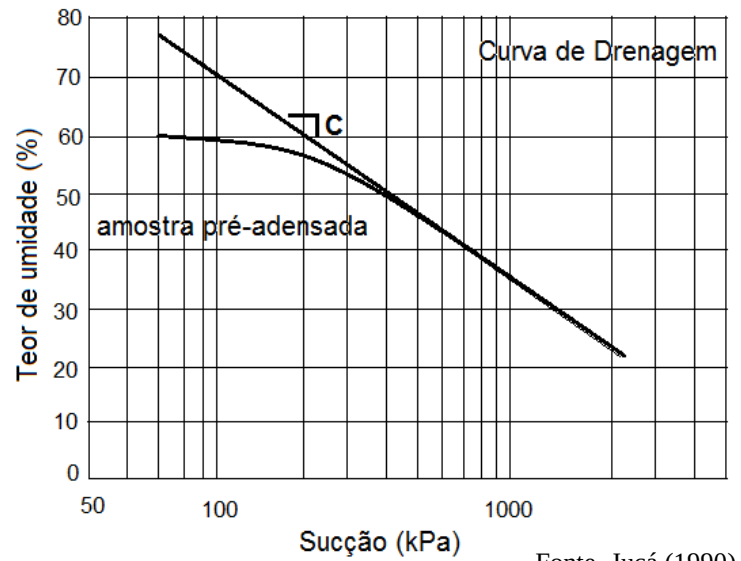
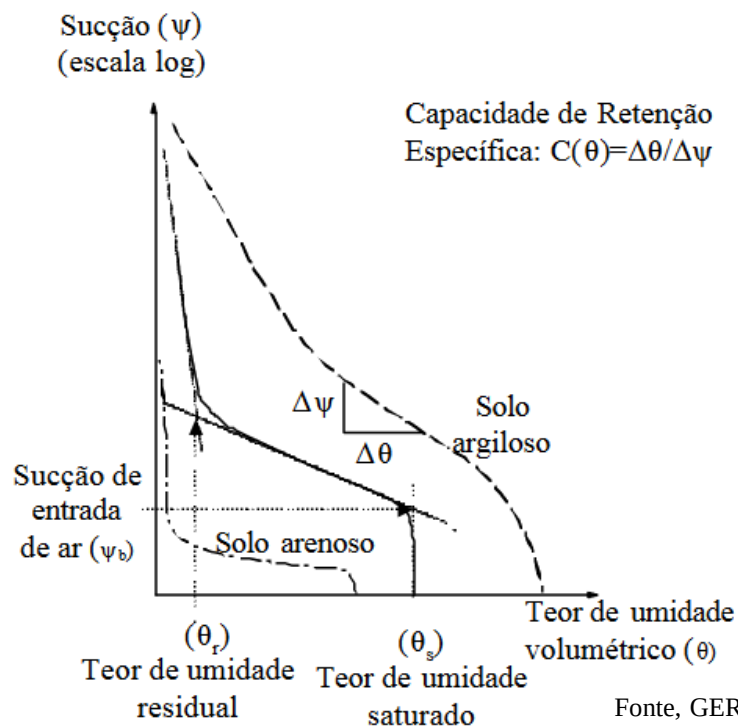


Figura 2.16 capacidade de sucção “C” (Jucá, 1990)



A figura 2.17 apresentada por Gerscovich (2001), mostra curvas características típicas para areias e argilas, além de definir os parâmetros mais importantes relativos a essa função.

Figura 2.17 Curvas características típicas (GERSCOVICH, 2001)



Fredlund e Xing (1994) definiram na curva característica, a relação entre a água presente nos poros e a sucção de um solo. Este volume de água pode ser quantificado em termos de teor de umidade volumétrico (θ), definido como a relação entre o volume de água e o volume de total, teor de umidade gravimétrico (ω), sua dimensão obtida em função da relação entre

pesos de água e de sólidos, ou grau de saturação. A sucção ou sucção mátrica (ψ) é definida pela diferença entre as pressões na água e no ar contido nos vazios ($u_a - u_w$), ou pode ainda incorporar a parcela de sucção osmótica, trabalhando-se, neste caso a sucção total. Para altos valores de sucção (acima de 1500 kPa), a sucção mátrica e a total podem ser consideradas equivalentes. Dentre as diversas formas de se definir curva característica, a mais adotada é aquela que relaciona teor de umidade volumétrico e sucção mátrica (GERSCOVICH, 2001).

2.6 Estabilização de solos expansivos

Entende-se por estabilização de solos expansivos, processos físico, físico-químico ou mecânico, visando neutralizar a expansão. Na área rodoviária, a estabilização de solos é um método de construção no qual o solo é tratado sem aditivos ou com aditivos, com a finalidade de tornar o solo resistente às intempéries sem desagregação. (PEREIRA, 2012). O domínio das técnicas de estabilização dos solos pode conduzir as sensíveis redução nos tempos de execução de obras, diminuindo o tempo e uma economia para a obra. (PESSOA, 2004).

Para Oliveira (2010) estabilizar um solo é torná-lo capaz de suportar esforço gerados pelos tráfegos de veículos sem sofrer deformações e recalques sobre quaisquer condições, podendo ser um processo de estabilização mecânico, químico ou químico-mecânico.

A opção da escolha da metodologia sofre influência de alguns fatores importante para a estabilização, como a finalidade da obra, as propriedades do solo a ser corrigida e as características específicas do material (BARBOSA, 2013).

2.6.1 Tipos e formas de estabilização

Os tipos de estabilização dos solos podem ser classificados em três: estabilidade mecânica, estabilidade granulométrica e estabilização físico-química (SILVA, 2012). Os métodos não tradicionais também são aplicados na estabilização dos solos, aumentando a resistência e melhorando suas características naturais.

2.6.1.1 Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica consiste numa compactação. É um processo que complementa qualquer outro processo de estabilização.

Os métodos mecânicos são aqueles que não se adicionam nenhum material ao solo. Aumentam a densidade do solo, melhorando sua resistência mecânica e durabilidade. Envolvem a redução de volume de vazios in situ do solo através da energia imposta; preenchimento de vazios, reduzindo os poros e inibindo a percolação da água e a erosão provocada por ela, aumentando a durabilidade; aumento da compactação, tendo-se o acréscimo da resistência mecânica drenagem enquanto mantem o conteúdo de água constante para a mistura de tipos de solos diferentes.

2.6.1.2 Estabilização granulométrica

A estabilização 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). As propriedades do solo são alteradas quanto à textura quando aplicado fibras metálicas, minerais, vegetais ou sintéticas para atingir a estabilização por correção granulométrica.

A cinza volante é um agente efetivo para estabilização mecânica dos solos, modificando a densidade do solo, teor de umidade, plasticidade e resistência dos solos, (QUISPE, 2013). Provoca a estabilização de solos, melhora a sua resistência e o controle da contração e expansão (Goosen et al. 2006).

Um grande problema na engenharia é a falta de resistência do solo para suportar grandes deformações que torna inviável pequenos projetos superficiais pela necessidade de fundações profundas que nem sempre solucionam o problema. Para solucionar esse problema, uma das medidas seria a estabilidade do solo com adição de agregados (solo-brita), alterando assim as propriedades geotécnicas do solo, evitando as deformações e maior capacidade de suporte. Essa é uma técnica antiga mais largamente utilizada hoje em dia em pavimentos, fundações, contenção de taludes e barragens. (FERREIRA et al. 2011).

2.6.1.3 Estabilização físico-química

A estabilização Físico-química consiste na adição de aditivos que reagem quimicamente com as partículas do solo, aumentando a estabilidade e melhorando suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Podem ser uma estabilização: solo-cimento, solo-cal (detalhado no item 2.7), Solo-betume, estabilização com cloro e outras estabilizações experimentais, utilizando materiais alternativos (PEREIRA, 2012). A estabilização química é produzida pela adição de

uma ou mais substância química ao solo, estabilizando e melhorando suas características (AZEVEDO, 2010). Os países europeus efetuam estabilização com cal utilizando teores baixos para melhoria da trabalhabilidade do solo e não apenas da resistência.

Solo-cimento

O solo-cimento pode ser aplicado a qualquer tipo de solo, modificando e melhorando suas propriedades com a aplicação do cimento. Em solos com teor elevado de argila, são necessários altos teores de cimento, com uma dificuldade na homogeneização da mistura. Na reação solo-cimento, a ação do cimento nos grãos do solo ocorre através de reações hidratação e hidrólise.

Nesse processo de estabilização, acontece uma ligação mecânica e química entre o cimento e a superfície rugosa e porosa de cada grão, havendo uma fixação entre os pontos de contato de cada grão. A fixação através do cimento é mais eficiente quanto maior for o número de contatos com as partículas. A dosagem do solo-cimento deve ser realizada por meio de ensaios de laboratório, seguido pela análise e interpretação dos resultados, baseando-se em critérios pré-estabelecidos, (LIMA, 2010).

Reação do solo-cimento

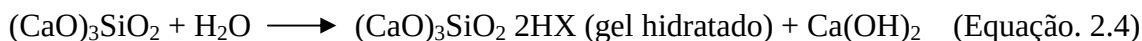
As reações do aglomerante com o solo ocorrem na hidratação do cimento que pode ser desenvolvida em quatro etapas (Guéiros, 2013):

- 1ª fase - componentes do cimento começam a reagir, liberando o hidróxido de cálcio, que se dissolve parcialmente na fase aquosa, elevando o pH para 13. Essa fase exotérmica (40 cal/g/h) dura aproximadamente de 5 a 10 minutos;
- 2ª fase - período de indução, durante o qual as superfícies dos grãos ficam cobertos com géis neo-formados. Forma-se uma camada gelatinosa de silicatos e aluminatos hidratados dos grãos de cimento;
- 3ª fase - endurecimento do gel, promovendo a ligação entre os grãos parcialmente hidratados. Duração aproximada de 6 horas;
- 4ª fase - endurecimento total do gel (GUÉIROS, 2013)

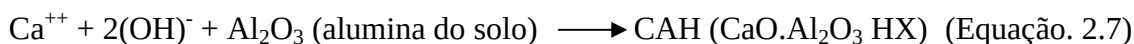
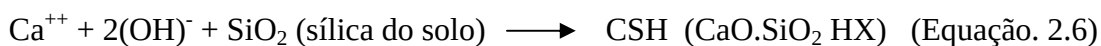
Reações iniciais:

a) Reações de hidratação do silicato tricálcico ($\text{CaO}_3 \text{SiO}_2$) do cimento Equações. 2.4 e 2.5:

Silicato tricálcico (C_3S)



b) Reações com o solo: reações entre a cal gerada na hidratação do cimento e os argilominerais do solo (reações pozolânicas) Equações. 2.6 e 2.7:



c) Pela a diminuição no pH da mistura, a reação caminha no seguinte sentido:

$C_3S_2HX = CSH + \text{cal}$ (Obs.: o CSH ($CaO.SiO_2 \cdot HX$) é um composto mais fraco que o C_3S_2HX ($(CaO)_3.(SiO_2)_2 \cdot HX$). (RENÓ, 2007)

O silicato de cálcio hidratado (C_3S_2HX) é o produto final da hidratação tanto do C_3S como do C_2S , sendo que, aquele originado do C_3S é estável somente em soluções saturadas de hidróxido de cálcio, com pH variando de 12,34 a 12,20, enquanto que o proveniente do C_2S é estável em soluções com pH igual a 11 (PITTA et al., 1988).

Existem outros processos de estabilização do solo como: mecânica com compactação, drenagem das partículas próxima da umidade ótima, granulométrica com adição e retirada de partículas de solo, alterando suas propriedades físico-química com adição de aditivos que interagem com as partículas como cal, cimento, asfalto ou betume e produtos químicos como cloretos e ácidos. Esses itens serão apresentados por não ser o objetivo da tese, sendo detalhado a estabilização do solo com cal.

2.7 Solo-cal

A reação solo-cal é uma mistura de solo, cal e água em proporções determinadas por ensaios de laboratório, com utilização em várias etapas de pavimento e também na melhoria de algumas propriedades prejudiciais dos solos; expansividade, umidade excessiva e plasticidade elevada (AZEVEDO, 2010).

As reações químicas da cal inicialmente é com a fração fina do solo argilominerais; a cal também pode reagir com materiais pozolânicos como cinza de carvão ou de casca de arroz.

a) Reação da formação da cal

A formação da cal está representada na Equação 8 para a cal viva calcítica, Equação 9 para a hidratação da cal calcítica, Equação 10, obtenção da cal dolomítica e Equação 11 para a hidratação da cal dolomítica.

Cal viva calcítica:



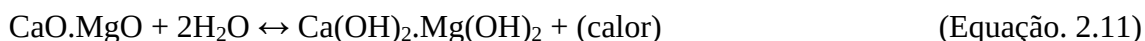
Na hidratação forma a cal hidratada calcítica:



Cal viva dolomítica:



Na hidratação forma a cal hidratada dolomítica:



Onde a nomenclatura de cada molécula é:

CaCO_3	→ Carbonato de Cálcio	CaO	→ Óxido de Cálcio
CO_2	→ Dióxido de Carbono	H_2O	→ Água
Ca(OH)_2	→ Hidróxido de Cálcio	MgCO_3	→ Carbonato de Magnésio
MgO	→ Óxido de Magnésio	Mg(OH)_2	→ Hidróxido de Magnésio
Al_2O_3	→ Óxido de Alumínio	SiO_2	→ Dióxido de Silício

A cal produz alterações nas propriedades do solo de várias formas especificadas a seguir.

Na plasticidade, a cal aumenta o limite de liquidez (WL) e limite de plasticidade (Wp) nas argilas não expansivas e diminui nas argilas expansivas, diminuindo também o índice de plasticidade, melhorando a trabalhabilidade da mistura.

A cal provoca a redução da expansividade aumentando o limite de contração, quanto à distribuição granulométrica aumenta a floculação e a agregação com uma intensidade maior, quanto maior for a quantidade de finos no solo, aumentando a resistência à compactação, diminuindo a absorção de água pela argila.

b) História da utilização da cal

A cal vem sendo utilizada e aplicada em várias formas em todo mundo, destacando sua utilização na construção civil, desde 6000 anos a. C; o Quadro 2.7 destaca algumas citações, o local e o ano da aplicação da cal.

Produtos e aplicações onde a cal faz parte na sua fabricação: adesivos, selantes, adsorventes, biocidas, revestimentos, tintas, diluentes, betumes, gesso, explosivos, adubos, combustíveis, fluídos de transferência de calor e hidráulicos, tintas e toners, produtos como reguladores de pH, floculantes, precipitantes, agentes de neutralização, produtos químicos de laboratório, curtimento de couro, lubrificantes, produtos farmacêuticos, misturas de cera, preparação de polímeros e compostos, semicondutores, produtos de limpeza, produtos químicos para tratamento de água, produtos para soldagem, cosméticos, produtos de higiene pessoal, agentes de extração, entre outros (ECHA, 2014).

c) A cal no Brasil

No início do Brasil colônia era utilizado conchas e mariscos queimados em fornos rústicos, para a produção da cal que era utilizada na produção de argamassas de revestimentos e assentamento em obras civis e militares, construídas pelos portugueses, na região litorânea do estado de Espírito Santo, até o século XX, produzindo construções mais resistentes (TRISTÃO et al. 2009).

Registros mostram que as caieiras geralmente eram instaladas próximas ao mar para poder aproveitar os depósitos de calcário marinho e de foz dos rios, onde se encontram os mariscos. Assim, em locais como Espírito Santo, Rio de Janeiro, Salvador, Pernambuco com uma

Quadro 2.7 Presença da cal no mundo

Ano local	Citação	Referencia
Palestina 7.000 a.C.	Primeira argamassa de cal em Jericó	Reller (1992)
Turquia 6000 a.C.	As primeiras aplicações da cal apagada nas construções datariam do período Neolítico	Malinowsky (1982 e 1991)
Egito 4000 a 2000 a.C.	Utilização de argamassas de cal em pavimentos Os gregos foram os primeiro a utilizar a cal como argamassa de revestimento. Em seguida foi misturado com areia e adicionado pedra Santorine, (pozolana) formando um ligante Hidráulico	Boynton, 1980
Egito 2200 a.C.	A Pirâmide de Quéfren (Khafre) revelou presença da cal ao lado de blocos de calcários e granitos lavrados.	A. Leprevost
Jerusalém 1000 a.C.	Uma extensa muralha foi construída em torno de Jericó, a 23 km de Jerusalém, para proteger a Cidade contra invasões.	
China 228 a.C.	Muralha da China, com 2.400 km de extensão, foi construída ou completada na Dinastia Chin, para defender as diversas regiões do Império contra os frequentes ataques inimigos. Terra argilosa e cal, com eventuais adições de clara de ovo. Tal mistura também foi utilizada para construção das fundações.	M. Venant
Grécia séc. II a.C.	Utilizava também o barro em vez da cal como argamassa de ligamento dos muros de pedra. Vestígio de cal nas alvenarias das cisternas, túmulos.	Jorge de Alarcão (1978)
Grécia Ano 75	Uso da cal, na forma de soluções saturadas de hidróxido de cálcio (água de cal), como medicamento para males do estômago	Discor de Pedânio medico grego
França Anos 1.217	Pela primeira vez a cal (virgem é moída) é utilizada em guerra. Os ingleses lançavam-na contra os rostos de seus inimigos franceses.	
Itália 1.500	Durante o período da Renascença, na Itália, os célebres artistas Michelangelo e Rafael utilizaram com frequência a “bela pasta branca de cal” em seus murais e afrescos.	Enciclopédia Britânica, vol.14, pág. 130

localidade chamado Forno da Cal em Olinda, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, que foram colonizados pelos portugueses, notam-se localidades com nomes que fazem referência a cal, como a Praia da Cal (Rio Grande do Sul), Caieira da Barra do Sul (Santa Catarina) e Ilha das Caieiras (Espírito Santo) (TRISTÃO et al. 2009).

No Brasil, grande variação na tecnologia de produção no setor da cal, marcado pela presença tanto de grandes empresas internacionais e nacionais que operam de maneira formal utilizando tecnologia similar a dos países desenvolvidos, em quanto pequenas empresas que produzem cal em fornos artesanais intermitentes, alimentados por biomassa de procedência variável, adotam processos com baixa eficiência e atuam com graus variados de informalidade trabalhista, ambiental, fiscal e de qualidade de produto. Naturalmente, é difícil estimar a quantidade de cal produzida sem licença ambiental, mas fontes do mercado estimam entre 15 e 20% da produção. Incluída também a informalidade fiscal, estimam-se taxas superiores (PUNHAGUI et al. 2014).

No distrito Serrinha, Município de Santa Maria do Cambucá (Pernambuco) pequenas minerações a céu aberto estão em atividade, associadas a calcinadoras e algumas unidades de cominuição que produzem calcários corretivos. A mineração e a produção de cal virgem utilizam métodos artesanais, resultando em cales comercializadas sem adequado controle de qualidade causando sérios danos à biomassa da Caatinga (DUARTE et al. 2012).

No mundo, a China é o maior produtor de cal com 80%, em segunda colocação os Estados Unidos com 9%. No Brasil, mesmo crescendo 4,5% de sua produção, continua em 5º lugar (ABPC, 2014). A cal, no Brasil, é uma resultante da calcinação de matéria-prima (calcário dolomitos antigos de purezas variadas); em média, na região sul-sudeste, predominam as cales de origem dolomitas e calcários magnesianos. Nas regiões centro, norte e nordeste predominam os calcários, sendo o sudeste responsável por 73% da produção brasileira (ABPC, 2009).

Os calcários, calcários magnesianos e dolomitos, apresentam uma classificação, levando em consideração a concentração de cada óxido presente na sua estrutura:

- a) Cal virgem cálcica - presença de Óxido de cálcio (CaO) entre 100 e 90% do total da molécula;
- b) Cal virgem magnesiana - presença de Óxido de cálcio (CaO) entre 90 e 65% do total da molécula;
- c) Cal virgem dolomítica - presença de óxido de cálcio (CaO) entre 65 e 58% do total da molécula

2.7.1 Estabilização de solos expansivos com cal

A estabilização do solo com cal está relacionada à quantidade de cal hidratada que é aplicada ao solo. Como a cal encontrada no comércio é muito irregular devido à falta de controle de qualidade na produção, que envolve calcinação até 1000°C, e altas impurezas na matéria prima, as quantidades variam.

Com a finalidade de verificar a pureza das cales vendidas no comércio e as suas respectivas composições químicas Cincotto, (1980) realizou uma pesquisa com cinco cales, utilizando a metodologia oficial para caracterizar as mesmas, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), determinando análise química, termogravimetria (TG), Análise Térmica Diferencial (DIA), Análise por Difração de Raio-X, Microscopia Eletrônica de Varredura, Finura, Retenção de água, Estabilidade e Plasticidade. Os resultados são apresentados na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 Composição Química dos Óxidos Totais das Amostras de Cal Hidratada, calculadas a partir dos resultados da análise química, (CINCOTTO, 1980).

Compostos Amostras	CaSO ₄	CaSO ₃	Ca(OH) ₂	Mg(OH) ₂	CaO	MgO	Ins+R ₂ O ₃	Total	CaO+ MgO
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)/(*)
1	0,27	12,8	50,4	26,7	nihil	7,97	1,81	99,95	97,3
2	0,24	19,7	52,3	14,2	nihil	11,4	1,99	99,83	97,0
3	0,27	13,7	44,2	29,2	nihil	5,02	7,51	99,90	89,6
4	0,35	8,2	54,6	17,3	nihil	15,0	4,59	100,07	94,0
5	0,46	11,6	68,0	1,3	nihil	14,7	4,03	100,09	94,6

(*) Valor de referência ao material não volátil.

Fonte, CINCOTO (1980)

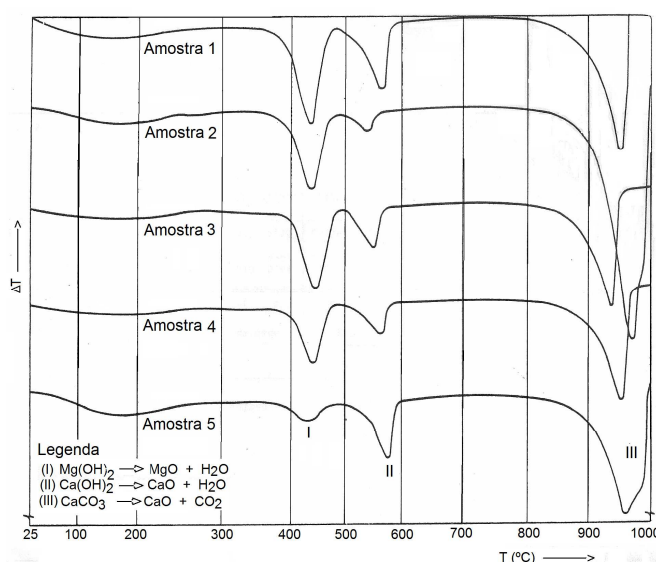
Com esses resultados, Cincotto (1980) concluiu que as amostras 1, 3 e 4 são classificadas como dolomíticas e 2 e 5 como magnesianas.

A Figura 2.18 apresenta o resultado da análise térmica diferencial, de amostras que passaram na peneira nº 200; o gráfico apresentou picos endotérmicos da separação da hidroxila, que acontece na temperatura específica para cada composto. Sendo 300°C a temperatura de perda de água, o intervalo até 380°C (I) desidroxilação do Mg(OH)₂, o intervalo de até 620°C (II) desidroxilação do Ca(OH)₂ e o intervalo até 740°C (III), dissociação do CaCO₃. Com os

resultados obtidos comparados com os outros resultados, pode-se chegar à pureza e à composição de cada amostra. A Tabela 2.11 apresenta os valores da temperatura de cada etapa das amostras.

Na análise de imagem por difração de raio-X e microscopia eletrônica de varredura, Cincotto (1980) verificou a presença de placas apenas nas amostras 1 e 2, e na 5, ausência das placas. A autora pode concluir também que devido à alta incidência dos teores de anidrido carbônico, variando próximo a 50% nas amostras, analisados nos resíduos que foram retidos na peneira nº 200 e que indicam a falta de controle de qualidade na calcinação do minério, ficando uma quantidade elevada sem calcinar ainda na forma de carbonato de cálcio ou de magnésio, tornando a cal fora dos padrões brasileiros de cal hidratada para argamassa.

Figura 2.18 Curva da termogravimetria com os valores das 5 amostras (CINCOTTO, 1980)



Fonte, CINCOTO (1980)

Tabela 2.11 Valores da termogravimetria para construção do gráfico (CINCOTTO, 1980)

Determinações Amostras	Massa total da amostra (mg)	Umidade		Perda de peso devidas a reações de decomposição dos compostos							
				Mg(OH) ₂		Ca(OH) ₂		CaCO ₃		Total	
		mg	%	mg	%	mg	%	mg	%	mg	%
1	6,284	0,040	0,64	0,500	7,96	0,751	11,95	0,300	4,77	25,32	
2	5,189	0,025	0,48	0,235	4,53	0,590	11,37	0,525	10,12	26,5	
3	4,859	0,050	1,03	0,425	8,75	0,425	8,75	0,300	6,17	24,7	
4	5,833	0,025	0,43	0,235	0,40	0,690	11,83	0,225	3,86	16,52	
5	5,031	0,025	0,50	0,050	0,99	7,770	13,91	0,375	7,45	22,85	

Fonte, CINCOTO (1980)

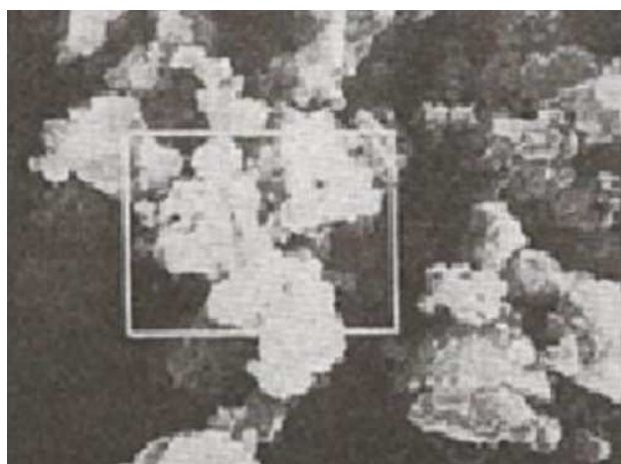
A análise de Microscopia Eletrônica de Varredura mostra a forma cristalina angular característica dos carbonatos, confirmando a deficiência da calcinação na formação dos óxidos. Na Figura 2.19, foi verificada a presença dos cristais da matéria prima não decomposta pelo calor nem pela água e na Figura 2.20, um aglomerado de cristais em placas.

Figura 2.19 Cristais de matéria prima não decomposta (Cincotto,1980)



Fonte, CINCOTO (1980)

Figura 2.20 Aglomerado de cristais não calcinados (Cincotto,1980)



Fonte, CINCOTO (1980)

(PAIVA et al. 2007), entre todos os plastificantes utilizados na preparação das argamassas, o mais recomendável para utilização é a cal hidratada (Ca(OH)_2), cujo desempenho como plastificante é comprovado em vários institutos de pesquisas. Seu uso é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As várias marcas de cales existentes no comércio são controladas através do selo de qualidade, fornecido pela Associação Brasileira dos Produtores de Cal (ABPC, 2009). Devido às grandes variações na qualidade das cales encontradas no comércio e às exigências dos construtores na qualidade das argamassas, torna-se necessária uma melhor fiscalização no processo de fabricação e no controle de qualidade para o consumidor.

A cal hidratada para argamassa deve obedecer a NBR 7175 de maio de 2003. Essa norma especifica os requisitos exigidos no recebimento da cal hidratada, a ser empregada em argamassas para a construção civil. Os valores estabelecidos pela ABNT são máximos e mínimos e contemplam as características físicas e químicas, ilustradas na Tabela 2.12.

Paiva e colaboradores (2007) analisaram seis tipos de cales vendidas na Região Metropolitana do Recife com a finalidade de verificar a qualidade das cales. Foram realizadas as seguintes determinações: massa unitária relativa, retenção de água, finura, quantidade de dióxido de carbono, sílica, resíduos insolúveis e umidade. Os resultados obtidos são comparados com os valores da norma na Tabela 2.13

Tabela 2.12 Características físicas e químicas das cales (ABNT, NBR 6473 2003 a)

QUÍMICAS				
COMPOSTOS		LIMITES		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂)	na fábrica	≤ 5 %	≤ 5 %	≤ 13 %
	no depósito	≤ 7 %	≤ 7 %	≤ 15 %
Óxido de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO+MgO)		≤ 10 %	≤ 15 %	≤ 15 %
Óxidos totais na base de não voláteis (CaO _T + MgO _T)		≥ 90 %	≥ 88 %	≥ 88 %
FÍSICAS				
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %
	Peneira 0,075 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, NBR 6473 (2003)

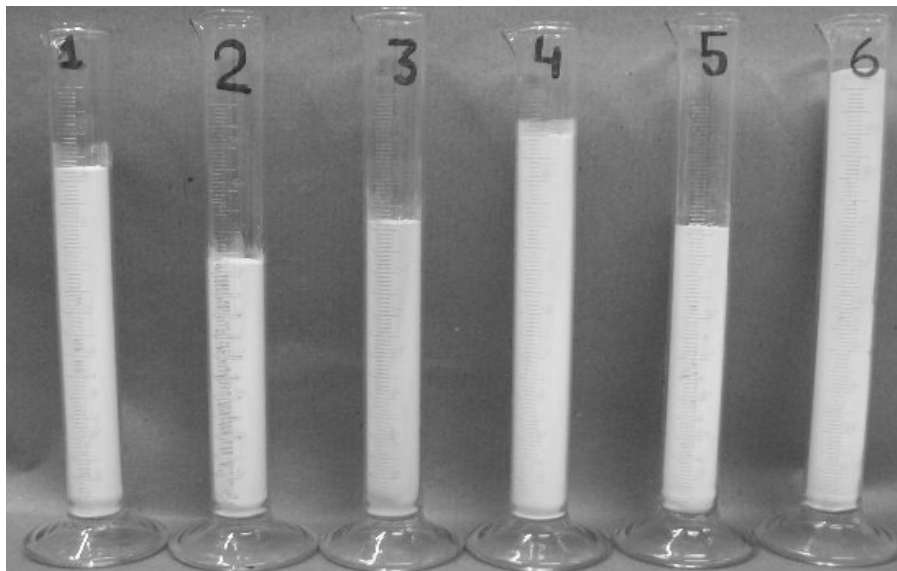
Tabela 2.13 Resultados das análises químicas das cales do Recife (PAIVA, et al. 2007)

DETERMINAÇÃO	UNIDADE	CAL						LIMITES		
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	CH I	CH-II	CH-III
Massa unitária	Kg.m ⁻³	595	781	697	562	685	476	---	---	---
Retenção de água	%	86	48	53	96	61	92	≥ 75	≥ 75	≥ 70
Finura (F ₃₀)	%	0,04	0,00	14,7	2,48	1,65	0,14	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Finura (F ₂₀₀)	%	20,9	12,4	49,5	12,6	10,6	2,1	≤ 10	≤ 15	≤ 15
CO ₂ (no depósito)	%	4,9	20,8	2,0	7,8	12,8	2,4	≤ 7	≤ 7	≤ 15
SiO ₂ + Sólidos insolúveis	%	9,5	14,7	69,8	8,8	2,7	0,3	---	---	---
Umidade	%	0,46	0,47	5,16	0,47	0,32	0,53	---	---	---

Fonte, PAIVA et al. (2007)

Na determinação da massa unitária, ficaram evidenciados diferentes volumes ocupados por 50 g de cada cal investigada (Figura 2.21). Confirmando a diferença nas qualidades das cales. A retenção de água, importante para as cales destinadas a argamassa, variou de 96 a 48%.

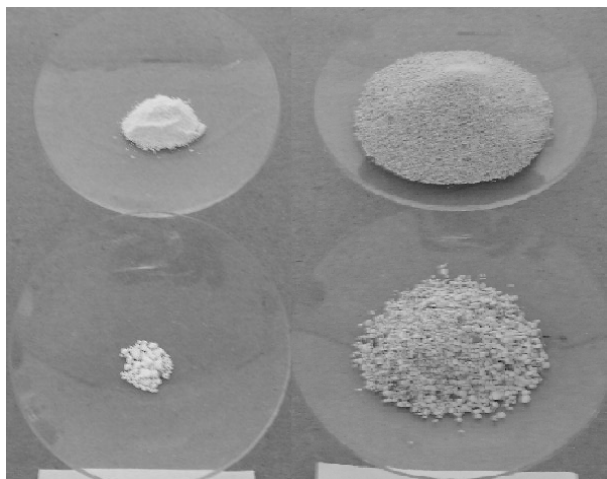
Figura 2.21 Volume ocupado por 50 g de amostras de cal (PAIVA et al. 2007)



Fonte, PAIVA et al. (2007)

A finura foi determinada com as peneiras nº de 200 e 30, realizada pela norma NBR 7175 (2003). Os autores destacaram os extremos, a cal C6 com uma quantidade mínima de resíduo (2,1%) e C3 com uma quantidade muito grande de resíduo (49,5%). Com a análise de SiO_2 da amostra 3, ficou constatado que o resíduo era areia colocada na cal para o fabricante obter maior lucro com a venda (FIGURA 2.22).

Figura 2.22 Resíduo das peneiras nº 30 e nº 200 das cales C3 e C6 (PAIVA et al. 2007)



Fonte, PAIVA et al. (2007)

Paiva e colaboradores (2007) concluíram que há falta de qualidade das amostras de cales, que não apresentaram o selo de qualidade da ABPC, confirmado nos resultados desse trabalho. É necessário que as cales comercializadas tenham selo de qualidade para que suas propriedades funcionem adequadamente e possam contribuir para uma maior eficiência nas argamassas, garantindo mais segurança na construção civil.

Silva (2010) mostrou argilas estabilizadas de dois solos com cal; foram apresentados os fatores responsáveis pelo seu comportamento, nomeadamente os tipos de minerais argilosos existentes, bem como as suas características intrínsecas. Os tipos de cal utilizados na estabilização do solo destacaram as reações entre o solo e a cal, dando ênfase aos fatores envolvidos na estabilização.

Portelinha e colaboradores (2012) realizaram uma avaliação da utilização de baixos teores de cal e cimento na estabilização de solos modificados, verificando as alterações das propriedades físicas e químicas de dois solos tropicais com ênfase à influência dos mecanismos de reação em curto prazo, utilizando um percentual de cal e cimento de 1, 2 e 3%. A caracterização química realizada foi: pH, CTC e concentração do cátion cálcio, levando em consideração o tempo entre a mistura e a análise para avaliar o IP. Resultados mostraram aumentos nos valores de pH, CTC e íons cálcio com o incremento dos agentes modificadores.

Maiores alterações nos parâmetros físicos e químicos foram observados nas misturas do solo laterítico do que no solo saprolítico. Com o cimento, as amostras tiveram um ganho maior nas propriedades físicas. Não foram observados tempos limites para o uso de cal. Já o cimento apresentou melhorias mais significativas em maiores tempos entre mistura e ensaios, enfatizando as reações de hidratação e cimentação como dominantes. As alternativas para estabilizar um solo e evitar altos custos com recuperação estrutural, é feita através de estabilização mecânica ou com uso de aditivos químicos como cimento, cal, betume entre outros. A cal é o estabilizante mais usado até hoje, melhorando as propriedades do solo em vários fatores.

Solos expansivos ocorrem em várias regiões de clima árido e semiárido pelo mundo, e causam sérios problemas em estruturas na engenharia civil. Para evitar maiores danos na construção, argilas expansivas podem ser estabilizadas. Estabilização de solos usando aditivos químicos é um dos mais antigos métodos e mais difundidos para melhoria dos solos.

Segundo Malhotra e Naval (2013), para trabalhar em solos, precisa-se ter um adequado conhecimento sobre suas propriedades e fatores que afetam seu comportamento. Solos expansivos sempre criam mais problemas para estruturas moderadamente carregadas do que estruturas muito carregadas. Ao consolidar sob carga e mudança volumétrica juntamente com variação de umidade sazonal, esses problemas são manifestados através de inchaços, encolhimento e uma liquidação desigual. O estudo de Malhotra e Naval foi conduzido com a finalidade de verificar as melhorias nas propriedades dos solos expansivos com a adição de cinzas e cal em percentagens variadas.

Os resultados dos testes tais como limite, compactação normal e ensaio de expansão livre obtidos a partir de argilas misturadas em diferentes proporções de adição de cal e cinzas (3, 5, 7 e 9% de cal) foram apresentadas e discutidas nesse trabalho. Os resultados mostraram que a argila apresentou um menor potencial expansão quando estabilizada, enquanto que um aumento no teor de umidade ótima foi observado.

ABASS (2014) utilizou cal hidratada para estabilização de um preparado em laboratório de argilas. As seguintes porcentagens (0, 3, 6, 9, 21 e 21 %) de cal foram adicionadas a solos expansivos. Uma série de experimentos laboratoriais foram implementados (tais como limites de consistência, distribuição do tamanho do grânulo, gravidade específica, teste de compactação e testes de inchaço edométrico). O resultado mostrou que a adição de cal foi efetiva na correção do comportamento do inchaço em solos expansivos. A cal foi entretanto efetiva e de uma excelente alternativa para a estabilização da expansão de solos expansivos.

Os fatores destacados foram: unidades cristalinas básicas dos minerais argilosos, minerais argilosos mais importantes na expansão (Caulinita, illita, montmorilonita, clorita e vermiculita), outros minerais argilosos, identificação dos minerais de argila através da difração de raio X, superfície específica das partículas da argila, suspensões coloidais de argilas, natureza elétrica das partículas argilosas, dupla camada iônica difusa, capacidade de permuta iônica, atividade das argilas, expansividade, interação entre partículas argilosas, floculação e dispersão, hidratação das argilas e potencial de sucção.

AL-TAIE et al. (2015) testou um novo método de estabilização de solos expansivos vulcânico de Melbourne (Austrália) com cal hidratada, variando os teores de cal de 2, 3, 4, 6, 8 e 10%. Foi sendo analisado o pH das misturas com período de cura de 1,5h e 7, 28 e 57 dias, realizando testes de limite de Atterberg, tensão e retenção linear, percentagem de expansão e

resistência à compressão sob cura de 7 e 28 dias. Os resultados encontrados apresentaram uma redução do pH com o tempo de cura e posteriormente foram comparados com resultados de Eades e Grim que não devem ser aplicado para solos expansivos vulcânicos.

2.7.2 Reações do solo com a cal

Reações ocorrem entre a cal e as partículas dos minerais argilosos num ambiente com pH elevado. O resultado desta melhoria traduz-se numa redução da plasticidade, redução do teor em água, redução da expansibilidade e maior facilidade na trabalhabilidade do solo (NEVES, 2009).

O pH determina a atividade do íon hidroxila (OH^-) que provoca a dissociação do H^+ ligado covalente à fração argila. Em um pH específico, os constituintes da fração argila apresentam um equilíbrio entre as cargas positivas e negativas, Ponto de Carga Zero (PCZ). Quando o pH está abaixo do PCZ a superfície está eletropositiva e quando está acima do PCZ a superfície do coloide está eletronegativa. O PCZ das argilas dos solos mais intemperizado é elevado (montmorilonita 2,5 caulinita 4,6) consequentemente, a maioria das condições de acidez predominantes nesses solos expressarem o caráter eletropositivo.

O processo de estabilidade está relacionado com a reatividade do solo e a cal. A principal diferença nesse processo é que na modificação são registrados ganhos significativos, a longo prazo, nas resistências mecânicas desenvolvidas pelas ligações estabelecidas pelas reações pozolânicas.

Alguns dos mecanismos das reações envolvidas na estabilização ou na melhoria dos solos com a cal ainda não são bem conhecidos, mas sabe-se que, no processo, predominam os efeitos físicos e físico-químicos da interação da cal com o solo. A cal como produto resultante da calcinação em altas temperaturas de rochas carbonáticas existentes na superfície terrestre - provoca reflexos quando em contato com o solo quanto à capacidade de troca iônica, à intensidade dos fenômenos de floculação / aglomeração, à variedade das reações pozolânicas e, por fim, à reação de carbonatação dos hidróxidos de cálcio e magnésio.

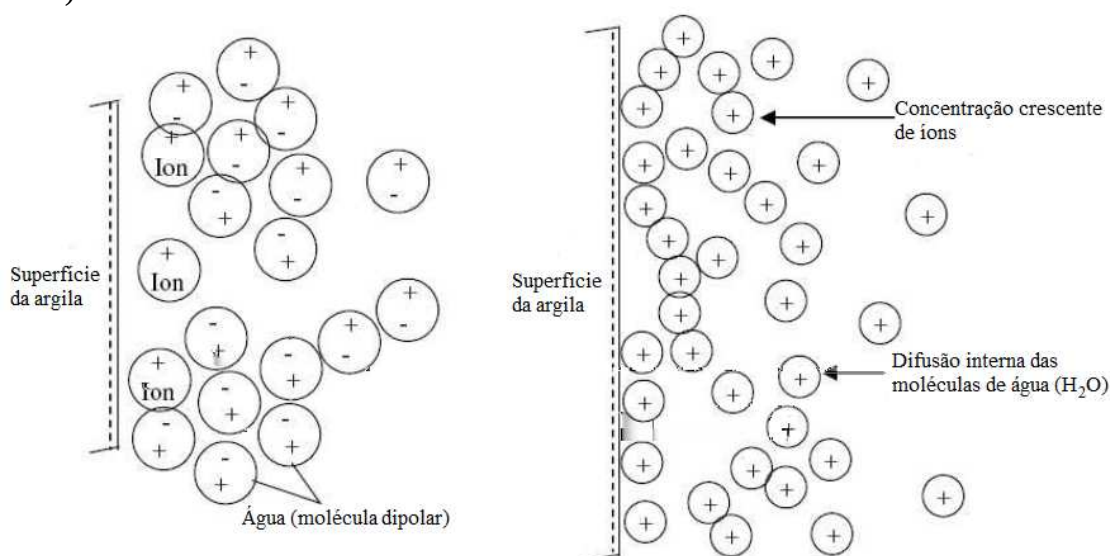
A cal é um estabilizante usado extensivamente em solos de granulometria fina (argilosos), melhorando suas propriedades que interessam à engenharia (ARAÚJO, 2009). O autor

comenta que a fração argilosa de tais solos possui uma superfície carregada negativamente e que, esta superfície, atrai os cátions livres e as moléculas de água. Como resultado, uma camada de água, altamente difundida, como mostrada na Figura 2.23, forma-se ao longo das partículas de argila e, conseqüentemente, separam as partículas do argilomineral, tornando instável pela água.

As reações de estabilização da mistura solo-cal ocorrem em duas fases, sendo que a primeira acontece logo ao contato do solo com a cal, provocando uma troca de cátions e uma flocculação com os argilominerais, tornando o solo mais estável, evitando a penetração da água. Em seguida, acontecem as reações mais lentas responsáveis pelo aumento da resistência mecânica do solo que são as reações pozolânicas que levam meses para acontecer.

A quantidade de estabilizante necessária para provocar a estabilização no solo é função do tipo de solo e dos seus minerais constituintes, assim como o tipo de estabilizante que será utilizado, sendo que as reações desenvolvidas entre eles dependem fundamentalmente da interação entre esses dois elementos, o solo e o estabilizante. Os fatores que determinam a quantidade de estabilizante a ser adicionado no solo é a quantidade de cálcio suficiente para que se desenvolvam as trocas catiônicas, flocculação e aglomeração, assim como o desenvolvimento da resistência (BRANDÃO et al., 2009),

Figura 2.23 Concentração de água ao redor da partícula (LITTLE, 1995 apud ARAUJO, 2009)



Fonte, LITTLE, 1995 apud ARAUJO, 2009

Na estabilização do solo com adição de cal hidratada, por ser uma base (hidróxido de cálcio) ocorre uma elevação do pH do solo que sofre grande influência na estabilização. Castro (1981) destaca as reações que ocorrem em função do acréscimo do pH:

1ª faixa pH menor que 4,0

Acontece a troca iônicas dos íons H^+ e de alguns cátions;

2ª faixa pH entre 4,0 e 5,6

O alumínio (Al^{3+}) trocável é neutralizado e pequena parte do H^+ depende do pH deslocado, o solo permanece ácido;

3ª faixa pH entre 5,6 e 7,6

Nessa etapa começa as reações de polimerização terminais de hidróxido de alumínio ($Al(OH)_3$), o pH do solo começa a alcalinizar.

4ª faixa pH entre 7,6 e 10,0

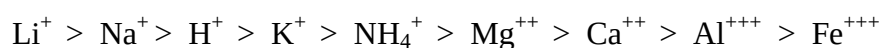
Nessa faixa o pH apresenta totalmente alcalino e os agrupamentos silanos (SiH_4) começam a reagir;

5ª faixa pH maior que 10,0

Começa as reações pozolânicas reações de formação do silicato de cálcio.

a) Troca iônica

A troca iônica é uma substituição que acontece quando a cal entra em contato com as partículas finas da argila, os cátions mais reativos e de força de valência maior vão substituir os cátions da superfície da argila e os que estavam dispersos na dupla camada (NEVES, 2009). A substituição ou troca iônica dos cátions adicionados ao solo de valência maior, ou de maior tamanho e os cátions adsorvidos e os aderidos nas paredes das argilas, favorece a estabilização do solo pelo equilíbrio elétrico das partículas argilosas, além de redução da camada dupla da argila. Os cátions que são substituídos seguem certa ordem, de preferência entre os íons envolvidos: a estabilidade química, o tamanho e a carga de cada cátion que podem ser ordenados por essa escala de substituição:



b) Floculação e aglomeração das partículas

A floculação é um produto da troca iônica que também reduz a espessura da dupla camada da argila. A forte concentração de cátions que separa as duas camadas da argila diminui a distância entre as partículas devido à concentração e às forças de atração ou repulsão elétrica, formando uma nova atração entre partículas. Assim, se colocar novas partículas de argila em contato, elas serão atraídas pelas outras, formando um agregado de partículas, pela força resultante entre elas que é de atração, surgindo mais agregados de partículas que são atraídos e formam os flocos.

A presença de valores elevados de pH no solo aumenta a velocidade da reação, favorecendo essa substituição, justificando essa capacidade das argilas de permuta iônica, aumentando as formações de aglomeração das partículas (NEVES, 2009).

Ensaio realizado em Porto Alegre na adição de cal juntamente com fibra, apresentaram um ganho na resistência significativa e no aumento da adição de 3 para 9 da cal foi apresentado um acréscimo de mais de 150%, devido à formação de aglomeração da cal com o argilomineral do solo utilizado. A cal diminuiu ainda o índice de vazios que contribui para a elevação da resistência (CORTE, 2013).

O solo, ao se misturar com a cal, ocasiona uma diminuição do IP e da retração melhorando a trabalhabilidade, além de melhorar também a capacidade de carga, através de uma reação rápida da cal. Em seguida, promove uma reação lenta que resulta no endurecimento gradual do solo-cal, produzindo um efeito, em longo prazo, até a estabilização decorrente da formação das aglomerações formadas entre os argilominerais e a cal. Quando ao solo fino é adicionada a cal, vários tipos de reações químicas ocorrem; as mais importantes: troca de cátions, floculação, reação pozolânicas e carbonatação (ALMEIDA, 2009).

A floculação pode ser acelerada quando acrescentamos a concentração de elétrons à valência dos íons ou à temperatura. A floculação pode diminuir quando diminuirmos um ou mais dos seguintes fatores: dimensão do íon, pH e adsorção aniônica. De um modo geral, são as reações físico-químicas de permuta iônica e floculação, as principais que são responsáveis pela alteração das propriedades e características geotécnicas do solo.

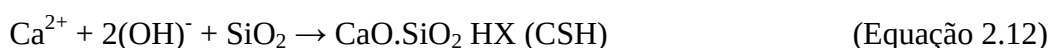
c) Reações de cimentação

Um produto comercial que pode ser utilizado para a formação de estruturas granulares cimentadas é a cal hidratada, na busca de simular condições de formação de solos arenosos no campo. Com relação a esse produto, em geral, a cal é produzida com base em calcário de elevado teor de cálcio ou de magnésio, sendo que, em geral, a cal com elevado teor de cálcio tem menos de 5% de MgO e recebe o nome de cal cálcica; por outro lado, quando a cal se origina de um calcário com elevado teor de magnésio, o produto é conhecido por cal dolomítica (VIANA, 2013).

