



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
TECNOLOGIA AMBIENTAL**

JAYNE ARAÚJO SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE UM SOLO
POTENCIALMENTE EXPANSIVO, ENCONTRADO EM AGRESTINA/PE,
APLICANDO CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL COMO ADITIVOS
ESTABILIZANTES**

Caruaru, 2018.

JAYNE ARAÚJO SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE UM SOLO
POTENCIALMENTE EXPANSIVO, ENCONTRADO EM AGRESTINA/PE,
APLICANDO CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL COMO ADITIVOS
ESTABILIZANTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello.

Co-orientador: Prof^o. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Caruaru, 2018.

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

S856e

Silva, Jayne Araújo.

Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes. / Jayne Araújo Silva. - 2018.

137 f.; il.: 30 cm.

Orientadora: Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello.

Coorientador: Sílvio Romero de Melo Ferreira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

Inclui Referências.

1. Solos (Pernambuco). 2. Cascas. 3. Arroz (Pernambuco). 4. Cal. 5. Minerais de argila (Pernambuco). 6. Estabilidade estrutural. I. Bello, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira (Orientadora). II. Ferreira, Sílvio Romero de Melo (Coorientador). III. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2018-230)

JAYNE ARAÚJO SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE UM SOLO POTENCIALMENTE
EXPANSIVO, ENCONTRADO EM AGRESTINA/PE, APLICANDO CINZA DE CASCA
DE ARROZ E CAL COMO ADITIVOS ESTABILIZANTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 18/07/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. MARIA ISABELA MARQUES DA CUNHA VIEIRA BELLO (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. SILVIO ROMERO DE MELO FERREIRA (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. SÉRGIO CARVALHO DE PAIVA (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Prof^o. Dr. JOAQUIM TEODORO ROMÃO DE OLIVEIRA (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

AGRADECIMENTOS

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

À Isabela Bello e Silvio Ferreira, pela orientação e co-orientação, respectivamente e por ter disposto de tempo e atenção para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradecer imensamente a minha mãe, que, guerreira como sempre foi, esteve ao meu lado em todos os momentos, me apoiando e suprimindo todas as minhas necessidades quando precisei. Te amo, minha vida. Essa conquista é nossa.

Aos meus amigos, em especial Bárbara Sobral, Rafael Barbosa, Antônio Mateus, Gemerson Lins, Sávio Holanda, Raisia Vieira, Rafaella Moura, Alison Noberto, pelo apoio prestado, mostrando-se pessoas pelas quais tenho grande apreço.

À Obra Missionária Tabernáculo de Agnes, que conheci e me tornei membro durante esta caminhada e se tornou uma parte da minha vida, considerando-os como uma família que Deus escolheu por mim e para mim.

Aos laboratoristas Valquíria e Gutemberg, por toda ajuda prestada, assim como a Sérgio Paiva, pelo auxílio em alguns ensaios.

Ao engenheiro Raphael Moutinho, que nos recepcionou, acompanhou e auxiliou durante a visita ao local de estudo, sendo fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade Federal de Pernambuco, por ceder do ambiente físico e equipamentos para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

Os solos expansivos, caracterizado como um dos solos não saturados, são bastante estudados devido aos danos causados nas estruturas. Esses solos contêm argilominerais que na estação chuvosa, aumentam de volume e no período seco contraem em sua superfície. Esse tipo de solo é presente em diversos países do mundo como, por exemplo, Índia, Estados Unidos, Brasil e Austrália. O estado de Pernambuco, possui um grande potencial para solos expansivos na região do Agreste e Sertão. Existem diversos métodos de identificação deste solo, para avaliar seu grau de expansão. A partir de ensaios de campo e de laboratório é possível avaliar a tensão de expansão, grau de expansividade e tipo de argilomineral constituinte. Para reduzir ou anular a expansão do solo, utiliza-se métodos de estabilização com o uso de algum tipo de aditivo estabilizante. O presente trabalho tem por objetivo caracterizar física e quimicamente o solo expansivo localizado no município de Agrestina na região Agreste de Pernambuco, Brasil e as misturas de solo-Cal-Hidratada e Solo com Cinza de Casca de Arroz, assim como as cinzas e os percentuais ótimos para combater a expansão deste solo. Analisar, também, a expansividade deste em seu estado natural de campo e após a compactação ótima, ambos naturais, e nos diversos percentuais das misturas. Os ensaios foram realizados no solo natural e nas misturas do solo com Cinza da Casca de Arroz (CCA) substituição, em peso, de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14% e com substituição, em peso de cal, nas proporções de 3%, 5%, 7%, 9%, 11% e 13%. Foi também realizado o ensaio de Difração de Raio X (DRX) para identificar o argilomineral presente no solo em análise. O solo em estado natural e umidade e densidade de campo, apresenta expansão livre de 6,58% (com sobrecarga de 10 kPa) e tensão de expansão média de aproximadamente 155 kPa. A substituição do solo por Cal-Hidratada e CCA reduziu significativamente a expansão, influenciando em suas características físicas e químicas, em relação ao solo natural, e mostrando-se eficaz na aplicação em solos expansivos para reduzir e/ou combater a expansão associada. Os mapas de susceptibilidade a expansão de solos podem ser bastante úteis na fase de projeto, onde se avalia toda a caracterização do solo, e podendo levar a uma investigação geotécnica mais minuciosa em áreas que possam ainda não ter seu potencial expansivo comprovado, como foi o caso da área de estudo deste trabalho, eximindo de possíveis problemas construtivos posteriormente.

Palavras-chave: Solo expansivo. Cinza de casca de arroz. Cal-hidratada. Argilomineral. Estabilização.