A adição da cal a um solo que contenha partículas de argila vai formar, lentamente, e ao longo do tempo, a ligação entre as partículas. Esta reação denomina-se “cimentação” ou “reação pozolânica” que é a responsável pelo processo de estabilização das camadas compactada de solos misturados com cal, devido à formação de uma matriz resistente. As argilas são minerais que contêm importantes quantidades de sílica, alumínio e outros elementos de substituição, como o ferro e o magnésio. Características que conferem aos materiais argilosos propriedades pozolânicas naturais (NEVES, 2009).

Quando quantidades adequadas de cal e água são adicionadas, o pH do solo rapidamente aumenta acima dos 10.5, permitindo que as partículas de argila se dividam, e provoquem a liberação de sílica e alumínio. Esses elementos entram em contato com o cálcio da cal para formarem silicato de cálcio hidratado (CSH – $(\text{CaO}.\text{SiO}_2 \text{ HX})$) e aluminato de cálcio hidratado (CAH - $(\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ HX})$). Os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados são produtos similares aos que se formam na presa do cimento Portland (NEVES, 2009).

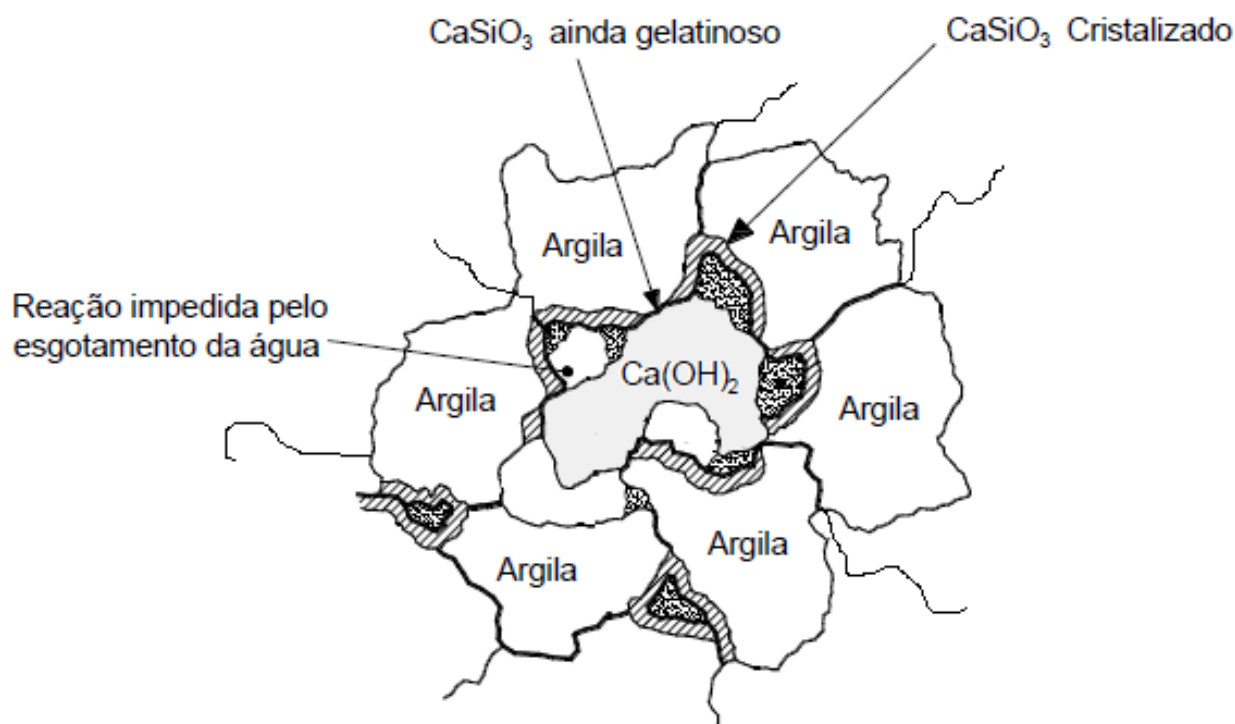
As reações pozolânicas (Equações. 2.12 e 2.13) estão diretamente condicionadas à quantidade de alumina e sílica solúveis que estão presentes na argila. Estas reações podem ocorrer das seguintes formas:



Onde:

O fator que pode limitar a velocidade de reação de cimentação é a concentração do soluto. A fase líquida do hidróxido de cálcio penetra na argila, o silicato reage com o cálcio formando o silicato de cálcio que inicialmente forma um gel, cristalizando lentamente na superfície da argila, unindo as partículas e endurecendo com o tempo na formação do cimento, com a elevação do pH da mistura (SILVA, 2010). Como pode ser verificado na Figura 2.24, a qual 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 2.24 Cimentação do argilomineral na presença da cal (SILVA, 2012).



Fonte, SILVA, 2012

d) Reações de carbonatação

Com o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera resultante de vários processos de queima industriais, além de acelerar o efeito estufa, é um dos grandes agentes de degradação das estruturas de concreto, ocasionando a carbonatação da superfície das peças estruturais e a despassivação das armaduras de concreto por carbonização. Ele provoca o aumento da acidez do concreto penetrando pelos poros e facilitando o processo de corrosão das armaduras (JUNIOR, 2010).

A principal reação que caracteriza o fenômeno da carbonatação é, representada pela Equação 2.14:



O hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) liberado das reações de hidratação do cimento, reage com o gás carbônico (CO_2) ou outros gases ácidos, como o gás sulfídrico (H_2S) ou dióxido de enxofre (SO_2), formando os carbonatos (CaCO_3) ou sulfatos (CaSO_4) e água.

Na estabilização do solo, a carbonatação é uma reação de grande importância para o sistema solo-cal, produzindo uma maior estabilização. Os hidróxidos de cálcio e de magnésio reagem com o anidrido carbônico, que tem caráter ácido, formando o sal, além dos carbonatos de cálcio e de magnésio (JUNIOR, 2010).

A carbonatação é um processo fraco de cimentação, pois apresenta um ganho muito pequeno na resistência do solo, devido à reatividade do carbonato ser menor que a reatividade do hidróxido. Devendo ser evitada a porosidade através da compactação e consequentemente essa reação.

A etapa rápida da mistura solo-cal, caracteriza-se por reações químicas. Na etapa lenta, é onde ocorre o aumento na resistência do material com as reações pozolânicas que são responsáveis pela formação de produtos cimentantes. Porém, diferentemente destas, as reações de carbonatação que são prejudiciais à composição solo-cal, também são características da fase lenta. A carbonatação, além de formar compostos cimentantes fracos, ainda leva a cal a perder reatividade, já que na forma de carbonato, a cal torna-se inerte, prejudicando seu processo de estabilização (FIGUEIREDO, 2011).

A carbonatação da cal é o processo inverso à sua formação, ocorrendo a produção de calcário. Este fenômeno verifica-se quando as misturas estabilizadas com cal entram em contato direto com dióxido de carbono, reagindo este gás com os íons de cal que não tenham sofrido o processo de cimentação com nova formação de calcário. O calcário assume um papel de “cimento fraco” nas misturas de solo com cal e aumenta a plasticidade do solo.

e) Critérios da dosagem de cal para estabilização do solo

A dosagem tem como finalidade selecionar a quantidade de cal que vai ser adicionada ao solo que fornecerá a resistência adequada para o uso destinado, tornando o solo estável. Através de ensaios de laboratório são definidos a dosagem e o procedimento escolhido.

Várias formas de dosagem para a mistura do solo com cal foram estudadas por pesquisadores com conclusões de caráter negativas ou positivas em relação aos métodos de dosagem, relacionado o tipo de solo e da cal empregados e a reatividade dos solos, ou de acordo com a execução do ensaio (OLIVEIRA, 2010).

Segundo Herrin e Mitchell (1968) *“nenhum teste sobre solo natural que possa indicar com precisão a conciliação do solo com a cal. Nem a capacidade de troca de base - o pH do solo – nem as características de plasticidade parecem ser indicadores satisfatórios.”*

Segundo Vargas (1981), para se alcançar um CBR desejado de 50%, a porcentagem de cal seria de 2 a 5%.

A seguir estão descritos três métodos utilizados na dosagem da cal na estabilização das argilas expansivas:

O método do Lime Fixation Point (LFP) é baseado no limite de plasticidade que determina o teor de cal máximo que proporciona melhoria na trabalhabilidade, sem ganhos significativos de resistência. Consiste em efetuar o ensaio do Limite de Plasticidade (LP), aumentando o teor de cal, até que o LP alcance um valor máximo (LFP).

O método do pH (EADES e GRIM, 1966) determina o teor de cal mínimo a ser adicionado ao solo quando o pH, em água, do solo apresente um valor igual ou maior que 12,4. Esse método não garante que a mistura solo-cal irá produzir um aumento significativo da resistência da mistura. Deve se considerar que a cal precisa de um tempo de cura para que as reações sejam consolidadas.

O método da resistência a compressão considera que um solo é reativo quando, ao ser adicionada a cal, sua Resistência a Compressão Simples (RCS), aumenta (aumenta a

resistência à compressão simples para menos 345 kPa quando estabilizado com cal) . Para solos reativos, o objetivo é o desenvolvimento das reações pozolânicas, proporcionando maior durabilidade e resistência; nos solos não reativos, busca-se melhorar algumas propriedades do solo: expansão e plasticidade (Oliveira 2010).

2.8 Alterações das características do solo estabilizado com cal

Com a adição de cal nos solos para adquirir estabilidade, várias propriedades físicas e químicas são alteradas, melhorando a plasticidade, trabalhabilidade, além da variação de volume. E algumas propriedades, como melhoria da resistência e durabilidade dependem de fatores como a qualidade e tipo da cal aplicada, o tipo do solo, a temperatura, o período e a condição de cura (BARBOSA, 2013).

2.8.1 Alteração na plasticidade

A plasticidade está normalmente associada aos solos argilosos o que permite que o índice de plasticidade também seja referenciado como um fator condicionante no tratamento de solos com cal (NEVES, 2009).

A propriedade relacionada à plasticidade tem como alterações, aumento no limite de plasticidade (WP); e tomando como foco o limite de liquidez (WL) há uma divergência quando comparado às argilas não expansivas e expansivas, as quais, respectivamente, tem aumento e diminuição neste limite. Também é possível observar que quando o foco é a trabalhabilidade, o IP tem uma queda com a mistura de cal hidratada ao solo, logo há um melhoramento da trabalhabilidade (GUEIROS, 2013).

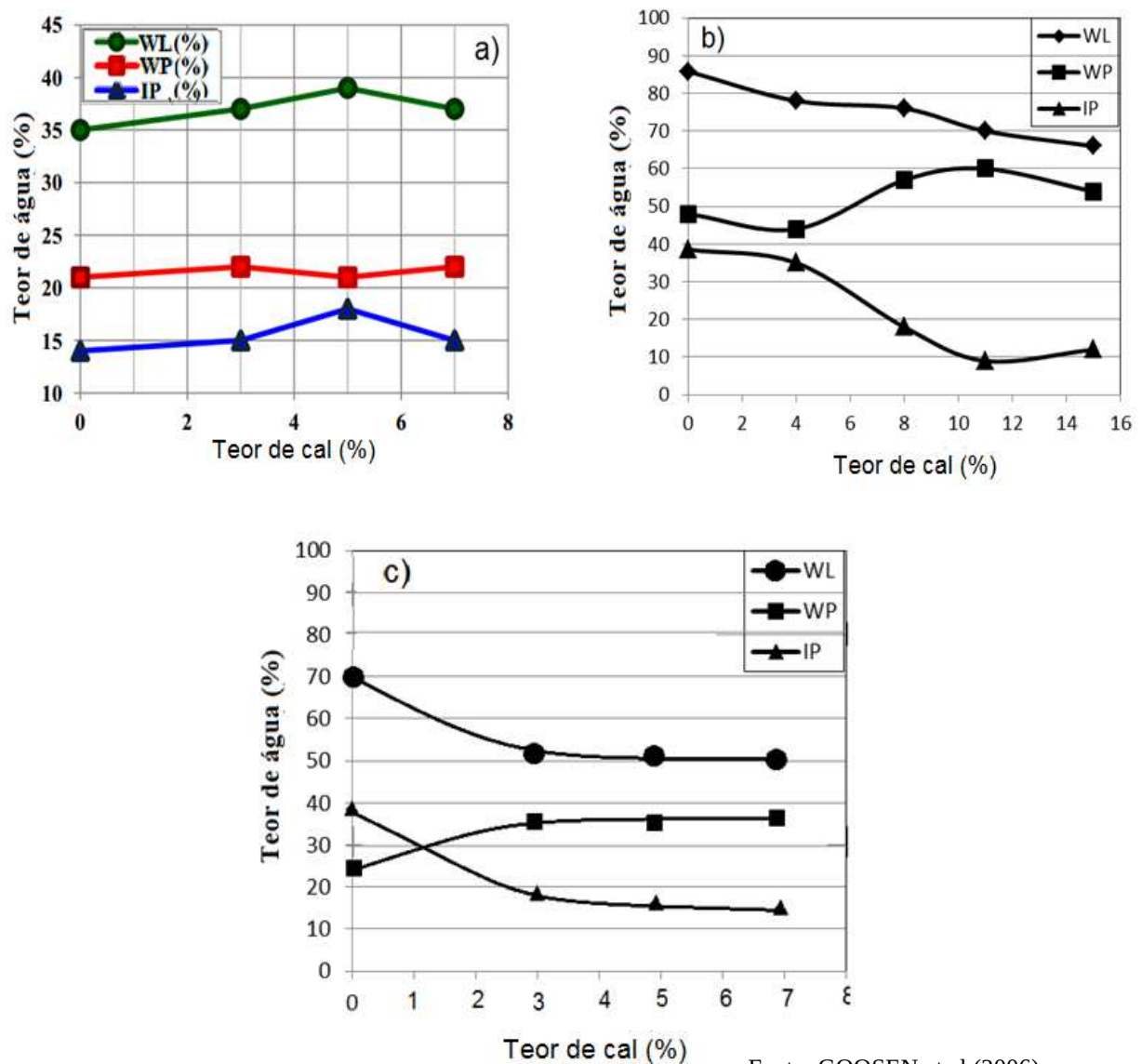
Resultados do trabalho de Klinsky, e colaboradores (2013) mostraram a variação do limite de liquidez (WP), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) com o acréscimo do teor de cal. Nota-se que a adição de cal hidratada produziu pequenos ganhos nos valores de LL, LP e IP. Essa tendência não era esperada, uma vez que a bibliografia relata diminuição dos índices de consistência em função do incremento do teor de cal hidratada (Figura 2.25a).

Nos resultados obtidos por Thomé (1994), (Figura 2.25b), o WP apresentou uma pequena redução até 4% de cal, isso ocorreu porque até este teor, a cal foi utilizada para neutralizar a matéria orgânica, em seguida o WP passou a aumentar. Com o teor de 11% o WP passou a diminuir, de acordo com Hilt e Davidson (1960) isso ocorreu porque esse teor de cal (11%)

foi necessário para atingir o que é chamado de “ponto de fixação da cal”; até esse ponto a cal contribui para a melhoria na trabalhabilidade do solo (BARBOSA, 2013).

Goosen et al. (2006) afirmaram que o acréscimo de cal aumenta o limite de plasticidade e diminui os limites de liquidez e o de contração, conforme pode ser observado na Figura 2.25 c). Diamond e Kinter (1965) argumentaram que mesmo em solos que o WL aumenta com o teor de cal, o acréscimo não é maior que o WP, resultando numa redução do IP.

Figura 2.25 Variação da umidade com teor de cal (%) a) Relaciona o percentual de umidade com umidade da amostra, verificando os limites de consistência das misturas solo-cal. (KLINSKY et al. 2013), b) Limites de Atterberg em função do teor de cal com um dia de cura (THOMÉ, 1994); c) Efeito da cal sobre os limites de consistência (GOOSEN et al. 2006).

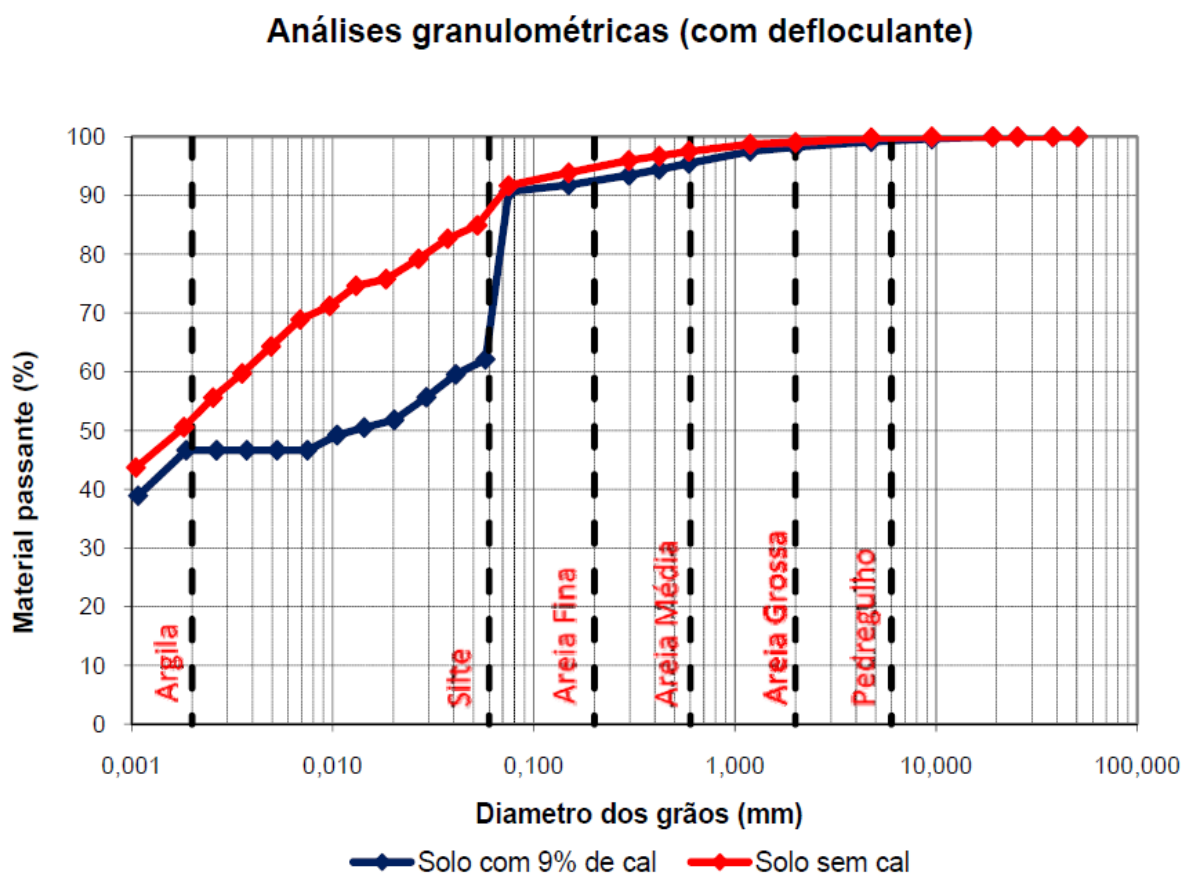


Fonte, GOOSEN et al.(2006)

2.8.2 Alteração da granulometria

Em estudo realizado com uma argila expansiva retirada do canteiro de obras da refinaria Abreu e Lima em Suape PE, por Silva Júnior (2010), foi verificado que a adição de um percentual de 9 % de cal, causa uma redução de 19 % de silte e uma diminuição de 4 % de argila (Figura 2.26).

Figura 2.26 Curvas granulométricas do solo natural sem a cal versus solo com 9% de cal (SILVA JUNIOR, 2010)

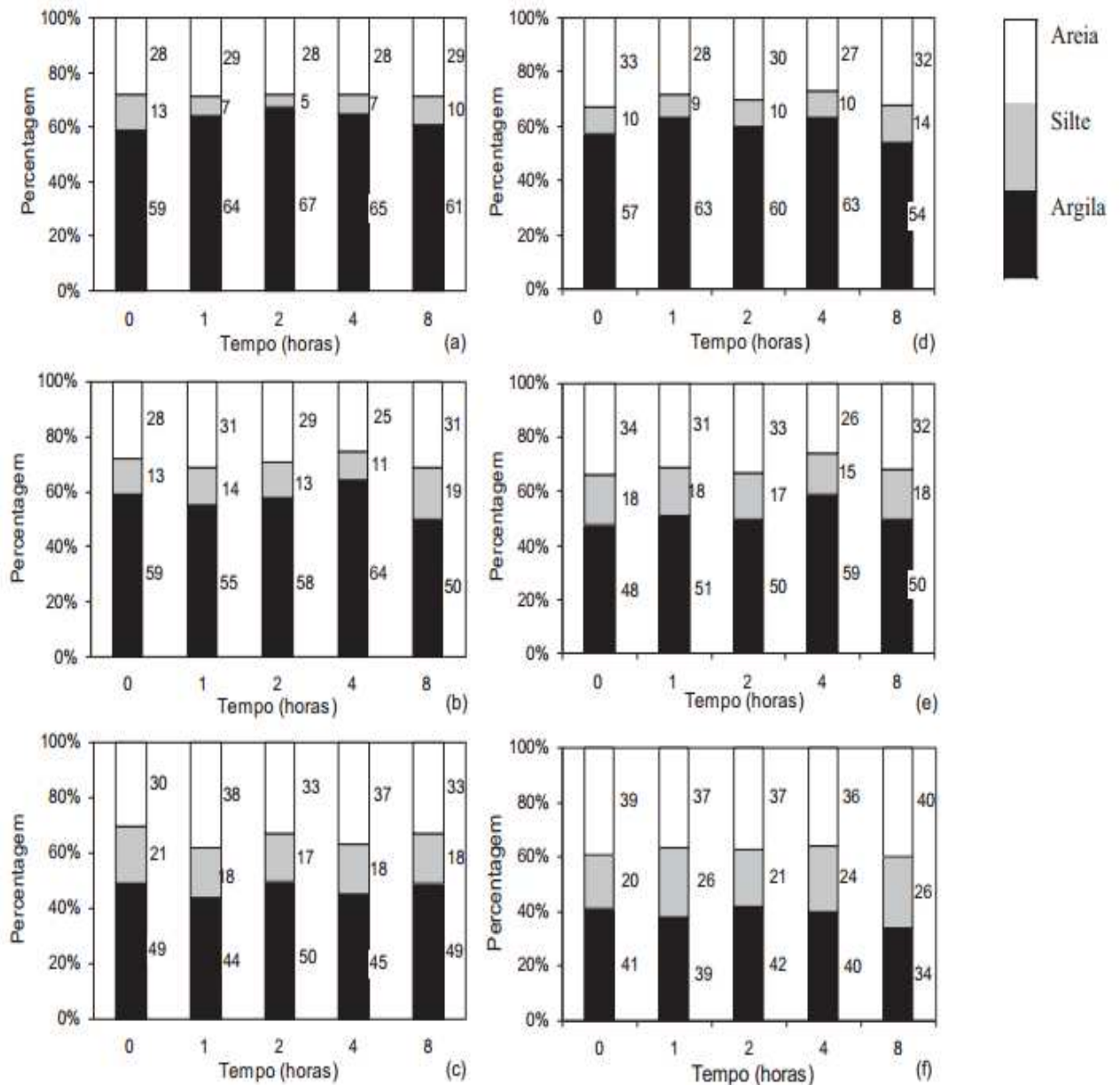


Fonte, SILVA JUNIOR (2010)

Portelinha e colaboradores (2012) analisaram a influência da adição de cal, cimento e do tempo de mistura, variando de 0, 1, 2, 4 e 8 horas. Solo da zona da mata norte do estado de Minas Gerais (Figura 2.27). Foi verificada uma redução da fração argila com o aumento da quantidade de cal e cimento, caracterizando as reações do cálcio do cimento e da cal entre as camadas das partículas, formando as floculações. A cal apresenta uma maior quantidade de cálcio, mas no cimento apresentou uma maior diminuição da fração argila. Nas misturas solo-cal, a influência do tempo de descanso entre a mistura e a realização do ensaio de

granulometria não foram constatados grandes modificações inicialmente, verificando a aglomeração das partículas de argilas crescente com o tempo.

Figura 2.27 Variação das frações granulométricas das misturas: (a) solo + 1% cal; (b) solo + 2% cal; (c) solo + 3% cal; (d) solo + 1% cimento; (e) solo + 2% cimento; (f) solo + 3% cimento e a influência do tempo de descanso entre a mistura e o ensaio de granulometria (PORTELINHA et al. 2012).



Fonte, PORTELINHA et al.(2012)

Guimarães (2002),verificou que a adição de cal ao solo de granulometria fina ocasiona inicialmente uma floculação e aglomeração das partículas argilosas, formando um solo com partículas maiores (mais grosso) e mais permeável. Guimarães afirmou que a adição de 10%

de cal, após 14 dias de cura, apresenta uma granulometria de silte, com 240 dias, passando a ter a granulometria da areia. Foi relacionado a finura da argila e a influência da cal na granulometria.

Na formação do solo, os seus constituintes organizados, podem ser observados analisando sua estrutura. Segundo Brewer (1976), a estrutura do solo é “a constituição física de um material, expressada pelo tamanho, forma e arranjo das partículas sólidas e vazias, incluindo as partículas primárias que formam as partículas compostas, e estas propriamente”.

A microestrutura pode ser observada por microscopia óptica sobre lâminas delgadas e também por microscopia eletrônica de varredura. Nóbrega (1981) adicionou 5% de cal a um latossolo e observou os efeitos desta adição do ponto de vista mecânico e micromorfológico (através de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura) e mineralógico. A cal trouxe modificações nas características micromorfológicas e nos microagregados. Após a compactação com adição de cal, os grãos se acomodam com a energia aplicada deixando entre si vazios. Observou ainda que além dos vazios dessa acomodação, existe uma microporosidade a nível de borda, oriunda da ação da cal em contato com o plasma, esta reação promove a neoformação de assembleias cristalinas neoformadas.

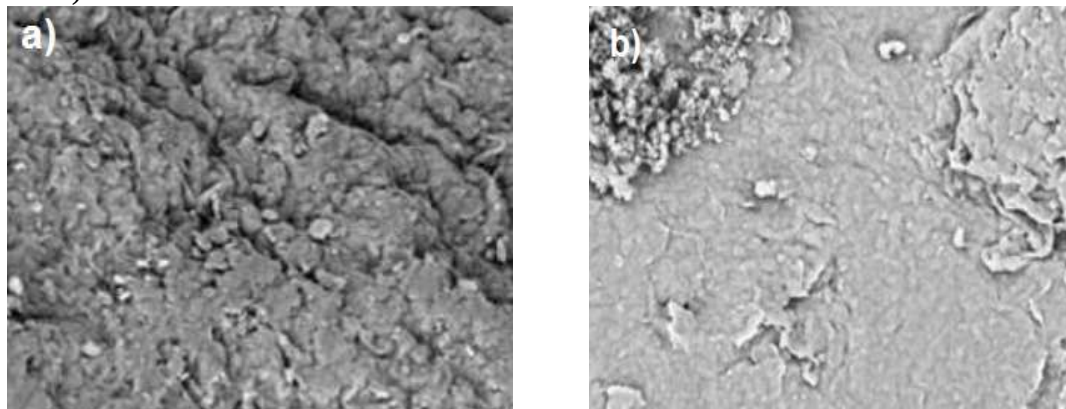
Os trabalhos realizados para estabilização do solo com cal através de reações imediatas e reações pozolânicas da mistura solo-cal, são investigadas pela avaliação mecânica e pelos índices físicos, antes e após a adição da cal. Uma avaliação que retrata de uma forma mais direta as reações químicas entre o solo e a cal e as mudanças na microestrutura do solo é o microscópio eletrônico de varredura (MEV), onde podem ser verificados todas as alterações que envolvem as reações de solo-cal (SILVA, 2016).

A MEV apesar de não avaliar quantitativamente as reações solo-cal, determina o início e o fim de cada reação de estabilização do solo, além de identificar também a presença de alguns componentes da reação.

Trabalho feito por Velasco (2013) com solo do tipo CH (USCS) e IP de 66%, após a adição de 4% de cal, foi verificado nas imagens do MEV que o solo natural apresentava uma forma escamosa com esparsas floculações. Após a adição da cal, a mistura apresentou uma estrutura mais homogênea e definida, com agregados e floculações em toda superfície, admitindo que o

solo ficou mais estável quanto à expansão pela umidade como pode ser verificado na Figura 2.28 a) MEV do solo natural e na Figura 2.28 b) MEV do solo natural com 4% de cal.

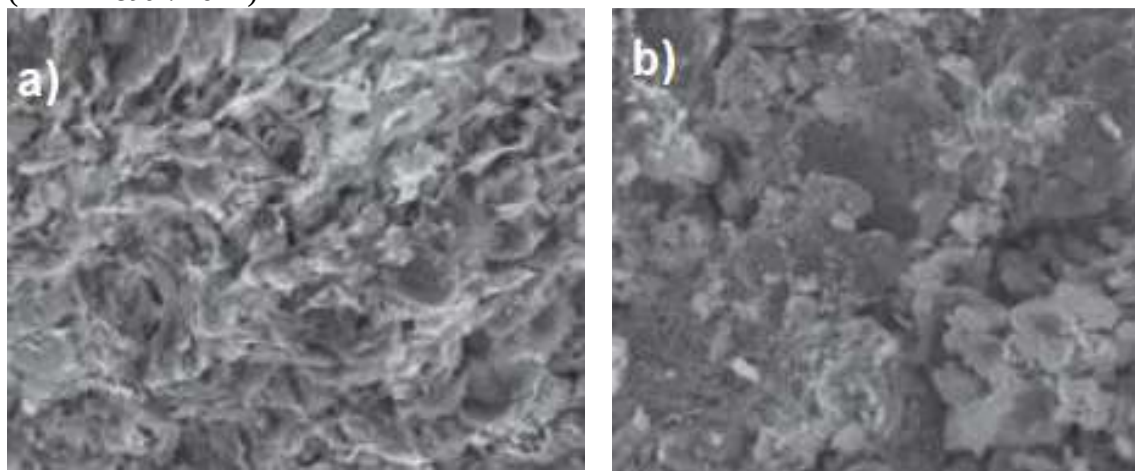
Figura 2.28.a) MEV do solo natural e b) MEV do solo natural com 4% de cal (VELASCO, 2013)



Fonte, VELASCO, (2013)

Registro da modificação do solo com adição da cal foi obtidos por Tran et al. (2014), fornecendo imagens da modificação da microestrutura das misturas solo-cal com 5% de cal, produzindo uma solo mais granular e estável à ação da água, como pode ser observado na Figura 2.29 a) solo natural e 2.29 b) solo tratado com 5% de cal.

Figura 2.29. a) MEV do solo natural e b) MEV do solo natural com 5% de cal (TRAN et al. 2014)

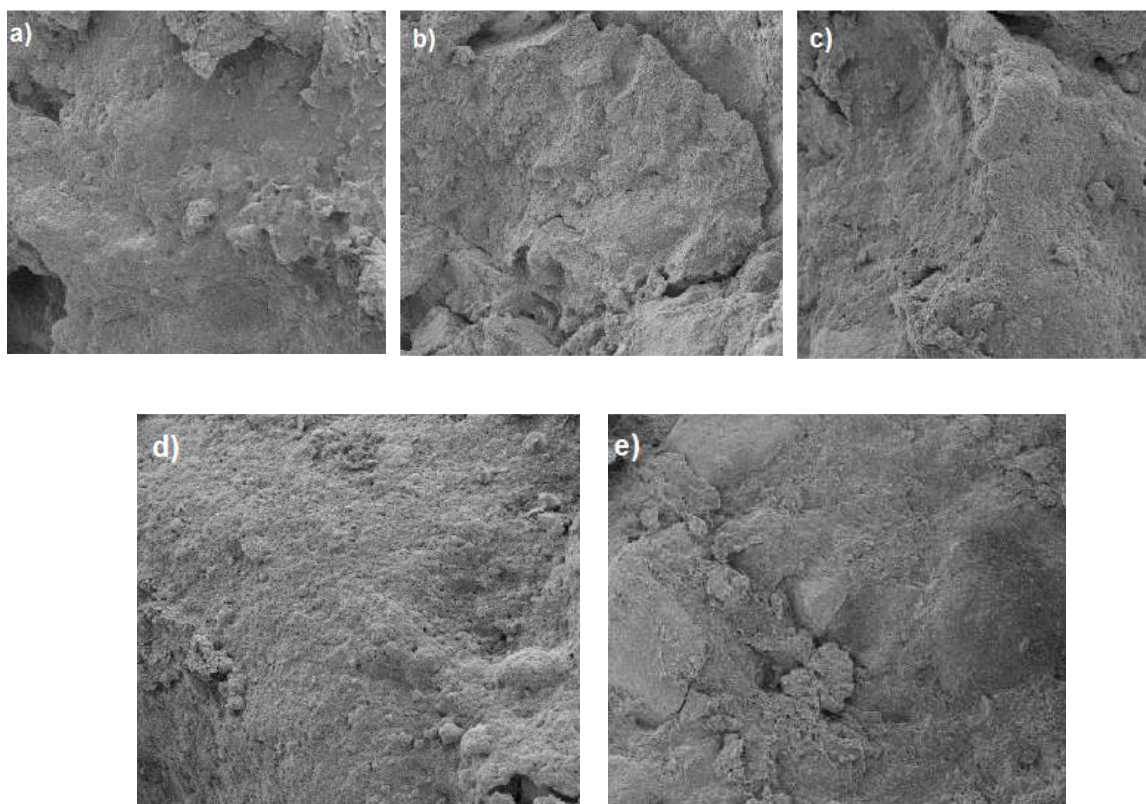


Fonte, TRAN et al.(2014)

Estudos realizados por Silva (2016) sobre a estabilização de solos lateríticos, com adição de 4, 5 e 6% de cal e um tempo de cura imediato, 7 dias, 28 dias e 60 dias podem ser observados na Figura 2.29 a) solo natural e Figura 2,29 b) solo tratado com 5% de cal. Com as análises das imagens do MEV foi verificada a superfície do solo natural com muita rugosidade e pouca

presença de flocos com a presença da cal; e com o aumento do tempo de cura foram observados uma superfície mais plana e presença dos flocos. As alterações na textura do solo ocorre pelas reações imediatas do solo com a cal, e a quantidade de flocos crescente pelas reações pozolânicas como pode ser observado na Figura 2.30 a) solo natural; Figura 2.30 b) solo + 4% cal com cura imediata; Figura 2.30 c) solo +4% de cal com 7 dias de cura; d) solo +4% de cal com 28 dias de cura e, e) solo +4% de cal com 60 dias de cura.

Figura 2.30 a) solo natural, b) solo + 4% cal cura imediata c) solo +4% de cal 7 dias de cura, d) solo +4% de cal 28 dias de cura e e) solo +4% de cal 60 dias de cura (SILVA, 2016)

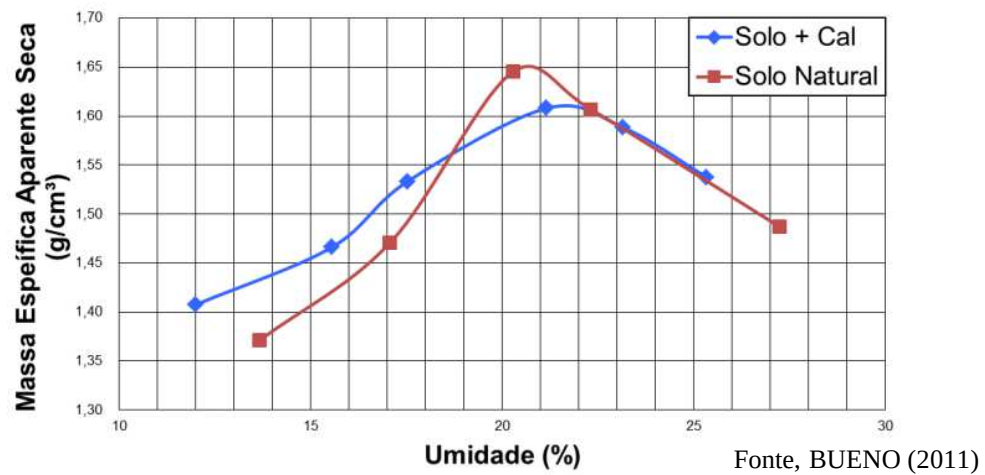


Fonte, SILVA, (2016)

2.8.3 Alteração da compactação

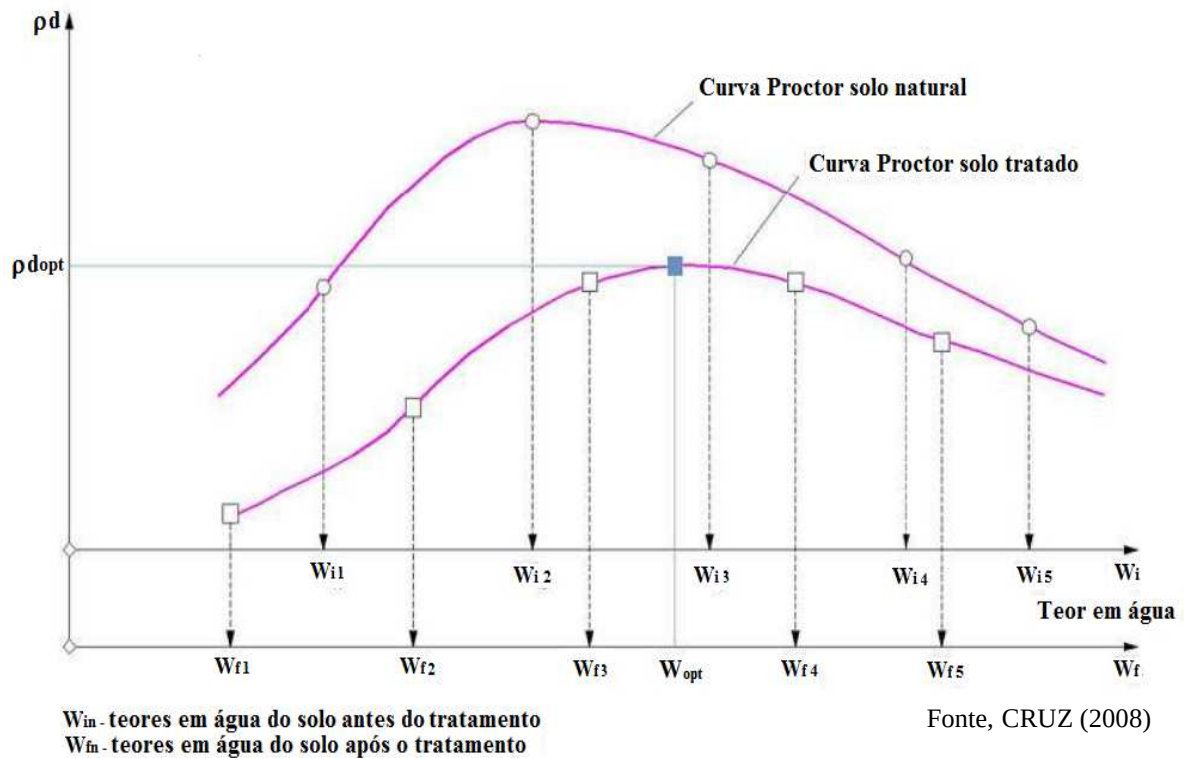
A cal, ao ser misturada no solo, forma floculo com a substituição dos íons pelo cálcio, aumentando a quantidade de vazios com o tempo, adquirindo resistência à compactação com um índice de vazios mais alto e diminuição da massa específica (Figura 2.31) (BUENO, 2011). Com o aumento do número de vazios, aumenta também a quantidade de água para ocupar os vazios, aumentando a umidade ótima do solo. A propriedade de retenção de água pela cal contribui para o aumento da quantidade desse líquido no solo (LOCH, 2013).

Figura 2.31 Curvas de compactação de solo e solo-cal (BUENO, 2011).



Após as reações químicas imediatas da cal com a fração argilosa, as características de compactação do solo são alteradas significativamente, em função do teor em cal e do tempo de cura inicial da mistura solo-cal. A adição da cal leva a uma diminuição do valor do peso unitário seco máximo e um aumento do valor do teor em água ótimo, como se pode verificar na Figura 2.32 (PINTO, 2009). Alterando a densidade devido à aglutinação das partículas é formado um solo com características físicas modificadas (PINTO, 2009).

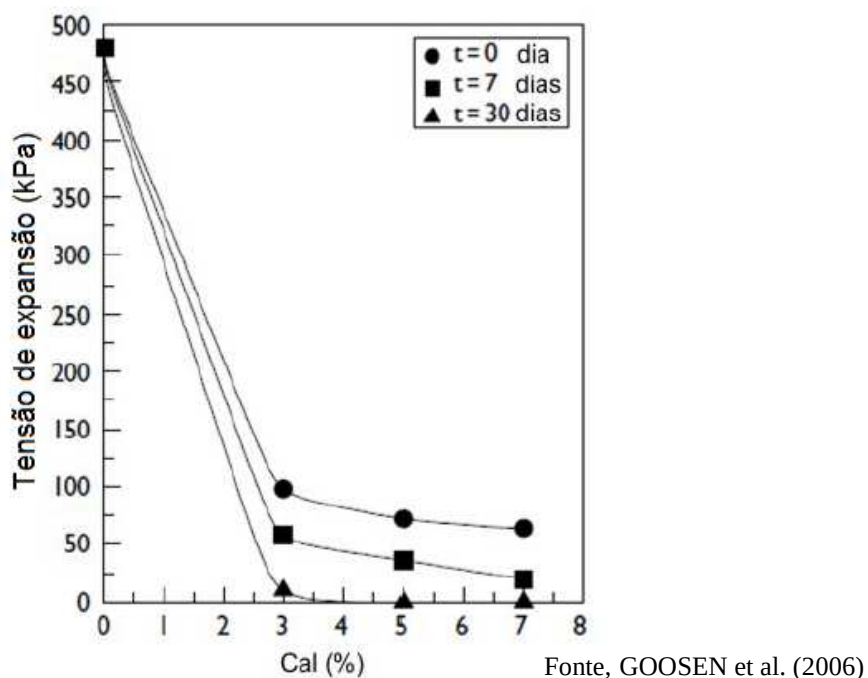
Figura 2.32 Curvas de compactação antes e após o tratamento com cal (CRUZ, 2008).



2.8.4 Alteração na expansão

Goosen et al. (2006) constataram o que é apresentado na literatura quando ensaiou em laboratório, um solo com Limite de Liquidez de 67,8%; Limite de Plasticidade e 22,2%; Índice de Plasticidade de 45,6%; fração de argila ($< 0,002$ mm) de 33% e alta atividade (1,38); nos resultados, que o acréscimo de cal diminuiu a pressão de expansão do solo, conforme se observa na Figura 2.33 e o tempo de cura influencia diminuindo, para cada teor de cal, a pressão de expansão (BARBOSA, 2013).

Figura 2.33 Efeito da cal e do tempo de cura na pressão de expansão (GOOSEN et al, 2006)



A variação de volume, durante molhagem sob tensão constante, pode ocorrer em forma de expansão (aumento de volume) ou colapso (diminuição de volume). O modo como varia o volume do solo depende do nível de tensão instalado, da energia de compactação e do ramo da curva de compactação (SANTOS, 2009).

Estudos foram realizados por Emmert (2010) para avaliação da expansão de solos com a adição de cal e solos com cimento, submetidos a 28 dias de cura; decorrido o período de cura, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de expansão, fazendo leitura da expansão a

cada 24 horas no período de quatro dias. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de penetração. Os resultados da expansão podem ser verificados na Tabela 2.14.

Tabela 2.14 Valores médios de expansão e CBR do solo natural e das misturas solo-cal e solo-cimento (EMMERT, 2010).

MISTURA	Energia de compactação	Cura (dias)	Expansão (%)	CBR (%)
Solo (TE)	Intermediária	-	0,03	13,5
	Modificada	-	0,06	8,0
Solo-cal	Intermediária	28	0,00	59,0
	Modificada	28	0,00	60,7
Solo-cimento	Intermediária	28	0,02	44,1
	Modificada	28	0,02	41,7

Fonte, EMMERT. (2010)

Os maiores valores de expansão foram encontrados na mistura solo-cimento. Entretanto, os valores foram considerados muito baixo, ou inexistentes como o da mistura solo-cal. Verificou-se também uma grande elevação da resistência da mistura solo-cal, observada nos resultados do CBR, alcançando valores maiores que 600% do solo original (EMMERT, 2010).

A redução no potencial de expansão e na tensão de expansão foi explicada por Silva- Júnior (2010) para teor de cal igual ou superior de 3 a 9%, justificado pelos fatores: a redução da força de repulsão provocada pela redução da massa específica da adição da cal, a diminuição da sucção favorece a diminuição da necessidade por água do solo expansivo, para neutralizar as cargas negativas da superfície do mineral e o cálcio de carga bivalente positiva da cal, diminui a distância da camada dupla do mineral, evitando a expansão do solo. A Figura 2.34a) mostra o comportamento da expansão do solo com o incremento da cal.

A cal tem uma aplicação para combater a expansão, bastante eficiente e econômica, mais o seu emprego é baixo, pois o tempo de cura para obter uma alteração na expansão desejada é elevado quando comparado com o do cimento (MALACONI, 2013).

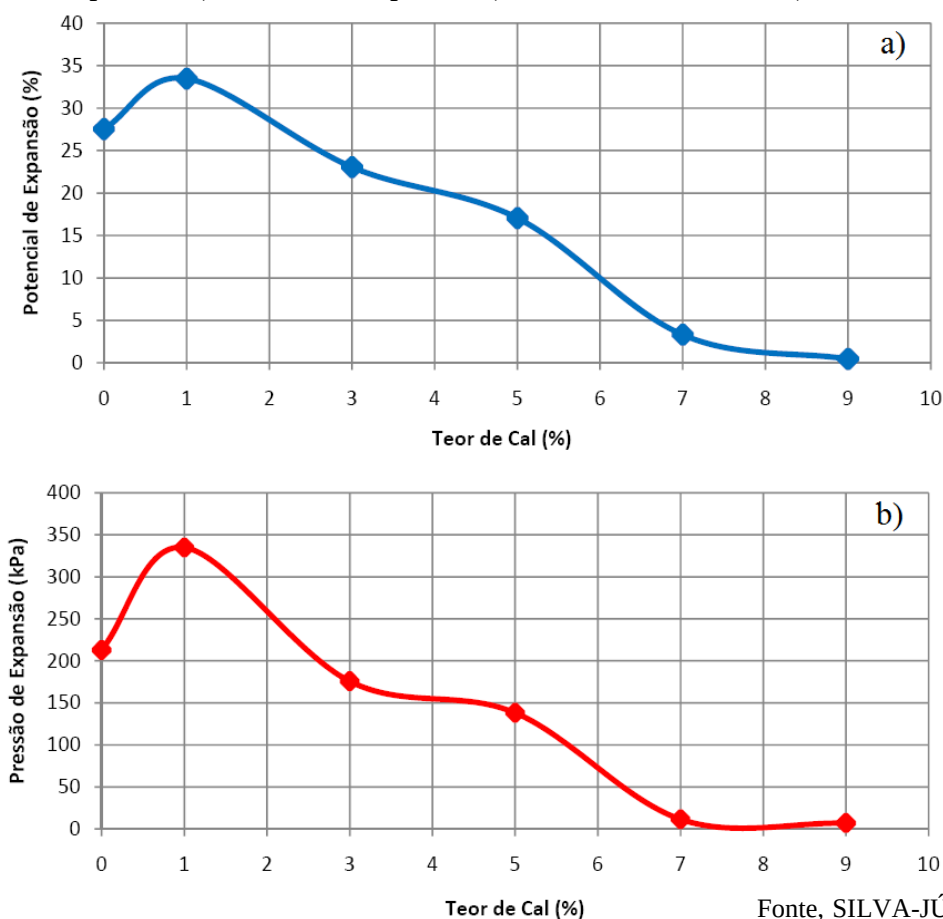
Ensaio realizado por Silva-Júnior (2010), avaliando as propriedades geotécnicas de expansão de um solo com e sem adição de cal, comprovou que um solo sem a cal apresentou um potencial de expansão de 27,5% e uma pressão de expansão de 213 kPa e com relação ao solo sem a cal. (Figura 2.34b).