ABSTRACT

Expansive soils, characterized by one of the unsaturated soils, they are considerably studied due to the damage they can cause to structures. These soils contain clay minerals which can increase their volume, during the rainy season; and during the dry season, they contract on their surface. This type of soil is present in many countries worldwide, such as India, the United States of America, Brazil, and Australia. The state of Pernambuco has a large potential for expansive soils in the dry region and backcountry. There are various methods to identify this soil, aiming for evaluating its expansion index. Data obtained in the field, as well as, in laboratory's experiments, it is possible to determine the expansion's tension, expansibility index, and the type of clay mineral in its composition. Stabilization methods are used, in addition to some stabilizer additive to reduce or cancel the soil expansion. The objective of this current paper is to physical and chemically characterize the expansive soil located in the municipality of Agrestina, in the dry region of the state of Pernambuco, Brazil, as well as, some mixtures, such as soil-hydrated whitewash, soil-rice husk ash (RHA), applying ashes with its optimal percentages to stop the soil expansion. To analyze its expansibility as is, then after the optimal compaction, both natural, and in different percentage of combinations of the mixtures. The experiments were performed in natural soil and its compound with RHA, substitution, in weight, of 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, and 14%; after that, its compound with hydrated whitewash, substitution, in weight, of 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, and 13%. X-Ray Diffraction (XRD) technique was used to identify what clay mineral was in the composition of each sample. The soil in its natural status, humidity, and density in the field demonstrated a free expansion of 6.58% (with a 10kPa load) and an average expansion tension of approximately 155 kPa. Replacing the soil by hydrated whitewash and RHA significantly reduced the expansion, reflecting on its physical and chemical characteristics, compared to the natural soil, demonstrating that their application in expansive soils is very efficient to reduce and/or avoid any related expansion. Soil expansion susceptibility maps can be very useful for probing design phase, where all the soil characterization is evaluated, and may lead to a more detailed geotechnical investigation in areas that may still not to have its proven expansive potential, as was the case of the study area of this work, exempting from possible constructive problems later.

Keywords: Expansive soil. Rice husk ash. Hydrated-whitewash. Clay mineral. Stabilization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FOTOGRAFIA 1 -	Solo expansivo após sofrer retração por perda de umidade.....	19
FIGURA 1 -	Comportamento da variação de deformação no período de tempo sob tensão (a) pequena alteração na umidade do solo, (b) mudança de umidade na periferia do solo, (c) apenas o núcleo central mantém a umidade inicial, (d) não há mudança na umidade do solo.....	21
MAPA 1 -	Distribuição de casos relatados.....	22
QUADRO 1 -	Ocorrência de solos expansivos no Brasil.....	22
MAPA 2 -	Suscetibilidade à expansão nos solos do Estado de Pernambuco (carta interpretativa).....	25
QUADRO 2 -	Métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos.....	26
GRÁFICO 1 -	Carta de Skempton.....	29
GRÁFICO 2 -	Classificação da expansibilidade de materiais argilosos por Williams & Donaldson (1980).....	30
GRÁFICO 3 -	Carta de Seed (1962).....	31
FLUXOGRAMA 1 -	Principais aplicações para as cascas de arroz.....	40
FOTOGRAFIA 2 -	(a) CCA misturada com palha de casca de arroz, (b) CCA após o eneiramento.....	41
MAPA 3 -	(a) Localização do estado de Pernambuco no mapa do Brasil e (b) da cidade de Agrestina no mapa de Pernambuco.....	46
MAPA 4 -	Localização da cidade de Agrestina no mapa de susceptibilidade à expansão dos solos em Pernambuco.....	47
MAPA 5 -	Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina – PE.....	48
GRÁFICO 4 -	Dados pluviométricos e de temperatura do município de Agrestina.....	50
FOTOGRAFIA 3 -	Perfil do solo em profundidade, apresentado as transições das camadas analisadas.....	52
FOTOGRAFIA 4 -	Edômetro utilizado nos ensaios de expansão.....	58

FOTOGRAFIA 5 -	(a) Molde usado na preparação do corpo de prova para compressão simples; (b) corpos de prova após o ensaio de compressão axial simples.....	60
GRÁFICO 5 -	Granulometria do solo natural.....	61
QUADRO 3 -	Potencial de expansão do solo de estudado através de cartas de Atividade.....	62
GRÁFICO 6 -	Curva de compactação do solo natural.....	63
QUADRO 4 -	Critério de classificação quanto a expansão do solo em estudo (métodos qualitativos).....	64
QUADRO 5 -	Critério de classificação quanto a expansão do solo de Barbosa (2013), Paiva (2016) e presente trabalho.....	65
GRÁFICO 7 -	Curva de expansão sob tensão do solo natural com diferentes.....	66
GRÁFICO 8 -	Curva de expansão com carregamento após expansão.....	68
GRÁFICO 9 -	Curva de expansão e colapso.....	68
GRÁFICO 10 -	Curva de expansão após compactação do solo em umidade ótima.....	71
GRÁFICO 11 -	Granulometria dos horizontes em análise.....	72
GRÁFICO 12 -	Edométrio duplo do solo inundado previamente ao ensaio e natural – sem inundação prévia.....	80
GRÁFICO 13(a) -	Gráfico DRX do Horizonte A.....	81
GRÁFICO 13(b) -	Gráfico DRX do Horizonte B.....	81
GRÁFICO 13(c) -	Gráfico DRX do Horizonte C.....	82
GRÁFICO 14 -	Curvas granulométricas do solo natural e suas misturas com cinza de casca de arroz.....	84
GRÁFICO 15 -	Teores de umidade das misturas nas porcentagens em estudo.....	86
GRÁFICO 16 -	Densidade real dos grãos.....	87
GRÁFICO 17 -	Curvas de Compactação do solo natural e misturas com cinza.....	88
GRÁFICO 18 -	Gráfico da massa específica aparente seca do solo com as diversas porcentagens de CCA e suas respectivas umidades ótimas.....	89
GRÁFICO 19 -	Limites de Atteberg para as diversas misturas com CCA.....	90
GRÁFICO 20 -	Expansão das misturas ao longo das idades.....	97
GRÁFICO 21 -	Percentual dos constituintes de cada amostra com CCA em análise.....	100
GRÁFICO 22 -	Tensão de expansão.....	102

GRÁFICO 23 -	Tensões de expansão média e resistência a compressão simples Média.....	106
GRÁFICO 24 -	Curvas granulométricas do solo natural e suas misturas com cal-hidratada.....	107
GRÁFICO 25 -	Umidade das misturas de solo e cal-hidratada.....	108
GRÁFICO 26 -	Densidade real dos grãos do solo e das misturas com cal-hidratada.....	109
GRÁFICO 27 -	Curvas de Compactação do solo natural e misturas com cal-hidratada.....	110
GRÁFICO 28 -	Gráfico da massa específica aparente seca do solo com as diversas porcentagens de cal-hidratada e suas respectivas umidades ótimas.....	111
GRÁFICO 29 -	Limites de Atteberg para as diversas misturas com cal-hidratada.....	112
GRÁFICO 30 -	Gráfico com o comportamento de Expansão Livre das misturas em diferentes períodos de cura das misturas solo-cal-hidratada.....	115
GRÁFICO 31 -	Percentual dos constituintes de cada amostra com Cal-Hidratada em análise.....	120

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos pela WES.....	27
TABELA 2 - Métodos de identificação de solos expansivos por Chen (1975), Holtz e Gibbs (1956) e Vijayvergiya e Ghazzaly (1973).....	28
TABELA 3 - Métodos de identificação de solos expansivos por Daksanamurthy e Raman (1973) e Seed et al. (1962).....	28
TABELA 4 - Possíveis danos pelo critério de Jimenez (1980).....	29
TABELA 5 - Atividade de uma argila através do Índice de atividade.....	30
TABELA 6 - Critérios de USBR – HOLTZ (1953).....	31
TABELA 7 - Critérios de Cuellar (1978).....	32
TABELA 8 - Dados dos solos e misturas dos estudos apresentados.....	37
TABELA 9 - Dados de ensaios de estudos com cinza de casca de arroz.....	43
TABELA 10 - Dados pluviométricos e térmicos de Agrestina, relativos a cada mês.....	49
TABELA 11 - Resultado das análises químicas da cal.....	53
TABELA 12 - Resultado dos Óxidos da Cal.....	53
TABELA 13 - Caracterização das propriedades da CCA no estado bruto.....	54
TABELA 14 - Características do solo estudado.....	62
TABELA 15 - Índices físicos do solo indeformado no início término dos ensaios Edométricos simples.....	67
TABELA 16 - Tensões de expansão aplicadas por diversos métodos no solo natural nas condições de campo.....	69
TABELA 17 - Tensões de expansão aplicadas por diversos métodos no solo natural nas condições de campo - Barbosa (2013), Paiva (2016) e presente trabalho.....	69
TABELA 18 - Dados de expansão e tensão de expansão na compactação ótima.....	71
TABELA 19 - Caracterização dos horizontes.....	73
TABELA 20 - Dados dos Limites de Atteberg dos horizontes estudados.....	74
TABELA 21 - Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raio X para as camadas de solo.....	75
TABELA 22 - Dados dos ensaios químicos realizados nos três horizontes do solo.....	77
TABELA 23 - Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raio X para a CCA.....	83

TABELA 24 - Caracterização do solo e das misturas solo-cinza.....	85
TABELA 25 - Peso específico real dos grãos das misturas com CCA.....	86
TABELA 26 - Densidade seca máxima e umidade ótima do solo e das misturas com CCA.....	88
TABELA 27 - Limites de Atteberg das misturas solo com CCA.....	90
TABELA 28 - Dados químicos das misturas de solo-CCA.....	92
TABELA 29 - Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raio X para o solo e misturas solo-cinza.....	95
TABELA 30 - Valores de expansões para as misturas.....	98
TABELA 31 - Porcentagem constituinte das amostras de solo-CCA analisadas.....	99
TABELA 32 - Tensão de Expansão a Volume Constante nas misturas.....	102
TABELA 33 - Dados de controle de umidade das misturas para as amostras submetidas aos ensaios de Tensão de Expansão.....	103
TABELA 34 - Valores das tensões de compressão para o solo natural e para as misturas de CCA.....	104
TABELA 35 - Caracterização do solo e das misturas com cal-hidratada.....	107
TABELA 36 - Limites de Atteberg das misturas de solo com cal-hidratada.....	113
TABELA 37 - pH das misturas de solo-cal em CaCl ₂ , H ₂ O e KCl.....	114
TABELA 38 - Expansão Livre das misturas de solo com cal-hidratada.....	116
TABELA 39 - Tensão de Expansão a Volume Constante das misturas de solo com cal-hidratada.....	118
TABELA 40 - Porcentagem constituinte das amostras de solo-cal-hidratada analisadas.....	119

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos da pesquisa	16
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	16
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	16
1.1.3	Estrutura da dissertação	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Solo expansivo	18
2.1.1	<i>Mecanismo de expansão</i>	20
2.1.2	<i>Locais de ocorrência de solos expansivos</i>	21
2.1.3	<i>Crterios de identificação dos solos expansivos e técnicas de ensaios</i>	25
2.1.4	<i>Caracterização do potencial de expansão</i>	27
2.2	Estabilização de solos expansivos	32
2.2.1	<i>Estabilização química com cal</i>	33
2.2.1.1	<i>A cal</i>	33
2.2.1.2	<i>Solo-cal</i>	34
2.2.1.3	<i>Troca de íons e floculação</i>	34
2.2.1.4	<i>Cimentação pozolânica</i>	34
2.2.1.5	<i>Carbonatação</i>	35
2.2.1.6	<i>Métodos de dosagem para misturas</i>	35
2.2.2	<i>Estudos de estabilização com solo-cal</i>	35
2.2.3	<i>Estabilização química com cinza de casca de arroz</i>	40
2.2.3.1	<i>A cinza da casca de arroz</i>	40
2.2.3.2	<i>Propriedade das cinzas da casca de arroz</i>	41
2.2.4	<i>Estudos de estabilização com solo-cca</i>	42
2.3	Caracterização por difração de raio-x (drx)	45
3	ÁREA DE ESTUDO	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	Amostras de solo	51
4.2	Cal-hidratada	52
4.3	Cinza de casca de arroz	53
4.4	Métodos	54

4.4.1	<i>Preparação das amostras</i>	54
4.4.2	<i>Misturas solo-cal-hidratada e solo-cca</i>	54
4.4.3	<i>Caracterização física do solo e misturas</i>	55
4.4.3.1	<i>Granulometria</i>	55
4.4.3.2	<i>Limites de atterberg</i>	55
4.4.3.3	<i>Densidade real</i>	55
4.4.3.4	<i>Compactação</i>	55
4.4.4	<i>Caracterização química</i>	56
4.4.4.1	<i>Espectrômetro de fluorescência de raio-x</i>	56
4.4.5	<i>Difração de raio x</i>	56
4.4.6	<i>Caracterização mecânica</i>	57
4.4.6.1	<i>Expansão “livre”</i>	58
4.4.6.2	<i>Tensão de expansão a volume constante</i>	59
4.4.6.3	<i>Expansão sob tensão</i>	59
4.4.6.4	<i>Carregamento após expansão com diferentes tensões de consolidação</i>	59
4.4.6.5	<i>Expansão e colapso</i>	59
4.4.6.6	<i>Edométrio duplo</i>	59
4.4.7	<i>Ensaio de resistência a compressão simples</i>	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1	Solo	61
5.1.2	<i>Critérios de expansibilidade</i>	63
5.1.3	<i>Ensaio de expansão</i>	65
5.1.4	<i>Solo compactado em laboratório</i>	70
5.2	Granulometria dos horizontes	72
5.2.1	<i>Espectrometria de raio x dos horizontes</i>	74
5.2.2	<i>Caracterização química dos horizontes</i>	76
5.3	Edométrio duplo	80
5.4	Caracterização mineralógica – drx	81
5.5	Espectrometria da cinza da casca de arroz	82
5.6	Misturas de solo com cinza de casca de arroz	84
5.6.1	<i>Granulometria</i>	84
5.6.2	<i>Umidade das misturas</i>	85
5.6.3	<i>Densidade real dos grãos</i>	86