Com o acréscimo da cal, inicialmente com 1%, aconteceu uma diminuição do potencial de expansão e da pressão de expansão. Para o teor de 1%, houve acréscimo tanto no potencial de

expansão quanto da pressão de expansão resultando, respectivamente, 33,5% e 335 kPa. Enquanto, para o teor de 9% de cal, praticamente eliminou a expansão e reduziu a pressão de expansão para 7 kPa, como mostra a Figura 2.34b.

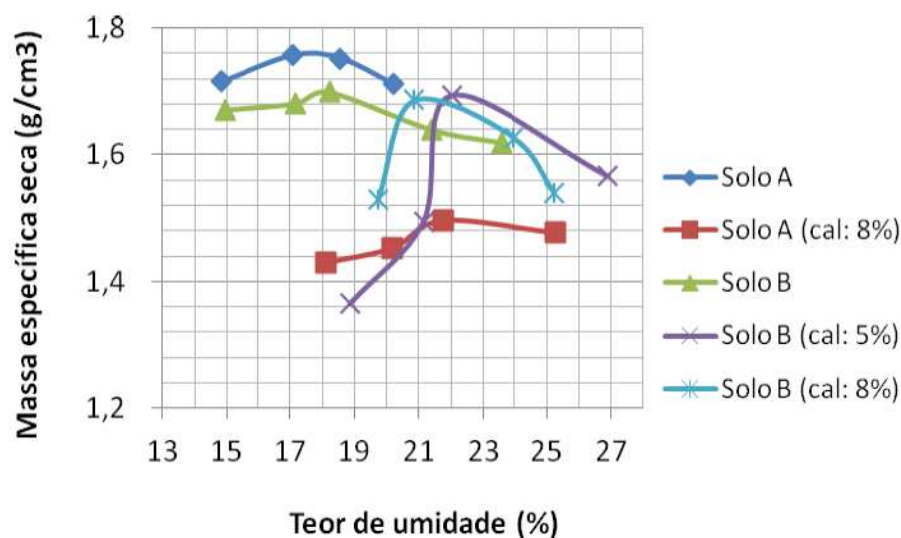
Trabalho realizado com dois solos com características expansivas e impróprias para sua aplicação em projetos rodoviários em Alegrete RS, foi utilizado tratado com a técnica de estabilização com cal, utilizando vários teores de cal na mistura. Concluindo que pela classificação Internacional SUCS, o solo A corresponde a uma argila pouco plástica arenosa (CL) e o solo B é uma areia argilosa (SC) (SULEIMAN et al. 2013).

Figura 2.34 Variação do Potencial de Expansão e Tensão de expansão com o teor de cal a) Potencial de expansão b) Tensão de expansão (SILVA-JÚNIOR, 2010).



Para os solos tratados com cal, com os teores de 5 e 8% apresentaram as curvas de compactação presentes na Figura 2.35 que relacionam a massa específica seca com o teor de umidade. Os ensaios de expansão normatizados pela NBR 9895 (ABNT, 1987), são parâmetros importantes para fins rodoviários, cujos resultados constam na Tabela 2.15.

Figura 2.35 Curva de compactação das amostras ensaiadas (SULEIMAN et al. 2013)



Fonte, SULEMAN et al. (2013)

Tabela 2.15 Valores dos ensaios de expansão nos solos originais e nos solos tratados com cal (SULEIMAN, 2013)

Solo	Expansão (%)
Solo A	2,23
Solo B	1,60
Solo A + 8% Cal	0,42
Solo B + 5% Cal	0,00
Solo B + 8% Cal	0,00

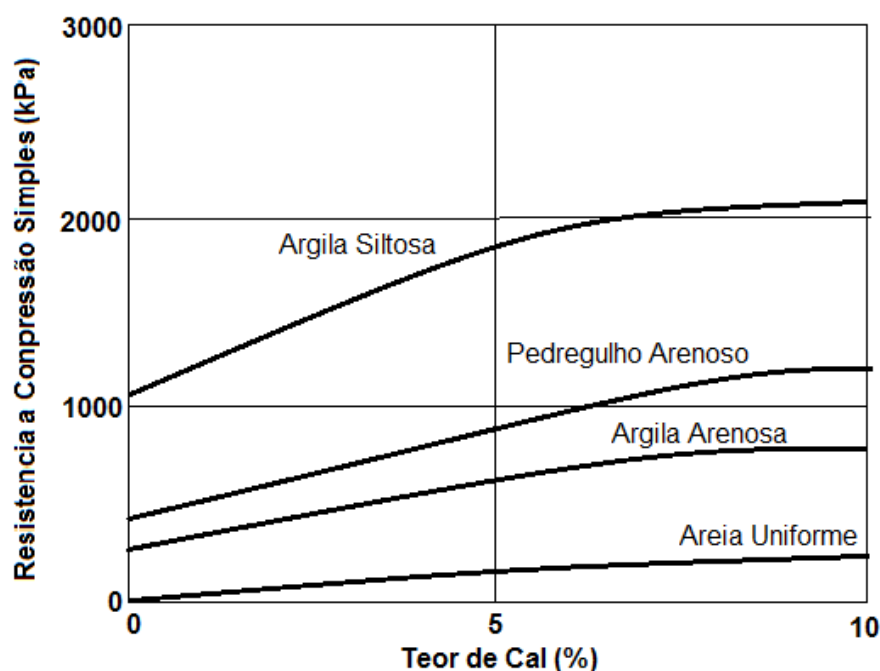
Fonte, SULEMAN et al. (2013)

A adição de 8% de cal no solo A, gerou uma redução de 80% da expansibilidade do solo. Já na situação do solo B, o acréscimo de 5% de cal foi suficiente para reduzir em 100% na expansibilidade. Para os dois solos estudados nesta pesquisa, foi verificado que a adição da cal provocou uma melhoria na estabilização química e na resistência do solo, viabilizando o seu uso em projetos rodoviários e construção de estradas rurais na região de Alegrete/RS (SULEIMAN, 2013).

2.8.5 Resistência a compressão simples

Segundo Inglês e Metcaf (1972), o aumento da resistência a compressão simples da mistura solo-cal ocorre de forma linear de acordo com a quantidade de cal, usualmente 8% para solos argilosos. A partir desse ponto há um decréscimo da resistência devido ao poder cimentante lento da mistura solo-cal a depender do tipo de solo (Figura 2.36).

Figura 2.36 Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (INGLÊS e METCALF, 1972)



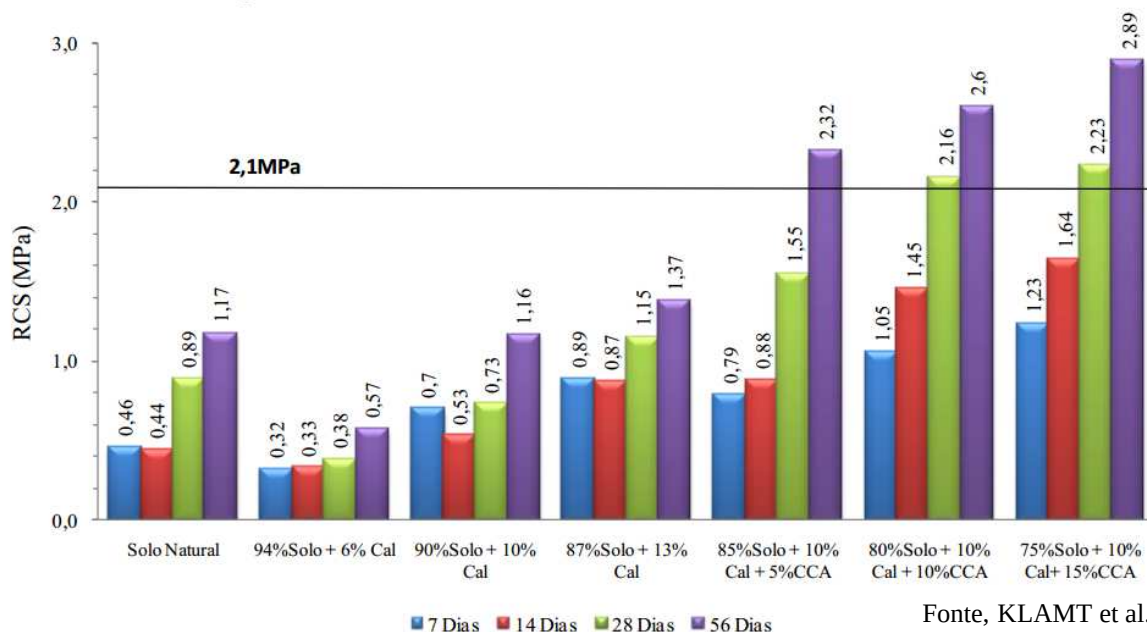
Fonte, INGLÊS e METCALF (1972)

Estudo realizado por Bell (1996) constatou um rápido aumento inicial na resistência de compressão simples (RCS) de um solo contendo montmorilonita com pequenos teores de cal (até 3%). Além disso, no solo estudado, 4% de cal foram suficientes para atingir a resistência máxima; para outro solo rico em caulinita, atingiu a resistência máxima com um teor de cal entre 4 a 6%. No entanto, o nível de resistência alcançado pela adição de cal ao solo caulínítico foi sensivelmente superior à mistura com solo contendo montmorilonita. Foi constatado também que a resistência não aumenta linearmente com o teor de cal e a cal em excesso diminui a resistência semelhante ao trabalho de Inglês e Metcalf (1972).

Trabalho realizado por Klamt et al. (2013), apresentou os resultados de resistência à compressão simples (RCS) para o solo natural, para as misturas de solo-cal e solo-cal- cinzas de casca de arroz (CCA) com o tempo de cura variando de 7, 14, 28 e 56 dias.

A RCS é uma característica muito importante na análise da estabilização de um solo por cal e cimento, logo, também pode ser aplicada para verificar o comportamento do solo quando adicionadas porcentagens de cal, cimento e CCA. Os resultados estão representados na Figura 2.37 onde pode ser visto a resistência à compressão simples com adição de cal e cinza de casca de arroz.

Figura 2.37 Resistência à Compressão Simples (MPa) – solo-cal e solo-cal-CCA, (KLAMT et al. 2013).

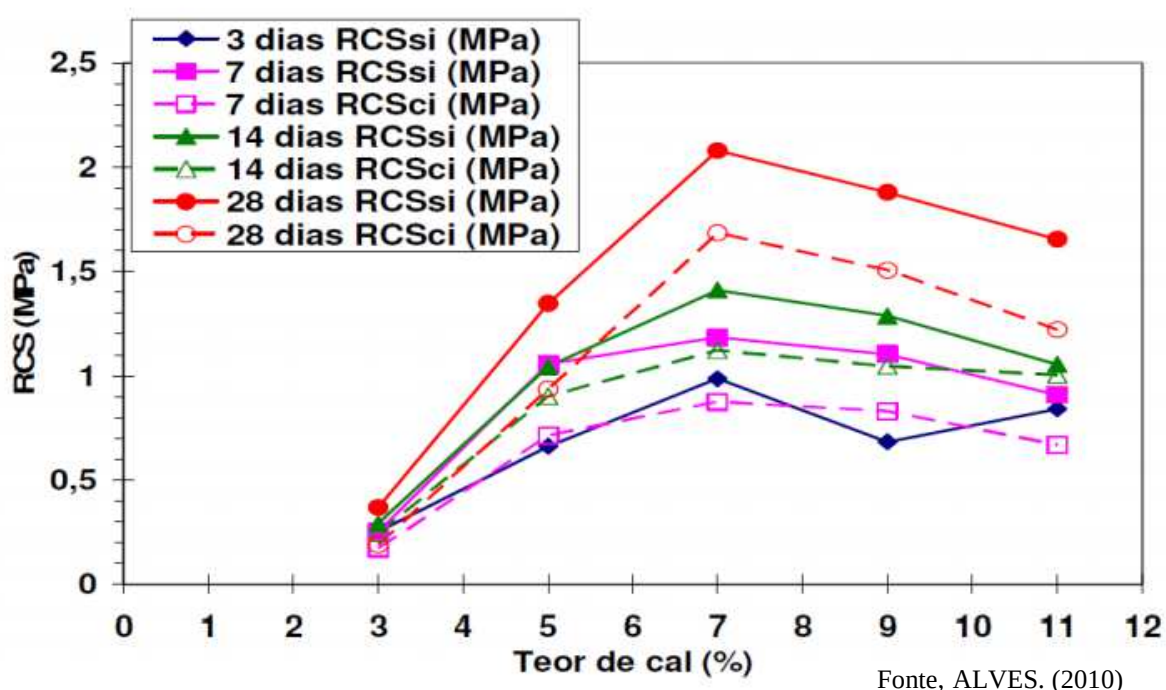


Kalmt e colaboradores observaram que a mistura solo-cal aumentou a resistência, mas na comparação com a resistência da mistura solo-cal-CCA, foi muito menor. A mistura com 13% de cal apresentou melhor comportamento enquanto a mistura solo-cal-CCA apresentou uma evolução constante com o tempo de cura, em todas as misturas (KLAMT et al. 2013).

O módulo de elasticidade é o principal parâmetro de rigidez de um solo. Este valor é dependente da quantidade de ligações formadas entre o solo e a cal geradas no processo de cimentação, limitado à percentagem de argila existente no solo. Os ensaios normalmente efetuados a esse tipo de solo visam obter a resistência à compressão simples aos 28 dias em função do teor em cal; essa análise se baseia num estudo de solos selecionados através de relações empíricas, relacionando o módulo de elasticidade com o valor da resistência à compressão (CAMAPUM et. al. (2014).

É importante verificar que, um excesso de cal nos solos, devido à carbonatação, gera uma perda de resistência nas misturas. A Figura 2.38 caracteriza a evolução da resistência à compressão de um solo argiloso, na qual se pode notar que o parâmetro de resistência atinge um valor máximo para 7% de teor em cal e começa a decair com a formação do carbonato (ALVES, 2010).

Figura 2.38 Resistência à compressão de um solo argiloso com cal (ALVES, 2010)

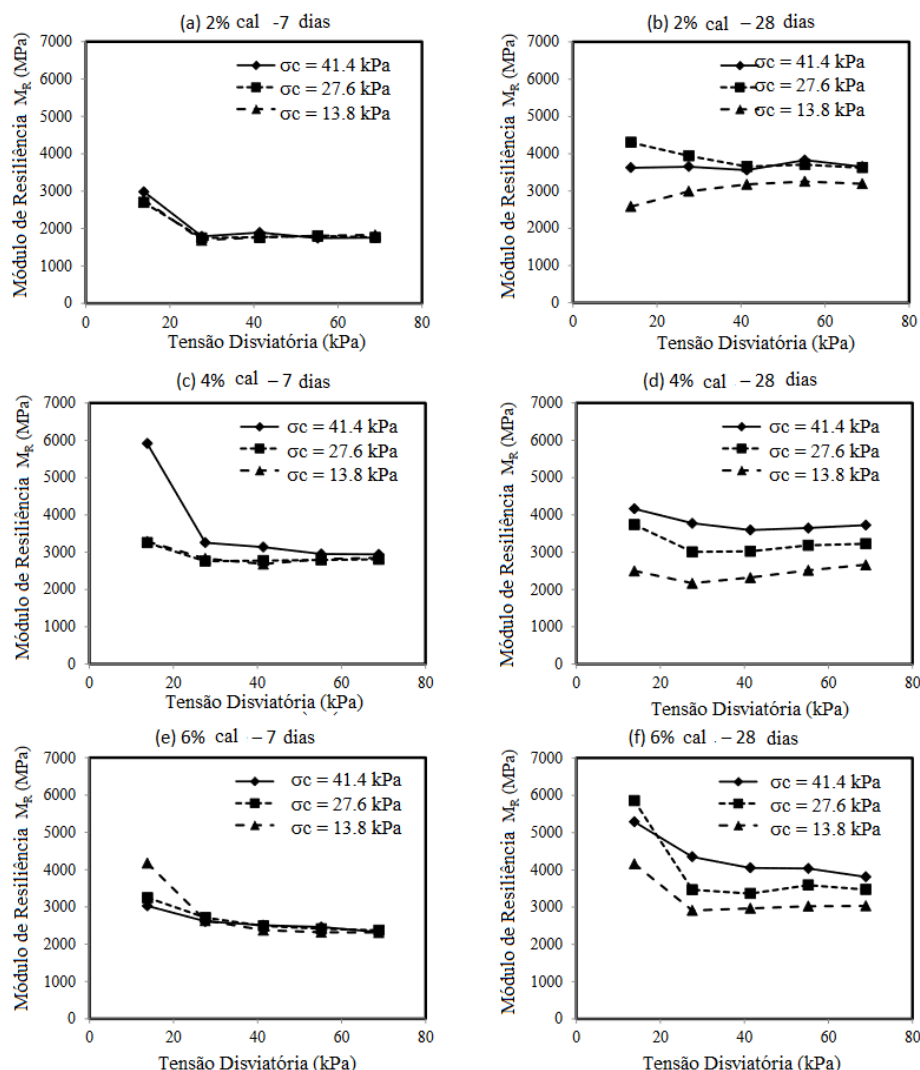


Estudos foram realizados por Elkady et al., (2015a) com solo expansivo na cidade de Tabuk no Reino da Arabia Saudita, tratado com cal hidratado com 2, 4 e 6% em peso seco do solo com tempo de cura de 7 e 28 dias. Os melhores resultados obtidos da estabilização foram determinados com o aumento do teor de cal e com 28 dias de cura.

Trabalho realizado por Elkady et al. (2015b) em Kingdom na Arábia Saudita quando foi aplicado cal (hidróxido de cálcio) para estabilizar um solo expansivo, e avaliado pela resistência à compressão simples (RCS) após tempo de cura de 7, 14 e 28 dias, com o teor de cal variando de 2, 4 e 6% (Figura 2.39).

O planejamento desse experimento constou também que os corpos de prova de solo-cal, foram submetidos a períodos de secagem e molhagem e após cada período de cura foi avaliado a resistência à compressão simples. Os resultados indicaram que os regimes de molhagem teve um efeito prejudicial à resistência a compressão simples dos corpos de prova, tratados com cal e com o aumento da percentagem de cal observou uma redução da percentual na RCS.

Figura 2.39 Resistência à Compressão Simples (MPa) dos solos tratados com cal variando os teores de 2, 4 e 6% e com o tempo de cura de 7, 14 e 28 dias, (ELKADY et al. 2015b)



Fonte, ELKADY et al. (2015b)

Estudos realizados por Barbosa (2013) num solo de Cabrobó, observou que as amostras de solo tratadas com cal apresentaram ganhos de resistência considerados, mostrando-se superiores em relação ao solo no seu estado natural (sem cal). Semelhança foi encontrada nos estudos de Eades e Grim (1960) que constatarem que o aumento de resistência para solos com caulinita, inicia com a adição dos primeiros teores de cal, enquanto que para solos contendo illita e montmorilonita são necessários adicionar 4 a 6 % de cal para que ele se desenvolva. Isto se dá porque, no caso das argilas contendo illita e montmorilonita, observaram que o aumento da resistência a compressão simples da mistura solo-cal se dá de forma linear e de acordo com a quantidade de cal, usualmente 8% para solos argilosos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O Programa de investigação geotécnico desenvolvido nessa tese de doutorado Consiste da caracterização Física, Química, Mineralógica, Microestrutural e Mecânica dos solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista, da cal e das misturas solo-cal, assim como da avaliação da expansividade dos solos e do efeito da adição da cal aos solos. A escolha dos locais está associada a projetos de infraestrutura do estado de Pernambuco, ou seja, o caso de Cabrobó, ao canal de transposição do rio São Francisco, Ipojuca à refinaria Abreu e Lima, e Paulista por ser uma área de estudo do grupo de pesquisa de solos não saturados da UFPE.

São descrito os ensaios de campo, a coleta das amostras deformadas e indeformadas, e os ensaios de laboratório. Esse programa de investigação geotécnica em campo foi realizado nos três municípios mencionados. As amostras coletadas em campo nos três municípios foram levadas ao Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, ao Laboratório de Geotecnia da UNICAP e ao Laboratório de Microestrutura da USP. O Quadro 3.1 indica os tipos de ensaios e locais onde foram realizados.

A cal hidratada de qualidade CH-I foi adquirida no mercado comercial, e realizados ensaios de caracterização físico-química, umidade, perda ao fogo, materiais voláteis, teor de anidrido carbônico, retenção de água, finura, determinação dos óxidos por eflorescência de raios – X, massa específica real dos grãos, seguindo as recomendações da ABNT e pelo picnômetro de gás Hélio e granulometria pelo granulômetro. Inicialmente, são abordados os materiais solo, cal e em seguida as misturas solo-cal.

3.1 Identificação das áreas de estudo

As coletas das amostras dos solos ocorreram nos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista do estado de Pernambuco. A Figura 3.1 mostra a Carta de Suscetibilidade à Expansão dos Solos no estado de Pernambuco (AMORIM, 2004), destacando os municípios em estudo, onde foram coletadas as amostras.

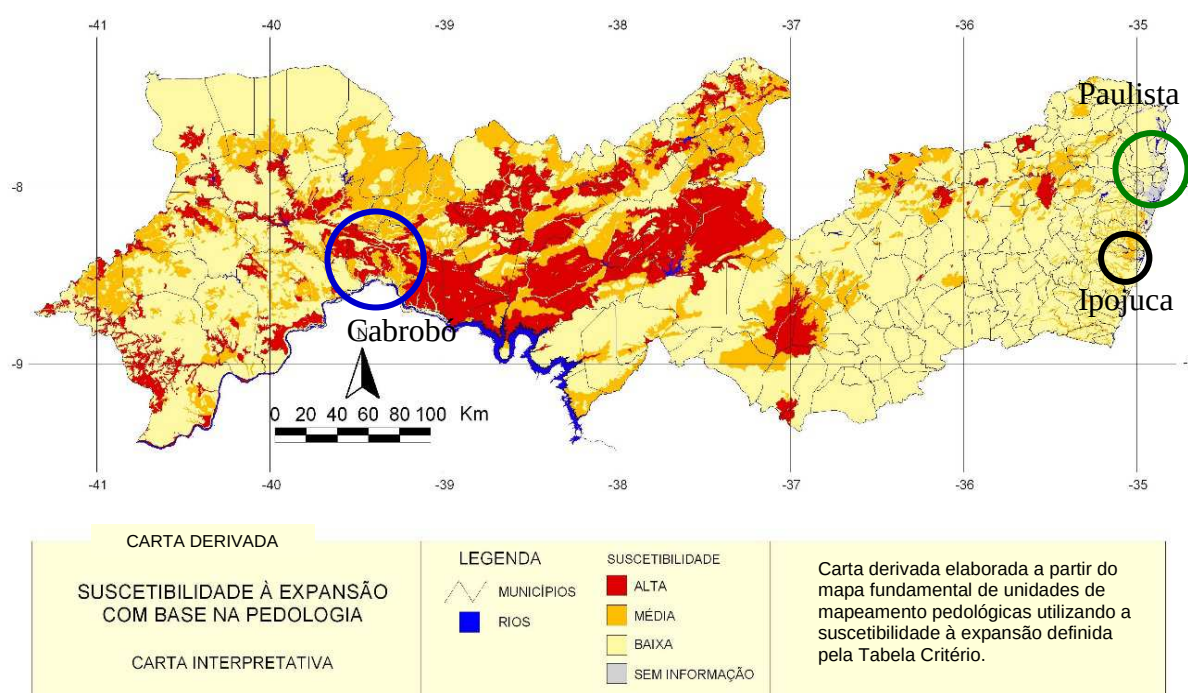
Quadro 3.1 Tipos de ensaios e local de realização

Tipo de investigação e ensaio no solo e na mistura	LOCAL			Local de realização dos ensaios
	Cabrobó	Ipojuca	Paulista	
Granulometria pela ABNT	X	X	X	UFPE/UNICAP
Umidade	X	X	X	UFPE/UNICAP
Granulometria a Lazer	X	X	X	USP
Densidade real picnômetro	X	X	X	UFPE/UNICAP
Densidade real picnômetro de gás Hélio	X	X	X	USP
Limites de Atteberg	X	X	X	UFPE/UNICAP
Compactação	X	X	X	UFPE/UNICAP
Caracterização Química	X	X	X	UNICAP
Mineralogia por difração de raio X	X	X	X	UNICAP/CETENE
Análise Termodiferencial	X	X	X	USP
Eflorescência de Raio X	X	X	X	UFPE
Microestrutura pelo MEV	X	X	X	UNICAP
Ensaio Edométrico Simples e Duplos	X	X	X	UFPE/UNICAP
Curva de contração e secagem (*)	X	X	X	UNICAP/UFPE
Compressão Simples	X	X	X	UNICAP/UFPE

CETENE - Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste; UFPE - Universidade Federal de Pernambuco; UNICAP - Universidade Católica de Pernambuco e USP - Universidade de São Paulo. (*) Relação entre índice de vazios, grau de saturação, umidade e sucção em amostras compactadas.

Fonte, Autor

Figura 3.1 Carta de suscetibilidade à expansão dos solos no estado de Pernambuco com destaque para os municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista (AMORIM, 2004)



Fonte, AMORIM, (2004)

Cabrobó encontra-se na Mesorregião São Francisco e na Microrregião Petrolina do Estado de Pernambuco, limitando-se a norte com Terra Nova, a sul com Estado da Bahia, a leste com Salgueiro e Belém de São Francisco, a oeste com Orobó e Parnamirim, distando 536,1 km da capital Recife. Seu clima apresenta como semiárido e quente com uma temperatura média anual de 26°C, chuvoso nos meses de fevereiro e março (IBGE, 2014; CABROBÓ, 2014). O local de estudo encontra-se numa área de alta suscetibilidade à expansão (Figura 3.1).

O município de Cabrobó tem uma constituição geológica apresentando contatos abruptos com os metassedimentos do Complexo Cabrobó, por vezes formando imbricamentos e lascas tectônicas. A flora é principalmente constituída por granada-biotita, xistos/gnaisses, localmente migmatizados e de maneira mais restrita ocorrem quartzitos e mármore (CRUZ e ACCIOLY, 2013). A pedologia de Cabrobó apresenta quatro unidades de solo, classificados como Gleissolo Sáfico (P1), Cambissolo Flúvico (P2), Neossolo Flúvico (P3) e Neossolo Flúvico (P4), de acordo com Santana et al. (2015).

O município do Ipojuca fica na Região Metropolitana do estado de Pernambuco, distante 49 km da capital (Recife). O município foi constituído de três distritos: Ipojuca, Camela e Nossa Senhora do Ó. O porto de Suape está localizado em Ipojuca com uma área de 527,107 km²; ocupa uma área total de 13.500 hectares, distribuídos em zona portuária, administrativa, industrial, preservação ecológica, sendo o principal porto da região Nordeste. Apresenta um clima quente e úmido pseudo-tropical, segundo a classificação de Köppen e o regime pluviométrico varia de 1800 a 2300 mm anuais, com uma temperatura média de 24°C e umidade de 80% (NIMER, 1979). O local de estudo encontra-se numa área de baixa suscetibilidade à expansão, conforme se verifica na Figura 3.1.

O município de Paulista – PE está localizado na região metropolitana do estado de Pernambuco no litoral norte do Estado a 17 km do Recife. O local de estudo está inserido na estação de tratamento de esgoto do Janga da Companhia de Saneamento do Estado de Pernambuco (COMPESA). O clima pode ser classificado como tropical e úmido, com chuvas de outono-inverno. Distinguem-se dois períodos: o de chuva (úmido) e o de estiagem (seco), sendo que os períodos úmidos são curtos e os secos são prolongados. Também podem ocorrer ocasionais temporais e longas estiagens (JUSTINO, 2001). O local de estudo encontra-se numa área de média suscetibilidade à expansão (Figura 3.1). Nessa área, foram realizados estudos por: Jucá et al. (1992), Bastos (1994), Justino (2001), Paiva (2009), entre outros.

3.2 Investigação de campo

No campo foram realizadas coletas de amostras deformadas e indeformadas (tipo blocos) em solos dos três municípios.

3.2.1 Coleta das amostras indeformadas e deformadas

Foram coletados dois blocos indeformados no município de Cabrobó na profundidade de 1,0 m, quatro no município de Paulista na profundidade de 1,0 m e em Ipojuca, amostras deformadas acondicionadas em saco. A obtenção dos blocos indeformados obedeceu às recomendações da norma ABNT, NBR 9604/86. É importante destacar que os blocos foram revestidos com filme de PVC, antes de colocar a folha de alumínio. A Figura 3.2 ilustra a obtenção de um dos blocos indeformados coletados em Paulista.

Figura 3.2 Coleta de amostras indeformadas no município de Paulista



Fonte, Autor

3.3 Investigação de laboratório

O programa de investigação geotécnica realizado em laboratório para analisar o comportamento dos solos expansivos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista foram realizados em amostras deformadas e indeformadas do tipo bloco dos solos, na cal e nas misturas solo-cal.

3.3.1 Caracterização da cal

Foram realizadas as determinações de umidade; perda ao fogo; óxido de silício; óxido férrico; óxido de cálcio; óxido de magnésio e massa específica obedecendo às recomendações da ABNT, NBR 6473/03 a retenção de água de acordo com a ABNT, NBR 9290/96 e a finura pela ABNT, NBR 9289/98. Foram realizadas análises químicas, de efluorescência de raio-X (FRX) e análise termo diferencial com procedimentos similares aos realizados na mistura solo-cal, como está descrito no item 3.3.4. A cal hidratada utilizada foi classificada segundo a ABNT, NBR 7175/03.

3.3.2 Preparação das misturas solo-cal

Na preparação das misturas solo-cal, inicialmente, procurou-se definir o menor teor de cal que a estabilizasse, com o pH de 12,42, pelo critério de Eades e Grim (1966). Com o valor do teor de cal definido foram preparadas as misturas para a realização dos ensaios de caracterização física, química, mineralógica, microestrutural expansão livre, tensão de expansão e compressão simples. Tomou-se o peso seco da amostra do solo e foi adicionado cal em teores de 1, 3, 5 e 7%, em peso. A mistura (solo-cal) foi homogeneizada e os ensaios foram realizados após 1 hora, com exceção dos ensaios químicos que também foram realizados após 120 dias e os ensaios de resistência a compressão simples com tempo de cura de 48 horas a temperatura de 65°C. Os métodos utilizados para o solo foram os mesmos para a mistura solo-cal, e são descritos nesse Capítulo. No ensaio de expansão livre e tensão de expansão no solo de Ipojuca foram também realizado com teores de 9 e 11% de cal.

3.3.3 Ensaios de caracterização física do solo, da cal e misturas solo-cal

A preparação das amostras dos solos seguiram as recomendações da ABNT, NBR 6457/86 e ABNT, NBR 7182/86 e os ensaios de caracterização física realizados foram: determinação do Limite de Liquidez ABNT, NBR 6459/84, determinação do Limite de Plasticidade ABNT, NBR 7180/84, Massa Específica ABNT, NBR 6508/84 e análise Granulométrica, ABNT, NBR 7180/84.

Para uma melhor análise da fração fina do solo, sua distribuição granulométrica foi analisada com o aparelho analisador de partículas por difração a Laser, “granulômetro”, marca Malvern, modelo Mastersizer S long bed, que permitiu realizar medidas de tamanho de partículas no

intervalo de 0,0001 m a 3,50 mm. A Figura 3.3 ilustra o equipamento da Universidade de São Paulo (USP), utilizado para realização do ensaio.

Figura 3.3 Aparelho analisador de partículas por difração a laser “granulômetro” (FERREIRA, 2013)



Fonte, FERREIRA (2013)

A análise da densidade real dos grãos dos solos e das misturas solo/cal e da cal foi realizada pelo procedimento descrito na ABNT, NBR 6508/84 e o picnômetro de gás Hélio, modelo Multipicnômetro Quantcharme- MVP 5DC da USP (Figura 3.4).

Figura 3.4 Equipamento Picnômetro Gás Hélio (FERREIRA, 2013).



Fonte, FERREIRA (2013)

Para o ensaio com o picnômetro de gás Hélio, tomou-se 50 g de amostra de solo ou mistura solo-cal ou cal, inicialmente seco ao ar, e posteriormente em estufa a uma temperatura de 60°C, até o peso permanecer constante. Cerca de 10 g das amostras secas foram utilizadas para cada ensaio com cinco repetições, considerando o valor médio encontrado.

Foram realizados os ensaios de compactação de acordo com a ABNT, NBR 7182/86, determinando os valores dos pesos específicos aparentes secos máximos e das umidades ótimas do solo natural e das misturas de solo-cal, inicialmente com energia normal e em seguida, realizando ensaios com pequenos acréscimos de umidade entre 1 a 3%, iniciando com as amostras secas ao ar.

3.3.4 Ensaio de caracterização química do solo da cal e misturas solo-cal

Os ensaios químicos foram realizados no laboratório de Análises Químicas da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), seguindo a metodologia do Manual de Métodos de Análise de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA (1997) e EMBRAPA (2011). Cada resultado foi obtido a partir de uma determinação realizada em triplicata e a diferença entre as determinações não deveria ultrapassar 0,1% do valor relacionados à titulação. Com repetições das análises até que os resultados ficassem dentro do limite de tolerância estabelecida pela EMBRAPA; foi considerado o sistema de classificação de solo da EMBRAPA (1999).

Foram analisadas as seguintes determinações em cada solo com a finalidade de verificar a qualidade do solo e a suscetibilidade à expansão: Potencial Hidrogeniônico em água $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, Potencial Hidrogeniônico em cloreto de potássio pH_{KCl} , Potencial Hidrogeniônico em cloreto de Cálcio $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, Carbono Orgânico (g/Kg) solo, Matéria Orgânica (g/Kg) solo, Alumínio extraível ($\text{meq Al}^{+++}/100\text{g solo}$), Cálcio trocável ($\text{meq Ca}^{++}/100\text{g solo}$), Magnésio trocável ($\text{meq Mg}^{++}/100\text{g solo}$), Potássio trocável ($\text{meq K}^{+}/100\text{g solo}$), Sódio trocável ($\text{meq Na}^{+}/100\text{g solo}$), Acidez extraível ($\text{meq (H}^{++}+\text{Al}^{+++})/100\text{g solo}$), Soma de cátions (S) ($\text{meq}/100\text{g solo}$), Capacidade de troca de cátions (T) ($\text{CTC meq}/100\text{g solo}$), Percentagem de saturação de bases (V) (% V), Percentagem de Óxido de Silício na fração argila (% SiO_2), Percentagem de Óxido férrico no extrato sulfúrico (% Fe_2O_3), Percentagem de Óxido de alumínio no extrato sulfúrico (% Al_2O_3), Percentagem de água na pasta saturada e no extrato de saturação (% H_2O), e Condutividade elétrica no extrato de saturação ($\mu\text{S}/\text{cm}/25^\circ\text{C}$).

A composição química quantitativa do solo e das misturas solo-cal, expressa em óxidos, foi obtida através de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) em amostras fundidas, com determinação de teores dos dez óxidos de maior abundância: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MnO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 e P_2O_5 . Uma porção de cada amostra foi colocada em estufa para secar a 110°C e então levada a uma mufla, a 1000°C por 2 horas, para a determinação de

perda ao fogo. Foram feitas pérolas fundidas usando tetraborato de lítio como fundente. As pérolas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios X (Rigaku modelo RIX 3000, equipado com tubo de Rh), pelo método de curvas de calibração que foram construídas com materiais de referências internacionais.

3.3.5 Caracterização da microestrutura

A contextura (microestrutura) do solo foi observada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, aplicada nas amostras indeformadas de Cabrobó e Paulista e compactadas de Ipojuca, verificando assim, a estrutura presente na fração fina do solo e nas misturas solo-cal, a partir dos ensaios de compactação na umidade ótima e na densidade seca máxima. As amostras eram retiradas cuidadosamente e colocadas para secar ao ar, onde eram moldados três corpos de prova de formato prismático com base de 9,8 mm e altura de 11,0 mm, seguindo as etapas:

- 1º) os corpos de prova foram moldados de modo que nenhum instrumento cortante ou pontiagudo tocasse na superfície de observação;
- 2º) os corpos de prova foram fixados em um cilindro de alumínio com diâmetro de 9,8 mm, e altura de 11 mm, por meio de fita dupla face 3M e reforçada por pequena quantidade de cola no contato;
- 3º) em seguida, os corpos de prova foram colocados na campânula de vácuo do tipo Fine Coat Íon Sputter JfC 1100, para metalização, onde receberam uma película de ouro fina, que tinha por finalidade o carregamento eletrostático, propiciando uma boa condução do feixe de elétrons.
- 4º) Após o processo de metalização, as superfícies das amostras foram observadas e fotografadas no equipamento JSM LV1600 Scanning Microscope de marca Joel, com máquina fotográfica acoplada (UNICAP), operando a 15 Kv e poder de resolução bem ampliado, permitindo aumentos de 40.000 vezes.

3.3.6 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica foi realizada nas amostras dos solos, com as seguintes etapas: separação da argila do silte; preparação das lâminas com magnésio glicol; preparação das lâminas com potássio na temperatura ambiente; preparação das lâminas com potássio a 300°C;

preparação das lâminas com potássio a 550°C; incidência de um feixe de raios-X monocromático, incidindo sobre um cristal da lâmina. Esse feixe difratado e medido por um detector de raios-X, deu origem a um perfil de difração ou difratograma; foram comparados os picos dos difratograma com a distância basal do argilomineral no tratamento com potássio e magnésio, identificando o argilomineral presente na amostra (FONSECA e LOPES, 2013; PERCILIO et al. 2014).

Seguindo os procedimentos a separação da fração de areia foi realizada por peneiramento partindo do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação: coleta-se 1 kg deste material e passa-se na peneira número 10, retira-se 70 gr deste solo que passa na peneira e adiciona-se a solução Na_2CO_3 pH 9,6. Em uma proveta de vidro de 1000 mL, é acoplado um funil de vidro e uma peneira de 0,053 mm, faz-se a aspeção desta solução, coloca o solo sobre a peneira e vai adicionando a solução que está na piceta como se fosse um processo de lavagem do solo, até completar os 1000 mL da proveta (ALBERES, et al. 2002).

Para separação das frações de Silte e Argila por sedimentação, homogeniza-se a proveta com agitador manual, o material passante da peneira 0,053 mm, e deixa a solução em repouso por 8 horas, onde as partículas mais densa (silte) sedimentam. O material sedimentado fica numa distância de 0,10 m da base interna da proveta, o volume em suspensão (argila) é retirado e centrifugado por 5 min a 7000 rpm, separando a argila do restante da amostra.

Preparação de 4 lâminas de vidro (dimensões conforme normalização e equipamento) com solução saturada na presença de potássio. Essa mistura foi colocada em cima da lâmina de vidro como uma película, uma das lâminas foi seca ao ar (temperatura ambiente para ensaios em laboratório 25 °C) e as outras foram levadas a mufla a uma temperatura de 300 e 550 °C. Prepara-se também com os mesmos procedimentos uma lâmina saturada com Magnésio e Glicerol seca ao ar (temperatura ambiente para ensaios em laboratório 25 °C).

As lâminas foram colocada no equipamento para ser obtida a difração de raios-X. O princípio da análise de difração permitiu identificar o mineral argílico e a composição mineralógica. A Lei de Bragg permitiu encontrar o comprimento de onda através da equação:

$$n\lambda = 2d \sin\theta:$$

(Equação 3.1)

sendo n o número inteiro da difração do plano, λ o comprimento da onda do feixe de raios-X monocromático, empregado na radiação, d distância interplanar e θ o ângulo de Bragg ou de incidência do feixe de raio X.

Os dados foram coletados empregando-se um difratômetro Shimadzu XRD-6000 com radiação CuK α , tensão de 40 KV, corrente de 30 mA, tamanho do passo de 0,020 2 θ e tempo por passo de 1,000s, com velocidade de varredura de 2°(2 θ)/min, e ângulo 2 θ percorrido de 2 a 42°.

3.3.7 Caracterização termogravimétrica

A caracterização termogravimétrica possibilitou conhecer as alterações que o aquecimento pode provocar nos materiais; permitem estabelecer a faixa de temperatura que adquirem composição química fixa, definida e constante; determinou a temperatura em que os materiais começaram a se decompor, acompanhou o andamento de reações de desidratação, oxidação, combustão, decomposição, dentre outros.

A Análise Mineralógica por Termogravimetria foi realizada na Universidade de São Paulo (USP), no equipamento NETZSCH STA 409PC, com atmosfera inerte de nitrogênio 5.0 analítico com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, até uma temperatura máxima de 1000 °C. Para a preparação da amostra foi utilizado, um cadinho de platina (Pt) vazio como material termicamente inerte de referência tarado na mesma temperatura de trabalho e em triplicata, adicionando 1,0 g ($\pm$ 1 mg) do solo, não recebendo nenhum tratamento prévio (CARVALHO et al. 2014). Os resultados obtidos foram analisados com auxílio do programa NETZSCH Proteus – Thermal Analysis Version 4.2.1.

O equipamento utilizado para o ensaio foi constituído basicamente por uma micro balança, um forno, um programador de temperatura e um computador; procedimento:

- Estabelecer no programa de computador, interligado ao equipamento, as temperaturas inicial e final da análise além da velocidade de variação de temperatura;
- colocar o cadinho vazio no equipamento, para zerar a massa deste recipiente;
- retirar o cadinho do equipamento e colocar a amostra;

- colocar a amostra e o cadinho no equipamento e acionar o comando para executar a leitura;
- tendo completado o ciclo de temperatura pré-estabelecido, retirou-se o cadinho com o que restou da amostra e efetuou-se a limpeza deste recipiente.

A amostra foi colocada em um cadinho que fica em uma balança posicionada no interior de um forno, podendo trabalhar em condições de alto vácuo ou sobre diferentes atmosferas. A variação de massa foi registrada com precisão de 0,1 μg , devido a fenômenos físicos e químicos como, por exemplo, a decomposição térmica, a retenção de gás, a dessorção de espécies previamente absorvidas ou adsorvidas.

3.3.8 Caracterização da expansividade

A caracterização da expansividade foi realizada nos solos e nas misturas solo-cal. No solo, os corpos de provas foram obtidos a partir dos blocos indeformados e também compactados enquanto nas misturas de solo-cal a partir de amostras compactadas estaticamente na umidade ótima e peso específico máximo. Analisou-se assim a influência do estado de tensão na deformação do solo causada pela inundação, no estado natural e na mistura solo-cal.

3.3.8.1 Ensaio de expansão “Livre”

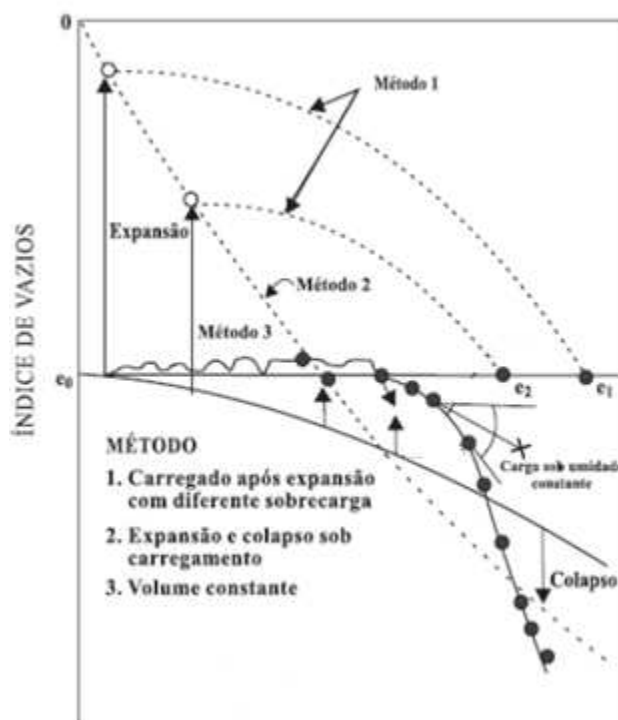
Os ensaios de expansão "livre" foram realizados em células edométricas convencionais, seguindo os procedimentos da norma ASTM D4829/95 e da ABNT, NBR 12007/90. As amostras foram moldadas em anéis de aço inoxidável de altura 20,00 mm e diâmetro de 71,3 mm do próprio equipamento e submetidas a pequenas tensões 10 kPa, sendo a expansão do solo acompanhada até a estabilização.

3.3.8.2 Ensaio de Tensão de Expansão

A tensão de expansão dos solos indeformados estudados foi determinada por três métodos diferentes: 1 - carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação; 2 - expansão e colapso sob tensão, 3 - volume constante; nas misturas de solo-cal, a tensão de expansão foi determinada pelo método volume constante. A Figura 3.5 mostra os métodos de determinação.

Método 1 (carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação)- as amostras do solo após serem moldadas nos anéis foram carregadas a umidade constante a diferentes tensões de consolidação por estágio (10, 20, 80, 320, 640 e 1280 kPa para o solo de Cabrobó, 10; 40 e 80 kPa para o solo de Ipojuca e 10; 20; 40 e 160 KPa para o solo de Paulista). Ao atingir a tensão de inundação as amostras foram inundadas e as deformações foram medidas. As deformações foram medidas em intervalos de tempo até a estabilização ser alcançada. Após a estabilização foram consolidadas sobre aumento de tensão. A tensão de expansão é a média das tensões obtidas em cada corpo de prova, correspondente àquela da altura inicial.

Figura 3.5 Métodos de avaliação da tensão de expansão (FERREIRA e FERREIRA, 2009)



Fonte, Ferreira e Ferreira, 2009

Método 2 (Expansão e colapso sob tensão) a amostra de cada solo foi colocada na célula e ajustada à prensa, em seguida cada corpo de prova foi submetido às mesmas tensões dos corpos de prova do Método 1, inundados e medidas as deformações ocorridas. Com as deformações e tensões verticais de inundações, foi obtida por regressão linear a reta que melhor ajusta os pontos e a partir da equação foi obtida a tensão de expansão para deformação nula de cada solo. No solo de Cabrobó foram também aplicadas as tensões de 320, 640 e 1280 kPa.

Método 3 (volume constante) - a amostra foi inundada e à medida que o volume do mesmo aumentava de volume, foi colocada uma sobrecarga para impedir esta variação. Nas primeiras horas de ensaio, permitiu-se uma pequena expansão de 0,02 mm para a aplicação da sobrecarga. A soma das sobrecargas correspondeu a uma tensão, que é a tensão de expansão do solo a volume constante e na outra não se considerou a deformação do sistema, mantendo-se a leitura inicial constante do deflectômetro.

3.3.9 Ensaio de resistência à compressão simples

As amostras utilizadas para os ensaios de resistência à compressão simples (ABNT, NBR 12025/2012) foram moldadas mediante a compactação estática, em três camadas, na energia normal até atingir a altura desejada. Ao fim da compactação de cada camada, foi executada a escarificação na superfície para proporcionar uma maior aderência entre as interfases. Para este processo, utilizou-se um cilindro bipartido de bronze com 50 mm de diâmetro e 100mm de altura,

Baseado na norma ASTM D5102/96, foram moldados dois corpos de prova do solo sem cal e dois corpos de prova para cada teor de cal desejado exceto no solo de Ipojuca foram realizados três corpos de provas. Após a compactação, os corpos de prova foram retirados do molde cilíndrico e pesados. Em seguida, foram enrolados em folha de alumínio, identificados e deixados em cura por 48 horas a uma temperatura de 65°C.

Foi analisado o rompimento dos corpos de prova das misturas de solos sem cal e de solos estabilizados quimicamente pela cal, com teores pré-determinados de 3, 5 e 7%, pelos critérios de Eades e Grim (1966). Inicialmente, caso necessário adicionou-se outros teores de solo-cal. Para a ruptura dos corpos de prova foi utilizada a célula do triaxial com anel dinamométrico de capacidade máxima de 50 kN e velocidade de 0,48 mm/min. O valor da resistência à compressão simples de cada mistura, para cada teor de cal especificado e para cada período de cura analisado, foi determinado através do valor da média aritmética dos dois resultados obtidos.

3.3.10 Ensaio para se obter a curva contração ou secagem (sucção)

Nas amostras indeformadas dos solos de Cabrobó e Paulista e compactado de Ipojuca foi determinada a sucção mátrica pelo método do papel filtro. Moldando o solo em anéis de 75

mm e altura de 20 mm e colocando dois papéis filtro (Whatman, 42) um no topo e outro na base em contato direto com o solo que foram envolvidos com filme de PVC em camadas e colocados em ambiente com temperatura constante (MARINHO 1994). Após 14 dias determinou-se a umidade dos papéis filtro em balança analítica com sensibilidade de 0,0001g.