5.6.4	<i>Compactação</i>	87
5.6.5	<i>Limites de atterberg</i>	89
5.6.6	<i>Ensaio químico das misturas de solo com cca</i>	91
5.6.7	<i>Espectrômetro de fluorescência de raio-x para solo e misturas com cinza de casca de arroz</i>	94
5.6.8	<i>Expansão das misturas com cinza de casca de arroz</i>	96
5.6.9	<i>Compressão simples das misturas com cinza de casca de arroz</i>	103
5.7	Misturas de solo com cal-hidratada	106
5.7.1	<i>Granulometria das misturas de solo com cal-hidratada</i>	106
5.7.2	<i>Umidade</i>	108
5.7.3	<i>Densidade real específica dos grãos</i>	108
5.7.4	<i>Compactação</i>	110
5.7.5	<i>Limites de atterberg</i>	112
5.7.6	<i>Ensaio químico</i>	113
5.7.6.1	<i>Ph das misturas com cal realizados em $CaCl_2$, H_2O e KCl</i>	113
5.7.7	<i>Expansão das misturas com cal-hidratada</i>	114
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	121
6.1	Conclusão	121
6.2	Sugestões	123
	REFERÊNCIAS	124
	APÊNDICE A - Índices físicos antes e após os ensaios de expansão livre e tensão de expansão das misturas	134

1 INTRODUÇÃO

A falta de estabilidade volumétrica ocasionada nos solos expansivos acontece por influência de alguns fatores, que são citados por Ferreira (1995) como tipo de solo, a climatologia, o estado de tensões e a variação da umidade, como também a estrutura laminar dos argilominerais do tipo 2:1, que englobam as montmorilonitas ou vermiculitas.

Segundo Chagas (2014, p. 16):

“Os solos não saturados são de natureza bastante diversa. Enquadrado nesta categoria estão as argilas expansivas altamente plásticas, solos residuais lateríticos e saprolíticos, além de uma grande variedade de depósitos aluvionares, coluvionares e eólicos, e diferentes tipos de solos compactados e cimentados.”

O comportamento do solo expansivo varia conforme o período do ano pois, em períodos de estiagem, ou seja, nos períodos secos, este solo apresenta altas resistências, sendo difícil a sua remoção. Já nos períodos mais chuvosos ou em ocasiões que gerem uma elevação da sua umidade, esse solo pode alcançar valores de expansão elevados (CAVALCANTE, CAVALCANTE JÚNIOR e SANTOS, 2006).

Segundo Campos e Burgos (2004 *apud* SIMÕES DE OLIVEIRA, JESUS E MIRANDA, 2006, p. 1):

“Os solos expansivos podem causar sérios danos às obras de engenharia principalmente quando esses materiais não são tratados de forma adequada nas etapas de projeto e execução da construção.”

No mundo, a ocorrência de solos expansivos é bem diversa, sendo encontrado em países como Cuba, México, Turquia, Argentina, entre outros. Já no Brasil, pode-se encontrar este tipo de solo em diversas regiões (Barbosa, 2013).

No estado de Pernambuco, diversos municípios apresentam solos expansivos e tem alguns dos condicionantes necessários para este fenômeno. Baseado nos condicionantes de geologia, pedologia, climatologia e o conhecimento geotécnico, Amorim (2004) apresentou uma carta geotécnica de susceptibilidade do solo pernambucano com seu grau de expansibilidade, sendo possível identificar os locais que merecem atenção para a realização de uma investigação geotécnica para caracterização dos solos expansivos.

Diversos tipos de soluções estão disponíveis atualmente para corrigir este comportamento expansivo em solos.

Ferreira (1999 *apud* AMORIM, 2004) comenta sobre a necessidade de identificação dos solos problemáticos, pois estes podem levar a danos às obras.

1.1 Objetivos da pesquisa

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento expansivo de um solo coletado em Agrestina-PE, tanto no seu estado natural indeformado quanto no seu estado natural deformado e misturado com cinza de casca de arroz (CCA) e cal-hidratada em diversos percentuais, para avaliar sua estabilização.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos pode-se enumerar da seguinte forma:

1. Caracterizar física e quimicamente o solo e as misturas solo-cal e solo com cinzas de casca de arroz;
2. Investigar qual o teor, em peso, de cal-hidratada e de cinza a ser adicionada para estabilizar o solo, quanto à expansão livre e tensão de expansão;
3. Obter os parâmetros mecânicos e de deformação para análise das tensões de expansão do solo e das misturas com diferentes períodos de cura;
4. Comparar os resultados obtidos através da estabilização deste solo utilizando cal hidratada e com a adição de cinzas com estudos recentes.

1.1.3 Estrutura da dissertação

O Capítulo I apresenta um breve resumo sobre solos expansivos, os objetivos gerais e específicos dessa pesquisa, assim como a estrutura da dissertação;

O Capítulo II apresenta a revisão bibliográfica sobre solos expansivos, abordando o mecanismo de expansão, locais de ocorrência de solos expansivos, critérios de identificação métodos de identificação, caracterização do potencial de expansão, e estabilização da expansão através da casca da cinza de arroz CCA e cal hidratada.

O Capítulo III descreve brevemente a Área de estudo e suas características;

No Capítulo IV são apresentados os Materiais e Métodos empregados na pesquisa em questão;

O Capítulo V apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física (granulometria, limites de consistência, umidades e densidades); caracterização química, fluorescência de raio x, expansão “livre”, tensão de expansão, compressão simples. Esses resultados são comparados com resultados encontrados na literatura

No capítulo VI apresentam-se as principais conclusões desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Solo expansivo

Diversas definições são encontradas com relação a solos expansivos. Segundo Mahler (1994 *apud* CHAGAS, 2014), a expansibilidade é entendida como a capacidade de um solo obter variações no seu volume, sendo esta mudança ocasionada pela penetração de água e estando este fenômeno, vinculado à capacidade que alguns solos argilosos têm em sentir mudanças em sua estrutura de origem, havendo a expansão, que ocorrem principalmente em solos que contenham montmorilonita. Mahler (1994 *apud* CHAGAS, 2014) ainda fala que não se deve incluir nesta definição os solos ou rochas, que quando são descomprimidos, tem a tendência de apresentam inchamento.

Schreiner (1987 *apud* FERREIRA, 1995 *apud* AMORIM (2004)) comentam sobre a diferença entre a expansividade intrínseca, expansão e inchamento. Por *expansividade intrínseca* se pode entender que é a capacidade do argilomineral conseguir absorver água, sendo proveniente da sua constituição mineralógica e também, da sua superfície específica. Não apresenta alterações geradas pela umidade ou sucção. Já a *expansão*, é compreendida como a variação de volume, gerada pela alteração do estado de tensões ao qual o solo está submetido. Entende-se como *inchamento* o resultado que vem da expansão, havendo deslocamentos no sentido vertical no terreno.

Paiva *et al* (2016, p.2) retrata sobre a característica intrínseca e extrínseca da expansividade do solo:

“Dois requisitos básicos, um intrínseco e outro extrínseco, são necessários para um solo exibir expansividade. O intrínseco está relacionado com a composição mineralógica, textura e estrutura. Esses parâmetros controlam, em nível microescalar, mecanismos que produzem a instabilidade volumétrica do solo. O extrínseco está relacionado com a climatologia, a hidrogeologia, a vegetação e a ocupação antrópica que são capazes de transferir a umidade de um ponto a outro do terreno.”

A expansão de solos ocorre normalmente naqueles solos que apresentam uma natureza argilosa ou uma natureza argilo-siltosa, e que a fração do solo que passa na peneira 200 consegue alcançar porcentagens maiores que 80%. Esse tipo de solo apresenta com bastante frequência argilominerais que pertencem ao grupo das montmorilonitas (CHEN, 1988; DAY, 1999 e MURTHY, 2003 citados por CAVALCANTE, CAVALCANTE JÚNIOR e SANTOS, 2006). Este solo pode originar-se de rochas ígneas básicas ou de rochas sedimentares que

apresentem argilominerais expansivos (CAVALCANTE, CAVALCANTE JÚNIOR e SANTOS, 2006).

Os solos expansivos, quando não estão saturados e são submetidos a uma variação de umidade, sofrem um aumento de seu volume. É também característica deste tipo de solo possuir limites de liquidez e índices de plasticidade altos. Já na questão de coloração, apresentam-se em tons cinza e preto (CAVALCANTE, CAVALCANTE JÚNIOR e SANTOS, 2006). A Fotografia 1 mostra um solo expansivo após sofrer retração por perda de umidade para o ambiente após seu processo de expansão.

FOTOGRAFIA 1: Solo expansivo após sofrer retração por perda de umidade.



Fonte: Autora (2018).

Os solos expansivos, experimentam em períodos de estiagem uma aparência bastante fissurada, causada pela contração destes que são submetidos com a perda de umidade. Os solos expansivos podem chegar a ser encontrados em profundidades de até 6 m, em depósitos de solos residuais. O nível do lençol freático é comumente encontrado em profundidades mais baixas (CAVALCANTE, CAVALCANTE JÚNIOR e SANTOS, 2006).

2.1.1 Mecanismo de expansão

As propriedades das argilas se devem aos minerais argilosos presentes. Esses minerais argilosos são da constituição e característicos das argilas. Eles são normalmente cristalinos, e se tratam, de forma química, de silicatos hidratados, podendo apresentar os cátions Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , k^+ , entre outros cátions (SILVA, 2010 *apud* BARBOSA, 2013).

A argila é composta por vários minerais que podem ser divididos em argilominerais, óxidos, hidróxidos e materiais amorfos. Nos solos em que não foram muito intemperizados, há a predominância do argilomineral 2:1. Em solos mais intemperizados, como ocorrem na maioria dos locais que apresentam climas tropicais, predominam os argilominerais do tipo 1:1. Ainda há os argilominerais interestratificados, que se formam pela junção, de forma superposta, de diversas camadas de argilomineral 2:1 ou pode ocorrer na junção de argilominerais de 1:1 e 2:1. Os argilominerais do tipo 2:1 são as vermeticulitas e a esmectita, encontrados com maior frequência. Já os argilominerais do tipo 1:1 são encontrados em maior frequência na forma de caulinita. (Ernani (2008 *apud* CASTRO, VENDRAME e PINESE, 2014)).

As cargas negativas no solo podem ser originadas das cargas permanentes (estrutura mineralógica) e das cargas que dependem do pH. As cargas negativas permanentes são existentes na estrutura mineralógica e são de origem da substituição isomórfica. Já as cargas negativas que variam de acordo com o pH, quando este aumenta, fazem com que se elevem a quantidade destas cargas. Elas são originadas através da dissociação e associação de prótons e da adsorção específica de cátions e ânions (BARBOSA, 2013).

A principal diferença entre a ilita e a montmorilonita é que ilita, não apresenta uma característica de expansividade intracristalina, ocasionada pela atração iônica geradas pelos íons de potássio (K^+) que estão presentes. Já na montmorilonita, ocorre expansividade intracristalina. (Pereira (2004 *apud* BARBOSA, 2013)).

Já as caulinitas são relativamente estáveis quando na presença de água, sendo considerado pouco expansivo pela não hidratação das camadas estruturais (Pereira (2004 *apud* BARBOSA, 2013)).