A determinação da curva contração-secagem de um solo pode ser obtida por meio de várias técnicas. Foi utilizado o método do papel filtro (Marinho, 1994) cujos ensaios foram realizados utilizando anéis de diâmetro que variaram (40 a 75 mm) e altura de 20 mm. Utilizou-se o papel filtro Whatman N°42, com diâmetro de 55 mm e a curva de calibração de Chandler et al. (1992). A metodologia consiste em moldar os corpos de prova e em seguida fazer o umedecimento através do processo de absorção de vapor com os procedimentos indicados a seguir.

Corpos de prova dos solos foram compactados no cilindro do Proctor na umidade ótima e peso específico seco máximo com energia do Proctor normal para os três solos. Nas amostras compactadas, foram cravados anéis com pontas aniceladas. As alturas dos corpos de provas eram apenas 80% das alturas dos anéis. A diferença entre as alturas foi deixada para que o solo quando expande-se, ficasse ainda comprimido dentro do anel. De cada cilindro do Proctor, foram moldados 3 corpos de provas e pesados.

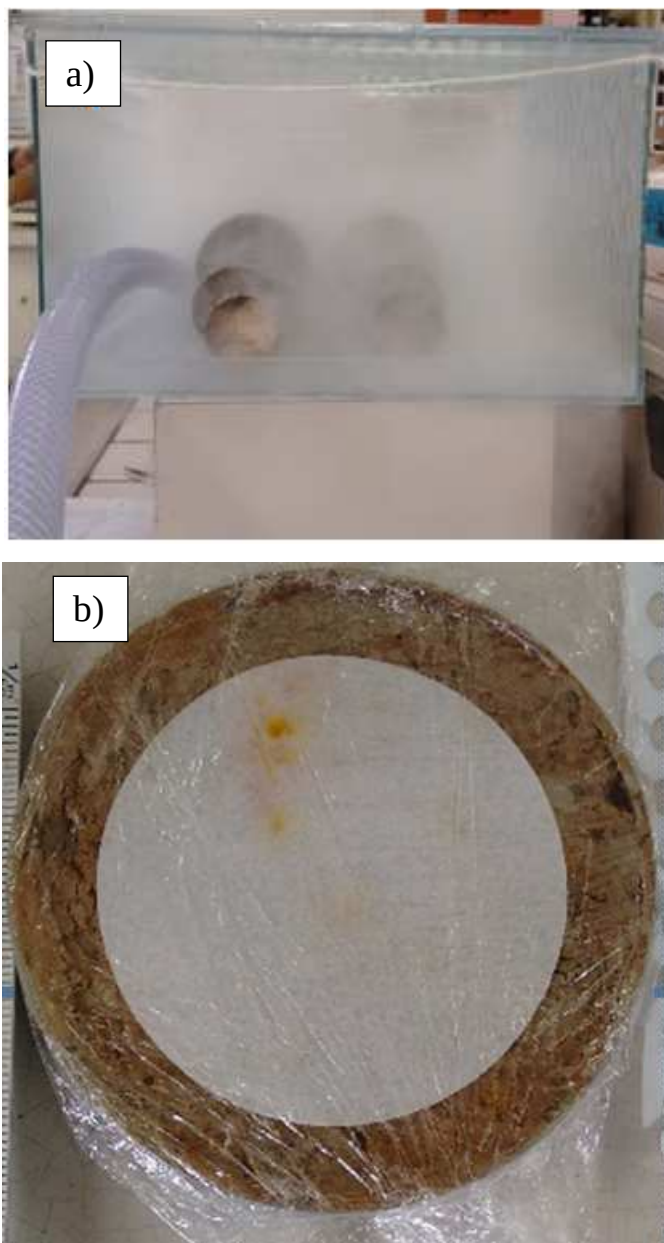
Os corpos de provas assim moldados foram colocados dentro de um aparato Figura 3.6a umedecidos pelo processo de absorção de vapor e deixado expandir linearmente sem sobrecarga até atingir a umidade saturada. O tempo necessário variou dependendo do solo; observou-se a expansão do solo ao absorver umidade.

Após o período de umedecimento os corpos de prova foram pesados em balança analítica de precisão de 0,001g, avaliado diâmetro e altura em oito pontos diametralmente opostos por meio de um paquímetro com sensibilidade de 0,1mm observou-se no anel.

Em cada corpo de prova foram colocados dois papéis filtros, em contato, um no topo e outro na base. Envolveu-se ambos com filme de PVC em camadas (Figura, 3.6). Decorridos 7 dias foram realizadas a pesagem dos papéis filtro em uma balança (analítica) de sensibilidade de 0,0001g (determinando a umidade do solo) e a medição de diâmetro e altura do corpo de prova para identificar o seu volume.

Os corpos de prova foram submetidos a uma secagem lenta em ambiente com temperatura e umidade relativa controlada. Esperou-se o tempo suficiente para que a umidade pudesse reduzir 3% nos solos de Cabrobó e Paulista e 5% no solo de Ipojuca; ao ser atingido o peso calculado pela variação de umidade, colocava-se o papel filtro no topo e na base e repetia-se o processo descrito acima.

Figura 3.6 Etapas do ensaio da curva contração-secagem. a) câmara de umedecimento b) papel filtro e corpo de prova embalado.



Fonte, Autor

4. CARACTERIZAÇÕES E ANÁLISES DO COMPORTAMENTO DE SOLOS EXPANSIVOS

Os resultados das análises físicas, químicas, mineralógicas, microestruturas, avaliação da expansão livre e tensão de expansão dos solos dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.

4.1 Caracterização física do solo

4.1.1 Composição granulométrica

A Figura 4.1 e Tabela 4.1 apresentam as curvas granulométricas e as frações dos solos, respectivamente. O solo de Cabrobó apresentou uma textura fina com mais de 50% passando na peneira nº 200 (ASTM), contendo 37% de argila, 34% de silte e 29% de areia. A fração areia é constituída de 25% de areia fina, 4% de areia média, sem presença de areia grossa e pedregulho. O solo de Ipojuca foi constituído de 67% de argila, 17% de silte e 16% de areia, enquanto que o solo de Paulista foi constituído de 50% de argila, 32% de silte e 18% de areia. Dos solos estudados, o que apresentou a maior quantidade de argila foi o de Ipojuca enquanto o de Cabrobó conteve mais areia.

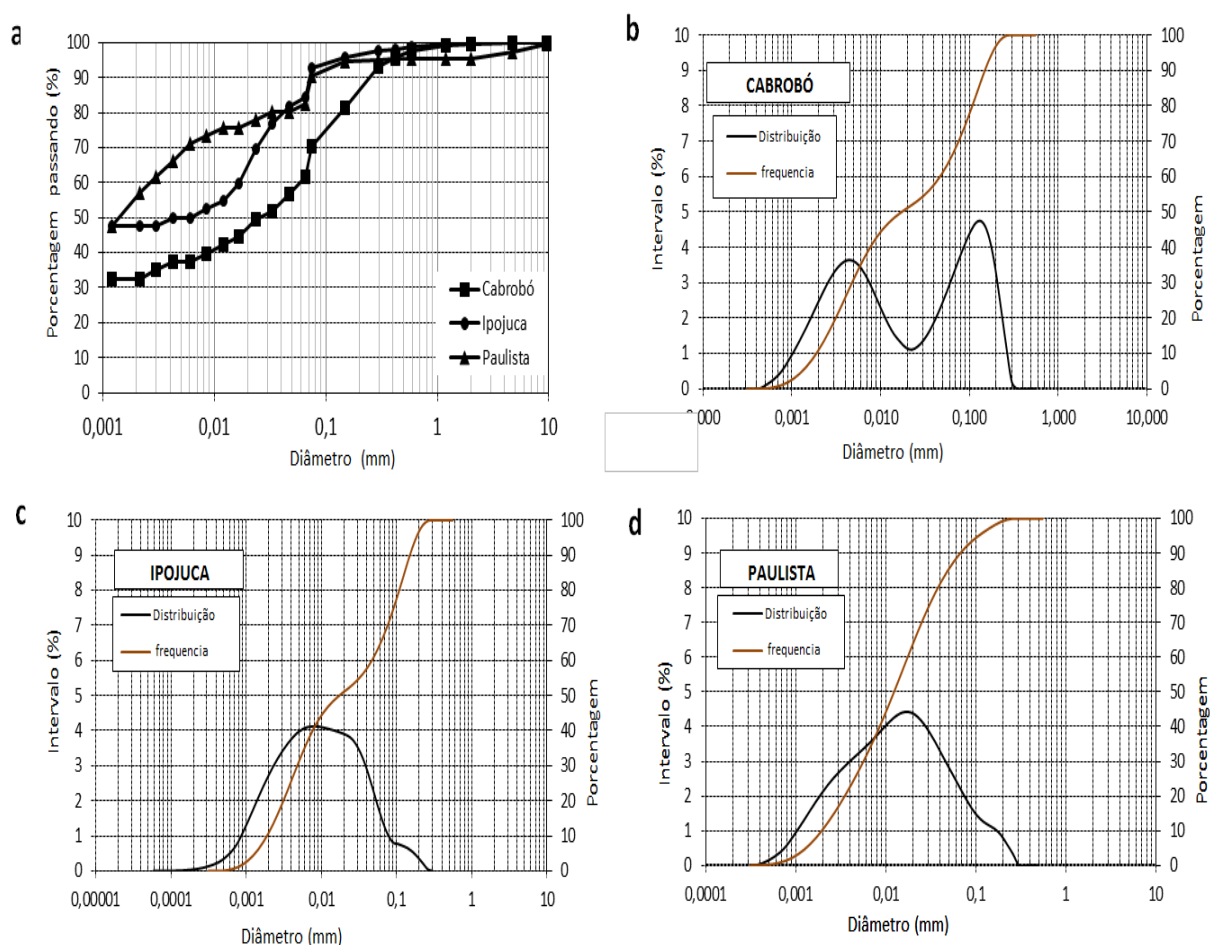
A Figura 4.1 apresenta também a distribuição de frequência dos grãos obtidos através do ensaio de difração à laser, para dimensões menores do que 0,64 mm, nos solos naturais. O solo de Cabrobó apresentou uma distribuição bimodal (Figura 4.1b), o de Ipojuca (Figura 4.1c) e o de Paulista (Figura 4.1d), modal. Segundo Camapum et al. (2014), os solos tropicais possuem suas características estruturais ditadas principalmente pela história de transformação químico-mineralógica pela qual passaram.

Nesse sentido, o perfil de solo deve ser considerado segundo o nível de intemperismo que passou, dividindo-se geralmente em solos profundamente intemperizados (solos lateríticos), solos de transição e solos pouco intemperizados (solos saprolíticos e saprólito). Os solos argilosos expansivos em estado natural apresentam geralmente estrutura com distribuição de poros bimodal (CAMPOS et al, 2008), com clara distinção entre macro e microporos (caso do solo de Cabrobó). Os solos tropicais pouco intemperizados, solos saprolíticos, em especial os finos, apresentam-se com partículas individualizadas ou compondo pacotes de argila (caso do solo de Ipojuca e Paulista).

No solo de Cabrobó, a curva de distribuição de frequência dos grãos foi uniforme, dentro de uma faixa muito estreita dos grãos de 0,002 a 0,02 mm, com pico de frequência acumulada maior que 90%. A curva de frequência apresentou distribuição de partícula com comportamento bimodal (com dois picos). Uma concentração ocorre na faixa de 0,001 a 0,01 mm, com um percentual acumulado próximo de 37%, e uma outra, na faixa de 0,06 a 0,2 mm com pico de frequência acumulado de 47%. Indicando que o solo tem menor quantidade de partícula na faixa de 0,01 a 0,05 mm (Figura 4.1b).

No solo de Ipojuca, a curva de distribuição de frequência dos grãos foi distribuída de uma forma uniforme, dentro de uma faixa de granulometria estreita de 0,002 a 0,2 mm, acumulando uma frequência próximo a 88%. A curva de distribuição das partículas apresentou um pico de 0,01 mm (Figura 4.1c).

Figura 4.1 Curva granulométrica dos solos a) Cabrobó, Ipojuca, Paulista; distribuição de frequência dos grãos b) Cabrobó, c) Ipojuca e d) Paulista



Fonte, Autor

No solo de Paulista, a curva de distribuição de frequência dos grãos apresentou um comportamento semelhante ao solo de Ipojuca, com curva de distribuição de frequência dos grãos uniforme dentro de uma faixa de 0,001 a 0,2 mm com frequência acumulada de 97%. A curva de distribuição das partículas apresentou o pico de 0,02 mm (Figura 4.1d).

Tabela 4.1 Caracterizações física dos solos estudados

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	CABROBÓ	IPOJUCA	PAULISTA
Pedregulho %	0	0	0
Areia %	29	16	18
Silte %	34	17	32
Argila %	37	67	50
Relação Silte/Argila	0,92	0,25	0,64
% < 0,002 mm	30	49	57
WL	37	81	61
WP	18	44	31
IP	19	37	30
Ia = IP / % < 0,002mm	0,63	0,76	0,53
WS %	9	20	11

WL= Limite de Liquidez WP= Limite de Plasticidade IP= Índice de Plasticidade
Ia= Índice de Atividade WS=Limite de Contração

Fonte, Autor

Conforme critérios da maioria das classificações de solos expansivos (CHEN, 1998), os solos analisados possuem uma característica comum a todos os solos expansivos, apresentaram um elevado percentual de partículas < 0,075 mm (67% Cabrobó, 80% Ipojuca e 82% Paulista).

4.1.2 Peso específico real dos grãos

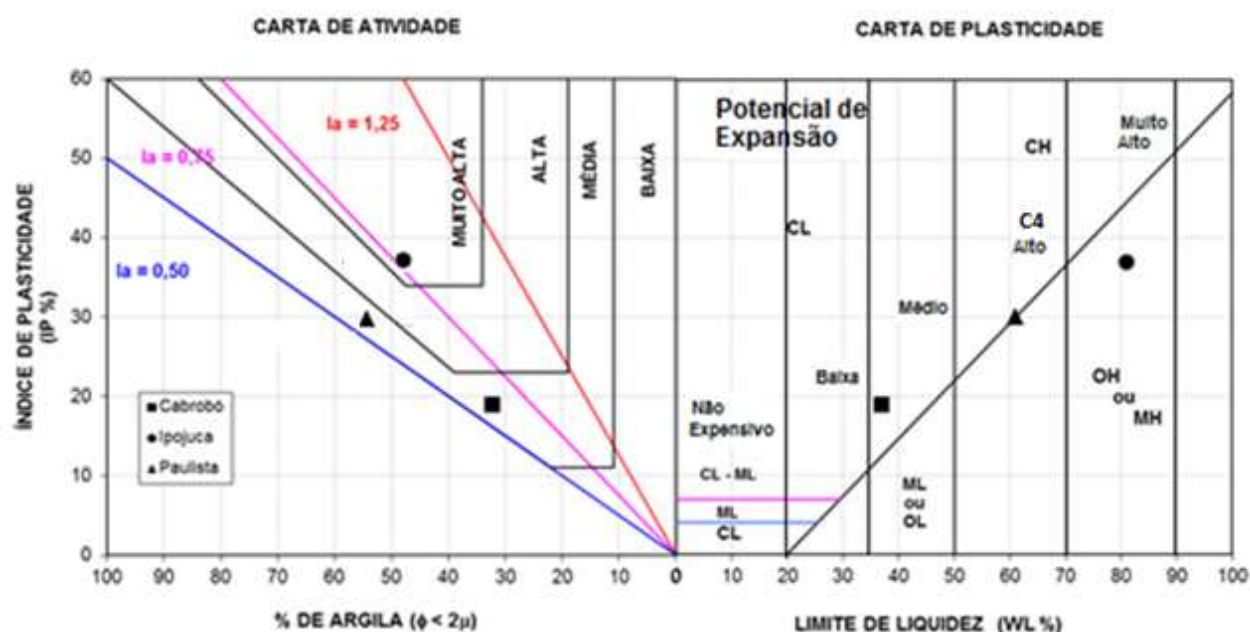
Os valores dos Pesos Específicos Real dos grãos obtidos pelos métodos da ABNT da NBR 7182/86 e pelo picnômetro de gás Hélio, realizado com as amostras dos três municípios foram praticamente iguais. O solo de Cabrobó apresentou valor de 26,06 KN/m³, de Ipojuca 26,26 KN/m³ e de Paulista 26,14 KN/m³.

4.1.3 Consistência

Os resultados dos Limites de Consistência, Índice de Plasticidade e atividade média dos solos são apresentados na Figura 4.2 e Tabela 4.2. O solo de Cabrobó apresentou Limite de

Liquidez de 37%, Índice de Plasticidade de 19% e no solo de Paulista foram determinados Limite de Liquidez de 61% e Índice de Plasticidade, 30%. O solo de Ipojuca apresentou Limite de Liquidez de 81% e Índice de Plasticidade de 37%. Todos os solos têm alta plasticidade ($IP > 15\%$) e atividade média ($0,5 < I_a < 1,25$).

Figura 4.2 Carta de plasticidade e Atividade em solo natural dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista, com critérios de Skempton (1953), Willians (1973) e Daksanamvrthy e Raman (1973).



Fonte, Autor

O solo de Cabrobó apresentou potencial de expansão médio pelos critérios de Seed et al. (1962); Willians e Donaldson (1973) Daksanamvrthy e Raman (1973) e de. O solo de Ipojuca apresentou alto potencial de expansão pelos critérios de Willians (1973) de Seed et al. (1962) e muito alto pelo critério de Daksanamvrthy e Raman (1973). O solo de Paulista apresentou potencial de expansão alto pelos critérios de Seed et al. (1962) e de Daksanamvrthy e Raman (1973) e Willians e Donaldson (1973) (Tabela 4.2).

O solo de Cabrobó apresentou-se como argila de baixa compressibilidade (CL) enquanto o de Ipojuca é um silte de alta compressibilidade (MH) e o solo de paulista uma argila de alta compressibilidade. Na classificação da Tramportation Resarch Board – (TRB), o solo de Cabrobó foi classificado como A-6 e os de Ipojuca e Paulista, A-7-6; todos solos argilosos não foram indicados para uso em subleito de uma estrada.

Tabela 4.2 Potencial de expansão médio pelos critérios.

solo	Seed et al. (1962)	Daksanamvrthy e Raman (1973)	Willians e Donaldson, (1973)
Cabrobó	médio	médio	Médio
Ipojuca	Alto	muitoAlto	Alto
Paulista	Alto	Alto	Alto

Fonte, Autor

Em função dos resultados obtidos, todos os três solos foram indicados para estabilização com cal, por atender aos requisitos: teor de silte e argila superior a 25%, apresentaram IP igual ou superior a 10% e matéria orgânica inferior a 1% (item 4.2) (National Lime Association, 2006). Van Impe (1989) considerou que para o sucesso na estabilização dos solos com uso da cal é necessário que tenha pelo menos 35% de material argiloso.

4.1.4 Compactação

A Figura 4.3a apresenta as curvas de compactação dos três solos obtidos com a elevação gradual da umidade. A curva de compactação do solo de Cabrobó apresentou dois picos, sendo o primeiro associado ao peso específico aparente seco de $15,97 \text{ kN/m}^3$ e a umidade ótima (W_{ot}) de 8,50% e o segundo pico, peso específico seco máximo (γ_{dmax}) de $17,90 \text{ kN/m}^3$ e umidade ótima (W_{ot}) de 15,20%.

A curva de compactação do solo de Ipojuca também apresentou pico duplo, sendo o primeiro associado ao peso específico aparente seco de $13,19 \text{ kN/m}^3$ e à umidade ótima (W_{ot}) de 18,30% e o segundo pico, ao peso específico seco máximo (γ_{dmax}) de $12,40 \text{ kN/m}^3$ e à umidade ótima (W_{ot}) de 38,00%.

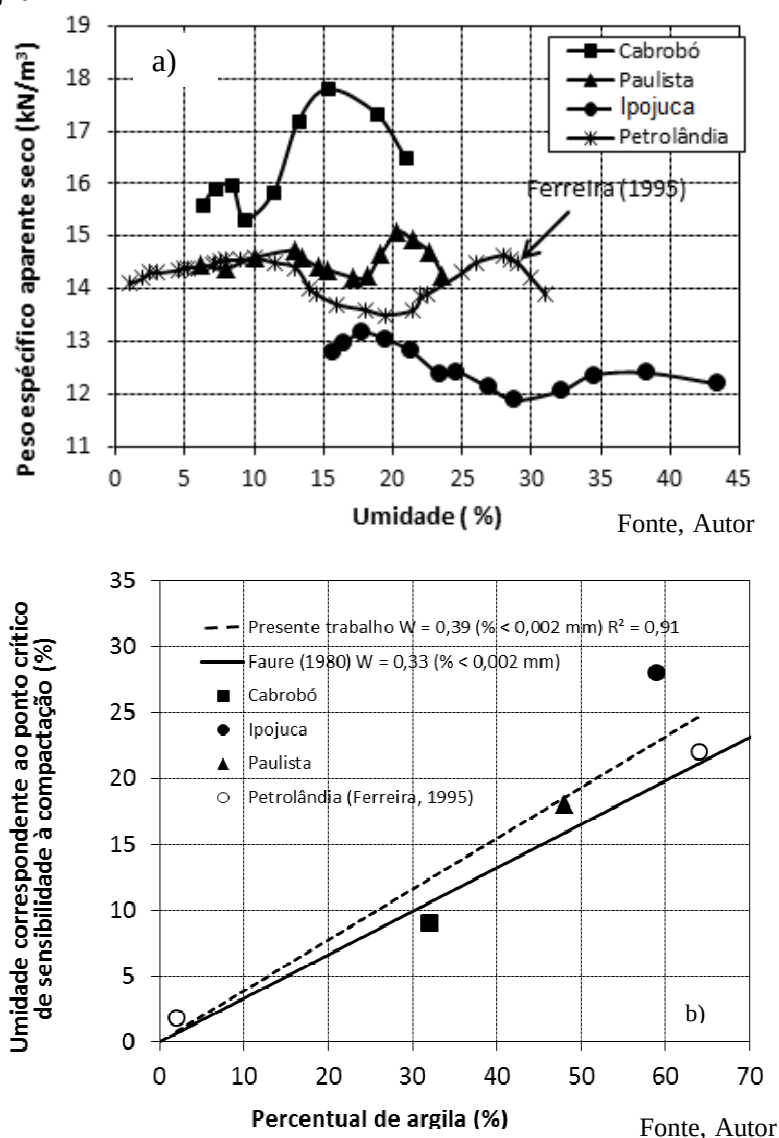
Os resultados do solo de Paulista também indicaram um pico duplo, sendo o primeiro associado ao peso específico aparente seco (γ_{dmax}) de $14,80 \text{ kN/m}^3$ e à umidade ótima (W_{ot}) de 12,50% e o segundo pico, ao peso específico seco máximo (γ_{dmax}) de $15,00 \text{ kN/m}^3$ e à umidade ótima (W_{ot}) de 21%.

O formato da curva de compactação dos três solos analisados foi do tipo I, segundo a classificação de Maccarini et al. (1991) e do tipo C, por Lee e Suedkamp (1972). Segundo esses autores, o formato da curva de compactação com pico duplo é encontrada em solos com limite de liquidez entre 30 e 70%, muito coesivo e possuem argilomineral montmorilonita, o solo de Ipojuca apresentou LL 81% e mesmo estando fora desse limite apresentou pico duplo.

Os solos estudados apresentaram essas características de acordo com o item 4.1.3 o qual será discutido no item 4.3.

A relação entre o valor de umidade relativo ao ponto crítico de sensibilidade à compactação e ao percentual de argila encontrado por Faure (1980) correspondeu a 0,33 enquanto o valor determinado nesse trabalho correspondeu a 0,39 (Figura 4.3b).

Figura 4.3 a) – Curva de Compactação do Solo de Cabrobó, Ipojuca e Paulista, b) Relação entre o valor de umidade relativo ao ponto crítico de sensibilidade à compactação e ao percentual de argila



A presença de pico duplo é explicado pelo fato de quando se adiciona uma pequena quantidade de água ao solo seco ao ar e se homogeneizar, a água apenas molha a extremidade do grumo e a energia de compactação não é suficiente para separar as partículas dos grumos devido à alta resistência do solo seco, apresentando o solo como se tivesse uma granulometria

diferente, mais granular, produzindo assim o primeiro pico com peso específico aparente seco e umidade. Com o aumento da umidade, os grumos ficam úmidos, diminuindo sua resistência ao esforço mecânico. Assim, o solo se comporta com a sua granulometria real, apresentando o segundo pico. Comportamento semelhante foi encontrado por Ferreira (1995) e Ferreira et al. (2012) em solos expansivos de Suape, Paulista e Petrolândia, em Pernambuco

4.2 Caracterização química

Os parâmetros químicos são modificados com os diferentes minerais argílico devido ao grau de meteorização ou intemperismo e ao tipo do mineral que deu origem ao solo, alterando o pH, a capacidade de troca de cátions, a matéria orgânica, a condutividade elétrica, entre outros parâmetros (RODRIGUES, SOUSA, 2002).

Os resultados da caracterização química dos solos obtidos estão mostrados na Tabela 4.3. Os cátions trocáveis calculados como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e os íons H^+ + Al^{3+} são conhecidos por acidez extraível.

A acidez do solo foi determinada relacionando o pH em água, com o pH em KCl, sendo associado à presença de argilomineral em processo de intemperização e pela presença de alumínio trocável (H^+ a Al^{3+}), responsável pela floculação do argilomineral. Segundo Guimarães (2002), classifica-se o solo em função do seu pH - extremamente ácido: $\text{pH} \leq 4,3$; fortemente ácido: $4,3 < \text{pH} < 4,4$; ácido: $4,4 < \text{pH} < 4,5$; moderadamente ácido: $4,5 < \text{pH} < 5,9$; levemente ácido: $6,0 < \text{pH} < 6,5$; neutro: $6,6 < \text{pH} < 7,3$ alcalino: $7,4 < \text{pH} < 8$ e fortemente alcalino: $\text{pH} > 8,0$. Baseado nessa classificação, o solo de Cabrobó foi classificado como fortemente alcalino, o solo de Ipojuca como moderadamente ácido e o de Paulista de ácido.

O solo de Cabrobó apresentou Capacidade de Troca Catiônica ($\text{CTC} = \text{T}$) com valor de 31,13 $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$ e alta atividade $\text{Ta} > 27 \text{ cmol}_\text{c}/\text{kg}$. Tem saturação por base (valor V) expressa em porcentagem superior a 50%, sendo um solo eutrófico (solo fértil). Os valores de saturação com sódio ($100 \text{ Na}^+/\text{T}$) são superiores a 6% e inferiores a 15%, caracterizando o caráter solódico. A condutividade elétrica do extrato de saturação é alta 250 μS (maior que 7 μS), indicando alta salinidade justificada pelo teor elevado de finos e a dificuldade na penetração da água.

Os resultados para o solo de Ipojuca apresentaram Capacidade de Troca Catiônica (CTC) de 63,0 cmol_c/kg, indicando alta atividade. A saturação por base superior a 50%, sendo um solo eutrófico (solo fértil). A saturação por sódio foi o menor resultado entre os três solos estudados dentro do intervalo de classificação de solo solódico. A condutividade elétrica foi alta (CE = 115 μS), caracterizando uma salinidade alta.

Tabela 4.3 Caracterização química do solo natural de Cabrobó, Ipojuca e Paulista

Determinações	Local do solo Unidade	Cabrobó	Ipojuca	Paulista
pH _{H2O}	--	8,60	5,55	5,22
pH _{KCl}	--	6,45	3,57	3,17
pH _{CaCl2}	--	7,92	4,82	3,61
Carbono Orgânico	%	0,04	0,04	0,09
Matéria Orgânica	%	0,07	0,07	0,16
Condutividade Elétrica	μS	250	115	303
Sódio (Na ⁺)	cmol _c /kg	3,13	0,22	14,6
Potássio (K ⁺)	cmol _c /kg	0,11	0,44	5,01
Cálcio (Ca ²⁺)	cmol _c /kg	12,80	26,00	2,30
Magnésio (Mg ²⁺)	cmol _c /kg	12,00	2,40	4,40
Alumínio (Al ³⁺)	cmol _c /kg	0,20	7,80	10,10
Hidrogênio (H ⁺)	cmol _c /kg	10,40	4,50	9,80
Soma de cátions (S)	cmol _c /kg	29,53	29,06	36,30
Capacidade troca Cátions (T ou CTC)	cmol _c /kg	31,13	63,00	46,30
Percentagem de Retenção de cátions RC	%	92,90	70,20	41,73
Percentagem de saturação de base V	%	94,86	46,10	56,80
Percentagem de saturação de alumínio m	%	0,67	22,00	27,7
Percentagem de Saturação de Sódio n	%	10,05	0,35	31,50
$V=100 \times \frac{S}{T}; \quad m=100 \times \frac{Al^{3+}}{S+Al^{3+}}; \quad S=Na^{+}+K^{+}+Ca^{2+}+Mg^{2+}; \quad CTC=S+Al^{3+}+H^{+};$ $n=100 \times \frac{Na^{+}}{T}; \quad RC=100 \times \frac{S+Al^{3+}}{\% \text{ argila}}$				

Fonte, Autor

O solo de Paulista apresentou CTC de 46,3 cmol_c/kg, sendo um solo de alta atividade, saturação por base superior a 50%; sendo também um solo eutrófico. A saturação por sódio foi superior a 15%, caracterizando o caráter sódico. A condutividade elétrica elevada (CE = 303 μS) caracterizou esse solo como pouco permeável.

Buol et al. (1997) definiram que a capacidade de troca catiônica de um solo pode explicar algumas propriedades, como: intemperismo, tipo do minerais argílico e expansividade. Afirmou, ainda, que os solos minerais com CTC maiores que 20 cmol_c/Kg podem apresentar

altos teores de montmorilonita, sendo assim, um solo expansivo. A EMBRAPA (2001) mostra como referência 27 cmolc/Kg, para distinguir valores altos de CTC, de valores baixos. Com base nessas referências, os solos estudados apresentaram alta Capacidade de Troca Catiônica nos três municípios, justificado pela baixa permeabilidade e pela presença do argilomineral montmorilonita; no item 4.3, será abordada a mineralogia dos solos.

A quantidade de Matéria Orgânica (MO) regula a quantidade da CTC no solo, controlando a estabilização do solo pelo aquecimento e controlando a permeabilidade do solo. Nos solos de Cabrobó e Ipojuca foram determinadas a matéria orgânica (MO) de 0,07% enquanto no solo de Paulista, 0,16%. Por conseguinte, os solos estudados não apresentaram resultado significativo de matéria orgânica, pois segundo a EMBRAPA (1997), um solo rico em MO possui teores superiores a 5%. De acordo com as diretrizes da National Lime Association (2006), o teor de matéria orgânica não deve ultrapassar o valor de 1% em solo apto à estabilização com cal.

A análise química dos óxidos existente nos solos, realizada pelo método de fluorescência de raios-X, está indicada na Tabela 4.4. Em todos os casos, os óxidos de silício, de ferro e de alumínio prevaleceram sobre os demais.

Tabela 4.4 Valores das porcentagens de óxidos e Perda ao fogo dos solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista

Óxidos	Local		
	Cabrobó (%)	Ipojuca (%)	Paulista (%)
SiO ₂	60,75	39,45	65,54
Al ₂ O ₃	12,97	21,17	15,27
Fe ₂ O _{3t}	4,39	18,62	5,05
MgO	0,75	1,28	0,68
MnO	0,06	0,14	0,00
CaO	2,93	0,14	0,14
Na ₂ O	0,94	0,00	0,00
K ₂ O	2,24	0,21	1,77
TiO ₂	0,82	4,74	0,87
P ₂ O ₅	0,02	0,31	0,02
PF	10,37	15,83	11,88
TOTAL	96,23	101,88	101,21

Fonte, Autor

O óxido de silício no solo de Cabrobó e de Paulista foi superior quatro vezes ao óxido de alumínio e no solo de Ipojuca, é menor que duas vezes. No solo de Cabrobó, o percentual da soma dos óxidos de magnésio + cálcio foi superior em mais de duas vezes aos dos solos de Ipojuca e Paulista, (Tabela 4.4), indicando que o processo de estabilização requer menor adição de cal, como será discutido no item 5.2.

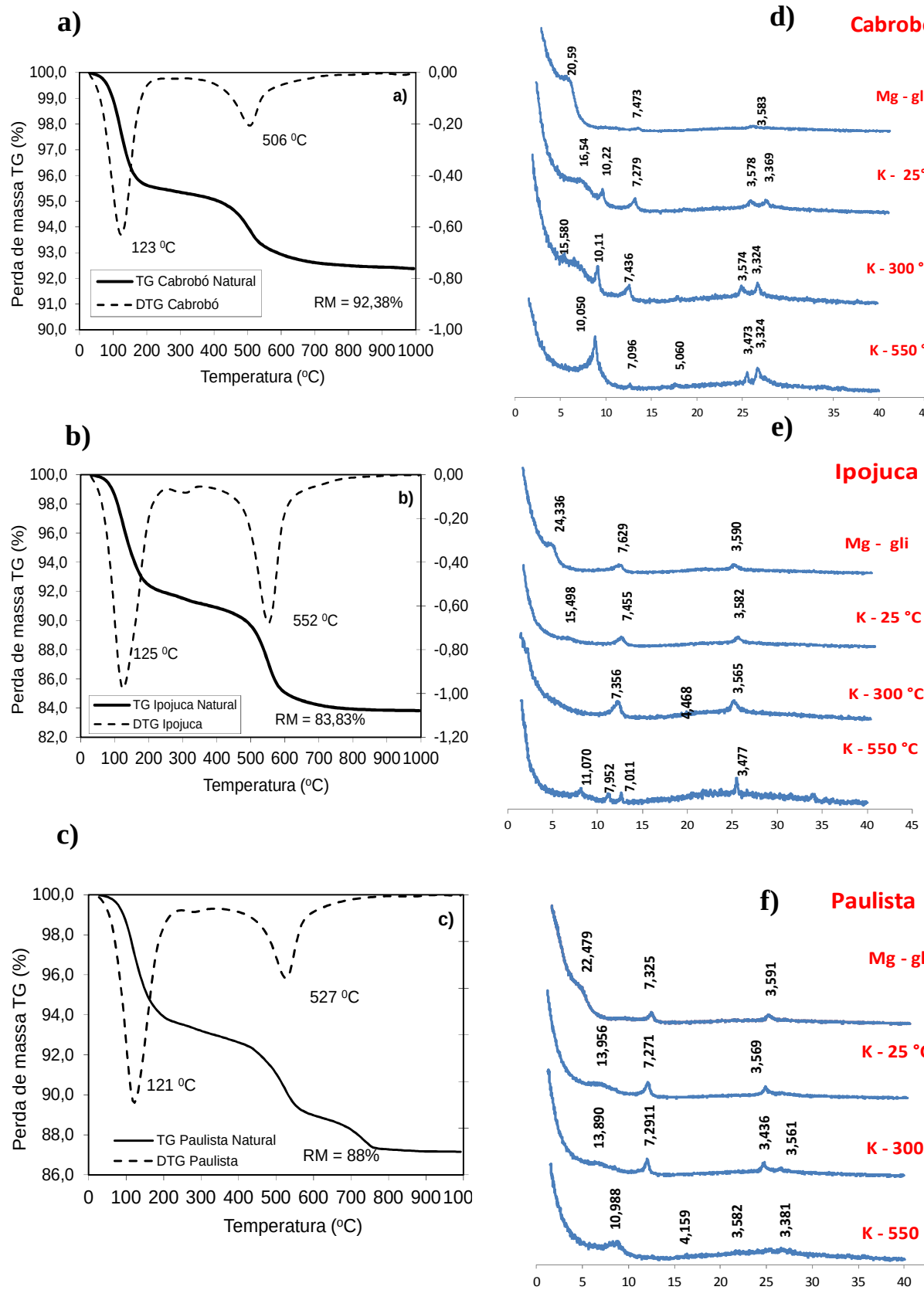
4.3 Caracterização mineralógica

A mineralogia controla o tamanho das estruturas, da forma, das propriedades químicas e das propriedades físicas de todas as partículas do solo, responsável diretamente do seu comportamento hídrico e mecânico (CARVALHO et al, 2015). Alguns minerais têm importância fundamental para o comportamento hidromecânico dos solos quando saturados ou não saturados, pela frequência da sua presença e pela influência deles sobre o comportamento analisado.

A Figura 4.4 mostra as curvas da TG (Termogravimetria) e DTG (Termogravimetria Derivada) para os solos naturais e os valores das perdas de massa e massa residual, correspondentes às temperaturas, para os solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista. Mostra também a difratograma de raios-X dos solos.

Na análise da TG/DTG do solo de Cabrobó (Figura 4.4a), entre 100°C até 250°C, foi determinado um pico endotérmico intenso de perda de água; a 400°C, inicia-se a reação de desidroxilação do hidróxido de esmectita que é completada a 650°C. Os difratogramas de raios-X apresentados na Figura (4.4d) para o solo, indica que há uma interestratificação irregular, envolvendo minerais do tipo 2:1 Mica, Clorita e expansivos (esmectitas e vermiculitas), além da presença da montmorilonita.

Figura 4.4 Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma para os solos naturais de: a) e d) Cabrobó, b) e e) Ipojuca e c) e f) Paulista



No solo de Ipojuca a TG/DTG (Figura 4.4b), entre 100°C até 250°C, apresentou um pico endotérmico intenso de perda de água; a 400°C, iniciou-se a reação de desidroxilação do hidróxido de esmectita que foi complementada a 700°C. Os difratogramas de raios-X apresentados na Figura (4.4e) indicaram que há uma interestratificação irregular, envolvendo minerais do tipo 2:1 Mica e expansivos (esmectitas e vermiculitas), além da presença da Clorita.

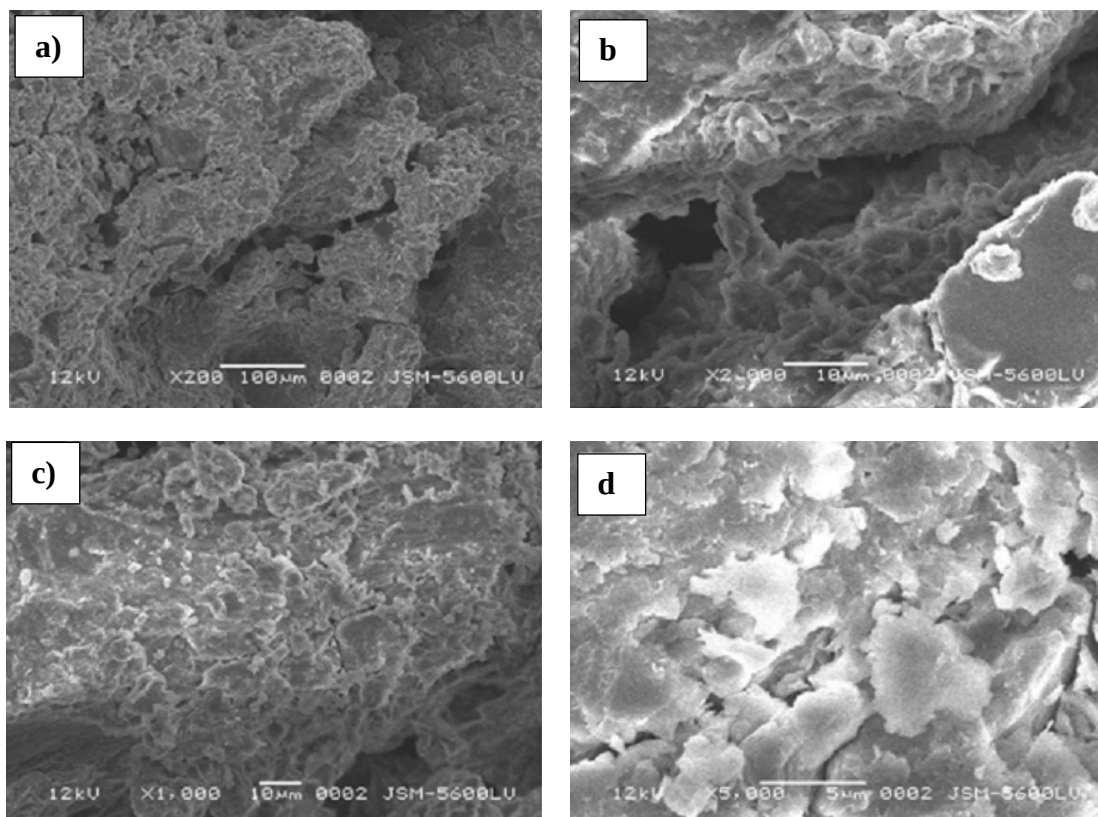
No solo de Paulista a TG/DTG (Figura 4.4 c), apresentou também um pico entre 100°C até 250°C, endotérmico intenso de perda de água; a 400°C, iniciou-se a reação de desidroxilação do hidróxido de esmectita que foi complementada a 750°C. Os difratogramas de raios-X, apresentados na Figura (4.4 f) indicaram que há uma interestratificação irregular, envolvendo minerais do tipo 2:1, Mica e expansivos (esmectita e vermiculitas), além da presença de Caulinita.

4.4 Caracterização das microestruturas dos solos

A eletromicrografia dos solos obtida a partir de amostras indeformadas de Cabrobó e Paulista e compactadas na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para Ipojuca, pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é ilustrada na Figura 4.5 para o solo de Cabrobó; na Figura 4.6 para o solo de Ipojuca e na Figura 4.7 para o solo de Paulista; a microestrutura dos três solos são semelhantes. Verificou-se uma macroestrutura prismática formada por fortes e grandes blocos angulares e subangulares. A microestrutura é caracterizada pela arrumação contínua, formada pela união dos microagregados, composto por um plasma argiloso.

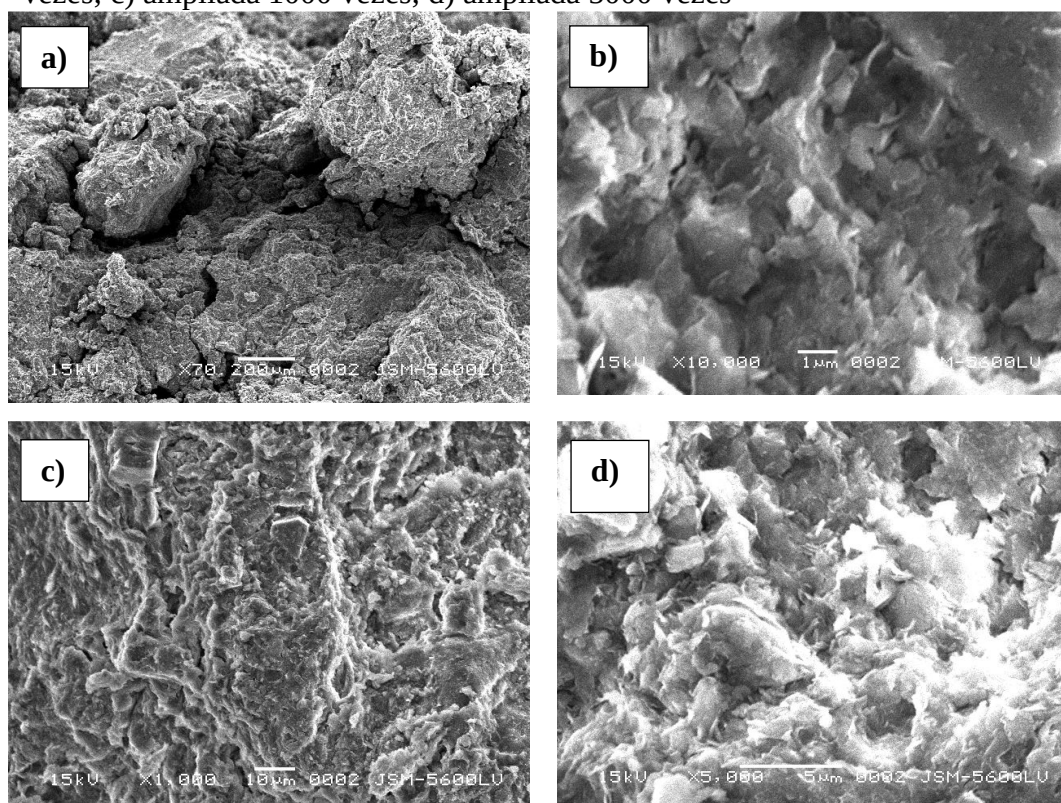
A textura dos solos é caracterizada por uma textura fina com parte predominante de argilas silicatadas prensadas por cristais de calcitas (em maior intensidade no solo de Cabrobó) que compõem grande parte da fração silte e areia fina. Encontra-se pápulos por vezes lamelados e provavelmente provenientes do enchimento de canais e poros aplanados. Há uma grande quantidade de poros aplanados, fruto da expansão e contração típicas de argilas de alta atividade. Cavidades “Vugh” também ocorrem, sendo predominante do tipo interconectado.

Figura 4.5 Eletromicrografias do solo de Cabrobó a) aumentada 200 vezes, b) aumentado 2000 vezes c) 1000 vezes e d) 5.000 vezes.



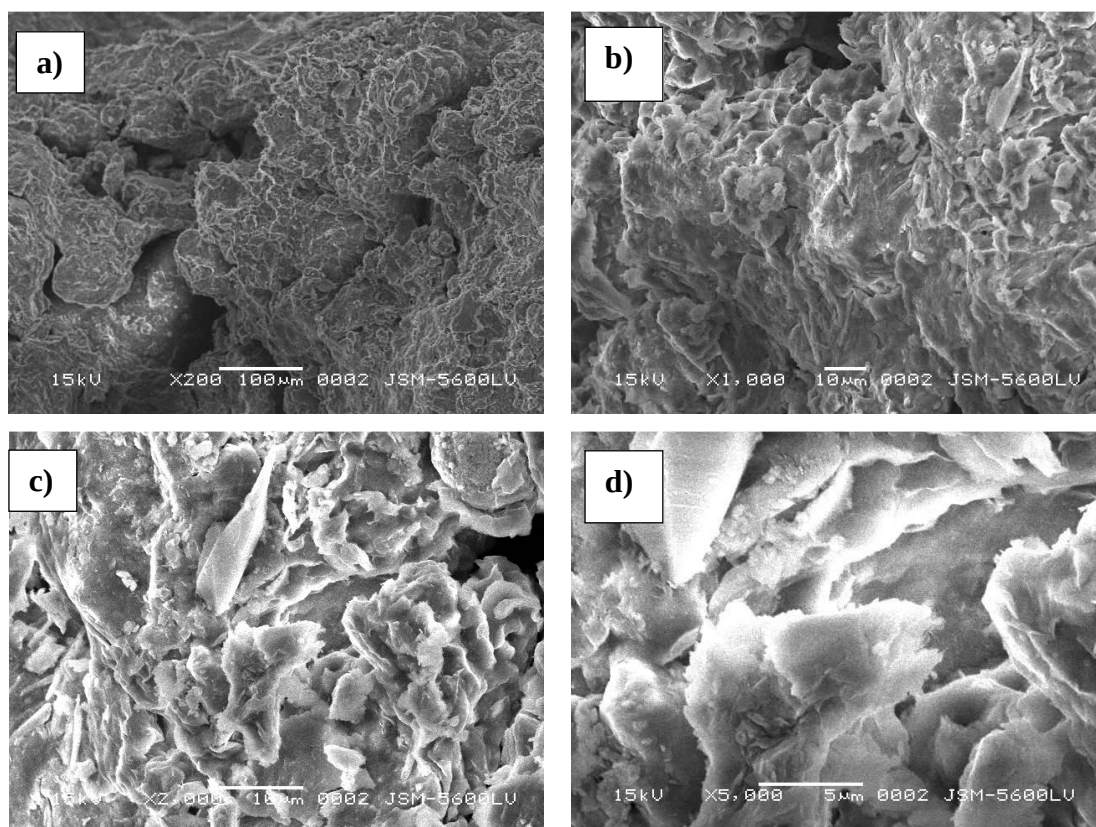
Fonte, Autor

Figura 4.6 Eletromicrografias do solo de Ipojuca a) ampliada 70 vezes; b) ampliada 10.000 vezes; c) ampliada 1000 vezes; d) ampliada 5000 vezes



Fonte, Autor

Figura 4.7 Eletromicrografias do solo expansivo de Paulista com aumentos de: a) 200 vezes, b) 1000 vezes; c) 2000 vezes e d) 5000 vezes



Fonte, Autor

4.5 Relações entre umidade, grau de saturação, índice de vazios e sucção na curva de secagem-contração (amostras compactadas).