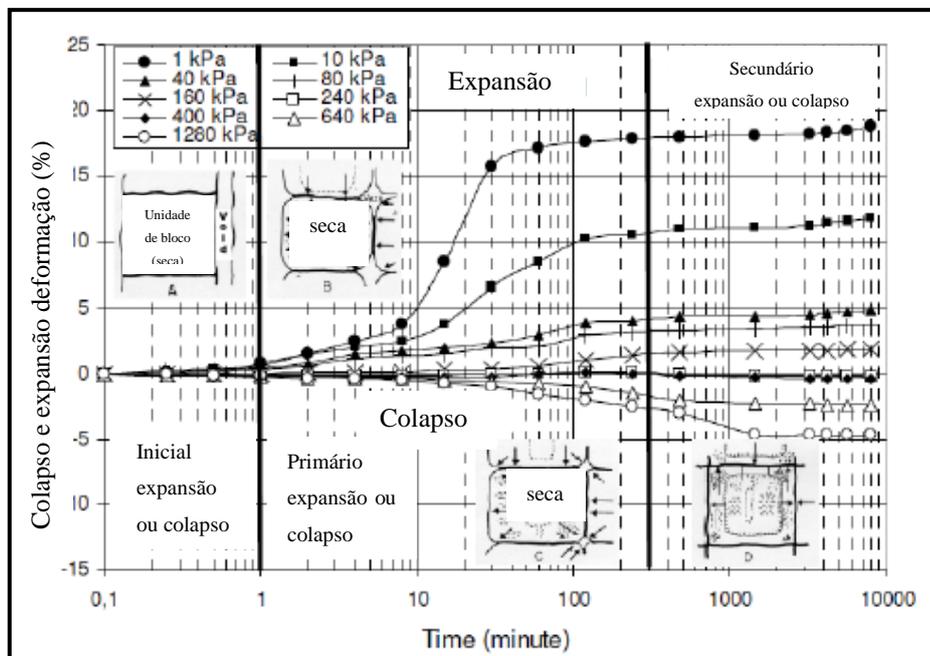
Barbosa (2013) citou Roo (2006 *apud* FERREIRA, 2010), que relata as fases durante o processo de deformação, tanto para expansão, quanto para o colapso de um solo. O processo ocorre em três fases (Figura 1):

1. O primeiro, denominada Inicial, se dá até o primeiro minuto, onde a deformação é relativamente pequena e a água começa a se infiltrar pela borda, apenas.

2. O segundo, denominado Primário, onde a água começa a se infiltrar em direção ao centro e ocorre entre 1 a 300 minutos, ocorrendo deformações maiores.
3. O terceiro, denominado Secundário, são as deformações que ocorre após os 300 minutos, onde a água alcança o centro do núcleo e se encontra praticamente saturada, diminuindo, desta forma, sua velocidade de deformação.

Sendo assim, o autor concluiu que as deformações iniciais estão relacionadas a microestrutura e as demais deformações, à sua macroestrutura.

FIGURA 1: Comportamento da variação de deformação no período de tempo sob tensão (a) pequena alteração na umidade do solo, (b) mudança de umidade na periferia do solo, (c) apenas o núcleo central mantém a umidade inicial, (d) não há mudança na umidade do solo.



Fonte: A Autora (2018).

Nota: adaptado de Ferreira (2010 *apud* BARBOSA (2013)).

2.1.2 Locais de ocorrência de solos expansivos

O Mapa 1 mostra as localidades em que se é possível encontrar um solo potencialmente expansivo.

MAPA 1: Distribuição de casos relatados.

Fonte: Santos (2015).

No Quadro 1 mostra as localidades no Brasil, de forma objetiva, em que se é possível encontrar solos expansivos, tabela que foi modificada por Ferreira *et al.* 2012.

QUADRO 1: Ocorrência de solos expansivos no Brasil.

LOCAL	REFRÊNCIA	ORIGEM/CLASSE PEDOLÓGICA
Barragem Anel de Dom Marco – RS	Costa Nunes et al (1976)	Folhelhos/ Siltitos
Campinas – SP	SÂMARA (1981)	Podzólico
Recôncavo Baiano – BA	SIMÕES e COSTA FILHO (1981)	Grupos Ilhas e Santo Amaro e Formação São Sebastião/ Vertisolo

Fonte: Modificado por Ferreira *et al.* 2012.

QUADRO 1: Ocorrência de solos expansivos no Brasil (continuação).

LOCAL	REFRÊNCIA	ORIGEM/CLASSE PEDOLÓGICA
‘Olinda – PE	Costa Nunes et AL (1982)	Formação Maria Farinha
Baía de Aratu – BA	BARRETO et al (1982)	Vertisolo
Cabo – PE	Costa Nunes et AL (1982)	Rochas Extrusivas Básicas
Parelhas – RN	LINS ET AL (1986)	Formação Seridó
Salvador – BA	PRESA (1986)	Solos Residuais/ Vertisolo
Feira de Santana – BA	PRESA (1986)	Solos Residuais/ Vertisolo
Recôncavo Baiano – BA	SIMÕES (1986)	Grupo Santo Amaro, Grupo Ilhas, Formação São
Carnaíba – PE	FERREIRA (1988)	Complexo Monteiro/ Bruno não cálcico
Afrânio – PE	FERREIRA (1989)	Grupo Salgueiro/ Cachoeirinha/ Areia Quartzosa/ Bruno não cálcico
Petrolia – PE	FERREIRA (1989)	Grupo Salgueiro/ Areia Quartzosa/ Bruno não Cálcico
Cabrobó – PE	FERREIRA (1989)	Complexo Presidente Juscelino/ Bruno não Cálcico
Salgueiro – PE	FERREIRA (1989)	Bruno não Cálcico
Serra Talhada – PE	FERREIRA (1989)	Complexo Monteiro/ Bruno não Cálcico
Maceió – AL	FERREIRA (1988)	Bruno não Cálcico
Sudeste de SP e do PR	Vargas et al (1989)	Formação Tubarão
Juazeiro – BA	FERREIRA (1989)	Grupo Salgueiro
Reservatório de Itaparica – BA	Signer et al (1989) Vargas et al (1989)	Siltitos e Argilitos
Petrolândia –PE	FERREIRA (1989)	Areia Quartzosa
Ibimirim – PE	FERREIRA (1989)	Bruno não Cálcico
Paulista – PE	FERREIRA (1989)	Formação Maria Farinha

Fonte: Modificado por Ferreira *et al.* 2012.

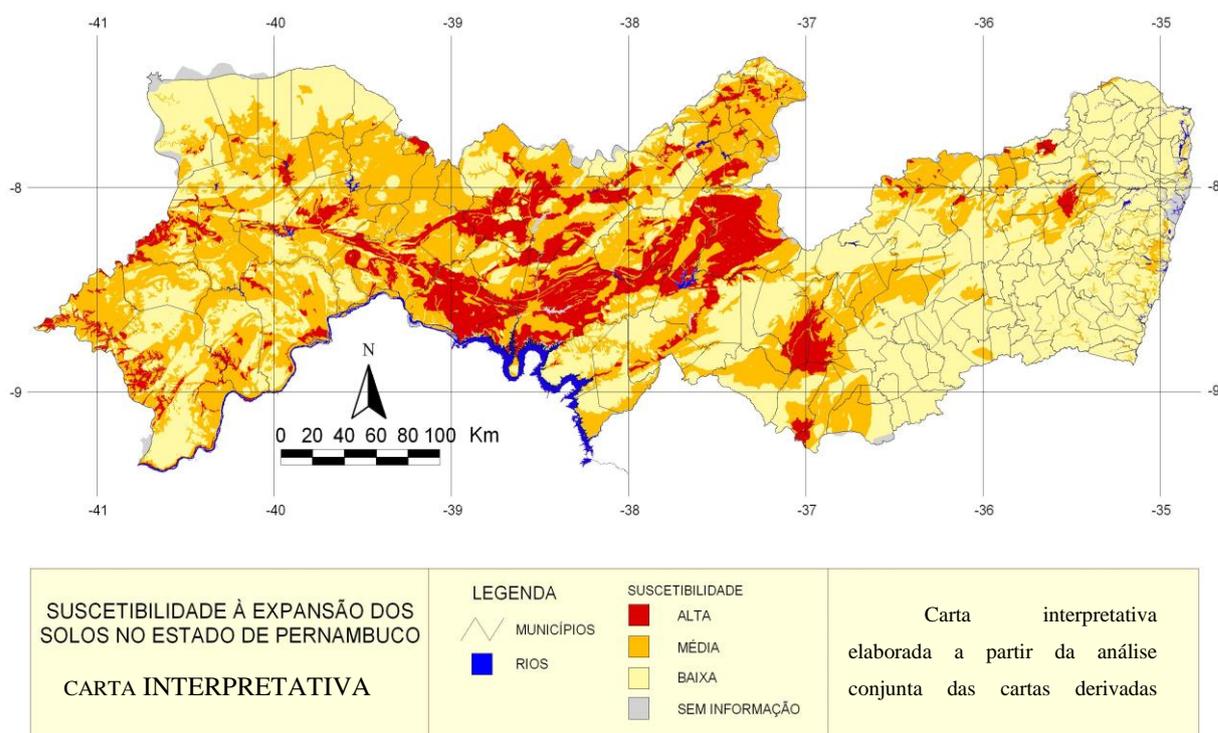
QUADRO 1: Ocorrência de solos expansivos no Brasil (continuação).

LOCAL	REFRÊNCIA	ORIGEM/CLASSE PEDOLÓGICA
Porto Alegre – RS	Vargas et al (1989)	Formação Rosário do Sul
Reservatório de Itaparica – BA	Santos e Marinho (1990)	Sedimentos da Bacia do Jatobá da Formação Aliança
Olinda – PE	Jucá et al (1992)	Formação Maria Farinha
Nova Cruz – PE	FERREIRA (1997)	Formação Barreiras
Laranjeiras – SE	GUSMÃO FILHO et al (2002)	Formação Barreiras
N. S. do Socorro – SE	GUSMÃO FILHO et al (2002)	Formação Barreiras
Grajaú – MA	GUSMÃO FILHO et al (2002)	-
Curitiba – PR	PEREIRA e PEJON (2004)	Formação Guabirotuba
Cuiabá – MT	RIBEIRO JÚNIOR <i>et al.</i> (2006)	Grupo Cuiabá / Filito Podzólico
Pesqueira – PE	SILVA e FERREIRA (2007)	Planossolo
Aracaju – SE	CAVALCANTE (2007)	Formação Calimbi
São Francisco – PE	LEITE e FERREIRA (2012)	Sedimento do Recôncavo, Tucano e Jatobá
Suape – PE	FERREIRA <i>et al.</i> (2012)	Formação Maria Farinha do Grupo Barreiras

Fonte: Modificado por Ferreira *et al.* 2012.

Amorim (2004) apresentou em seu estudo, uma carta interpretativa, realizado através de um mapeamento regional, da susceptibilidade do solo pernambucano com seu grau de expansibilidade. Esta carta foi originada a partir da análise conjunta da geologia, pedologia, climatologia e o conhecimento geotécnico do estado de Pernambuco. No mapa 2 mostra a susceptibilidade dos solos expansivos no estado de Pernambuco, apresentando também a susceptibilidade à expansão, sendo classificado como alto, médio ou baixo. A partir deste mapa, é possível identificar os locais que merecem atenção para a realização de uma investigação geotécnica para caracterização dos solos expansivos.

MAPA 2: Suscetibilidade à expansão nos solos do Estado de Pernambuco (carta interpretativa).



Fonte: Amorim (2004).

2.1.3 Critérios de identificação dos solos expansivos e técnicas de ensaios

Ferreira (1999 *apud* AMORIM, 2004) mostra que é necessário identificar um solo problemático para que se obtenha sucesso nos projetos de engenharia, pois quando se é feito um diagnóstico com descuido, estes solos podem levar a danos às obras. Ainda segundo Ferreira (1999 *apud* AMORIM, 2004), a identificação visual, assim como alguns índices que são usados nos ensaios de caracterização de solos não determinam de forma exata a expansividade e colapsividade de um solo. Portanto, os solos problemáticos necessitam ter seu grau de susceptibilidade determinados.

Schreiner (1987 *apud* FERREIRA, 1995) apresenta métodos diretos e indiretos para o auxílio da identificação de solos expansivos, mostrados no Quadro 2.

QUADRO 2: Métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos.

MÉTODOS	SUB-DIVISÕES	CRITÉRIOS	REFERÊNCIAS
INDIRETOS	IDENTIFICATIVOS	Difração de raio X, Microscopia eletrônica de varredura, Análise termo-diferencial e Adsorção de etileno-glicol e glicerina.	AYALA et al. (1986)
		Físico-químicos	FINK et al. (1971)
	QUALITATIVOS	Granulometria, consistência e índices físicos e classificação geotécnica.	PRIKLONSKIJ (1952), SKEMPOM (1953), SEED et al. (1962), VAN DER MERWE (1964), CHEN (1965), VIJAYVERVIYA e GHAZZALY (1973), RODRIGUES ORTIZ (1975), CUELLAR (1978)
	ORIENTATIVOS	Geologia, geomorfologia, Pedologia e identificação visual.	PATRICK e SNETHEN (1976), AYALA et al. (1986) FERREIRA (1990c e 1993a).
DIRETOS	AVALIATIVOS	Ensaio de expansão de Lambe	LAMBE (1960)
	QUANTITATIVOS	Expansão livre e tensão de expansão Ensaio edométrico duplo e simples	SEED et al. (1962), CHEN (1965), VIJAYVERIYA e GHAZZALY (1973), RODRIGUEZ ORTIZ (1975), CUELLAR (1978), JIMENEZ SALAS (1980)
		Ensaio edométrico de sucção controlada.	ESCARIO (1967 e 1969), AITCHISON et al. (1973), JOHNSON (1978), McKEEN (1980).