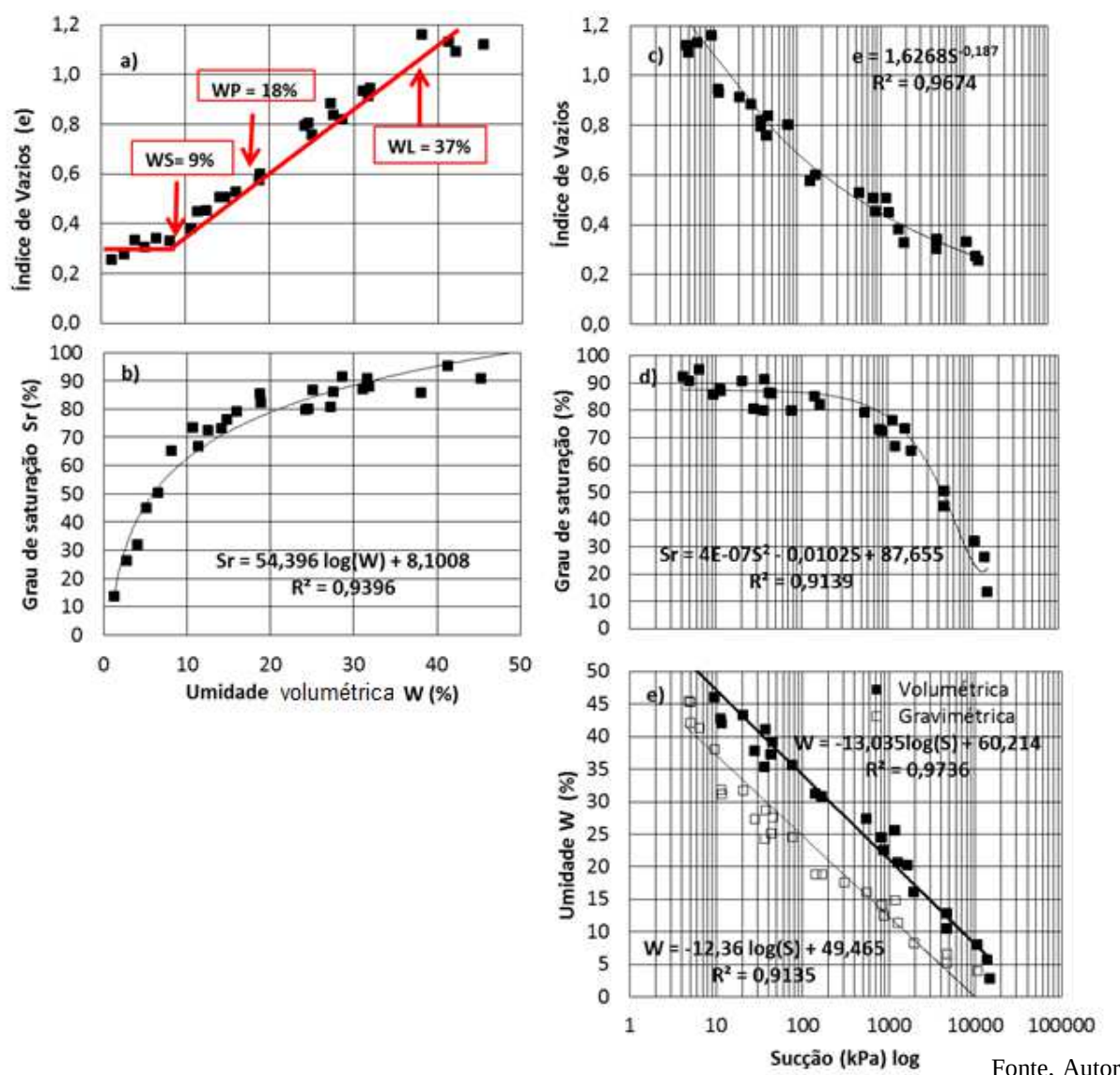
O solo como um material poroso possui um determinado volume de vazios podendo, está totalmente preenchido por um líquido (normalmente a água), cheio de ar (solo seco) ou ainda com fração de ambos, formando o solo não saturado. As relações entre a umidade, grau de saturação, índice de vazios e sucção na curva de contração são ilustrados nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, respectivamente, para os solos expansivos de Cabrobó, de Ipojuca e de Paulista.

As curvas de variação de índice de vazios com a umidade ($e \times W$) no processo de secagem, do solo de Cabrobó (Figura 4.8a), do solo de Ipojuca (Figura 4.9a) e do solo de Paulista (Figura 4.10a), são próximas das paralelas à linha de saturação ($e = G_s W$) dos respectivos solos até a umidade próxima ao limite de contração (W_s) quando o índice de vazios torna-se praticamente constante com a redução de umidade.

A relação entre umidade e grau de saturação ($W \times S_r$) permite determinar a umidade onde ocorre a dessaturação das amostras inicialmente saturadas ou “quase saturadas”, e indica o

ponto onde o ar começa a entrar no solo, mudando de forma acentuada a quantidade de variação de saturação. No solo de Cabrobó (Figura 4.8b) a umidade é de 30%, no solo de Ipojuca (Figura 4.9b) a umidade é 26% e solo de Paulista 35% (Figura 4.10b).

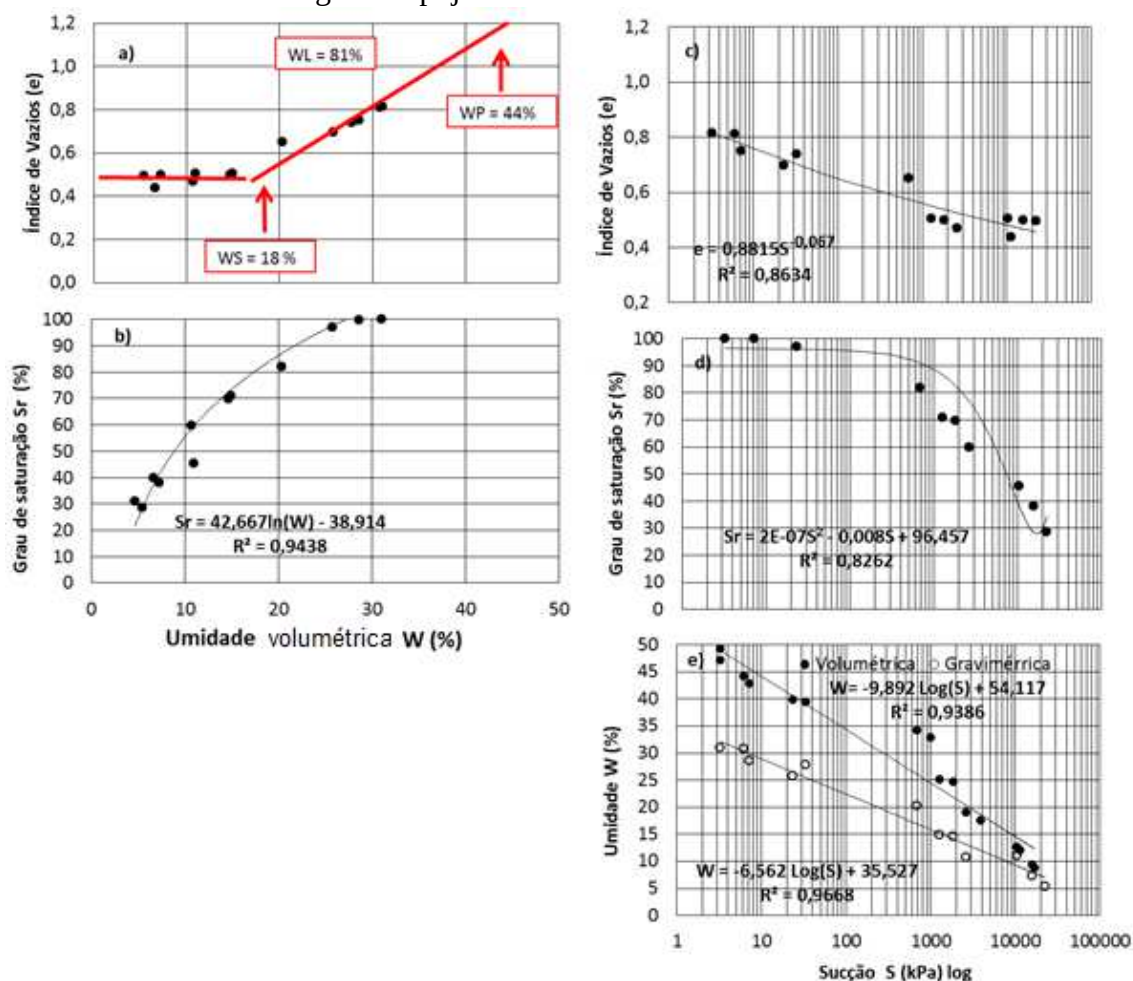
Figura 4.8 Relações entre umidade, grau de saturação, índice de vazios e sucção para as amostras da argila de Cabrobó



A relação entre o índice de vazios (e), grau de saturação (Sr) e sucção (S) permite determinar o ponto de entrada generalizada de ar, que situa-se em torno de 10 MPa para os três solos (Figuras 4.8 c e d; Figuras 4.9 c e d e Figuras 4.10 c e d), valor típico de solos na zona ativa. A ausência de dados na Figura 4.9 c e d no intervalo de 40 a 400 kPa foi ocasionado por problemas técnicos.

A relação entre umidade de saturação, grau de saturação, índice de vazios e sucção obtidos para os solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista são similares às obtidas por Marinho (1994) em argilas compactadas de Londres em argilas azul Italiana e por Silva (2010) em argilas do Janga. Figura 4.8c), Figura 4.9c) e Figura 4.10c).

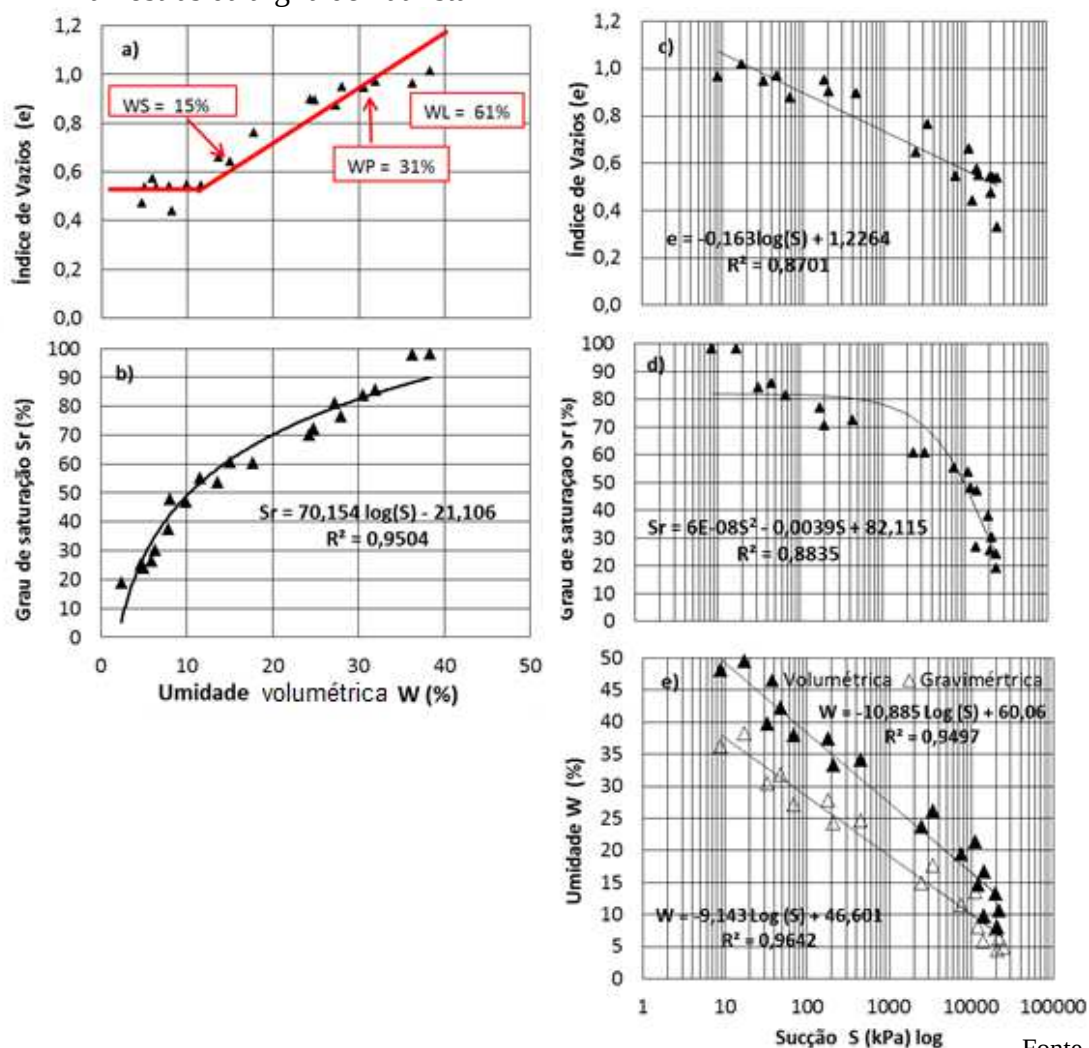
Figura 4.9 Relações entre umidade, grau de saturação, índice de vazios e sucção para as amostras da argila de Ipojuca



Fonte, Autor

A Figura 4.11 apresenta uma relação entre as fases, sólida líquida e gasosa para os solos de Cabrobó (a e b), Ipojuca (c e d) e Paulista (e e f) na curva de contração. À medida que o solo perde água (fase líquida), há um acréscimo do volume da fase gasosa; a fase sólida fica constante e a sucção cresce evidenciando uma redução no volume total do solo (Figura 4.11 a, c e e). Considerando agora que o volume total para cada amostra do solo corresponde a 100%, o volume relativo da fase líquida diminui e os volumes das fases sólidas e gasosas crescem com o acréscimo da sucção (Figura 4.11 b, d e f).

Figura 4.10 Relações entre umidade, grau de saturação, índice de vazios e sucção para as amostras da argila de Paulista

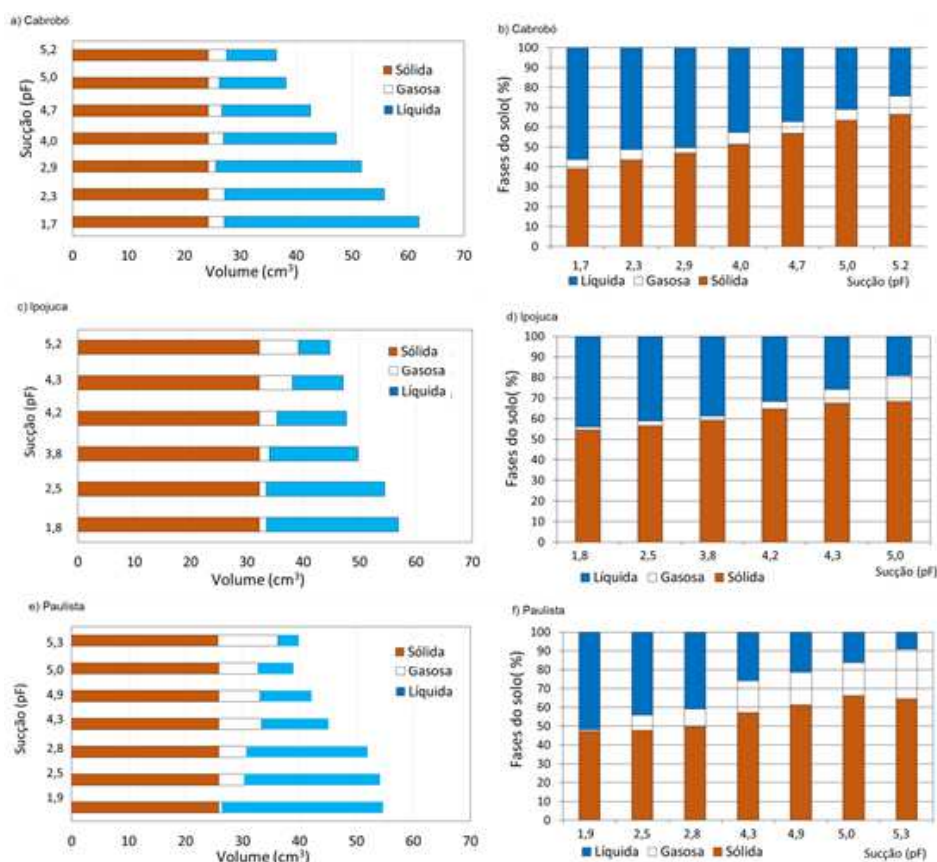


Fonte, Autor

Os valores da Capacidade Diferencial de Umidade ($C = \Delta W / \Delta \log(\text{sucção})$) obtidos a partir da relação entre a sucção e umidade na curva de contração-secagem (Figura 4.9 a Figura 4.11) foram 12,36% no solo de Cabrobó, 9,14% no solo de Ipojuca e 6,56% no solo de Paulista. Jucá (1990) obteve o valor de 10,40% para a argila expansiva, Gris e Ferreira (1995) obteve o valor de 3,8% para a argila expansiva de Petrolândia-PE.

Os valores das sucções iniciais, obtidas pelo método de papel filtro em amostras indeformadas dos solos foram 6,16 Mpa no solo de Cabrobó, 3,02 Mpa no solo de Ipojuca e 12,01 MPa no solo de Paulista correspondentes a umidade de campo (gravimétrica). Ferreira (1995) obteve a sucção de 4,90 Mpa na argila de Petrolândia-PE localizada em um clima Semiárido em período seco. Silva (2010) obteve para a argila de Paulista a sucção de 13,0 MPa em período seco.

Figura 4.11 Relações entre as fases, sólida líquida e gasosa para os solos de Cabrobó (a e b), Ipojuca (c e d) e Paulista (e e f) na curva de contração



Fonte, Autor

4.6 Avaliação da expansão livre e tensão de expansão

4.6.1 Expansão "livre"

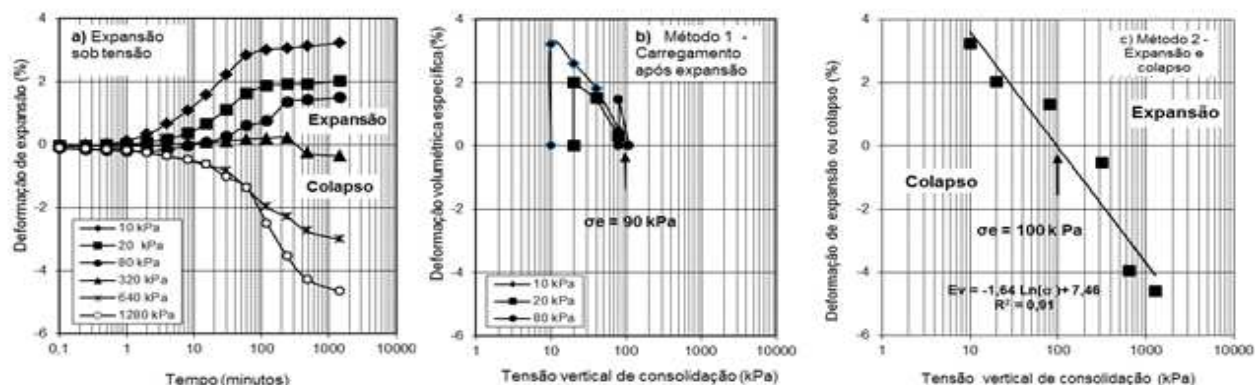
A expansão "livre" determinada nas análises foi de 3,20% no solo de Cabrobó (Figura 4.12), 12,00% no solo de Ipojuca (Figura 4.13) e 10,70% no solo de Paulista (Figura 4.14). Pelo critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), inundação a 10 kPa no solo de Cabrobó tem um grau de expansividade médio e nos solos de Paulista e Ipojuca, alto. Os valores dos índices físicos do solo na condição que foram determinados e encontram-se no Apêndice.

4.6.2 Tensão de expansão

Os métodos para obtenção da Tensão de expansão utilizados para os solos estudados (Expansão sob tensão, Método 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação e Método 2 - Expansão e colapso) são apresentados na Figura 4.12a para o solo de Cabrobó, na Figura 4.13a para o solo de Ipojuca e na Figura 4.14a para o solo de Paulista.

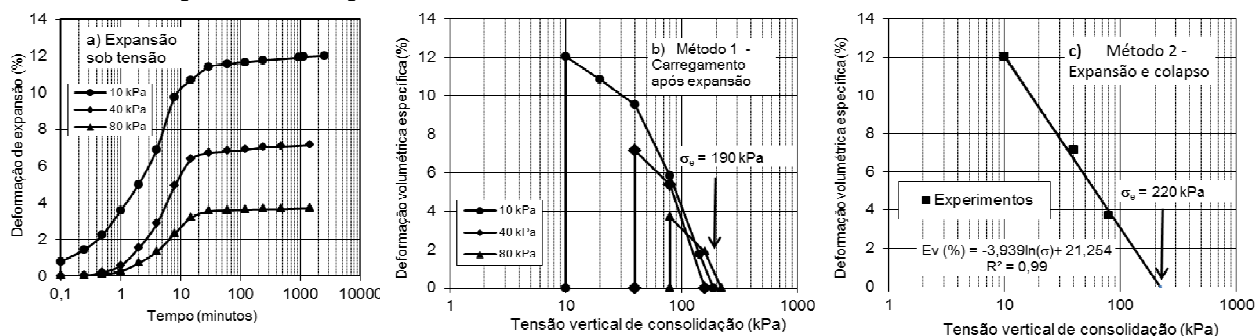
Os valores da tensão de expansão do solo determinados por diferentes trajetórias de tensões, que correspondem a diferentes métodos, são apresentados na Tabela 4.5.

Figura 4.12 Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Cabrobó: a) Expansão sob tensão, b) Método 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 - Expansão e colapso



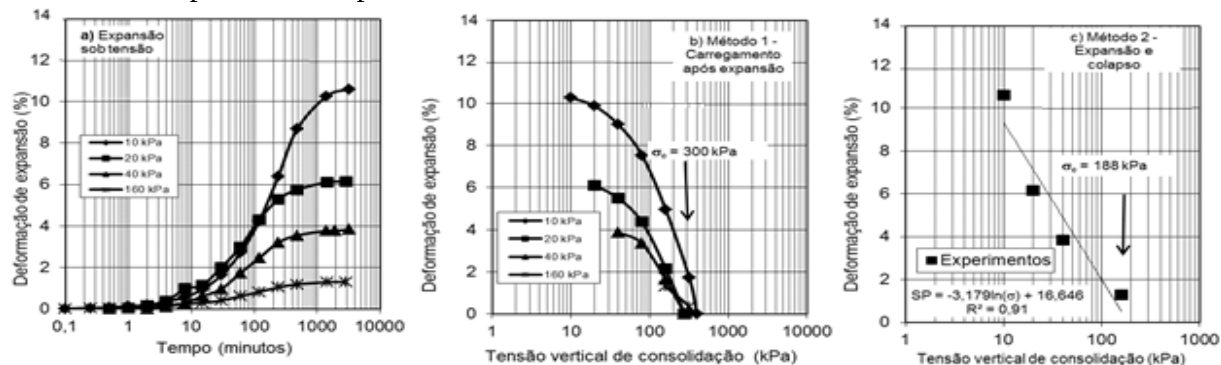
Fonte, Autor

Figura 4.13 Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Ipojuca: a) Expansão sob tensão, b) Método 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 - Expansão e colapso



Fonte, Autor

Figura 4.14 Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Paulista: a) Expansão sob tensão, b) Método 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 - Expansão e colapso



Fonte, Autor

Considerando os valores médios da tensão de expansão (Tabela 4.5), o solo expansivo de Paulista apresentou valores maiores que os de Cabrobó e de Ipojuca. E os valores das tensões de Cabrobó apresentaram menor valor, chegando a valores menores que 50% dos solos de

Ipojuca e de Paulista. Comportamento similar ao solo de Paulista foi obtido na argila de Petrolândia - PE por Ferreira e Ferreira (2009) e por Delgado (1986), na argila compactada de Arahá-A, coletada da Barreira La Paz de Arahá (Sevilla).

Tabela 4.5 Tensão de expansão dos solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista

Método de Tensão de Expansão				Tensão de Expansão (kPa)				
				Cabrobó	Ipojuca	Paulista	Petrolândia Ferreira e Ferreira (2009)	Sevilla Delgado (1986)
Carregamento	após	expansão	com	90	190	300	333	260
diferentes tensões verticais de consolidação								
Expansão e colapso sob tensão				100	220	180	239	150
Volume constante				87	245	275	242	193
Média.				92	218	252	271	201

Fonte, Autor

Considerando os valores médios das tensões de expansão, o solo de Cabrobó foi classificado com grau de expansividade média; o de Ipojuca e de Paulista apresentaram grau de expansividade alta pelo critério de Rodriguez e Ortiz (1975) e considerando o critério de Jimenez (1980), o valor de expansão do solo de Cabrobó causa fissuras importantes nas edificações e os solos de Ipojuca e de Paulista podem apresentar danos que levam à demolição das edificações.

4.6.3 Resistência à compressão simples

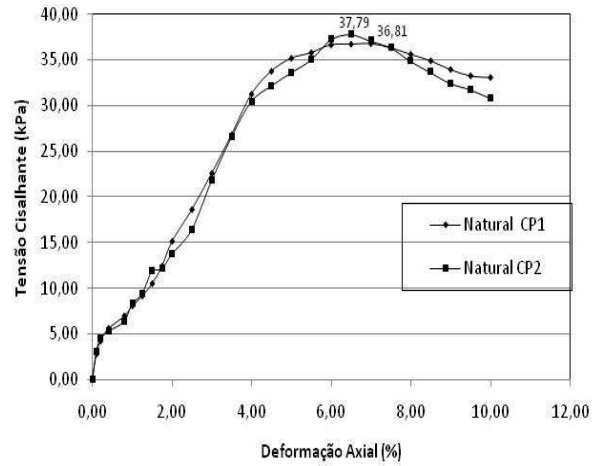
Para o solo do município de Cabrobó, o ensaio de resistência à compressão simples para dois corpos de provas são apresentados na Figura 4.15. Para o solo compactado, observa-se que houve uma resistência à compressão simples em média de 37,3 kPa. As formas da curva de resistência à compressão simples em relação à deformação são relativamente parecidas para os dois corpos de prova, apresentando um comportamento de pico-friável na curva tensão deformação.

O solo do município de Ipojuca apresentou no ensaio de resistência à compressão simples para o solo compactado com dois corpos de provas (Figura 4.16), uma média de 317 kPa. Com a curva de resistência à compressão simples relacionada à deformação com uma curva de comportamento de pico-friável, para a curva de tensão e deformação.

O solo do município de Paulista apresentou no ensaio de resistência à compressão simples, para o solo compactado com dois corpos de provas (Figura 4.17), uma média de 203,4 KPa.

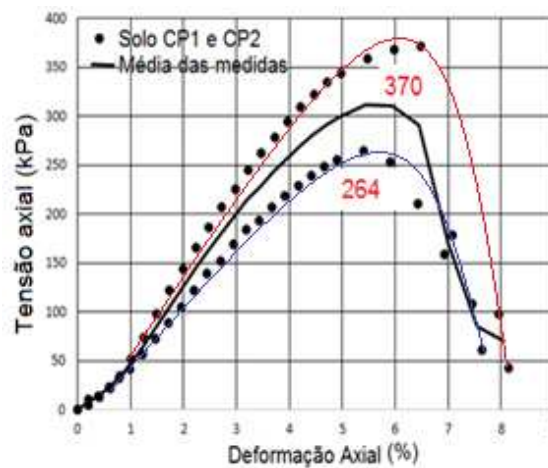
As curvas dos dois corpos de provas apresentaram comportamento plástico para a relação tensão e deformação.

Figura 4.15 Relação entre tensão axial e a deformação axial do solo de Cabrobó



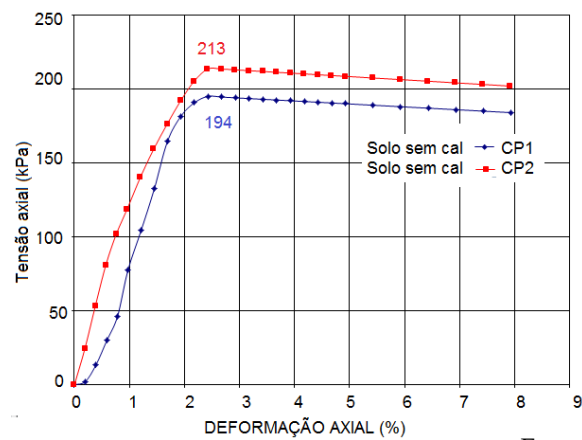
Fonte, Autor

Figura 4.16 Relação entre tensão axial e a deformação axial do solo de Ipojuca



Fonte, Autor

Figura 4.17 – Resistência à Compressão Simples do solo em relação à deformação, do município de Paulista



Fonte, Autor

5 CARACTERIZAÇÕES E ANÁLISES DO COMPORTAMENTO DA CAL E DAS MISTURAS SOLO-CAL

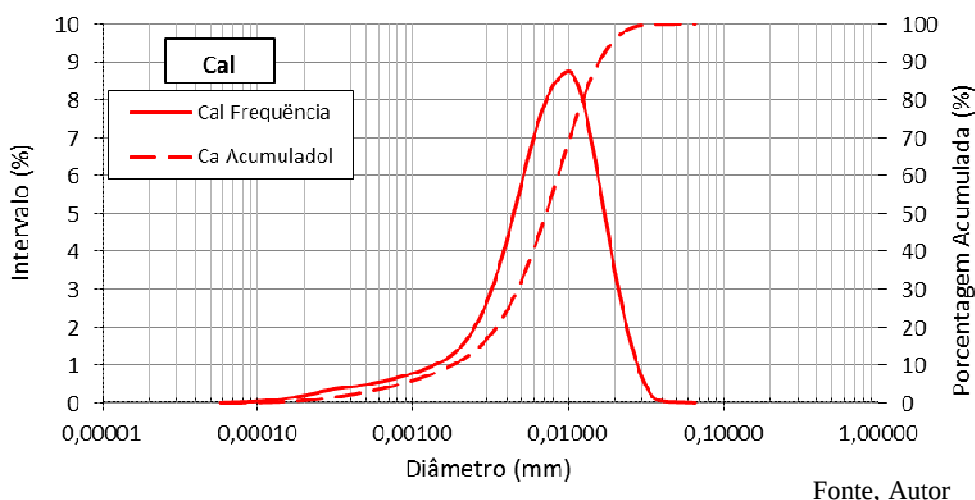
Os resultados de todos os ensaios realizados, destacando a influência da adição da cal nos solos, são mostrados em comparando com os solos naturais sem a mistura da cal, nos três solos dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista. Inicialmente, são apresentados os resultados de caracterização da cal e análises das misturas de solo com diferentes teores de cal. São apresentados e discutidos os resultados das análises físicas, químicas, mineralógicas, microestruturas, avaliação da expansão livre, tensão de expansão e resistência à compressão simples das misturas da cal com os solos dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.

5.1 Cal

5.1.1 Análise Física da Cal

A Figura 5.1 mostra a curva granulométrica da cal por frequência e acumulada. As porcentagens passando na peneira nº 30 ($\phi = 0,075$ mm) foi de 0,13%; sendo menor que 10%, atendendo às recomendações da ABNT, NBR 9289/98 para as cales de qualidade CH-1. Apresentou também uma retenção de água de 85%, onde a norma estabelece o valor $\geq 75\%$ para a qualidade CH-1. A curva de distribuição de frequência dos grãos foi uniforme na faixa de granulometria entre 0,002 mm e 0,02 mm; foi determinado concentração de 75% das partículas.

Figura 5.1 Curva granulométrica da cal



Fonte, Autor

5.1.2 Análise química da cal

Os resultados das análises química da cal são apresentados na Tabela 5.1. Todos os valores determinados de perda ao fogo, óxido férrico, óxido de cálcio total, óxido de cálcio disponível, anidrido carbônico, massa unitária, finura e retenção de água estão dentro da especificação para cal CH-1.

Os resultados de óxidos de cálcio determinados pela técnica analítica de espectrometria de fluorescência de raios-X e pela ABNT, NBR 2003b/95 apresentaram valores semelhantes e obedeceram aos parâmetros oficiais para cal CH-1 (Tabelas 5.1 e 5.2).

Tabela 5.1 Resultados das análises químicas da cal

Determinações	Unidade	Resultado
Umidade	%	1,31
Perda ao fogo (PF)	%	24,23
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	%	0,22
Óxido de cálcio total (CaO_T)	%	66,93
Óxido de cálcio disponível (CaO_D)	%	58,49
Anidrido Carbônico (CO_2)	%	4,09
Massa específica	g/mL	0,445
Finura: Peneira 30 – 0,600 mm	%	0,1
Peneira 200 - 0,075 mm	%	0,13
Retenção de água	%	87

Fonte, Autor

Tabela 5.2 Resultados dos óxidos da cal por fluorescência de raios-X

Óxido	%
SiO_2	0,00
Al_2O_3	1,50
Fe_2O_{3t}	0,00
MgO	1,93
MnO	0,00
CaO	66,42
Na_2O	0,00
K_2O	0,12
TiO_2	0,06
P_2O_5	0,01
PF	27,44
TOTAL	97,48

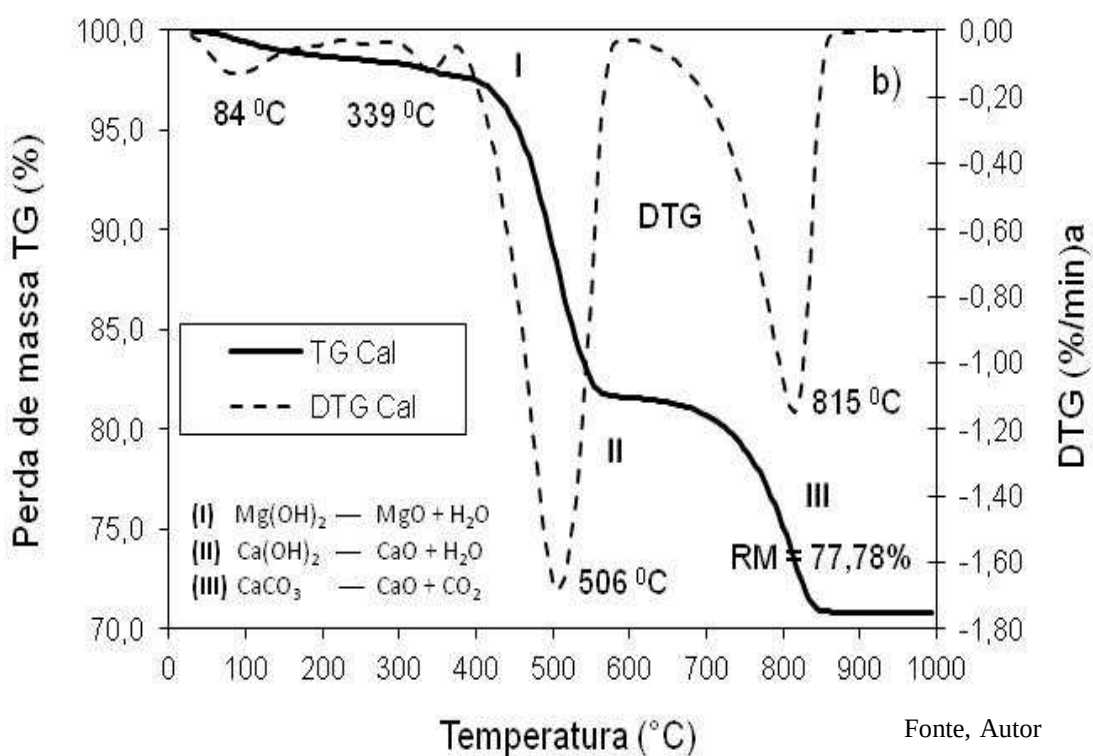
Fonte, Autor

5.1.3 Análise termogravimétrica da cal

As curvas da TG e DTG da cal utilizada são ilustradas na Figura 5.2. As perdas de massa e massa residual na decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) em óxido de cálcio (CaO), ocorrem entre 506°C e 815°C. Tendo como base o estudo da composição química da cal hidratada realizado por Cincotto (1980), a temperatura da desidroxilação foi de 448 °C. Na interpretação das curvas, admitiu-se que até 225 °C houve perda de umidade (desidratação); entre a faixa de 225 a 375°C houve desidroxilação do hidróxido de magnésio, a desidroxilação do hidróxido de cálcio entre 375 e 506°C e a decomposição do carbonato de cálcio entre 506 e 815°C.

A cal hidratada utilizada atendeu a todas as recomendações da ABNT sendo qualificado do tipo CH-1.

Figura 5.2 Curvas da TG e DTG para a cal



5.2 Misturas solo-cal

Os resultados das análises físicas, químicas, mineralógicas, microestruturas, avaliação da expansão livre e tensão de expansão estão apresentados para a mistura solo-cal dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista, variando os teores de cal na mistura.

5.2.1 Dosagem da mistura solo-cal

A dosagem da mistura solo-cal foi adotada baseada na proposta de Eades e Grim (1966). De acordo com os autores, o pH, após a adição da cal e o tempo de repouso de uma hora, deve ficar igual ou superior a 12,4, sempre utilizando o menor percentual de cal. A Tabela 5.3 e a Figura 5.3 mostram os valores do pH após uma hora da mistura e a 120 dias da adição da cal nas amostras dos três municípios analisados.

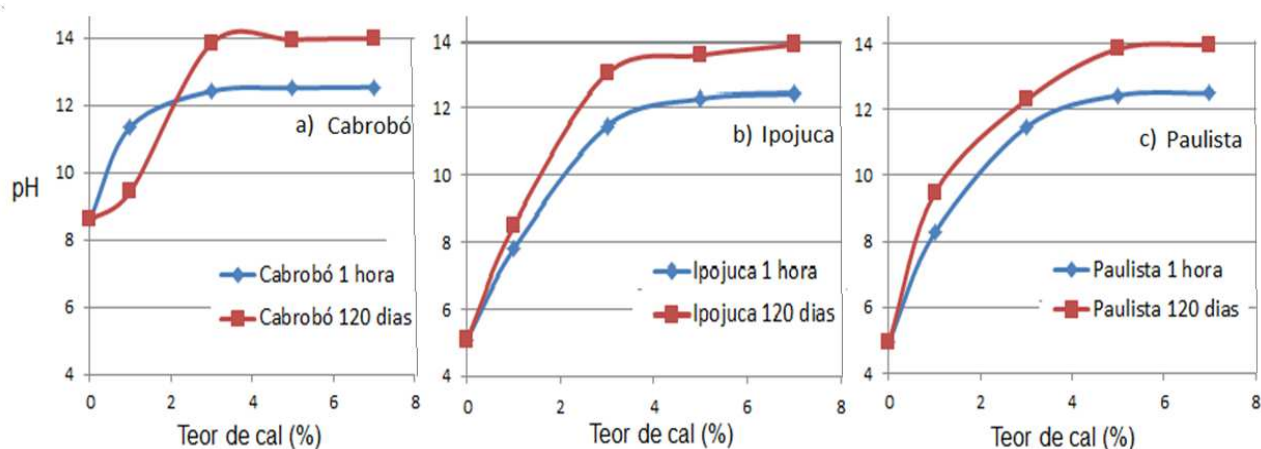
Nos três locais analisados, o valor do pH em água aumentou após uma hora, à medida em que a cal era adicionada ao solo; após 120 dias de cura ocorreu também aumentos. Com base em Eades e Grim (1966), os solos de Cabrobó alcançaram a estabilização com 3% de cal, Ipojuca com 7% e Paulista com 5%, obedecendo ao tempo de cura de uma hora. Com o tempo de cura de 120 dias, os solos de Cabrobó e Ipojuca estabilizaram-se com 3% de cal enquanto os de Paulista estabilizaram-se com 5% de cal (Figuras 5.3a Cabrobó; b Ipojuca e c Paulista).

Tabela 5.3 – Valores de pH (a 1 hora e 120 dias de cura).

Teor de Cal (%)	0		1		3		5		7	
Tempo de Cura	1h	120 dias	1h	120 dias	1h	120 dias	1h	120 dias	1h	120 dias
Cabrobó	8,60	8,60	11,37	9,44	12,43	13,85	12,52	13,97	12,55	14,00
Ipojuca	5,09	5,09	7,80	8,51	11,47	13,04	12,29	13,61	12,44	13,93
Paulista	4,93	4,93	8,25	9,46	11,47	12,29	12,43	13,84	12,50	13,97

Fonte, Autor

Figura 5.3. Variação do pH em água com o teor de cal com 1 hora e 120 dias



Fonte, Autor

O tempo de cura (120 dias) é necessário para que todos os constituintes da cal se relacionem com os constituintes do solo, completando estequiometricamente essa reação (solo-cal), pois uma reação sólido / sólido ocorre quando a interação é mais lenta quimicamente, produzindo uma reação pozolânica.

5.2.2 Caracterização física de misturas solo-cal

Os resultados de caracterização física da mistura solo-cal dos solos estudados são apresentados, mostrando a variação na granulometria, peso específico real dos grãos, plasticidade e compactação, causados pela adição da cal.

5.2.2.1 Granulometria e limite de Atterberg das misturas solo-cal

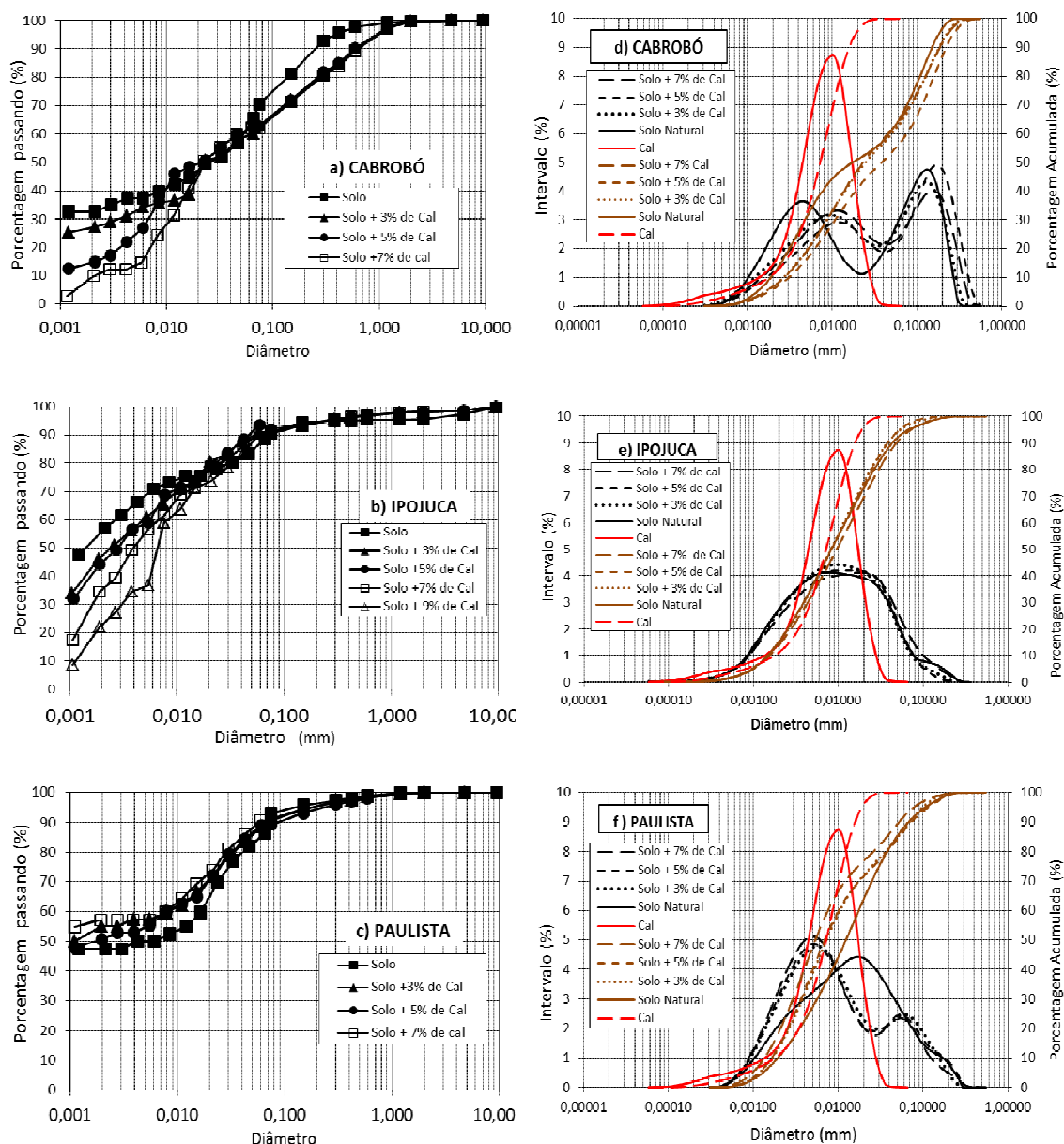
A análise das curvas granulométricas dos materiais com o uso do defloculante mostrou que os tratamentos dos solos com cal aumentaram as texturas dos solos em Cabrobó e Ipojuca; no solo de Paulista, a adição da cal provocou um pequeno acréscimo da fração argila e praticamente não modificou a fração silte e areia fina. A adição da cal reduziu a fração argila e eleva a fração silte e areia em especial a areia fina, devido à propriedade de floculação da cal. Na distribuição de frequência isto fica bem definido indicando que as curvas se deslocam para a direita à medida que a cal foi adicionada (Figura 5.4). A relação silte/argila cresce confirmando a aglutinação das partículas menores (Tabela 5.4).

A forma da curva de distribuição de frequência do solo de Cabrobó após a adição da cal continuou sendo bimodal e do solo de Ipojuca continuou sendo unimodal. No entanto a forma da curva de distribuição de frequência do solo de Paulista é unimodal passou a ser bimodal com a adição da cal, tendo dois picos; o primeiro ocorre entre 0,005 mm e 0,007 mm e o segundo entre 0,05 mm e 0,07 mm.

Os resultados dos limites de consistência, limite de liquidez, índice de plasticidade e atividade média das misturas solo-cal são apresentados na Figura 5.5 e Tabela 5.4, juntamente com a classificação da TRB e a classificação unificada.

A adição da cal aos solos de Cabrobó e de Ipojuca elevou os valores do limite de liquidez na mistura solo-cal em menor intensidade do que o acréscimo nos valores do limite de plasticidade. No solo de Paulista, ocorreu um decréscimo no WL e acréscimo no WP. Nos solos de Cabrobó e Paulista, ocorreram redução do índice de plasticidade em acordo com Thomé (1994), Goosen e Al-Rawas (2006) e Klinsky et al. (2013) (Figuras 5.5 e 5.6). No solo de Ipojuca, praticamente não houve modificação no IP com o acréscimo da cal. Blandl (1981) atribuiu que as rápidas mudanças nos valores dos limites de Atterberg com adição de cal devem-se às transformações estruturais e floculação do material.

Figura 5.4 Curvas granulométricas dos solos e das misturas solo-cal variando a concentração da cal de d) Cabrobó, e) Ipojuca e f) Paulista. E distribuição de frequência dos grãos de a) Cabrobó, b) Ipojuca e c) Paulista



Fonte, Autor

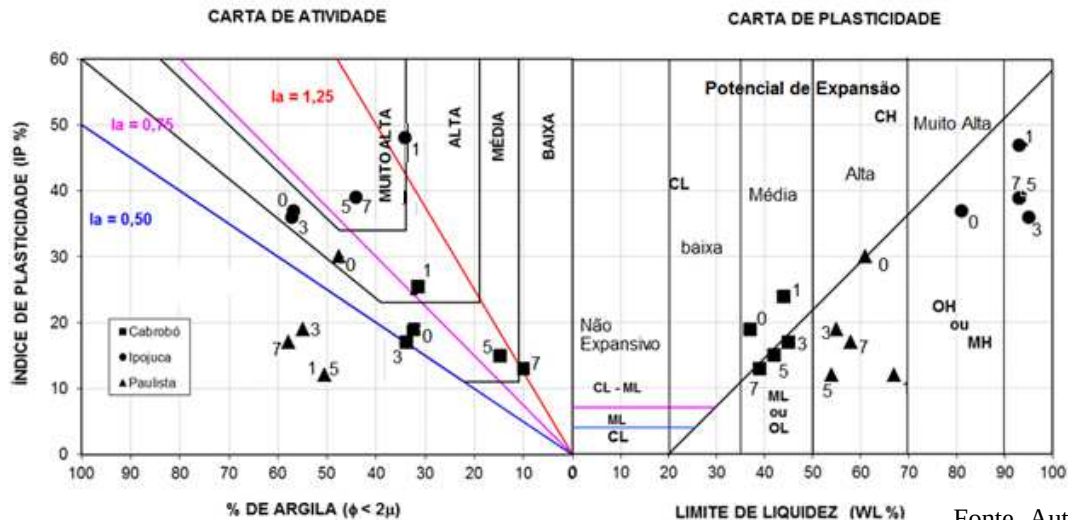
Tabela 5.4 Caracterização granulométrica do solo e da mistura solo-cal

Caracterização Física	CABROBÓ				IPOJUCA				PAULISTA			
	0%	3%	5%	7%	0%	3%	5%	7%	0%	3%	5%	7%
Pedregulho %	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
Areia %	29	42	40	40	16	9	8	11	18	16	16	14
Silte %	34	26	36	47	17	19	32	36	32	27	28	28
Argila %	37	32	24	13	67	71	59	52	50	57	56	58
Relação Silte/Argila	0,92	0,81	1,50	3,62	0,25	0,27	0,54	0,69	0,64	1,04	1,04	0,93
% < 0,002 mm	30	27	15	10	49	62	49	44	48	55	52	58
WL %	37	45	42	39	81	95	93	93	61	55	54	58
WP %	18	26	27	26	44	59	54	56	31	36	42	41
IP %	19	19	15	13	37	36	39	39	30	18	12	17
WS %	9,3	8,8	14,1	18,0	20,2	16,3	23,3	32,2	10,8	9,4	13,7	24,8
Unificada	CL	ML	ML	ML	MH	MH	MH	MH	CH	MH	MH	MH
TRB	A-6	A-7-6	A-7-6	A-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6

WL= Limite de Liquidez WP= Limite de Plasticidade IP= Índice de Plasticidade LC ou WS=Limite de Contração

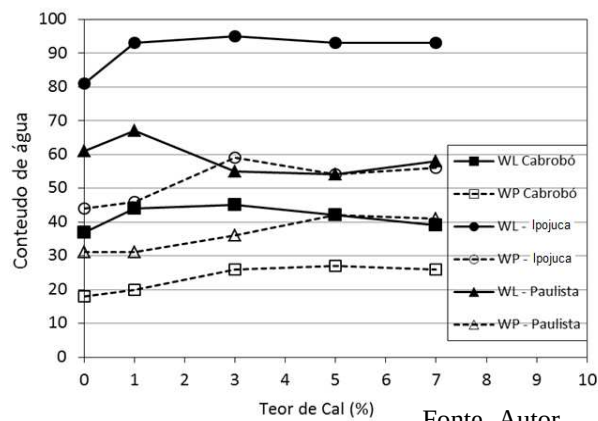
Fonte, Autor

Figura 5.5 Carta de Plasticidade e Atividade do solo natural e da mistura solo-cal nos municípios estudados, com mesmos critérios do item 4.1.3 Figura 4.2



Fonte, Autor

Figura 5.6 Variação do conteúdo de água com o teor de cal



Fonte, Autor

5.2.2.2 Pesos específicos dos grãos das misturas solo-cal

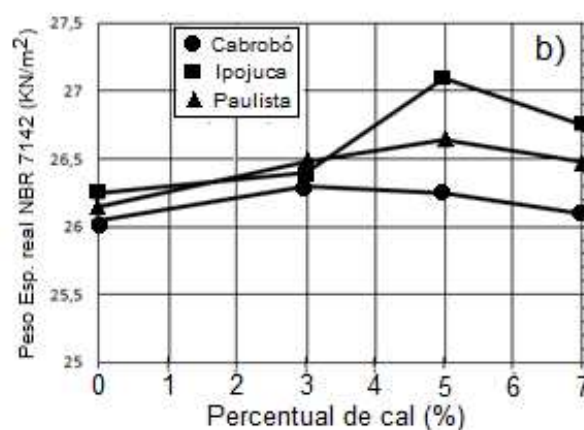
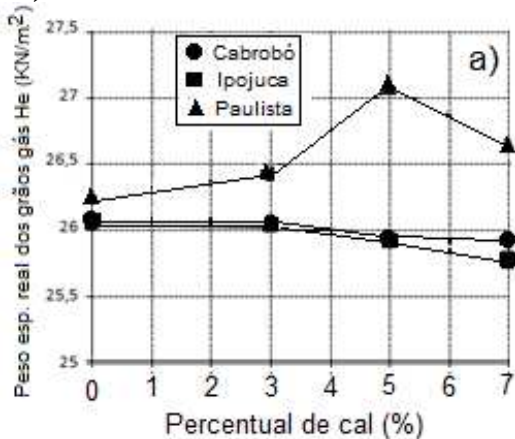
A Tabela 5.5 e a Figura 5.7 apresentam os valores dos pesos específicos real dos grãos dos solos e das misturas solo-cal obtidos pelos métodos da NBR 7182/86, e pelo picnômetro de gás Hélio. Com a adição da cal ao solo, houve pequenas alterações no peso específico real dos grãos, havendo tendências de pequenos acréscimos, não sendo superior a 4% com os determinados pela ABNT. Os valores obtidos pelo picnômetro de gás Hélio foram ligeiramente inferiores aos obtidos pela determinação na ABNT, não sendo superior a 3%.

Tabela 5.5 Resultados dos Pesos Específicos dos grãos pelos dois métodos com adição de cal comparados com as amostras originais

% cal	Picnômetro segundo NBR 7182/86			Picnômetro de gás Hélio		
	Cabrobó	Ipojuca	Paulista	Cabrobó	Ipojuca	Paulista
0,0	26,05	26,25	26,12	26,06	26,26	26,09
3,0	26,30	26,40	26,48	26,04	26,44	26,07
5,0	26,25	27,10	26,64	25,91	27,09	25,93
7,0	26,10	26,75	26,48	25,76	26,65	25,91

Fonte, Autor

Figura 5.7 Peso específico real dos grãos pelos métodos com adição de cal: a) de gás Hélio e b) NBR 6508/84



Fonte, Autor

5.2.2.3 Compactação das misturas solo-cal

A Tabela 5.6 mostra os valores do peso específico aparente seco máximo e umidade ótima dos solos e das misturas solo-cal, enquanto a Figura 5.8, as curvas de compactação nos municípios estudados. As misturas solo-cal apresentam um único pico em todos os casos, ao contrário do solo natural que apresenta pico duplo, frequente em solos expansivos como discutido no item 4.1.4. A alteração dos tipos de picos ocorre devido à adição da cal ao solo, tornando a mistura de dimensões maiores (floculação).

Tabela 5.6 Valores dos pesos específicos máximos secos dos solos compactados com adição da cal

Solo	% de cal	Peso específico do solo máximo (kN/m ³)	Umidade ótima (%)
Cabrobó	0%	16,1 / 17,80	10,0 / 15,33 (dois picos)
	3%	17,30	11,19
	5%	17,10	10,96
	7%	17,60	12,45
Ipojuca	0%	13,19 / 13,69	18,30 / 38,00 (dois picos)
	3%	13,01	30,14
	5%	14,32	25,86
	7%	14,10	27,21
Paulista	0%	14,80 / 15,00	12,50 / 21,00 (dois picos)
	3%	15,49	22,88
	5%	15,65	20,78
	7%	15,65	23,78

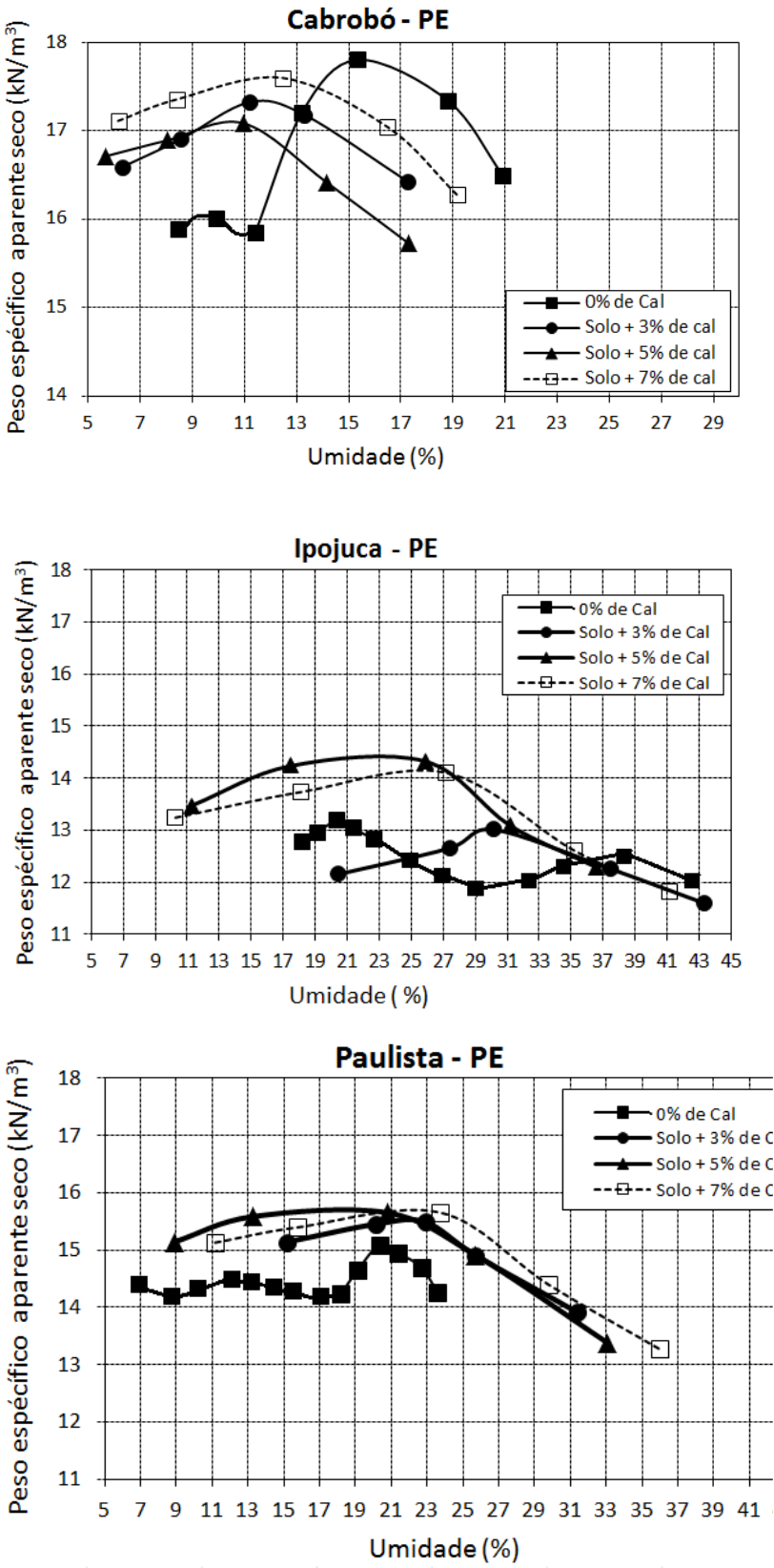
Fonte, Autor

A redução da umidade ótima com o teor da cal está associada ao aumento dos cátions trocáveis fornecido pela cal (Ca^{++}) e à flocculação das partículas de argila, que ocorrem simultaneamente. À medida que o solo floccula, há maior quantidade de grumos na massa do solo e a capacidade de absorver água diminui, reduzindo a umidade ótima, e um aumento do peso específico máximo.

Nos três solos estudados, a umidade ótima decresce com o acréscimo do teor de cal até 5% e cresce quando o teor de cal aumenta para 7%, exceto no solo de Paulista que há um aumento da umidade ótima quando se adiciona 3% de cal em relação ao solo natural. Resultados semelhantes foram encontrados por Osinubi (1998). O peso específico seco máximo no solo de Cabrobó também decresce com o acréscimo do teor de cal até 5% e cresce quando o teor de cal aumenta para 7%. Nos solos de Ipojuca e de Paulista, o peso específico aparente seco máximo decresce com o acréscimo de cal até 3% e depois cresce ou fica praticamente constante com o aumento da teor de cal, Figura 5.9

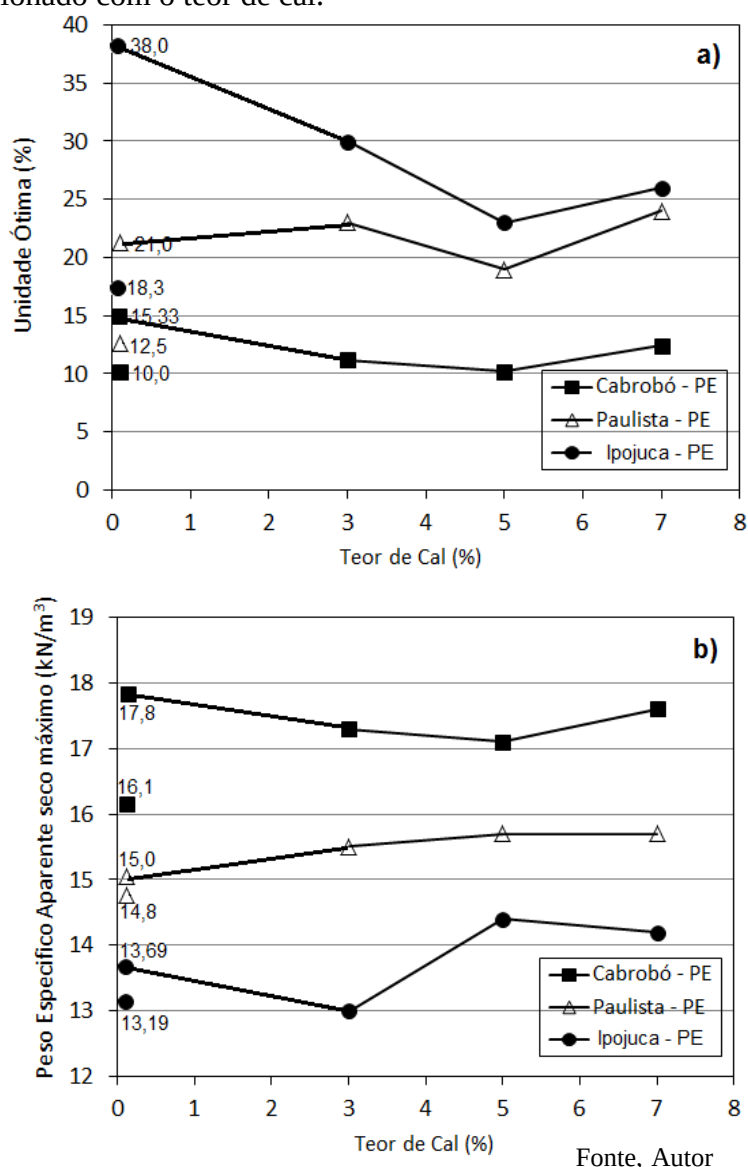
A fração areia é maior no solo de Cabrobó do que nos demais, a ela está associado o maior peso específico aparente seco máximo e menor umidade ótima em relação aos demais solos estudados. A CTC e a fração argila do solo de Ipojuca (63 cmolc/kg) são os maiores dos três solos, e a ele está associado o menor peso específico aparente seco máximo e maior umidade ótima em relação aos demais solos estudados.

Figura 5.8 Curva de compactação do solo natural e das misturas solo-cal dos municípios estudados.



Fonte, Autor

Figura 5.9 a) Umidade Ótima relacionado com o teor de cal, e b) Peso específico Aparente seco máximo relacionado com o teor de cal.



5.2.3 Caracterização química das misturas solo-cal

A adição de cal ao solo causou redução dos óxidos de silício, alumínio, ferro, sódio, potássio e dióxido de titânio e, conseqüentemente, acréscimo dos óxidos de magnésio e cálcio pertencentes a cal, Tabela 5.7, nos três solos analisados. Aumento do pH, Ca^{++} , Mg^{++} , CTC, e da soma de cátions, em razão do acréscimo da cal. Como o Al^{+++} e H^+ é determinado com relação ao pH, seus valores foram nulo, conforme Tabela 5.8. Resultados provocados pelo acréscimo de hidróxido de cálcio atuando, com efeito, diluidor no solo e incrementando cátion Ca^{++} e aumentando o pH com o íon hidroxila.

Tabela 5.7 Resultado da análise química da mistura solo-cal nos solos dos três municípios.

CABROBÓ	Cal	pH	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ⁺²	Al ³⁺	H ⁺	S	CTC-T	V	m	100NaT ^I
	%		μS	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	%	%	%
	0	8,60	250	3,13	0,11	12,0	12,0	0,2	10,40	29,53	31,13	94,86	0,67	10,05
CABROBÓ	1	11,37	385	2,96	0,07	20,0	7,20	0	0	30,16	30,16	100	0	9,80
	3	12,43	797	3,18	0,07	20,8	15,2	0	0	39,18	39,18	100	0	8,10
	5	12,52	1493	3,35	0,07	28,8	11,2	0	0	43,35	43,35	100	0	7,70
	7	12,52	2517	3,13	0,11	31,2	12,8	0	0	47,13	47,13	100	0	6,60
IPOJUCA	Cal	pH	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ⁺²	Al ³⁺	H ⁺	S	CTC-T	V	m	100NaT ^I
	%		μS	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	%	%	%
	0	5,09	115	0,22	0,44	26,0	2,4	7,8	4,5	29,0	41,36	46,1	22,00	0,53
	1	7,80	246	0,61	0,37	30,0	9,2	0		62,2	40,18	100	46,92	1,52
	3	11,47	424	0,38	0,22	33,2	6,8	0	0	63,4	40,60	100	31,66	0,94
	5	12,29	708	0,38	0,18	34,5	9,1	0	0	76,4	44,16	100	29,23	0,86
	7	12,44	682	0,38	0,22	35,2	6,4	0	0	105,6	42,20	100	25,33	0,90
PAULISTA	Cal	pH	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ⁺²	Al ³⁺	H ⁺	S	CTC-T	V	m	100NaT ^I
	%		μS	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	%	%	%
	0	4,93	303	14,6	5,01	2,30	4,4	10,1	9,8	26,3	46,3	56,8	27,7	31,5
	1	8,25	629	32,9	16,6	23,4	2,4	0	0	75,3	75,3	100	43,7	42,5
	3	11,47	717	48,1	11,1	35,6	2,1	0	0	96,9	96,9	100	49,9	49,5
	5	12,43	1165	32,9	7,7	55,8	1,1	0	0	97,6	97,6	100	33,7	33,7
	7	12,50	3170	30,3	7,7	74,4	5,6	0	0	118,0	118,1	100	25,7	25,4

Fonte, Autor

Tabela 5.8 Valores das porcentagens de óxidos e Perda ao fogo nas misturas solo-cal nos três solos estudados.

Óxidos	Cabrobó				Ipojuca				Paulista			
	Solo	3%	5%	7%	Sol	3%	5%	7%	Solo	3%	5%	7%
SiO ₂	60,75	58,92	57,94	56,86	39,45	37,91	37,51	36,80	65,54	63,97	62,94	56,23
Al ₂ O ₃	12,97	12,8	12,63	11,96	21,17	20,51	20,28	19,95	15,27	14,92	14,64	20,22
Fe ₂ O _{3t}	4,39	4,19	4,04	3,96	18,62	17,77	17,34	16,76	5,05	4,86	4,72	4,10
MgO	0,75	0,82	0,85	0,85	1,28	1,25	1,27	1,28	0,68	0,72	0,72	1,53
MnO	0,06	0,06	0,05	0,05	0,14	0,14	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	2,93	4,94	5,95	6,80	0,14	1,47	2,73	4,30	0,14	1,75	2,80	3,70
Na ₂ O	0,94	0,92	0,90	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	2,24	2,17	2,12	2,10	0,21	0,20	0,20	0,19	1,77	1,73	1,70	1,50
TiO ₂	0,82	0,77	0,77	0,76	4,74	4,49	4,40	4,24	0,87	0,84	0,83	0,74
P ₂ O ₅	0,02	0,02	0,02	0,02	0,31	0,30	0,30	0,29	0,02	0,02	0,02	0,03
PF	10,37	10,62	10,91	11,85	15,83	16,50	16,44	16,73	11,88	12,37	13,00	13,08
TOTAL	96,23	96,22	96,18	96,07	101,88	100,53	100,59	100,66	101,21	101,18	101,36	101,13

Fonte, Autor

Os resultados da Capacidade de Troca Catiônica para o solo sem cal e o solo-cal, com tempo de cura de 1 hora e 120 dias, estão apresentados na Tabela 5.9. Analisando os resultados da Capacidade de Troca Catiônica após 1 hora, percebe-se que houve um considerado aumento num espaço de tempo muito curto, devido a adição de cal ao solo, evidencia que a interação

solo-cal desencadeou as reações químicas de imediato (a troca catiônica e em seguida a floculação) para posterior reações químicas lenta (cimentação e carbonatação).

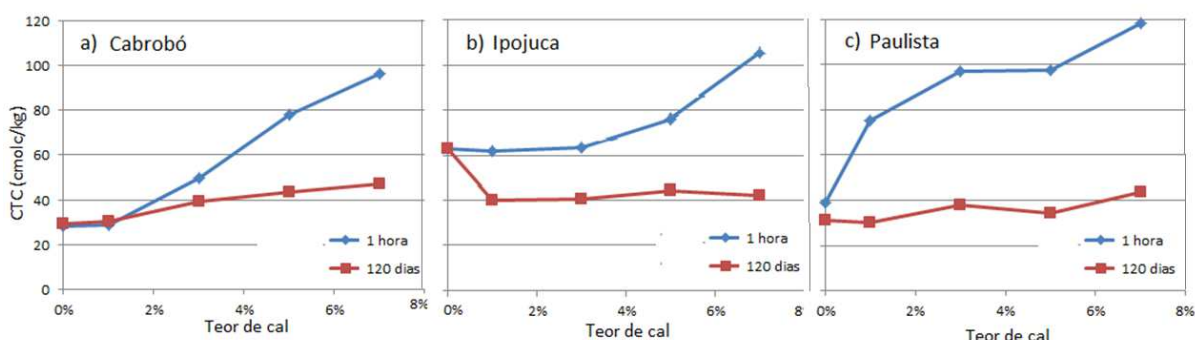
Tabela 5.9 – Resultado da Capacidade de Troca Catiônica da mistura solo-cal.

CTC (cmol _c /kg)		Teor de Cal				
		0%	1%	3%	5%	7%
Cabrobó	1 hora	28,4	28,8	49,6	77,9	96,3
	120 dias	29,5	30,2	39,2	43,4	47,1
Ipojuca	1 hora	63,0	62,2	63,4	76,4	105,6
	120 dias	63,0	40,2	40,6	44,2	42,2
Paulista	1 hora	38,9	75,3	96,9	97,6	118,1
	120 dias	31,1	30,2	37,8	34,4	43,6

Fonte, Autor

No entanto, há uma significativa redução da CTC quando o tempo de cura é maior (120 dias). Isto se dá porque quando o solo é misturado a cal há, primeiro, uma lenta assimilação do solo para depois começar a interação dos elementos da cal com o argilomineral. Assim, este tempo de cura entre as misturas é necessário para que ocorra uma completa reação, proporcionado ao solo um melhor processo de cimentação e uma maior estabilização. Estes resultados confirmam o que Prusinski e Bhattacharja (1999) declararam, que a troca catiônica e a floculação são as primeiras reações após a mistura solo-cal, conforme Figura 5.10 sendo a) Cabrobó, b) Ipojuca e c) Paulista.

Figura 5.10 Resultado da Capacidade de Troca Catiônica da mistura solo-cal.



Fonte, Autor

Ao adicionar mais cal ao solo (7%), o valor da umidade ótima aumentou indicando que o teor de 5% de cal é o que a mistura solo-cal apresenta menor umidade ótima. Comportamento inverso foi observado com relação ao peso específico seco máximo exceto para a mistura do solo de Cabrobó (solo mais arenoso e com maior CTC dos três analisado, (Figura 5.10).

Com a adição de cal no solo de Cabrobó, que já era fortemente alcalino (8,6), não alterou sua classificação, porém agora seu pH atingiu valor maior que 12,55. Tanto o solo como as misturas são classificadas como eutrófico, alta capacidade de troca de cátions ($T > 27 \text{ cmol.kg}^{-1}$), o solo é solódico. Com relação aos óxidos, a adição da cal causa uma pequena redução nos óxidos de silício, alumínio e ferro e um acréscimo significativo do Óxido de cálcio atingindo 2,3 vezes para o percentual de 7% de cal.

No solo de Ipojuca que tinha o pH moderadamente ácido (pH = 5,09) com a adição da cal aumentou gradativamente seu valor atingindo 12,44 com uma percentagem de 7% de cal. O solo natural que foi classificado como distrófico, com a adição da cal mudou de classificação passando a eutrófico, com alta capacidade de troca de cátions, solo sálico e solódico. Os óxidos apresentaram uma redução após a adição da cal em Ferro, alumínio, silício, potássio e titânio, com um aumento de trinta vezes no óxido de cálcio no percentual de 7% de cal. A Tabela 5.10 apresenta alguns parâmetros químicos e seus conceitos.

Tabela 5.10 – Resumo de Alguns Parâmetros Químicos e seus Conceitos

Local	Parametro Química	Solo natural	Solo +3% de cal	Solo +5% de cal	Solo +7% de cal
Cabrobó	pH	Fortemente Alcalino	Fortemente Alcalino	Fortemente Alcalino	Fortemente Alcalino
	Valor de V	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
	CTC ou T	Alta	Alta	Alta	Alta
	CE	Sálico	Sálico	Sálico	Sálico
	100 Na ⁺ /T	Solódico	Solódico	Solódico	Solódico
Ipojuca	pH	Moderadamente Ácido	Fortemente Alcalino	Fortemente Alcalino	Fortemente Alcalino
	Valor de V	Distrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
	CTC ou T	Alta	Alta	Alta	Alta
	CE	Sálico	Sálico	Sálico	Sálico
	100 Na ⁺ /T	Solódico	Solódico	Solódico	Solódico
Paulista	pH	Ácido	Fortemente Alcalino	Fortemente Alcalino	Fortemente Alcalino
	Valor de V	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
	CTC ou T	Alta	Alta	Alta	Alta
	CE	Sálico	Sálico	Sálico	Sálico
	100 Na ⁺ /T	Solódico	Solódico	Solódico	Solódico
Caráter Salino		4 < CE < 7 dS/m		Caráter Sódico	100 Na ⁺ T ⁻¹ > 15%
Caráter Salico		CE > 7 dS/m		Caráter Solóco	6 < 100 Na ⁺ T ⁻¹ > 15%

Fonte, Autor

O solo de Paulista que era ácido ($\text{pH} = 4,93$), com a adição da cal aumentou gradualmente atingindo um pH de 12,50 com 7% de cal. Tanto o solo como as misturas estão classificadas como eutrófico com uma alta capacidade de troca de cátions, sálico e solódico. Os óxidos desse solo após a adição da cal apresentaram uma redução nos óxidos de silício, ferro, potássio e titânio e um aumento de 26 vezes na quantidade de cálcio com o percentual de 7% de cal.

5.2.4 Caracterizações mineralógicas das misturas solo-cal

Os resultados dos ensaios de TG e DTG para as misturas solo-cal, variando as proporções de cal, nos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista estão apresentados nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, respectivamente. Em todos os casos, segundo Santos (1989), as mudanças térmicas da montmorilonita mostram que entre 100°C e 250°C há um pico endotérmico intenso de perda de água adsorvida, a partir da temperatura 400°C inicia a perda da hidroxila do hidróxido de montmorilonita, completando o processo em 700°C .

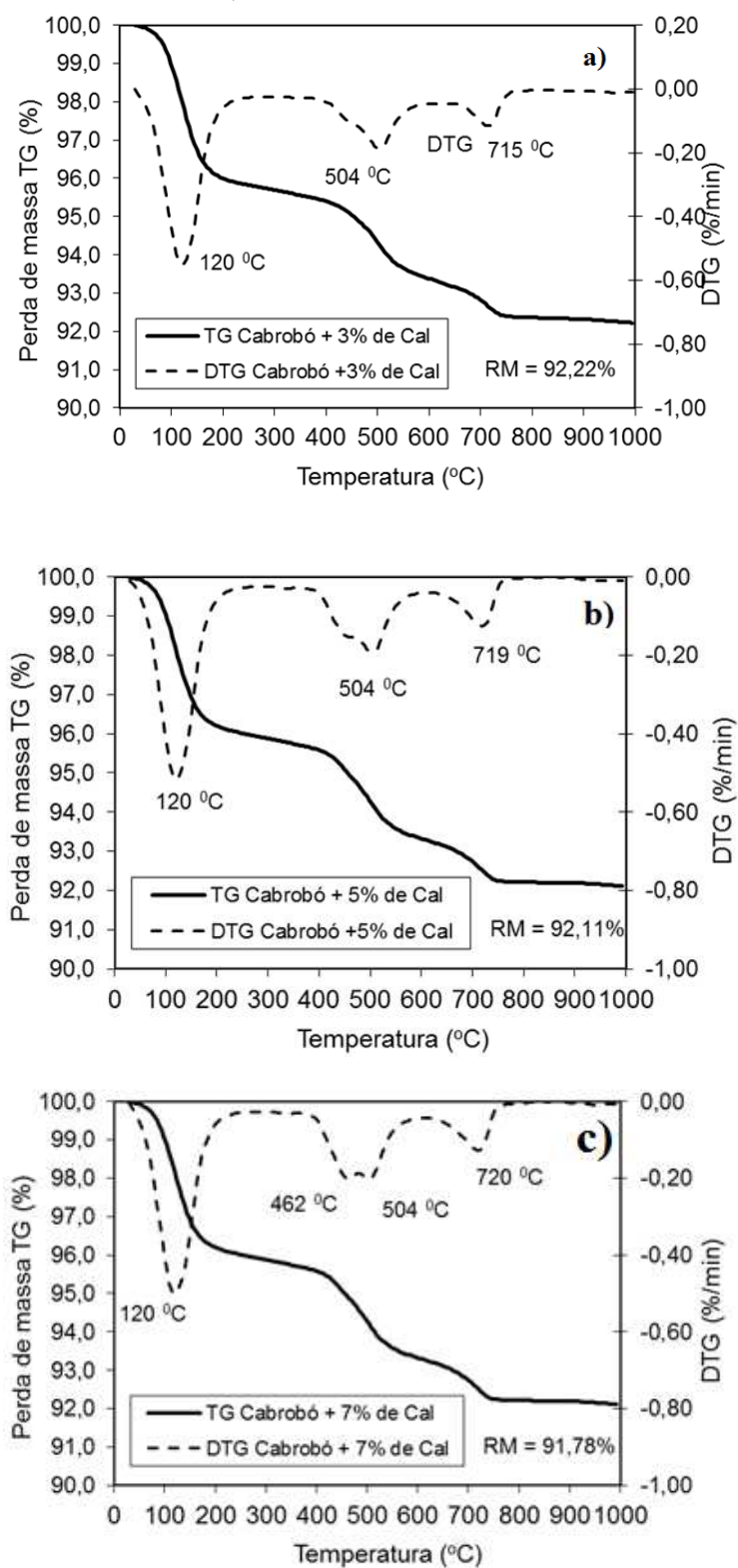
Analisando as curvas características dos ensaios de TG/DTG nos solos do município de Cabrobó, acrescidos de cal (Figura, 5.11), verifica-se nas três figuras a perda da água na temperatura de 120°C , na temperatura entre 400 e 600°C apresentou um pico correspondendo à perda da hidroxila do hidróxido de montmorilonita nas três percentagens de cal, e um terceiro pico entre 600 e 800°C foi observado correspondendo à calcinação da calcita (carbonato de cálcio CaCO_3) formando o óxido pela descarbonatação nas três concentração da cal, como pode ser verificado na Figura 5.10.

As curvas características dos ensaios de TG/DTG nos solos do município de Ipojuca, acrescidos de cal (Figura, 5.12), verifica-se nas três percentagens, a perda da água na temperatura de 120°C . Na temperatura entre 400 e 650°C , apresentou um pico correspondendo à perda da hidroxila do hidróxido de montmorilonita nas três concentração de cal, e na temperatura entre 650 e 750°C foi um pico correspondente à formação do óxido de cálcio pela decomposição da calcita.

As curvas características dos ensaios de TG/DTG nos solos do município de Paulista, acrescidos de cal (Figura, 5.13), verifica-se, nas três percentagens a perda da água na temperatura de 120°C . Na temperatura entre 400 e 650°C apresentou um pico correspondendo a perda da hidroxila do hidróxido de montmorilonita nas três percentagens de cal e na

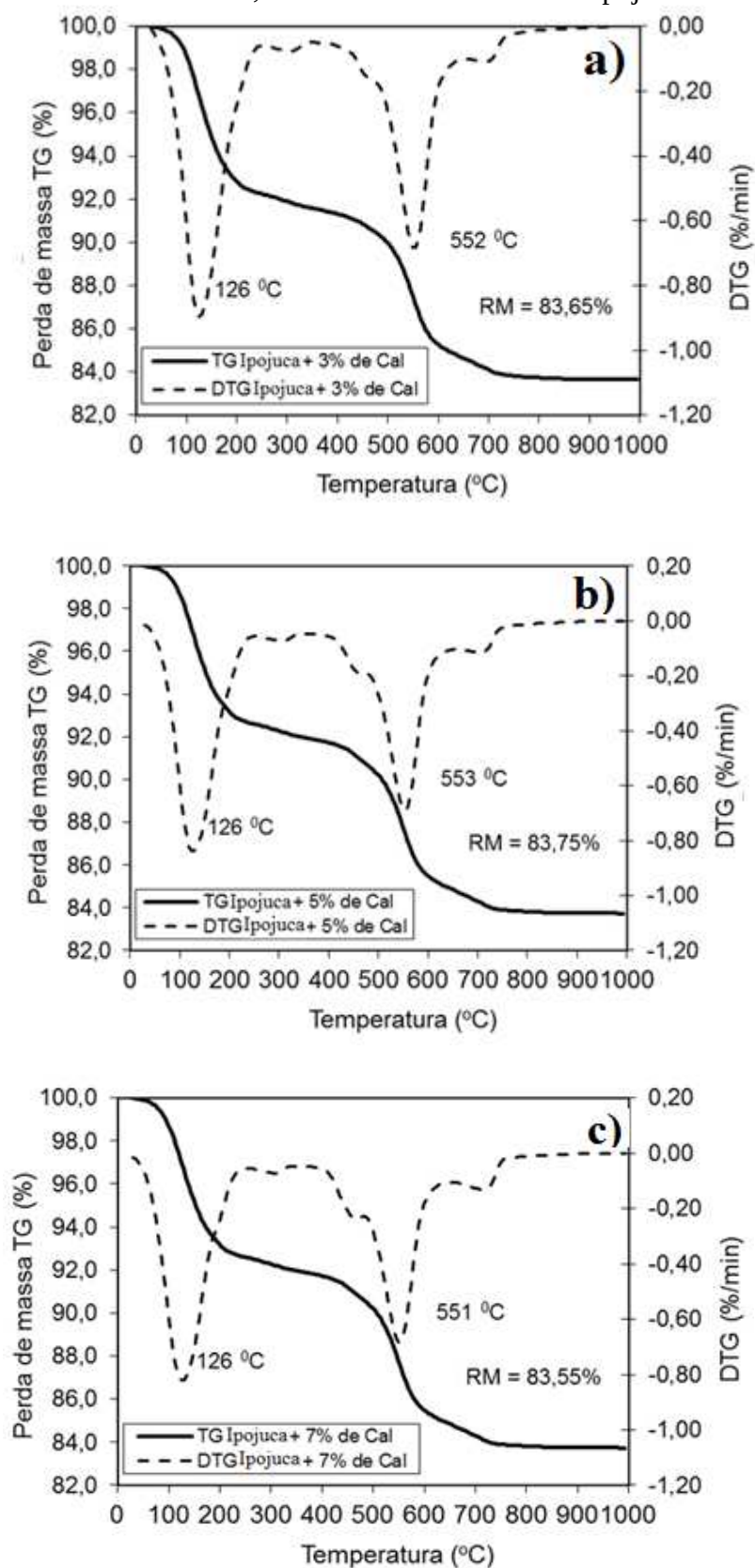
temperatura entre 650 e 750°C foi um pico correspondente a formação do óxido de cálcio pela decomposição da calcita como foi observado nos outros solos analisados.

Figura 5.11 – Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para os solos com acréscimo de 3, 5 e 7% de cal nos solos de Cabrobó.



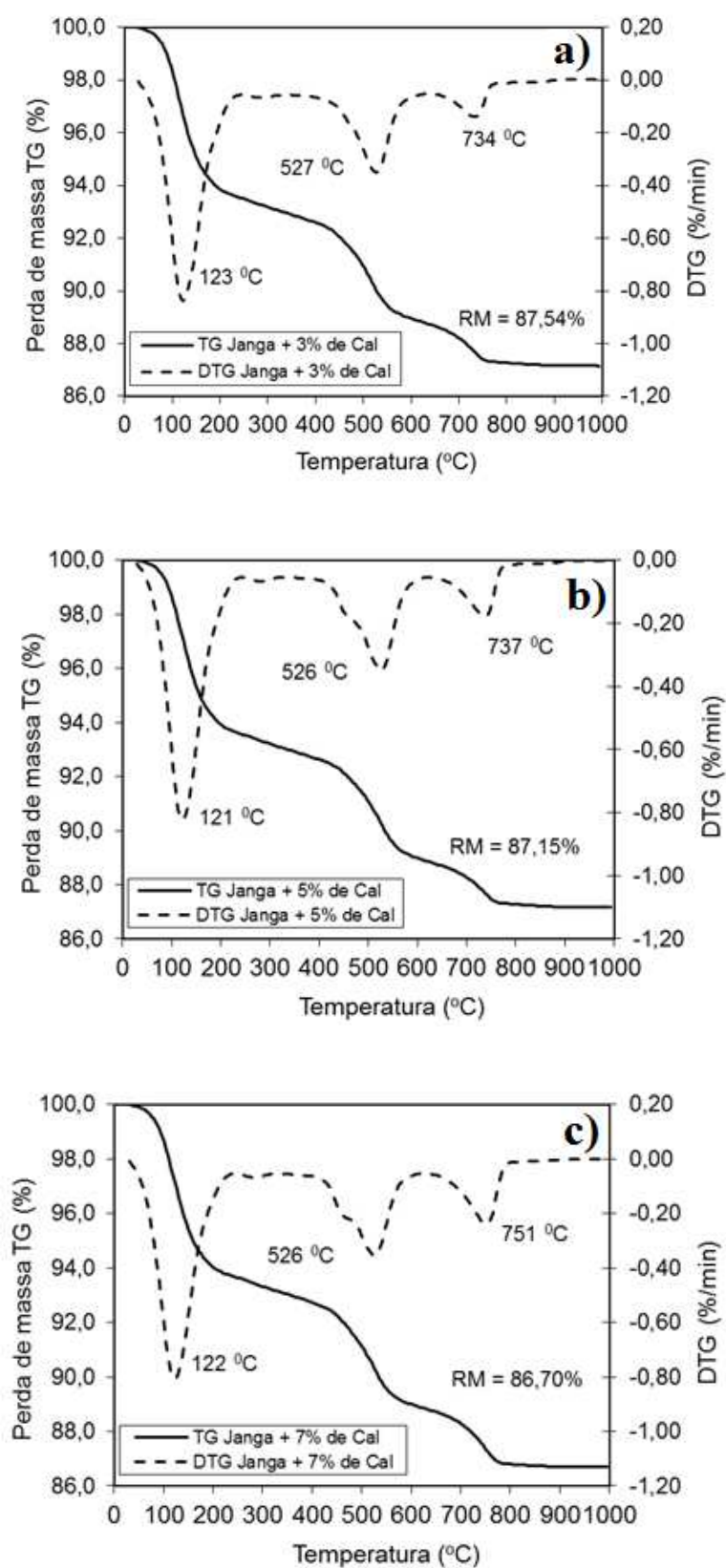
Fonte, Autor

Figura 5.12 – Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para os solos com acréscimo de 3, 5 e 7% de cal nos solos de Ipojuca.



Fonte, Autor

Figura 5.13 – Curvas da TG e DTG com o correspondente do difratograma, para os solos com acréscimo de 3, 5 e 7% de cal nos solos de Paulista.



Fonte, Autor

5.2.5 Caracterização da microestrutura das misturas solo-cal

As eletromicrografias das misturas do solo de Cabrobó com 3%, 5% e 7% de cal são presentes nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 respectivamente; as eletromicrografias das misturas do solo de Ipojuca com 3%, 5% e 7% de cal são apresentadas nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 respectivamente e as eletromicrografias das misturas do solo de Paulista com 3%, 5% e 7% de cal são apresentadas nas Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 respectivamente.

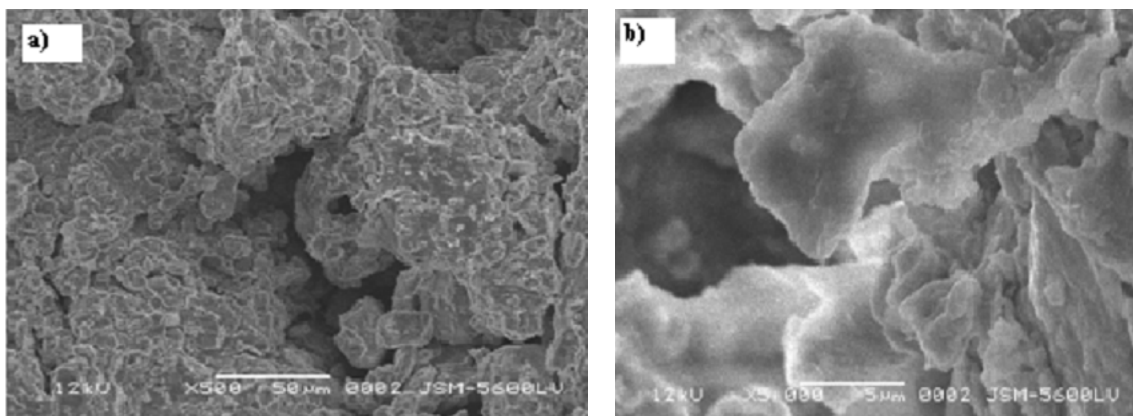
A Figura 5.14 das eletromicrografias das misturas solo-cal do município de Cabrobó, nas três concentrações, mostram o comportamento do solo formando grãos maiores com granulometria semelhante à areia, se acomodando, deixando alguns vazios, devido ao esforço aplicado ao solo. Verifica-se que, nas bordas dos microagregados, o solo está sempre combinado com a cal, produto da reação da cal em contato com o plasma, resultado semelhante encontrado por Nóbrega (1981); Velasco, 2013; TRAN et al. 2014 e SILVA, 2016.. A cal (Ca(OH)_2) por ser um hidróxido, eleva o pH do solo alcalinizando e estabilizando os constituintes instáveis, formando uma estrutura mais estável ao reagir com o cálcio. A microporosidade é formada pela reação da cal com o plasma, preenchendo parcialmente os vazios causados a neoformação de assembleias cristalinas nas bordas dos Microagregados.

As eletromicrografias das misturas solo-cal dos solos de Ipojuca e Paulista, apresentadas nas Figuras de 5.16 a 5.22, mostram os comportamentos dos grãos como “pseudo areia”, acomodando os grãos devido ao esforço aplicado, formando vazios entre os grãos e um solo mais estável, semelhante ao solo de Cabrobó.

Verifica-se nos três solos estudados que após a adição da cal as imagens mostram algumas alterações superficiais comparando com as amostras do solo natural, com o acréscimo da cal a superfície ficam mais planas com presença de flocos resultantes das reações imediatas que a adição de cal realiza. Com o aumento da quantidade de cal verifica-se a ocorrência de alterações no tamanho das partículas argilosas relacionando o solo natural sem cal. Sendo assim o início das reações da cal com a sílica presente nas estruturas dos argilominerais, resultado também visto por SILVA (2016), sendo o início das reações pozolânicas. Sendo justificado o valor da propriedade mecânica do solo com cal em relação ao solo sem cal.

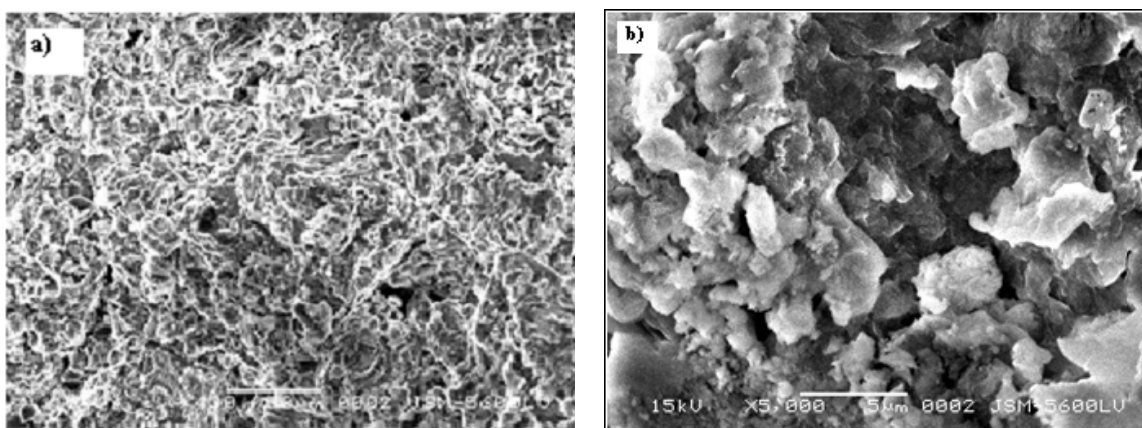
Analisando as Figuras 5.16; 5.19 e 5.22 do solo com 7% de cal pode-se notar que os tamanhos das partículas argilosas se alteram. Sendo o início da fase inicial das reações pozolânicas nos solos resultados semelhantes foram encontrados por: Barbosa, 2013; Velasco, 2013; TRAN et al. 2014 e SILVA, 2016.

Figura 5.14 (a, b) Eletromicrografias (aumentadas 500 e 5.000 X) das microestruturas do solo com adição de 3% de cal. Cabrobó



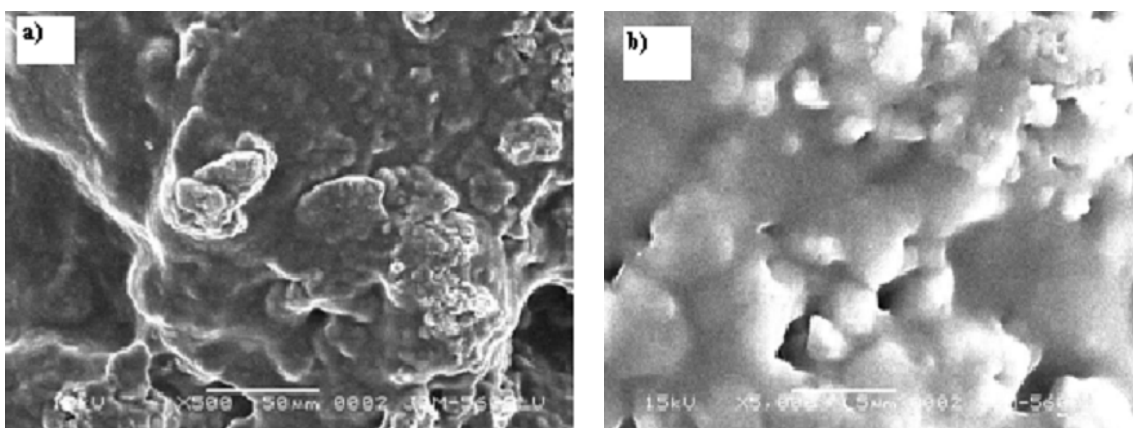
Fonte, Autor

Figura 5.15 (a, b) Eletromicrografias (aumentadas 500 e 5.000 X) das microestruturas do solo de Cabrobó com adição de 5% de cal



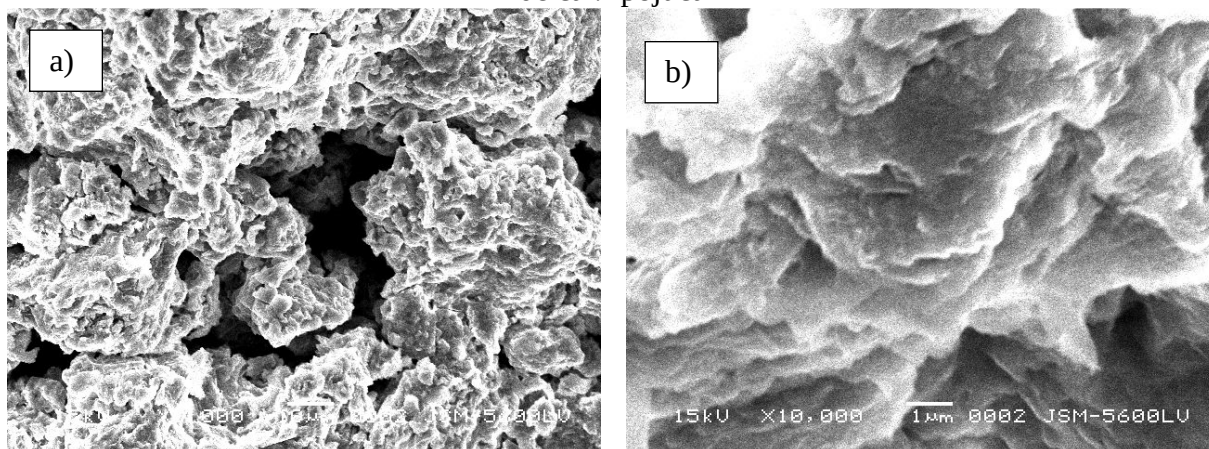
Fonte, Autor

Figura 5.16 (a, b) Eletromicrografias (aumentadas 500 e 5.000 X) das microestruturas do solo de Cabrobó com adição de 7% de cal



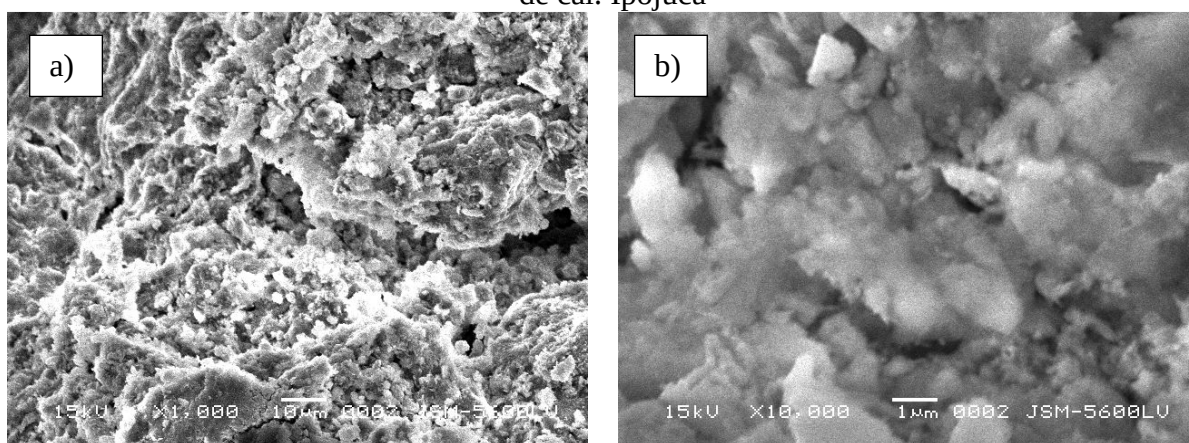
Fonte, Autor

Figura 5.17 (a, b) Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 3% de cal. Ipojuca



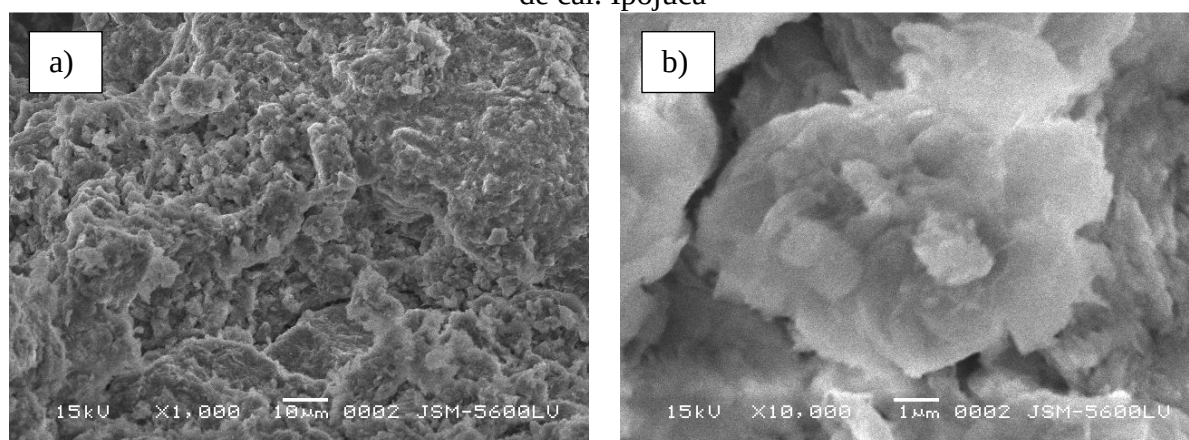
Fonte, Autor

Figura 5.18 (a,b) - Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 5% de cal. Ipojuca



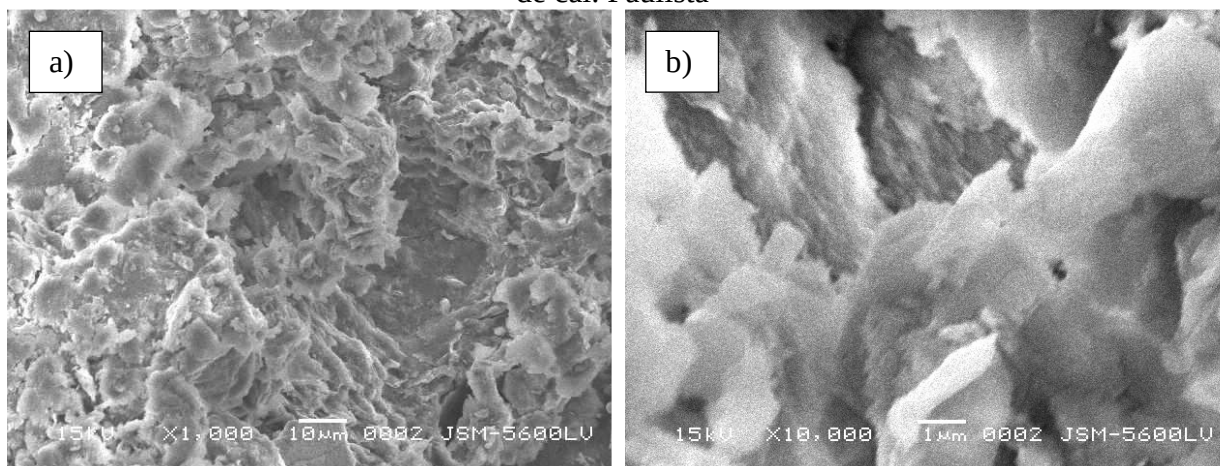
Fonte, Autor

Figura 5.19 (a, b) Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 7% de cal. Ipojuca



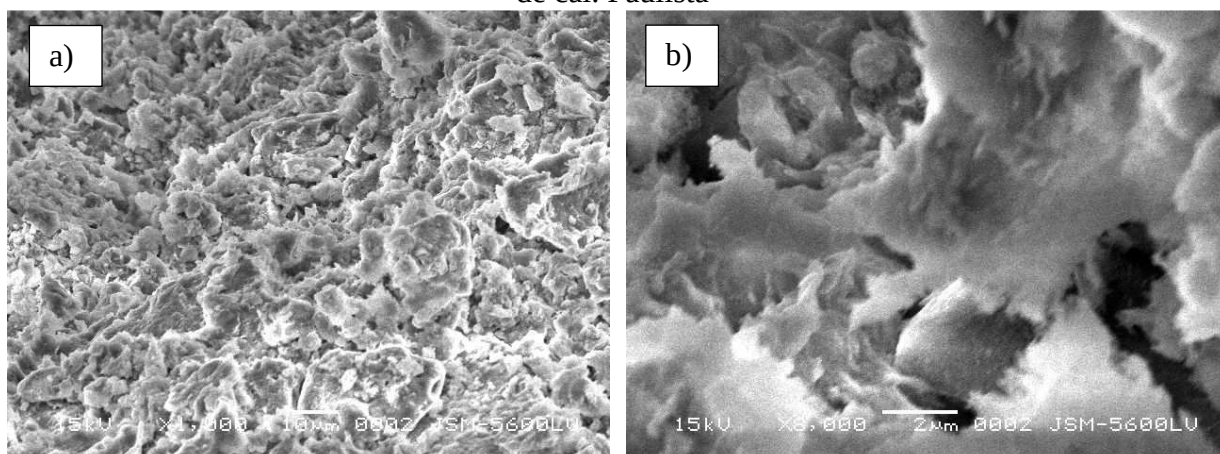
Fonte, Autor

Figura 5.20 (a, b) Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 3% de cal. Paulista



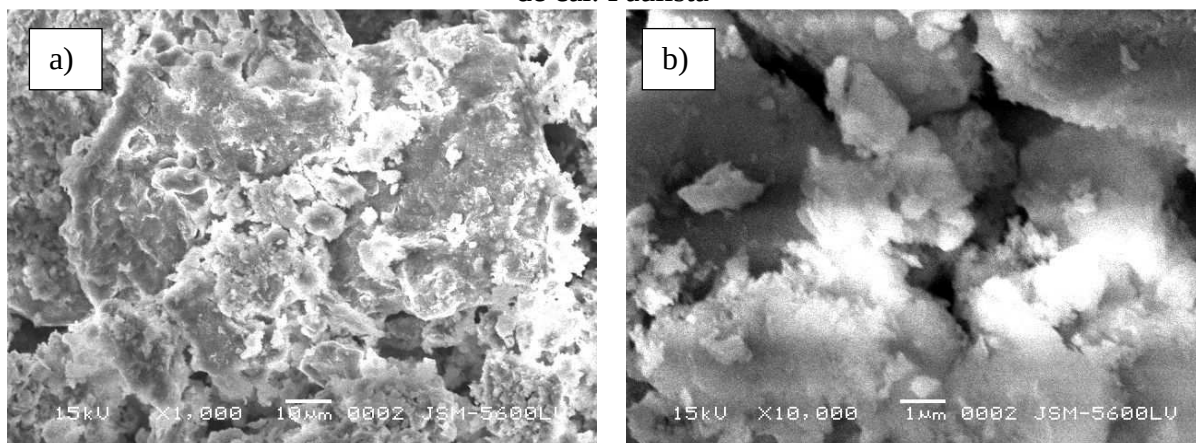
Fonte, Autor

Figura 5.21 (a,b) - Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 5% de cal. Paulista



Fonte, Autor

Figura 5.22 (a, b) Eletromicrografias (ampliadas 1000 e 10.000 vezes) da mistura solo + 7% de cal. Paulista



Fonte, Autor

5.2.6 Caracterização da expansão livre e tensão de expansão das misturas solo-cal

Os valores da expansão livre no solo compactado e nas misturas solo-cal compactadas são apresentados na Tabela 5.11 e Figura 5.23, enquanto os valores da tensão de expansão no solo e nas misturas solo-cal compactados obtidos pelo método a volume constante são apresentados na Tabela 5.11 e Figura 5.24.

A Tabela 5.12 mostra os teores de cal que estabilizaram os solos quimicamente pelo critério de Eades e Grim (1966) e os correspondentes valores dos teores de cal que estabilizaram os solos mecanicamente, considerando a “expansão livre” a baixo valor e a tensão de expansão, a valores que não provoca danos nas estruturas.

Nos solos compactados na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo apresentaram alta expansão à muito alta pelo critério de Cuellar (1978). A adição da cal aos solos compactados reduziram a “expansão livre” para valores menores que 1%; foi necessário adicionar 3%, 11% e 5% de cal aos solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista, respectivamente.

Nos solos compactados, também na umidade ótima e peso específico seco máximo a tensão de expansão obtida pelo método a volume constante, foram de 90 kPa, 248 kPa e 280 kPa para os solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista, respectivamente. Indicando a possibilidade de ocorrência de fissuras importante (solo de Cabrobó), demolições das edificações (solo de Ipojuca e Paulista), 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 Cabrobó e Paulista e 9% ao solo de Ipojuca.

Entre os três solos, o solo de Cabrobó foi que estabilizou com menor teor de cal (3%), isto se deve a maior percentagem de óxido de cálcio e potássio no solo natural (Tabela 5.8), sendo o solo que apresentou menor expansão livre e tensão de expansão além da menor capacidade de retenção de cátions.

No solo de Ipojuca a estabilização química ocorre para o teor de cal de 3% e a estabilização mecânica para 11%, superior à estabilização química. Já no solo de Paulista a estabilização química ocorre para 5% e a mecânica para valores inferiores de 3%, (Tabela 5.12).

Tabela 5.11 Valores de expansão Livre e Tensão de Expansão para as misturas solo-cal, nos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista

Município	Teor de cal (%)	Expansão “Livre” (%) – (critérios de Cuellar (1978) (Amostras compactadas)	Tensão de expansão (kPa)- Método Volume Constante (critérios Jimenez Salas, 1980)
Cabrobó	0	7,45 (alta)	90 (fissuras importantes)
	3	0,40 (baixa)	10 (sem danos)
	5	0,06 (baixa)	5 (sem danos)
	7	0,00 (baixa)	0 (sem danos)
Ipojuca	0	14,00 (muito alto)	248 (demolição)
	3	12,16 (muito alto)	180 (danos graves)
	5	7,90 (alto)	100 (fissuras importantes)
	7	4,63 (médio)	40 (fissuras importantes)
	9	3,11 (médio)	5 (sem danos)
Paulista	11	0,30 (baixo)	0 (sem danos)
	0	12,3 (muito alto)	280 (demolição)
	3	1,10 (baixo)	10 (sem danos)
	5	0,20 (baixo)	6 (sem danos)
	7	0,00 (baixo)	0 (sem danos)

Fonte, Autor

Tabela 5.12 Teores de cal que estabilizaram os solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista

solo	Teor de Cal Para Estabilização %			
	Química Eades e Grim (1966)	Mecânica Expansão Livre	Tensão de Expansão	Química + Mecânica
Cabrobó	3	3	3	3
Ipojuca	3	11	9	11
Paulista	5	3	3	5

Fonte, Autor

Figura 5.23 Variação de Expansão Livre com o teor de cal. Nos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista. critério de Cuellar (1978)

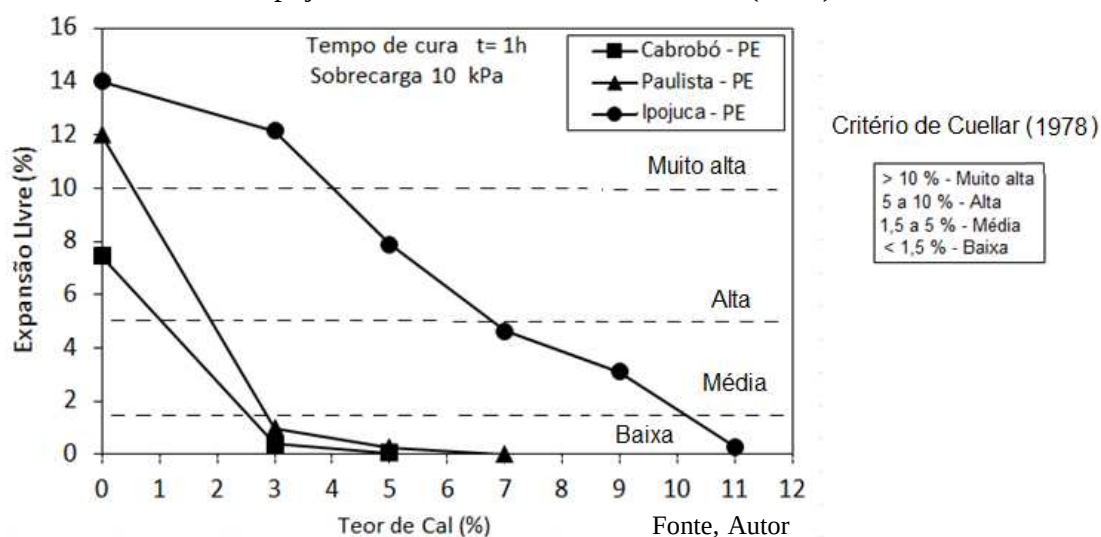
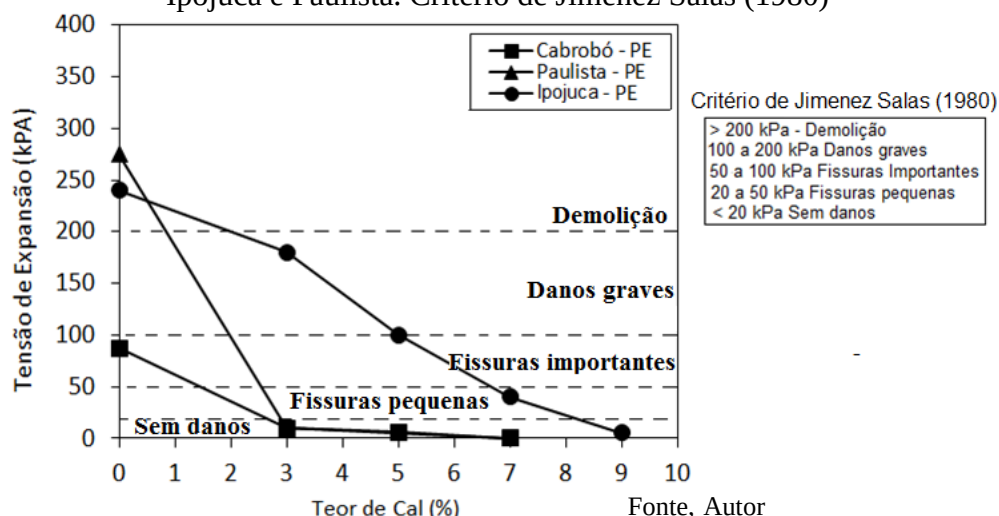


Figura 5.24 Variação da tensão de expansão com o teor de cal dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista. Critério de Jimenez Salas (1980)

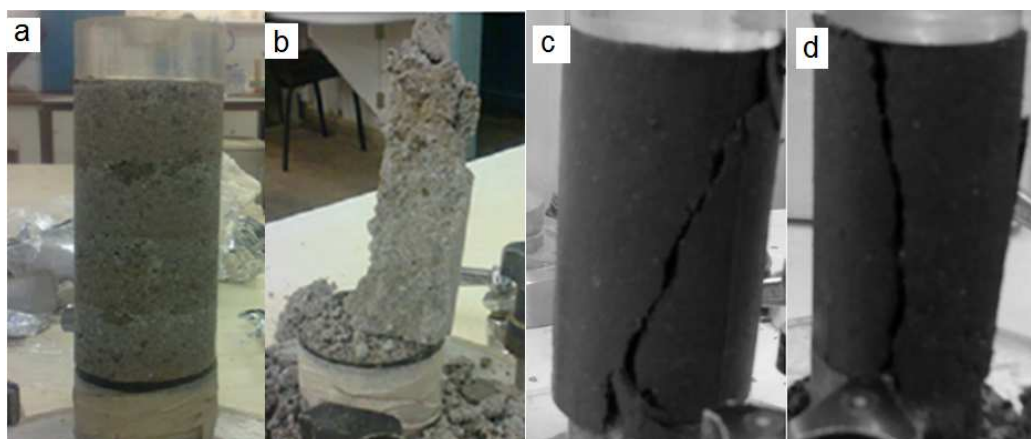


A redução na característica de expansão é geralmente atribuída a uma diminuição da afinidade com a água dos solos saturados pelo íon cálcio, diminuindo a presença de água (a cal fornece cátions para equilibrar a superfície do argilomineral e, conseqüentemente, diminuir a espessura da camada (dupla difusa), e pela formação de uma matriz cimentante, que resiste à expansão volumétrica (Blandl, 1981). Chen (1975) considera que a cal é o agente mais favorável para reduzir o potencial de expansão dos solos. Evans e Bell (1981) afirmam que, nos primeiros incrementos de cal, ocorrem as maiores reduções do comportamento expansivo do material.

5.2.7 Resistência à compressão simples das misturas solo-cal

No solo de Cabrobó, os corpos de prova ensaiados, apresentaram uma ruptura brusca à compressão simples, conforme Figura 5.25 (a, b, c e d), com superfície de ruptura com tendência diagonal em relação ao eixo axial.

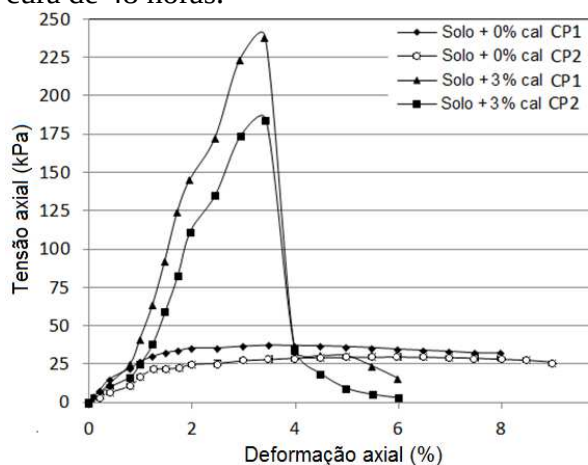
Figura 5.25 – Corpo de prova de Cabrobó (a) antes; (b, c e d) após o rompimento.



Fonte, Autor

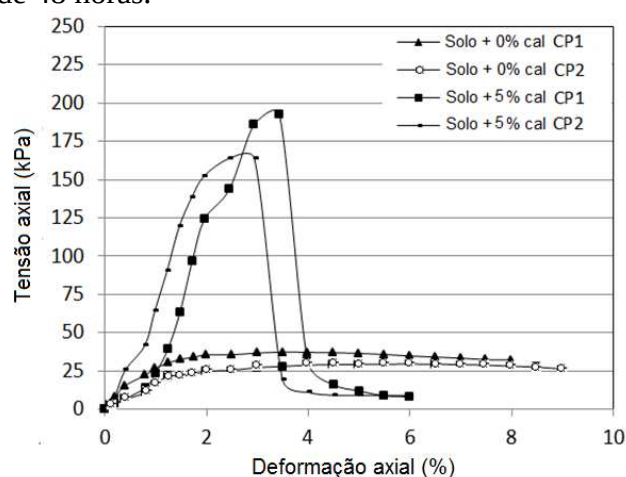
O comportamento da Resistência à Compressão Simples da amostra de solo compactado (sem cal), do município de Cabrobó, e das amostras com adição de cal, nos teores de 3%, 5% e 7% estão representados nas Figuras 5.26, 5.27 e 5.28, para os períodos de cura de 48 horas; as curvas que tinham comportamento de pico-friável, com adição da cal passou a apresentar um comportamento de pico. A Tabela 5.13 mostra os valores de deformação, tensão e o módulo de elasticidade de cada ensaio.

Figura 5.26 – Variação da tensão axial com a deformação axial das amostras do solo de Cabrobó e com adição de 3% de cal, para cura de 48 horas.



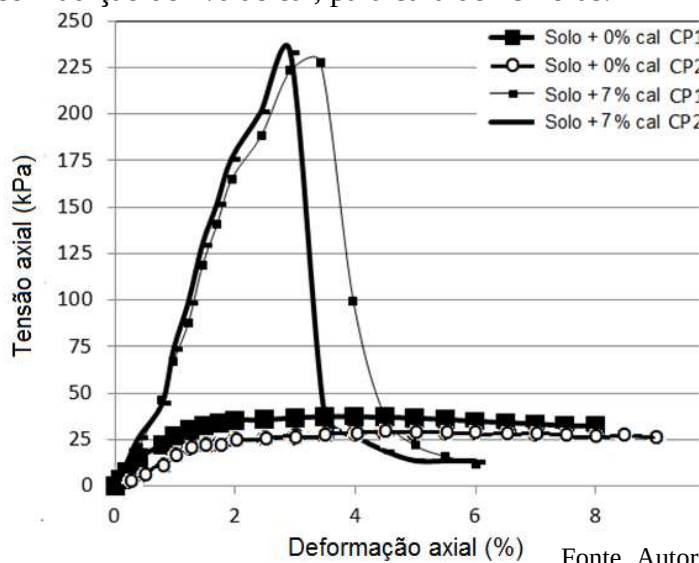
Fonte, Autor

Figura 5.27 – Variação da tensão axial com a deformação axial das amostras do solo de Cabrobó e com adição de 5% de cal, para cura de 48 horas.



Fonte, Autor

Figura 5.28 – Variação da tensão axial com a deformação axial das amostras do solo de Cabrobó e com adição de 7% de cal, para cura de 48 horas.



Fonte, Autor

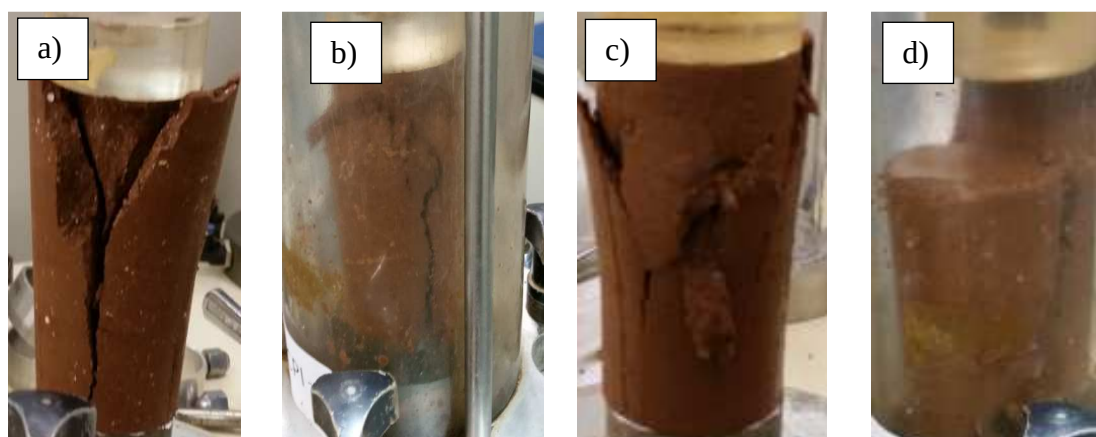
Tabela 5.13 – Valores de deformação, tensão e módulo de elasticidade dos ensaios com o solo de Cabrobó.

Resistência à Compressão Simples	Teor de Cal			
	0%	3%	5%	7%
Deformação Axial na ruptura (média) $\epsilon_a(\%)$	2,99	3,42	2,94	3,16
Resistência à compressão simples (kPa)	37,00	212,00	178,00	230,00
Módulo de Elasticidade (kPa)	741	8072	7964	9649

Com base nos resultados de RCS apresentados, observou-se que as amostras de solo, tratadas com cal, apresentaram ganhos de resistência 6 vezes, no módulo de elasticidade, 13 vezes para a adição de cal de 7% em relação ao solo natural compactado.

No solo de Ipojuca, as amostras apresentaram uma ruptura à compressão simples, com tendência a diagonal em relação ao eixo axial, Figuras 5.29 (a, b, c e d).

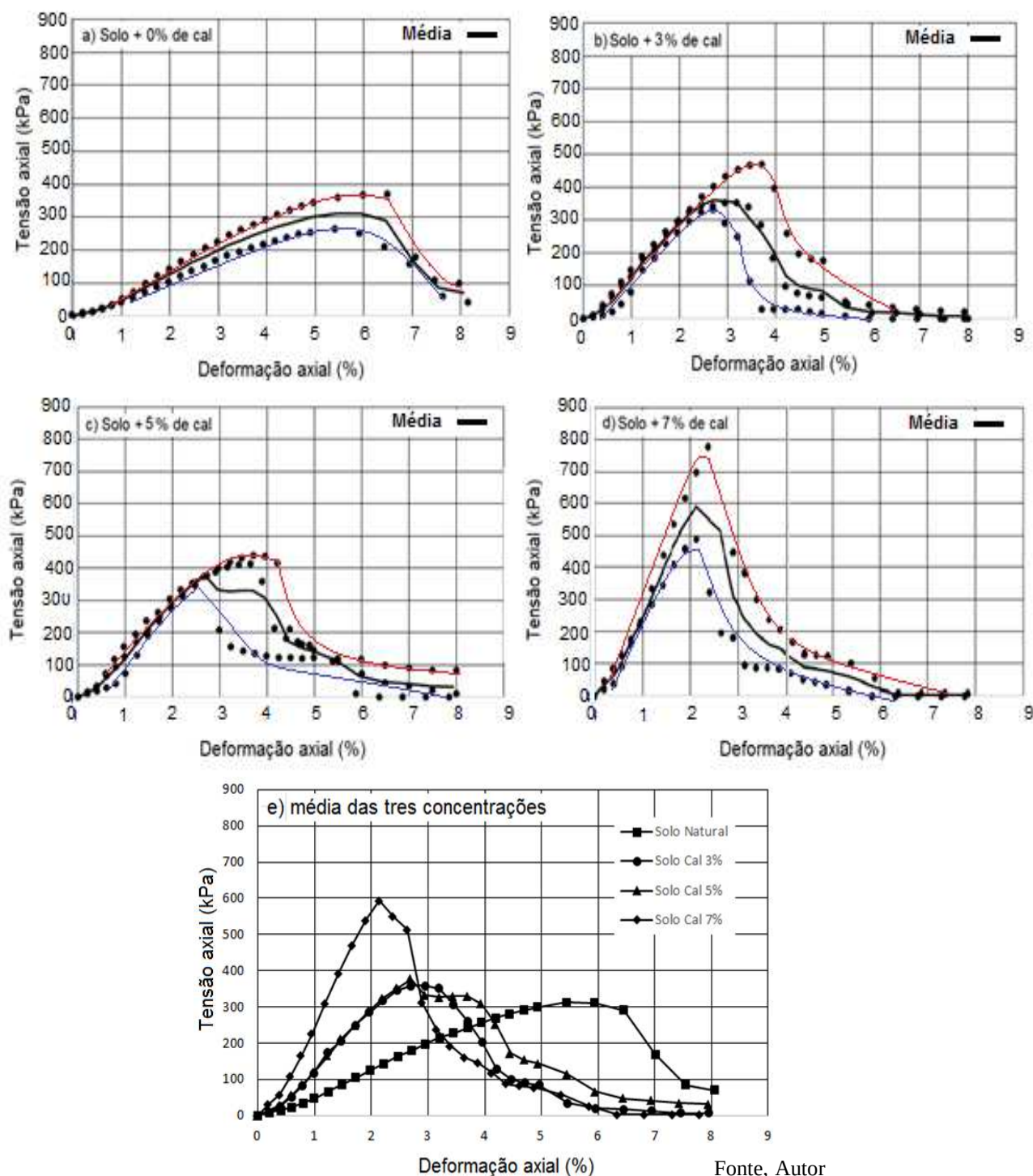
Figura 5.29 Corpo de prova do solo de Ipojuca com: a) 0% de cal, b) 3% de cal, c) 5% de cal e



Fonte, Autor

O comportamento da Resistência à Compressão Simples da amostra de solo (sem cal), do município de Ipojuca, e da amostra ensaiada com a adição de cal, nos teores de 3%, 5% e 7% estão representados na Figura 5.30 (0% de cal a), 3% de cal b), 5% de cal c), 7% de cal d) e e) com todas as médias). As misturas foram submetidas a um período de cura de 48 horas, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.14 com os valores das deformações, tensões e o modulo de elasticidade dos ensaios. A adição de 7% de cal ao solo aumentou a resistência à compressão simples em 1,9 vezes e o módulo de elasticidade em 4,6 vezes em relação ao solo compactado; com a adição da cal o comportamento das curvas que era de pico-friável foi acentuando a inclinação passando a comportamento de pico com 7% de cal.

Figura 5.30 – Variação da tensão axial com a deformação axial das amostras: a) solo sem cal, com adição de b) 3%, c) 5% e d) 7% de cal, para cura de 48 horas, do solo de Ipojuca



Fonte, Autor

Tabela 5.14 – Valores de deformação, tensão e módulo de elasticidade dos ensaios com o solo de Ipojuca.

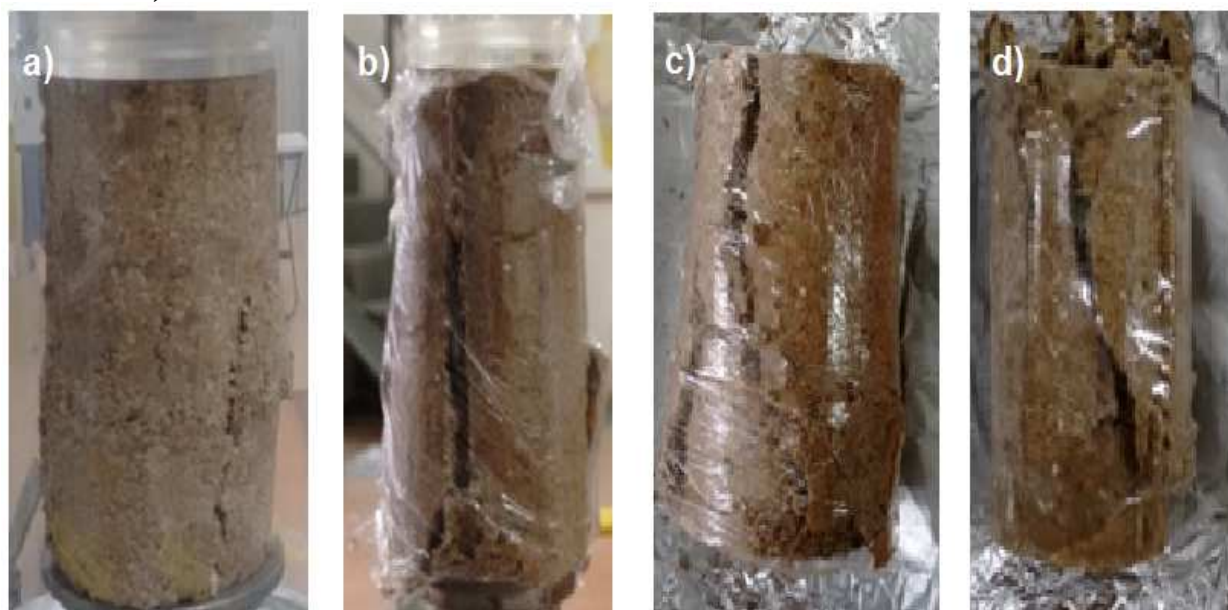
Resistência à Compressão Simples	Teor de Cal			
	0%	3%	5%	7%
Deformação Axial na ruptura (média) (%)	5,43	2,94	2,70	2,14
Resistência a compressão simples (kPa)	312	358	376	558
Módulo de Elasticidade (kPa)	6896	15000	15789	32142

Fonte, Autor

No solo de Paulista, os corpos de provas (CP) ensaiados apresentaram uma forma de ruptura com leve tendência a diagonal, com o solo com cal e sem cal Figura 5.31.

As resistências à compressão simples apresentaram crescimento significativo quando comparadas ao solo com cada uma das misturas solo-cal (Figura 5.32 e Tabela 5.15). As curvas tensão deformação do solo natural e da mistura solo mais 3% de cal, apresentam comportamento de material plástico. A medida que o teor de cal cresce na mistura, para 5% e 7% o material se torna mais rígido e o comportamento é de material frível.

Figura 5.31 – Corpo de prova do solo do município de Paulista: a) sem cal, b) 3% de cal, c) 5% de cal e d) 7% de cal.



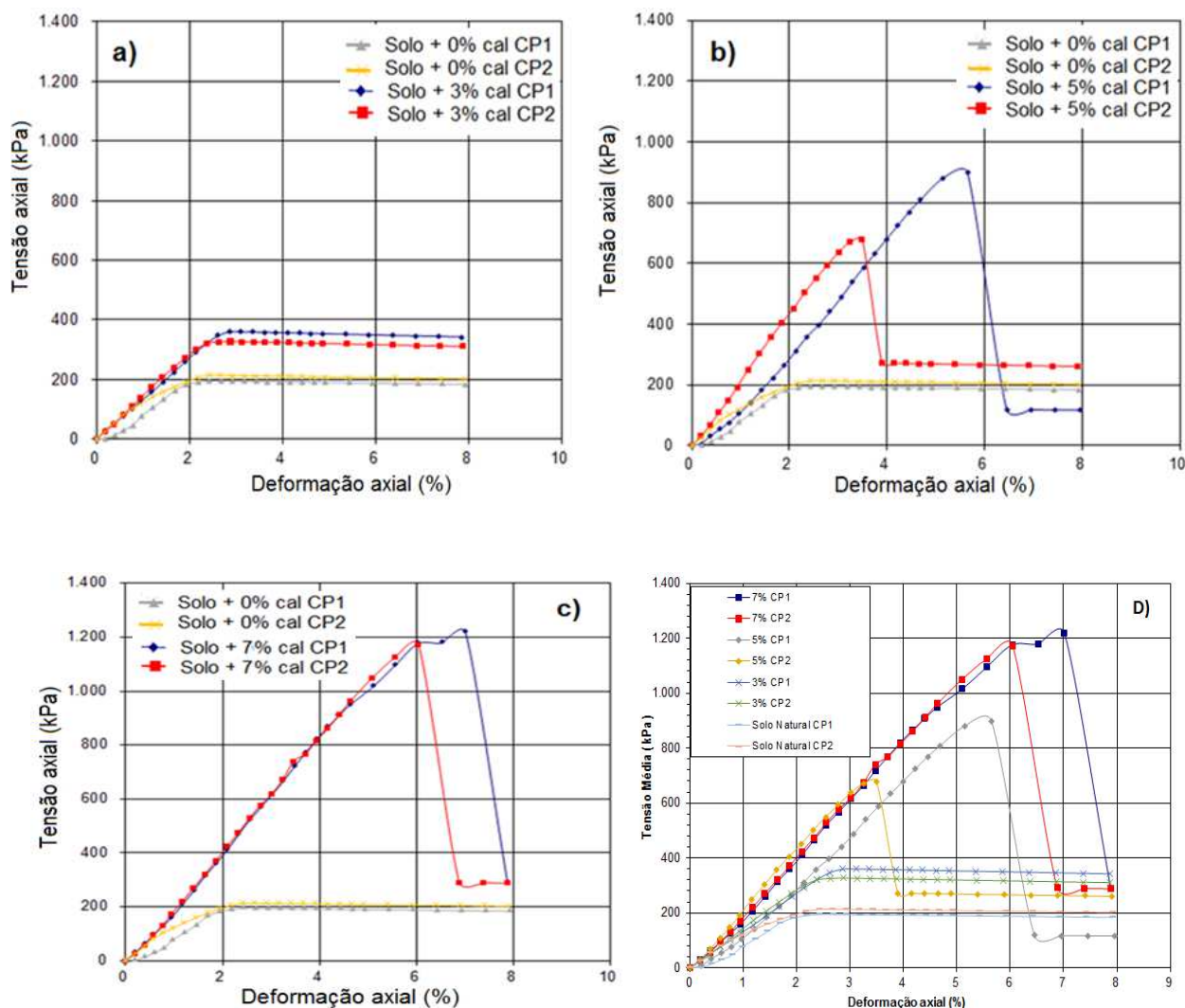
Fonte, Autor

Tabela 5.15 – Valores de deformação, tensão e módulo de elasticidade dos ensaios com o solo de Paulista.

Resistência à Compressão Simples	Teor de Cal			
	0%	3%	5%	7%
Deformação Axial na ruptura (média) (%)	2,3	2,74	4,57	6,35
Resistência à compressão simples (kPa)	200	342	788	1194
Módulo de Elasticidade (kPa)	12132	14549	22646	20165

Fonte, Autor

Figura 5.32 – Variação da tensão axial com a deformação axial das amostras sem cal e com adição de a) 3% de cal, b) 5% de cal e c) 7% de cal, para cura de 48 horas do solo de Paulista .d) média dos três resultados



Fonte, Autor

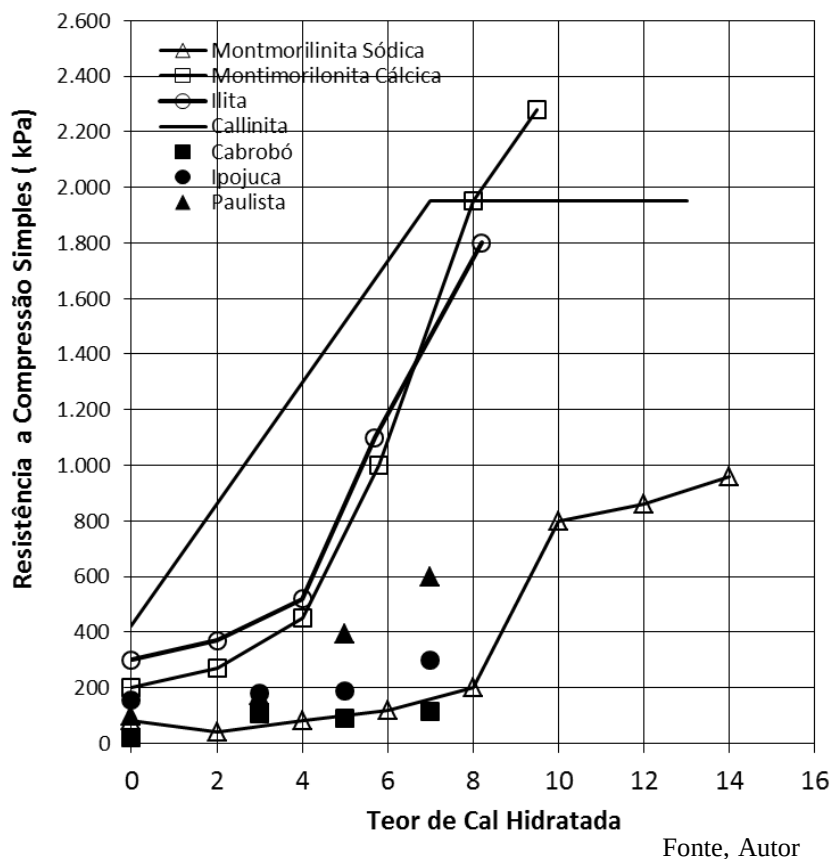
O solo de Paulista tratado com cal apresentou um aumento na Resistência à Compressão Simples comparando ao estado natural em 5 vezes e módulo de elasticidade em 1,7 vezes.

Eades e Grim (1960) constataram que o aumento de resistência para solos com caulinita, inicia com a adição dos primeiros teores de cal, enquanto que para solos contendo ilita e montmorilonita são necessários adicionar 4 a 6% de cal para que ele se desenvolva, Figura 5.33. Isto se dá porque, no caso das argilas contendo ilita e montmorilonita, é necessário que haja uma saturação das camadas pelo íon cálcio para que se inicie o ataque ao argilomineral.

Inglês e Metcalf (1972), observaram que o aumento da resistência à compressão simples da mistura solo-cal se dá de forma linear e de acordo com a quantidade de cal, usualmente 8% para solos argilosos. Bell (1996) obteve um rápido aumento inicial na RCS, de um solo contendo montmorilonita, 4% de cal foi o suficiente para atingir a resistência máxima, enquanto que para um solo rico em caulinita, a resistência máxima foi atingida com teores entre 4 a 6%.

As curvas representativas da resistência a compressão de solos com adição de vario teores de cal, após 28 dias de cura, mostram que conforme o tipo e a qualidade do solo, cada argila apresenta um aspecto diferente segundo Eades e Grin (1960) a profundidade da alteração do solo pode ser observada pelas modificações provocadas pela cal nos minerais argilosos. Observou-se que as os resultados das análises de resistência a compressão simples dos solos estudados estão compreendidos entre a montmorilonita sódica, montmorilonita cálcica e a illita (Figura 5.33)

Figura 5.33 – Variação da resistência a compressão simples (kPa) relacionado com o teor de cal (%) no solo de Cabrobó, Ipojuca e Paulista (Eades e Grin, 1960)



5.3 Síntese dos principais resultados

São apresentadas as sínteses dos principais resultados das caracterizações físicas, químicas, mineralógicas, micro estrutural e mecânica dos solos e das misturas solo-cal desta pesquisa, suas principais conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

5.3.1 Síntese dos principais resultados - solos

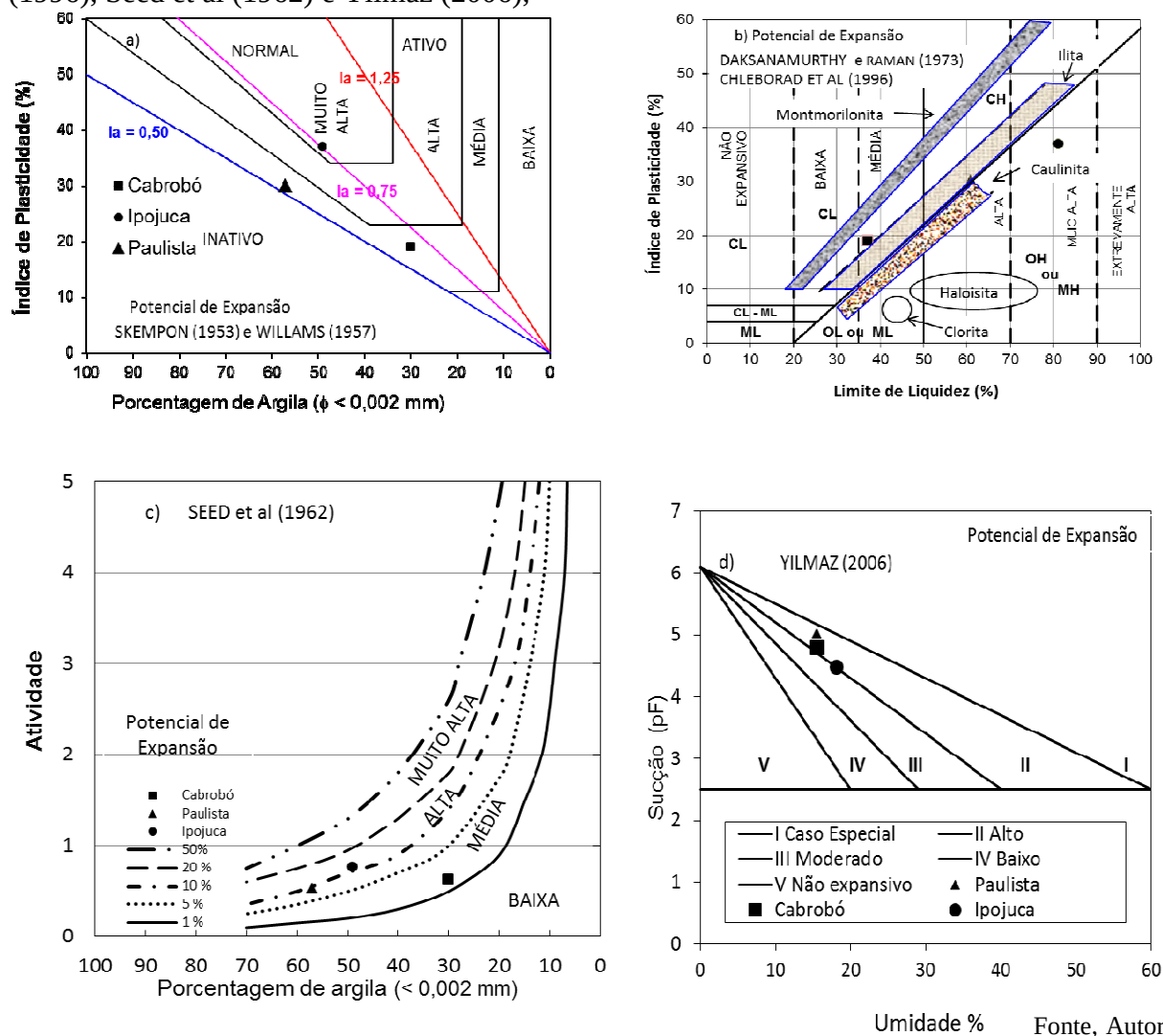
O potencial de expansão das argilas de Cabrobó, Ipojuca e Paulista pelos critérios de Van der Merwe (1964), Seed et al. (1962), Yilmaz (2006), Skempton (1953), Williams (1957) e Daksanamurty e Raman (1973) está representado na Figura 5.34, e um resumo dos principais resultados dos ensaios de caracterização física, química, microestrutural, mecânico e mineralógico dos solos estão incluídos na Tabela 5.16.

O solo de Cabrobó foi classificado de argila de baixa compressibilidade (CL) pela classificação da TRB; pela classificação unificada, A-6; distribuição granulométrica bimodal, plasticidade alta e atividade média (SKEMPTON, 1953). A curva de compactação apresentou pico duplo pelo critério de Macarrine et al. (1991) e do tipo C, segundo Lee e Suedkamp (1972). De acordo com as indicações físicas apresentou potencial de expansão médio pelo critério de Williams (1957) e Daksanamurty e Raman (1973) e baixo pelo critério de Seed et al. (1962). Foi determinado um solo fortemente alcalino, eutrófico, de alta capacidade de troca de cátions, sálico e solódico. Apresentou interestratificação irregular de minerais do tipo 2:1, mica e expansivos esmectitas, vermiculita e clorita. Por ter apresentado grau de expansividade média, pode causar fissuras importantes nas edificações.

O solo de Ipojuca foi classificado como um silte de alta compressibilidade (MH) e na classificação unificada foi denominado de argila A-7-6 (classificação TRB). Apresentou distribuição granulométrica monodal, plasticidade alta, atividade muito alta (SKEMPTON, 1953). A curva de compactação ilustra pico duplo tipo 1 (MACCARINI et al., 1991) e tipo C (LEE e SUEDEKAMP, 1972). Segundo o critério de Williams (1957), foi determinado potencial de expansão alto; pelo critério de Seed et al. (1962), muito alto; e segundo Daksanamurty e Ramam (1973), muito alto. Esse solo apresentou pH moderadamente ácido, distrófico com capacidade de troca de cátions alta; sendo sálico, solódico e com

interestratificação irregular de minerais do tipo 2:1, mica e expansivos esmectitas, vermiculita e clorita. Considerando o grau de expansividade alto, pode causar danos às edificações que levam à demolição.

Figura 5.34 O potencial de expansão das argilas de Cabrobó, Ipojuca e Paulista pelos critérios de Skempton ((1953), Willams (1967), Daksanamurthy e Raman (1973), Chleborad et al. (1996), Seed et al (1962) e Yilmaz (2006),



O solo de Paulista designado argila de alta compressibilidade (CH), classificada por argila tipo A-7-6 na classificação unificada, de alta plasticidade, com média atividade, segundo Skampton (1953). Apresentou curva de compactação com pico duplo tipo 1 (MACARRINE et al. 1991); tipo C (LEE e SUEDEKAMP, 1972). Segundo o critério de Williams (1957); alto, pelo critério de Seed et al. (1962); apresentou potencial de expansão alto, segundo Daksanamurthy e Ramam (1973). O solo apresentou-se ácido, eutrófico (fértil), com alta capacidade de troca de cátions; pela condutividade elétrica, foi classificada como sálico com caráter sódico e apresentou interestratificação irregular do tipo 2:1 de mica expansivo de

esmetita e vermiculita com presença de caulinita; grau de expansividade alto, podendo causar danos às edificações com demolição.

Neste contexto, todos os três solos indicaram condições favoráveis para o tratamento de estabilização com cal.

Tabela 5.16 Resumo da caracterização física, química, mineralógica e mecânica dos solos de Cabrobó Ipojuca e Paulista.

	CARACTERIZAÇÃO	CABROBÓ	IPOJUCA	PAULISTA
FÍSICA	Classificação unificada	CL	MH	CH
	TRB	A-6	A-7-6	A 7-6
	Plasticidade	Alta	Alta	Alta
	Atividade (Skempton, 1953)	Média	Média	Média
	Distribuição	Bimodal	Monodal	Monodal
	Granulométrica			
	Tipo de Curva de	Pico Duplo tipo 1	Pico Duplo tipo 1	Pico Duplo tipo 1
	Compactação	(Macarrine e Santos, 1991) tipo C (Lee, Suedkamp (1972)).	(Macarrine e Santos, 1991) tipo C (Lee, P. Y. e Suedkamp, R. J. (1972)).	(Macarrine e Santos, 1991) tipo C (Lee, P. Y. e Suedkamp, R. J. (1972)).
	Potencial de expansão			
	Critério de Williams (1957)	Médio	Alto	Alto
QUÍMICO	Critério de Seed et al. (1962)	Médio	Muito alto	Alto
	Daksanamurty e Ramam (1973)	Médio	Muito alto	Alto
	pH	Fortemente alcalino	Moderadamente Ácido	Ácido
	Valor “V”	Eutrófico (FÉrtil)	Distrófico	Distrófico
	CTC	Alta	Alta	Alta
MINERALOGIA	Condutividade Elétrica	Sálico	Sálico	Sálico
	Na ⁺ /T	Caráter solódico	Caráter solódico	Caráter sódico
	Composição Mineralógica	Interestratificação irregular de minerais do tipo 2:1 Mica expansivos(esmetita, vermiculita e clorita	Interestratificação irregular de minerais do tipo 2:1 Mica expansivos(esmetita, vermiculita e clorita	Interestratificação irregular de minerais do tipo 2:1 com esmetita e vermiculita com caulinita
MECÂNICO	Expansão Livre	Médio	Alto	Alto
	Tensão de Expansão	Média (danos com fissuras importantes)	Alto (danos de demolição de edificações)	Alto (danos de demolição da edificações)
	Resistência à compressão simples	37,0 kPa	316 kPa	204 kPa

Fonte, Autor

Tabela 5.17 Principais conclusões das misturas solo-cal

Caracterização das misturas solo-cal		CABROBÓ	IPOJUCA	PAULISTA
FÍSICA	Classificação unificada	De CL para ML	MH	De CH para MH
	TRB	A-6	A-7-6	A-7-6
	WS (%)	De 9,28 para 18,4	De 20,24 para 33,2	De 10,81 para 24,77
	WL (%)	De 37 para 39	De 81 para 93	De 61 para 58
	WP (%)	De 18 para 26	De 44 para 56	De 31 para 41
	Peso específico real dos grãos	Pequeno acréscimo de $\pm 4\%$ nos três solos		
QUÍMICO	Tipo de Curva de Compactação	Nos três solos passaram de pico duplo para Pico simples		
	pH	fortemente alcalino	de ácido a fortemente alcalino	de ácido a fortemente alcalino
	Cond. Elétrica (μS)	sálico	sálico	sálico
	CTC cmolc/kg	alta	alta	alta
	Ca ⁺⁺	Aumenta nos três solos com adição de Ca(OH) ₂ da cal		
	Mg ⁺⁺	Aumenta nos três solos com adição de Mg(OH) ₂ da cal		
MINERLOGIA	Microestrutura	Formação de grãos maiores granulometria semelhante a areia. Bordas dos microagregados combinados com cal Desaparece a superfície de fricção e aglomeração de agregados		
	Microscopia Eletrônica de Varredura			
MECÂNICO	Expansão Livre Cuellar (1978)	de Média a Baixa, com 3% de cal (0,4)	de Alta a Baixa, com 11% de cal (0,3)	de Alta a Baixa com 5% de cal (0,2)
	Tensão de Expansão Rodriguez e Ortiz (1995)	Média (danos com fissuras importantes) para sem danos	Alto (danos de demolição de edificações) para sem danos	Alto (danos de demolição de edificações) para sem danos
	Tensão de Expansão Jimenez Salas (1980)	Com 3% cal passou de fissuras importantes para sem danos	Com 11% cal passou de demolição para sem danos	Com 7% cal passou de demolição para sem danos
	Resistencia à compressão simples	7% cal 37→230	7% cal 312→594	7% cal 200→1194

Fonte, Autor

A adição da cal ao solo de Cabrobó modificou a classificação unificada do solo de uma argila de baixa compressibilidade (CL) para um silte de baixa compressibilidade (ML), a curva de compactação deixa de ser de pico duplo e passa a ser de um só pico. A mistura solo-cal continua sendo alcalina, a CTC é alta, a mistura é eutrófica. A adição de 3% de cal ao solo reduz a expansão de média para baixa e de danos importantes para as edificações a sem danos. A resistência à compressão simples cresce 6 vezes e o módulo de elasticidade 13 vezes na adição de 7% de cal.

A adição de cal ao solo de Ipojuca não altera a classificação unificada (MH) e o da TRB (A-7-6). A curva de compactação passa a apresentar um único pico. Há formação de grumos e aglomerados de agregados; a mistura passa a ser alcalina, a CTC é alta e eutrófica; a adição de

11% de cal ao solo reduz a expansão livre e a tensão de expansão a valores praticamente nulo; a resistência à compressão simples cresce 1,9 vezes e o módulo de elasticidade 4,6 vezes quando adicionado 7% de cal ao solo compactado.

Com o incremento da cal ao solo de Paulista modificou a classificação do solo de argila de alta compressibilidade para silte de alta compressibilidade; a curva de compactação passa a apresentar pico único. Há formação de grumos e aglomeração de agregados. A mistura passa a ser alcalina, a CTC é alta e eutrófica. A adição de 5% da cal ao solo reduz a expansão livre e a tensão de expansão a valores nulos; a resistência à compressão simples aumentou 6 vezes e o módulo de elasticidade 1,7 vezes quando adiciona 7% de cal ao solo compactado.

6 CONCLUSÕES

6.1 Caracterizações físicas dos solos

- Os solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista apresentam um percentual de argila respectivamente 37%, 67% e 50%, sendo classificados segundo a classificação unificada como: CL (argila de baixa compressibilidade) para Cabrobó e MH (silte de alta compressibilidade) para o solo de Ipojuca e argila de alta compressibilidade CH Paulista.
- A classificação segundo Highway Research Board (HRB) ou classificação TRB, Coloca o solo de Cabrobó como A-6 solo argiloso, os solos de Ipojuca e Paulista como A-7-6, solos argilosos, sendo solos não indicados para uso em estradas e edificações pelas suas instabilidades.
- O índice de plasticidade dos três solos está classificado como, alta plasticidade, ou seja, todos com valores superiores a 15%, e o limite de liquidez indicando alto potencial expansivo dos solos;
- A carta de atividade dos solos naturais dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista, pelos critérios de Williams (1957), conclui que o solo de Cabrobó apresenta uma atividade média e o solo de Ipojuca e Paulista uma atividade alta. E pelos critérios de Daksanam Vrrthy e Raman (1973), Seed et al. (1962), o solo de Cabrobó apresenta médio potencial de expansão; o solo de Ipojuca muito alto e o solo de Paulista com um potencial de expansão alto.
- O tipo da curva de compactação com um pequeno acréscimo de umidade, a partir do solo seco, classifica os solos dos três municípios como sendo do TIPO-1, com pico Duplo segundo os critérios de Macarrine e Santos (1991), e do TIPO-C segundo Lee, P. Y. e Suedkamp, R. J. (1972), para os três solos analisados. Comportamento semelhante foi encontrado por Ferreira et al. (2012). Esse comportamento com a coesão muito alta, sugere um argilomineral com presença de montmorilonita expansiva.

- A determinação da curva de contração-secagem após processo de umedecimento se mostrou apropriado para obter a relação em umidade x sucção, índice de vazios, saturação

6.2 Caracterização da cal

- As caracterizações físicas realizadas na cal relativa a granulometria, retenção de água, e a química, os óxidos de cálcio e magnésio, e a análise termo diferencial, atenderam todas as recomendações da ABNT sendo qualificada como uma cal de tipo CH-1.

6.3 Caracterização química mineralógica e microestrutural dos solos

- O pH do solo de Cabrobó é Fortemente Alcalino, o de Ipojuca Moderadamente Ácido e o de Paulista Ácido. A capacidade de troca de cátions dos solos estudados é alta. O valor de V nos três solos é elevado (solos férteis) bem como a condutividade (solo sálcos). O solo de Cabrobó e Ipojuca tem caráter solódico e o de Paulista sódico com relação a relação Na^+/T .
- A composição mineralógica dos solos de Cabrobó e Ipojuca apresentaram uma interestratificação irregular de minerais do tipo 2:1, com mica expansivas com presença de esmectita, vermiculita e clorita; o solo de Paulista apresentou a composição mineralógica com interestratificação irregular de minerais do tipo 2:1, caulinita confirmando a presença de argilominerais expansivos em todos os solos estudados.

6.4 Influencia da adição da cal nos solos.

- Com a adição da cal aos solos dos municípios de Cabrobó, Ipojuca e Paulista iniciaram as reações com a argila, formando floculo, aumentando a aglutinação e as partículas e a textura dos solos, ocasionando uma elevação das frações areia e silte, diminuindo os índices de plasticidade, modificando as curvas de compactação em todos os casos, passando de pico duplo para pico único, reduzindo o peso específico seco e a umidade

ótima. Houve uma redução e estabilização da capacidade de troca de cátions, após a mistura solo-cal passarem por um tempo de cura de 120 dias, aumentando os percentuais dos óxidos de cálcio e magnésio, e a redução dos óxidos de silício, alumínio, ferro, sódio, potássio e titânio. O aumento do pH tornou os solos em condições para estabilização com cal.

- A adição da cal eleva a resistência a compressão simples e o módulo de elasticidade.
- O teor de cal para estabilizar a expansão dos solos deve atender tanto a nulidade da pelo critério do pH (Eades e Grim, 1966), expansão livre e tensão de expansão simultaneamente. Os solos estudados estabilizaram com: 3% de cal no solo de Cabrobó, 11% de cal para o solo de Ipojuca e 5% de cal para estabilizar o solo de Paulista.

6.5 Sugestões para futuras pesquisas.

- identificar quantitativamente os compostos formados nas reações pozolânica através de difratometria de raios-X;
- avaliar a resistência a compressão simples com o tempo mais prolongado de cura para as misturas solo-cal;
- avaliar a influência do tipo de cal no processo de estabilização da expansão e aumento de resistência;
- avaliar a influência da sucção na mistura;
- avaliar a viabilidade econômica do uso da cal no melhoramento do solo e o impacto que essa técnica pode trazer ao ambiente.

REFERÊNCIAS

ABASS, K. I.;(2014) **Lime Stabilization of Expansive Soil** *Journal of Engineering and Development*, Environmental Eng. Dep., Collage of Engineering, Al-Mustansiriya University, Baghdad ,Iraq,. Vol. 71, No.7, Mar. 3172, ISSN 7172- 1133 dezembro 2014.

AITCHISON, G. D.; PETER, P. e NARTIN, R. (1974). **Longterm Observation of Deformation in Structure Founded in Expansive Clays in South Australia**.*Proc. 3RD Int. Cinf. Exp. Soils*, Haifa, Vol. 2, 109-113p.

AITCHISON, G. D.; WOOD, C. C. (1965). **Some Interactions of Compaction Permeability and post Construction de Flocculation Affecting The Probability of Priding Failure In Sanall Earth Dams**. 6th Int. Cinf. On Soil Mechanics and Fundation Engineering, Montreal.

AL-TAIE, A. T.; DISFANI, M. M.; EVANS, R. P.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S. (2015) **Determination of OptimumLine Content for Volcanic Expansive Clays**. 15^o Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, Argentina.. p1623-1630.

ALBERES, A. P.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B. A. **Um Método Simples de Caracterização de Argilominerais por Difração de Raio X. Cerâmicas**. Vol. 48, nº305, São Paulo, jan./fev./mar. 2002.

ALMEIDA, R. M. S. (2009) **Estabilidade de Areia Monogranulares Para Fins Rodoviários-Estudo Aplicado à Região de Mira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).Universidade de Aveiro, 117p.

ALVES. J. N. (2010) **Avaliação de dimensionamento da subestrutura ferroviária de linhas de alta velocidade**. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 99p.

ALONSO, E. E.; GENS, A. and HIGHT, D. W. (1987) **General report Special problem solis**. European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 3 pp. 1087-1146.

AMORIN, S. F. (2004) **Contribuição à Cartografia Geotécnica: Sistema de Informações Geográficas dos Solos Expansivos e Colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC-PE)**. Dissertação (mestrado) da Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Pag.168.

ANTUNES, F. S; POLIVANOV, H.; PORTOCARRERO, H.; CAMPOS, T. M. P. (2015) **Solos: Subsidio Para Estudos de Geologia de Engenharia**. Anuário do Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, v.38-1, p. 180-198.

ARAÚJO, A. F. (2009) **Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 175 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT) **NBR 1998** – (1998). Determinação da Finura da Cal- Rio de Janeiro.

_____. **NBR 6457** – (1986). Amostra de Solo – Preparação para ensaio de Compactação e ensaio de Caracterização. Método de ensaio. ABNT, Rio de Janeiro.

_____. **NBR 6459** - (1984b) solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 6473** – (2003a) Cal virgem e cal hidratada. Análise química, Rio de Janeiro.

_____. **NBR 6508** – (1984) massa específica de grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 9604** – (1986) Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostra deformadas e indeformadas.

_____. **NBR 7175** – (2003b) Cal hidratada para argamassas, Rio de Janeiro.

_____. **NBR 7180** – (1984c) Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 7182** - (1986). Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 9289** – (1998). Cal hidratada para argamassas – determinação da finura.

_____. **NBR 9290** – (1996). Cal hidratada para argamassas – determinação de retenção de água.

_____. **NBR 9895** – (1987). Ensaio de expansão – Rio de Janeiro.

_____. **NBR 12007** – (1990). Adensamento Unidimensional.

_____. **NBR 12025** – (2012). Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio— Rio de Janeiro.

American Society for Testing and Materials (ASTM):. ASTM D4829 – (1995). Método de Teste Padrão para o Índice de Expansão de Solos.

_____. **ASTM D5102** – (1996). Método de Teste Padrão para resistência à compressão não confinada compactados misturas de solo-cal.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL (ABPC). São Paulo (2009) <Disponível em: <http://www.abpc.org.br/frame.htm>> Acesso em: 05 de junho de 2014.

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

AZEVEDO, A. L. C., (2010). **Estabilização de Solos Com Adição de Cal – Um Estudo Sobre a Reversibilidade das Reações que Acontecem no Solo Após a Adição de Cal**. Dissertação de (Mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 114p.

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

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

BELL, F. G. (1996). **Lime Stabilization of clay menerals and soil**. Engineering Geology. N. 42, p.223-237.

BLANDL, H. (1981). **Alteration of soil parameters dy stabilization with line**. In International Conference on Soil Machanics on Foundation Engennring, 10., Stokholm. Proceeding Rotterdam: A. A. Balkema, v.1, p587-595.

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

BUENO, E. S.; (2011). **Estudo de alguns fatores que podem afetar a durabilidade de Mistura Solo-cal**. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS. 149p.

BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; MCCracken, F. D.; SOUTHARD, R. J.;(1997). **Soil Genesis and Classification**. 2.th.ed. Ames: Iowa State University, 527p.

CABROBÓ Vip. Processo de desertificação dificulta plantio em Cabrobó (2014), Acesso em 4 de junho de 2016 <http://www.cabrobovip.com.br/?p=22452> 29 de abril de 2014.

CAMAPUM, C., J.; MARINHO. A. M. M.; OLIVEIRA. O. M.; GITIRANA, G. F. N.(2014) **Contribuição ao Entendimento do Comportamento dos Solos Não Saturados Curva Característica de Sucção Transformada**. XVII Cobranerg Goiânia - GO, 2004.

CAMPOS, I. C. O.; GUIMARÃES, E. M.; CARVALHO, J. C.;(2008). **Busca de Entendimento da Curva Característica de Materiais Expansivos**. Cobranseg. Journal of Mechanical and Civil Engineering, 1535-1542p.

CAMPOS, L.E.P & BURGOS, P.C.; (2004). **Influência da Sucção na Expansão de Massapês** In: REGEO, Porto Alegre - RS. Cd-Rom.

CARCEDO, F. J. A.; GIJON, M. F.; MAZO, C. O.; RODRIGUEZ, J. L. S.; (1986). **Mapa Previsor de Riegos doe Expansividad de Argillasen España**. A escala 1:1000.000.Série : Geologia Ambiental. Instituto Geológico y Minero de España. Centro de Estudiosy Esperimentacion de Obras Públicas.

CARVALHO, H. J. S.; MIGUEL, P.; PINTO L. F. S.; BRAGA, M. G.; GOMES, S. R; FARIAS, S. S.; (2014) **Uso de Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica (ATD-TG) na Caracterização e Quantificação de Propriedades do Solo**. X Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo, Pelotas, RS.

CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos da Mecânica dos Solos**. Campina Grande: Gráfica Marconi. 1997.

CARVALHO, J. C.; BARBOSA, M. C.; MENDONÇA, R. M. G.; FARIAS, W. M.e CARDOSO, F. B. F.; (2015) **Propriedades Químicas, Mineralógica e Estruturais de solos**

naturais e compactados. Solos não saturados no contexto geológico, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS) São Paulo-SP 39-78p.

CASTRO, F. J. C. O.; (1981). **Um estudo Físico químico matemático de estabilização alcalina dos solos argilosos**. Dissertação (Mestrado) COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 476p.

CHANDLER, R.J.;CRILLY, M.S.; MONTGOMERY-SMITH,G.; (1992). **A Low-Cost Method of Assessing Clay Dessication for Low-Rise Buildings**. Proc. of the Institute of Civil Engineering, Vol. 92, N° 2, p. 82-89.

CHEN, F. H. (1965). **The Use of Piers To Prevent the Upliftiures Founded on Expansive Clays**. **Proc 1st Int. Conf. Exp Soil**, Texasng of the lightly loa ded StructSoils, Amsterdam: Elsevier, 275 - 463 p.

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

CHEN, F. H. (1998). **Foundation on Expansive Soils**, New York: Elsevier, 463 p.

CINCOTTO, M. A. (1980) **Estudo da Composição Química da Cal Hidratada**. Associação Brasileira de Produtores de Cal. Boletim 11. São Paulo, Brasil.

CORTE, M. B. (2013) **Mistura Solo-Cal-Fibra: Comportamento Mecânico à Compressão e Tração**. Trabalho de Conclusão curso Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande de Sul. 68p.

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

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

CRUZ, J. (2008). **Avaliação do Estado da Arte da Aplicação de Solos Tratados com Cal no Âmbito das Infraestrutura de Transporte**. **Dissertação (Mestrado)** Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

CRUZ, R. F.; ACCIOLY, A. C. A. (2013) **Petrografia, Geoquímica e Idade U/PB do Ortognaisse Rocinha, no Domínio Pernambuco-Alagoas W da Província Borborema**. Estudos Geológicos v.23(2), Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco. 27p.

CUELLAR, V. (1978). **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. 321p.

DAKSANAMURTY, V.; RAMAN, V., **A Simple Method of Identifying na Expansive Soil**. Soils And Foundation, v. 13 n 13, n 1 97-104p 1973.

DA SILVA, J. J. M. (2001). **Variação volumétrica de uma argila contráctil-expansiva não saturada submetida a diferentes condições climáticas**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 249 p.

DELGADO, A. (1986) **Influencia de la Trayectoria de las Tensiones em el Comportamento de Las arcilas Expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno**. Sevilla, Universidad de Sevilla 564p. (tese de doutorado).

DIAMOND, S.; Kinter, E. B.(1965). **Mechanisms os Soil Lime Stabilization: an interpretive review**. Highway Research Record, Washington, n. 92.

DRISCOLL, R., CRILLY, M., *Subsidence damage to domestic buildings, Lessons learned and questions asked*, London, Building Research Establishment, 2000.

DUARTE, W. H. B.; MENOR, E. A. M. B.; MOTA FILHO F. O. Contaminação geoquímica ambiental da produção de calcários corretivos e cal na região de Santa Maria do Cambucá, Pernambuco: considerações sobre a produção mineral regional. Revista de Geografia (Recife), Vol. 29, No 3 (2012).

EADES, J. L. e GRIM, R.E. (1960). **Reaction of hydrated lime with Clay minerals in soil stabilization**. Highway Research Record, Washington, n. 262, p. 51-63.

EADES, J. L. e GRIM, R. E. (1966). **A quick test to determine lime requirements for lime stabilization**. Highway Research, Washigton, D. C. n 139. P61-72.

ECHA - European Chemicals Agency. (2014) **Calcium dihydroxide**. Disponível em: <http://apps.echa.europa.eu/registered/data/dossiers/DISS-9eaebe88-3dab-1715-e044-00144f67d031/AGGR-c0185199-38f6-4eeb-9847-bb362953630e_DISS-9eaebe88-3dab-1715-e044-00144f67d031.html#section_3_5>. Acesso em: 14 fev. 2016.

ELKADY, T. Y.; AL-MAHBASHI, A.; AL-SHAMRANI, M.A. (2015a) **Resilient Modulus Lime-treated Expansive Subgrade**. 15° Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, Argentina. p1631-1638.

ELKADY, T.Y., SHAKER, A.A., BAIG, A.A., AL-SHAMRANI, M.A. (2015b) **Effect of intermittent wetting on the UCS of lime-treated expansive soils**. 15° Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, Argentina. p.1639-1644.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (1997). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos. 212p.

____ – EMBRAPA (2011). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Revista. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos. 230p.

____ – EMBRAPA (1999). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, 412p.

____ - EMBRAPA, **Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco**. Recife. (2001). CD-ROM. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Documentos; Nº. 35.

EMMERT, F.; (2010) **Avaliação do emprego de técnicas de estabilização de solos na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia – GO**. Dissertação (Mestrado) Universidade de Brasília. 116p.

ESCARIO, V. (1967). **Measurement of the SuWelling Characteristics of a soil fed with water tension. International Cooperative research on the prediction of moisture content under pavements**, O. C. D. E., Madrid-Meeting.

ESCARIO, V. (1969). **SuWelling of soils in contact with water at a Negative Pressure. Proc. Of the 2 nd International research and enginee ring**. Conference on expansive clay soils, Texas, pp 207-217.

EVANS, G. L.; BELL, D. H. (1981). **Chemical stabilization of loess New Zealand**. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 10. Stockhoim. Proceedings. Rotterdam: A. A. Balkema, v.3, p. 649-658.

FAURE A. (1980) **Comportamento mecânico das argilas em função de sua natureza: formulação de uma nova concepção de plasticidade e liquidez.** IV Reunião Aberta da Indústria da cal. Boletim no 12, 100-123.

FEDA, J.,(1966) **”Structural stability of subsident loess soil from prahadejvice”**, Engineering Geology, vol. 3, Nº3 pp201-202.

FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário da língua portuguesa - Academia Brasileira de letras e da Academia Brasileira Filosofia**, 1. Edição Editora Nova Fronteira. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1975. 1499p.

FERREIRA, M. C., THOMÉ, A.; (2011) **Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais.** Notas de aula Universidade de Passo Fundo – UPF, Passo Fundo, RS Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.18, p.1-12.

FERREIRA, S. R. M. (1995). **Colapso e Expansão em Solos Natorais devido a Inundação** Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro 379p.

FERREIRA, S. R. M. (1990). **Geology and Pedology Relatad to Colapsiveis em Pernambuco – Brasil.** IAGE, 6TH p-617-621.

FERREIRA, S. R. M. (2013). **Comunicação pessoal.** “Fotos solicitadas e Planilha”. Brasil.

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

FERREIRA, S. R. M. et. al. (1993). **Variação do Volume de um solo não Saturado colapsível e expansivo.** 7º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Poços de Caldas Minas Gerais, Vol. 1 p283-296.

FERREIRA, S. R. M. e FERREIRA, M. G. V. X. (2009) **Mudanças de volume devido a variação de teor de umidade em um Vertisolo no Semi-Árido de Pernambuco.** Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso), v. 33, p. 779-791.

FIGUEIREDO, S. S.; (2011) **Estudo da durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Federal de Campina Grande, PB. 106 f. CDU – 624.13(043).

FINK, D. H. (1971). **Demixing of Exchangeable Cations in free swelling bentonite clay**. Soil Science Society of America Proceedings, vol. 35.

FONSECA, H. D.; LOPES, G. A. C. (2013) **Avanço em Caracterização de Amostras Sólidas Cristalinas Através de Difractometria de Raios-X**, Estação Científica, UNIFAP, Vol. 3, Nº1, jan – jun, , p31-45.

FREDLUND, D.G. e XING, A. (1994) **Equations for the soil water characteristic curve** - Can. Geot. J.31(4) pp 521-532.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. (1977), **Stress state variables for unsaturated soils**. *J. of geot. Div. A.S.C.E.*, Vol.103, no.5, pp 447-466.

GERSCOVICH, D. M. S. (2001) **Equações para Modelagem da Curva Característica Aplicada a solos Brasileiros**. IV Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre, RS, Março 2001, pp76-92.

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

GRIM, R.E.(1953). **Clay Mineralogy**. McGraw-Hill Book Company, INC, USA.

GRIM, R.E.(1968). **Clay Mineralogy**. Second Edition, McGraw-Hill co., New York.

GUÉRIOS, E. M.; (2013) **Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para uso em pavimento urbano**. Trabalho de Conclusão Engenharia de Produção Civil na Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba.

GUIMARÃES, J. E. P. (2002). **A Cal** – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. 2ª ed. Recife: Editora Universitária da UFPE.

HAINES, W. B. **The Volume-Changes Associated with variations of water content in soil**. Journal of Agricultural Science, [S.I.]: 1923 v.8. p 297-310.

HERRIN, M. e MITCHELL, H. **Mistura de solo-cal**. Rio de Janeiro: IPR, 1968.

HO, D. Y. F.; FREDLUND, D. G. and RAHARDJO, H.(1992) **Volume change índices during loading and unloading of na unsaturated soil** Camadian Geotechnical Journal. Vol 29 n.2 pp195-207.

HOLTZ, W. G., e GIBBS, H. J. Shear Char. , **Gravelly Soils**, 1953 gravels, 3/200.

HOUSECROFT, C. E. e SHARPE, A. G. **Química Inorgânica** / 4ª edição. Rio de Janeiro: LTC. 2013. 624p. ISBN 978-85-216-2327-4.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2014
<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=260720> acessado em 07/09/2015.

INGLES, O. G. and AITCHISON, G. D., 1969. **Soil-water disequilibrium as a cause of subsidence in natural soils and Earth embankments** In: Lond Subsidence, IASH, Publ, 89(2): 342-353.

INGLES, O. G. and METCALF, J. B. (1972). **Soil stabilization: principles and practice**. Sidney: Butterwoeths, 372p.

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

JOHNSON, L. D. (1978). **Predicting potencial heave and heave with time in swelling foundation soils. Technical report S-78-7**. U.S. Army Engineer Water ways experiment station, CE Uiksburg, Miss.

JUCÁ, J. F. T. (1990). **Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada**. Tesis Doctoral, E.T.S. Camiños, Canales e Puertos, universidad Politécnica de Madrid.

JUCÁ, J. F. T.; GUSMÃO FILHO, J. A. and JUSTINO da SILVA, J. M. (1992). Laboratory and field tests on an expansive soil in Brazil. *7th International Conference on Expansive Soils* – Dallas/Texas, Vol. 1, pp. 337-342.

Jucá, J. F. T.; Cabral, J. J. P. S.; Monteiro, V. E. D.; Santos, S. M. & Perrier Jr, G. S. (1997). “Geotechnics of a Municipal Solid Waste Landfill in Recife, Brazil”. Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Almeida (ed), Balkema, Rotterdam, ISBN9054108851, PP. 429-436.

JÚNIOR, L. A. M. (2010) **Carbonatação natural de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz. Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria, RS, Brasil 124p.

JUSTINO, S. J. M. (2001) **Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva não Saturada Submetida a Diferentes Condições Climáticas.** Tese (Doutorado em engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 249 p.

KLAMT, R. A.; Rodrigues, R. E.; SULEIMAN, G. K. A.; BARONI, M. (2013) **Verificação da Melhoria da RCS com Acréscimo de Cal, Cimento e Cinza da Casca de Arroz em um Solo Arenoso da Formação Botucatu.** Anais, VII Seminário de Engenharia geotécnica do Rio Grande de Sul, Santa Maria, Maio. 65-73p.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. C.; BERTOLLO, S. A. M.; LEAL, A. D. (2013) **Trabalho apresentado. 42ª reunião anual de pavimentação e 16ª encontro Nacional de Conservação Rodoviária.** FAURGS. Gramado / RS.

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

LAMBE, T. W. e WHITMAN, R. V. (1969). **Soil Mechanics.** Series in soil Engineering. Massachusetts Institute of Techonology, p 553.

LEE, P. W.; Suedkamp, R. J. (1972) **Characteristics ofIrregularly Shaped Compaction Curves of Soils. Highway Research Record** n. 381, National Academy of Sciences, Washington, D.C., p 1-9.

LIMA, M. A. A. (2014) **Estudo do Comportamento Geotécnico de Uso de Solo Argiloso de Suape, Potencialmente Expansivo, Estabilizado com Cal.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco. UFPE.

LIMA, R. C. O. (2010) **Estudo da Durabilidade de paredes e Tijolos de Solo-cimento incorporado com Resíduo de Granito.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. CDU 6284038(043).

LIRA, Liliana de Fátima Bezerra (2006) **Nanocompósito Montmorilonita/Polipirrol: Preparação, Caracterização e Aplicação como Sensores de Voláteis.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco.

LOCH, F. e C.(2013) **Barreiras de solo estabilizados com cal e cimento para proteção ambiental**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 242p.

MALANCONI, M. (2013), **Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como camada de pavimento urbano**, Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de São Carlos, SP. 94f.

MALHOTRA, M.; NAVAL, S. (2013) **Stabilization of Expansive Soils Using Low Cost Materials. P.D.M School of Technology & Management, Bahadurgarh.2**. D.A.V Institute of Engineering & Technology, Jalandhar International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 2, Issue 11, May.

MARINHO, F.A.M. (1994). **Shrinkage Behaviour of some Plastic Soils**. PhD Thesis – Imperial College, University of London, 216p.

MARINHO, F. A. M. (1997). **Medição de Sucção em Solos**. In: 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados – ÑSAT97, Rio de Janeiro, Anais...p. 373-397.

MARINHO, F. A. M. and CHANDLER, R. J.(1993). **Aspects of the behaviour of clays on drying: Unsaturatend Soils**. ASCE Geotechnical Specil Publication nº 39 Edited dy Houston S.L. and Wray W. K. pp. 77-90.

MARQUES, G. L. O. (2012) **Notas de aula Universidade Federa de Juiz de Fora** < Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAKy0AH/cap3-solo-cal>> acesso em 28 de maio. 2013.

MACCARINI, M., SANTOS, G. T. e TEIXEIRA, V. H. (1991). **Ponto Crítico de Sensibilidade à Compactação de um Solo Residual Riodacítico Maduro Ocorrente em Santa Catarina**. 23ª Reunião Anual de Pavimentação, Outubro, Florianópolis, pp. 419-429.

MC KEEN, R. G. (1981). **Field studies airport paviments on expansive clays**. 4th Int. Conf. On Expansive Soils pp. 242-261.

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

MITCHELL, J. K. (1973). **Fundamentals of soil behavior**, 2 nd Ed John Willey e sons, inc USA. P.437.

MITCHELL, J. K. (1976). **Fundamentals of soil behavior**, 2 nd Ed John Willey e sons, inc New York. P.422.

MITCHELL, J. K. and AVELLE, D. L. (1984). **A technique to predict expansive soil movements** – 5ª International Conference on Expansive Soils – Adelaide. South Australian May – pp. 124-130.

MONIZ, A. C. **Composição química e estrutura dos minerais de argila**, In: Moniz, A. C. (ed). Elementos de Pedologia. Rio de Janeiro. Livro Técnico e Científico, Editora S. A. p 29-4. 1975.

NATIONAL LIME ASSOCIATION. (2006). **Technical Memorandum Guidelines for Stabilization of Soil Containing Sulfates**. Austin White Lime, Chemical Lime. Texas Lime. < Disponível em: www.lime.org/sulfate.pdf >. Acesso em 10 de fevereiro de 2013.

NELSON, J. D.; MILLER, D. J. **Expansive Soils - Problems and Practice in Foudation and Pavement Engineering**. New York: Jonh Wiley & Sons, Inc., 1992. 259p.

NEVES, E. N. S. A. C.; (2009) **Estudo Laboratorial de Solos Tratados com Cal Modelos de Comportamento**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portuga. 156p.

NIMER, E. (1979) **Pluviometria e recursos Hídricos dos estados de Pernambuco e Paraíba**. Rio de Janeiro: SOUREN, 117p.

NÓBREGA, M. T. (1981). **Estabilização Solo-Cal**. Associação Brasileira dos Produtores de Cal. Boletim 13. São Paulo, Brasil.

OLIVEIRA, E. (2010). **Emprego da Cal na Estabilização de Solos Finos de Baixa Resistência e Alta Expansão: Estudo de Caso no Município de Ribeirão das Neves**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina.

OLIVEIRA, A. M.S.; BRITO. S. N. A. B. **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, 7º reimpressão, 2011.

OSINUBI, K. J. (1998). **Influence of compactive efforts and compaction delas on line-treated soli**. Journal of Transportation Engineering. March/April.

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

PAIVA, S. C. ; GOMES, E. A. O.; OLIVEIRA, R. A.; **Controle de qualidade da cal para argamassa – Metodologias Alternativas**. Revista Ciências e tecnologia. Ano 1; número 1; Fundação Antônio dos Santos Abranches – FASA- UNICAP - 2007

PAIVA, S. C.; Barbosa, V.; Melo, R. A.G. A.; Silva, M. V.; Domingues, F. D. B.; Oliveira, A. F. F.; Ferreira, S. R. M. **Caracterização de Solo Expansivo de Cabrobó / PE Tratado com Cal**. XVI. Anais, Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 2012. Porto de Galinhas. PE 551p.

PAIVA, S. C.; LIMA, M. A. A.; FERREIRA, M. G. V. X.; FERREIRA, S. R. M. F. (2016) **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal**. Revista Matéria Artigo 11713 Vol. 21 nº 2. P. 437-440

PATRICK, P. M.; SNETHEN, D. R.(1976). **Na occurrence and distribution survey of expansive materials in the United states by phisiographia áreas**. Federal Highway Administration Report nº fhwa – rd- 76-82, 73p.

PERCILIO, R. R.; BERGAMASCHI, S.; BERTOLINO L. C. (2014) **Caracterização Faciológica e Paleoambiental de Depósitos Sedimentares da Bacia do Macacu na Região de Itambí, Itaboraí, Rio de Janeiro**. Cadernos de Geociências, v. 11, n. 1-2, nov. p. 7-13

PEREIRA, E. M. 2004. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guarbirotuba em ensaio com sucção controlada**. Dissertação de mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 227p.

PEREIRA, K. L. A., (2012) **Estabilização de um Solo com Cimento e Cinza de Lodo para Uso em Pavimentos**. Dissertação (Mestrado) Da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 125p,

PESSOA, F. H. C. **Análise de solos de Urucu para fins de uso rodoviário**. 2004. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Brasília. Brasília. 2004.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/3ª Edição** São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 365p. ISBN 978-85-86238-51-2

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

PINTO, N. M. S. A.; (2009) **Contribuição para o estudo da combinação de cal com cimento no tratamento de solos**. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia Geotécnica Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 124p.

PINTO, O. C. B. **Estrutura dos minerais argílicos**. Viçosa. Imprensa Universitária. 32 p. 1967.

PITTA, M. R., CARVALHO, M. D.; RODRIGUES, P. P. F. (1988) **Materiais para pavimentos de concreto simples**, Estudo Técnico 47, ABCP, São Paulo. 172p.

PORTELINHA, F. H. M.; LIMA, D. C.; FONTES, M. P.F.; CARVALHO, C. A. B.; STEHLING, R. S. **Influência dos mecanismos de reação nas propriedades físicas e químicas de dois solos tropicais melhorados com cimento e cal**. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia Sociedade Portuguesa de Geotecnia Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. N.º 124 – Março 2012, ISSN 0379-9522, 7-30p

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

PRUSINSKI, J. R.; Bhattacharja, S. (1999). **Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soil**. Transportation Research Record, Washington D. C. nº 1652, p.215-228

PUNHAGUI, K. R. G.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A., (2014) **ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE RESTRIÇÕES E PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS**. USP RIBEIRÃO PRETO-SP, p.61

QUISPE, C. C.; CASAGRANDE, M. D. T. (2013) **Comportamento de um solo argiloso estabilizado com cinzas de resíduos sólidos urbano sob carregamento estático**. 42ª RAPv Reunião Anual de Pavimentação 16º ENACOR Encontro Nacional de Conservação Rodoviária novembro Gramado. RS.

QUISPE, T. R.; NAVARRO, T. R.; CUADROS, G. J. L. Mecánica de Suelos II - Suelos Expansivos, Suelos Dispersivos y Colapsables publicado em maio 2014 em <http://es.slideshare.net/yordidipasganboa/copia-de-exposicin-suelos-ii-grupo> acessado em 25 de junho de 2016.

RANGANATHIA, M. B. V.; SATYANARAYAN, A. B., (1965), **A rational Method of predicting potential for compacted Expansive clays**, **Proceedings**, 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, vol. 1 pp92-96.

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

RENÓ, M. L. G. (2007) **Uso de Técnicas de Otimização Robusta Multi-Objetivos na Produção de Cimento.** Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Itajubá. Minas Gerais. 122p.

RIBEIRO, K. F.; VALIN, M. O.; RIBEIRO I. J. (2014) **Principais Métodos Para a Estabilização da Expansão dos Solos Saprolíticos de Filitos da Baixada Cuiabana.** XVII Congresso de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Goiania GO.

RICHARDS, L. A. (1931) **Capillary conduction of liquids Though porous médium - Physics – A jornal of General and Applied Physics,** Vol. 1 pp. 318-333.

RODRIGUES, C. M. G. & SOUSA, L. M. O. (2002) – **Influência da composição química e mineralógica no comportamento do saprolito granítico da Guarda.** Actas do 8º Cong. Nacional de Geotecnia. Lisboa. Vol. 1, pp. 321-330.

RODRIGUES, R. A.; VILAR, O. M. (2013); **COLAPSO DE SOLO DESENCADEADO PELA ELEVAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA.** Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, ISSN 23188472; v. 01, n. 06, pp. 13-27

RODRIGUEZ ORTIZ, J. M. (1975); **Las arrcillas Ezpansivas: su estudio y tratamiento.** Bol . de inf. del Laboratorio del transporte y Mecánica del Suelo, nº108, pp.3-30.

ROGERS, J. D; OLSHANSKY, R.; ROGERS, R. B.; **Damage to Foudations From Expansive Sols.** Acesso em 25 de Junho de 2014, disponível em. http://web.mst.edu/~rogersda/expansive_soils/DAMAGE%20TO%20FOUNDATIONS%20FROM%20EXPANSIVE%20SOILS.pdf.

SANDRONI, S. S.: CONSOLI, N.C., 2010. **Sobre a prática da engenharia geotécnica com dois solos diferentes: os extremamente moles e os expansivos.** Anais da COBRANSEG, 2010, Gramado. ABMS. P. 97-186.

SANTANA, M. B.; FILHO, M. R. R.; MARQUES, F. A.; CUNHA, T. J. F.; NASCIMENTO, A. F. (2015). **Variação da composição granulométrica em solos na Ilha de Assunção, Cabrobó** – Pernambuco XXXV Congresso Brasileiro de Ciências do Solo. Natal – RN, 4p.

SANTOS, Gerson Marques dos.(2008). **Estudo do comportamento histerético de uma argila expansiva não-saturada.** – dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, 119 p.

SANTOS, P. S., (1989). **Tecnologia de argila.** Vol. 1 fundamentos. São Paulo.340p.

SANTOS, Pedro de Almeida Leite; (2009). **Análise do Comportamento de um Aterro Construído com Material Evolutivo Compactado.** Dissertação (Mestrado), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa 105p.

SCHREINE, H. D. (1987). **“State of the art review on expansive soils”.** Imperial college, London.

SEED, H. B.; WOODWARD, D. J.; LUNDGREN, R. **Prediction for compacted clays.** Journal soil mechanics and Foundations division, asce, V.88, sm 3 pp 53-87, 1962.

SHRIVER, D. F. e ATKINS, P. W. **Química Inorgânica/** 3ª edição Porto Alegre: Bookmon. Tradução Maria Aparecida Gomes, 2003. 816p. ISBN 85-363-0274-7.

SILVA, M. F. S. 2010. **Estudo Comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal.** Dissertação (Mestrado da Universidade Nova de Lisboa) Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa 90p.

SILVA, O. S. (2012). **Estudo de propriedades Geotécnico de um Solo Argiloso, Potencialmente Expansivo, Compactado com e sem Adição de Cal.** Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco. 150p.

SILVA, JUNIOR, M. A. M. (2010). **Propriedades geotécnicas de expansão de um solo argiloso compactado com e sem adição de cal.** Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 89p.

SILVA. MATHEUS FRANCISCO, (2016). **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico.** Dissertação (mestardo) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 121p.

SIMMES, P. R. M., COSTA FILHO, L.M., **“Características mineralógicas de solos expansivos do Recôncavo Baiano”**, In: *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais*, pp.569-588, Rio de Janeiro, 1981.

SKEMPTON, A. W. (1953). **The collodial activity of clays**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS. 3rd., 1953 Zurich, **Proceeding**. Zurich, 1953. v.1, p. 57–61.

SNETHEN, D. R.; JHSON, L. D.; PATRICK, D. M. (1977) **An evalwation of expediente meto do logy for identificationof potentially expansive soils** F,H.W.A.R.D. pp. 77-94, federal.

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

SOUZA, Roberto Silva.; (2008) **Zona rural de Olinda (PE): aspectos da atividade agropecuária no final do século XX**, Revista de Geografia, Recife UFPE, v. 25, n.1, jan–abr 2008.

SULEIMAN, G. K. A.; TAPAHUASCO, W. F. C.; NETO, R. G. S.(2013) **A Utilização da Cal em Forma de Pasta como Agente Estabilizante em Solos Oriundos da Cidade de Alegrete/RS**. Anais, VII Seminário de Engenharia geotécnica do Rio Grande de Sul, Santa Maria, Maio 2013. 74-80p.

TAYLOR, R. K.; SMITH, J. **Engineering geology of clay mineral**: swelling, shrinking and mudrock breckdown. Clay Minerals, 1986. p. 235-260.

THOMÉ, A. (1994). **Estudo do comportamento de um solo tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. Porto Alegre. p.3-5 e p.8-15 Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TRAN, T. J.; CUI, Y.; TANG, A. M.; AUDIGUIER, M.; COJEAN, R. Effects of Lime Treatment on the Microstructure and Hydraulic Conductivity of Héricourt Clay. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 6, pp 399-404. Amsterdam, NL Elsevier, 2014.

TRISTÃO, F. A.; MORAES, B. R. S. C.; REMBISKI, F. D.; **Evolução histórica da utilização de cal de conchas em edificações no Espírito Santo**. V Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis ELECS Recife. 2009

UEHARA, G e GILLMAN, G. **The mineralogy chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays**, Boulder, Westview Press, 1981. 170p.

USBR. **Shear Testing.Gravelly Soils.**(1953) gravels 3 / 200.

VAN, D. M. D. H. (1964) **Thgr Prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils.** Trans S. afr inst. Of. Civ. Engrs vol 6, nº6.

VAN Impe, W. F. (1989). **Soil improvement techniques and their evolution.** Rotterdam: A. A. Balkema.

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

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

VELASCO, E. S. **Scanning Electron Microscop (SEM) as a Means to Determine Dispersibility.** 2013. 204 p. Thesis (Master in Geotechnical Engineering) – Iowa state Universit, Ames, US, 2013.

VIANA, L. A.; (2013) **Efeitos da cimentação e da morfologia na condutividade hidráulica e na resistência mecânica de empacotamentos binários.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 90f.

VIJAYVERGIYA, V. N. e GHAZZALY, O. I. (1973). **Predicton of Swelling Potencial for Natural Clays. Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Solis,** Hayfa, Vol. 1, pp. 227-236.

WILLIAMS, A. A. B.(1957). **Studies of shear strength and bearing capacity of some partiallysaturated sands. Proceedings of theFourth** Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol. 3, pp. 453-456.

WILLIAMS, A. A. B. & Donaldson, G. W. (1980). **Building on expansive soils in South Africa:**1973 – 1980. Proceedings 4th International Conference on Expansive Soils, Vol. II, Denver, Colorado, p. 834 – 844.

Ylmaz, I. (2006). **Indiret estimation of the swwlling and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity.** Engineering geology, 85, 295-301.