Fonte: Schreiner (1987 *apud* FERREIRA (1995)).

Segundo Amorim (2004, p. 21):

“Os métodos indiretos são aqueles que recorrem à identificação mineralógica, índices físicos, limites de consistência ou parâmetros ligados à textura, composição e comportamento do solo. Os métodos diretos são baseados na medida da expansão induzida ao solo ou da tensão necessária para impedir esta expansão, realizando-se ensaios do tipo edométrico.”

2.1.4 Caracterização do potencial de expansão

Diversos critérios de caracterização do potencial de expansão utilizam de parâmetros diretos e indiretos para avaliar tal potencial. Alguns destes parâmetros estão expostos na Tabela 1 e Tabela 2.

Na classificação proposta pela WES, pode-se classificar o potencial de expansão através de alguns parâmetros como potencial de expansão, obtido no ensaio de expansão livre, Limite de Liquidez, Índice de Plasticidade, expostas na Tabela 1.

TABELA 1: Métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos pela WES.

Classificação do Potencial de Expansão	Potencial de Expansão (%)	Limite de Liquidez (%)	Índice de Plasticidade (%)
Baixo	< 0,5	< 50	< 25
Médio	0,5 – 1,5	50 – 60	25 – 35
Alto	> 1,5	> 60	> 35

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado do Manual Técnico Foundations in Expansive Soil, (1983).

Nos critérios apresentados na Tabela 2.4, Chen (1975) caracteriza o potencial baseando-se no Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade. Já o critério de Holtz e Gibbs (1956), usa o Índice de Plasticidade. Já no critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), apresentado na tabela, usa-se a expansão livre, em porcentagem, para uma tensão de sobrecarga de 10 kPa.

TABELA 2: Métodos de identificação de solos expansivos por Chen (1975), Holtz e Gibbs (1956) e Vijayvergiya e Ghazzaly (1973)

Grau de Expansão	Chen (1975)		Holtz e Gibbs (1956)	Vijayvergiya e Ghazzaly (1973)
	LL (%)	IP (%)	IP (%)	Sp (%)
Baixo	< 30	0 -15	< 20	< 1
Médio	30 – 40	10 – 35	12 – 34	1 – 4
Alto	40 – 60	20 – 55	23- 45	4 – 10
Muito Alto	> 60	> 35	> 32	> 10

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de Sridharan e Prakash (2000) e Vijayvergiya e Ghazzaly (1973).

Nos critérios apresentados na Tabela 3, Seed *et al.* (1962) usa como parâmetro o Índice de Plasticidade e Daksanamurthy e Raman (1973) usa o Limite de Liquidez na classificação do potencial expansivo do solo.

TABELA 3: Métodos de identificação de solos expansivos por Daksanamurthy e Raman (1973) e Seed *et al.* (1962).

Grau de Expansão	Daksanamurthy e Raman (1973)	Seed <i>et al.</i> (1962)
	LL (%)	IP (%)
Baixo	$20 \leq LL \leq 35$	< 10
Médio	$35 < LL \leq 50$	$10 \leq IP \leq 20$
Alto	$50 < LL \leq 70$	$20 < IP \leq 35$
Muito Alto	$LL > 70$	$IP > 35$

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de Hotineanu *et al.* (2014).

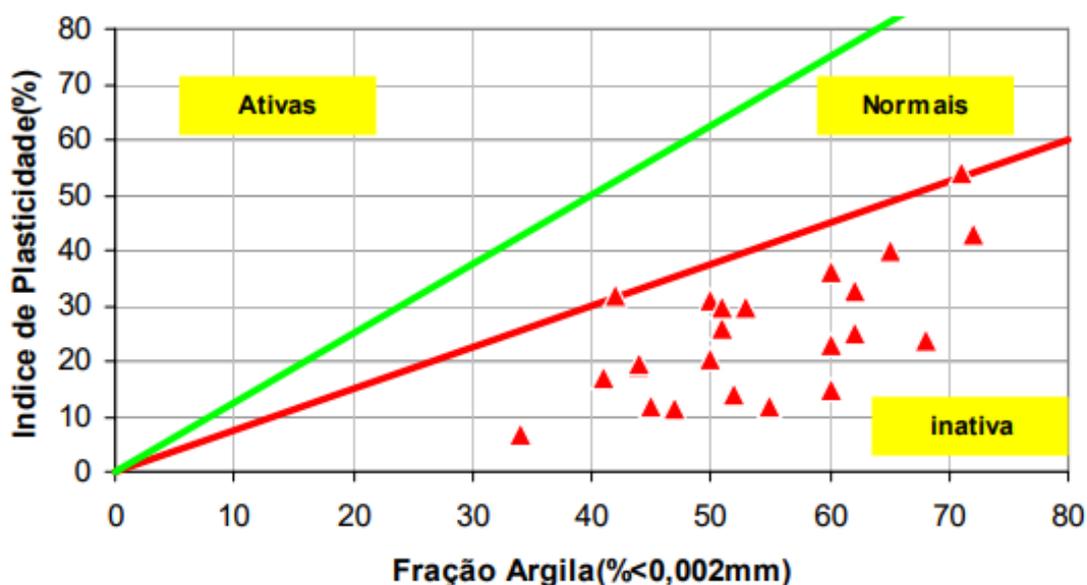
Na Tabela 4 está exposto o critério de Jimenez (1980), que correlaciona a Tensão de Expansão com possíveis danos causados.

TABELA 4: Possíveis danos pelo critério de 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).

No critério de Skempton (1953), carta apresentada no Gráfico 1, correlaciona o Índice de Plasticidade do solo com o teor de argila presente neste. Está carta foi utilizada no trabalho de Simões de Oliveira, Jesus e Miranda (2006), dispondo de alguns pontos nela, referentes ao estudo destes que não são originais da carta. Outras cartas que serão apresentadas também foram consultadas do trabalho dos autores supracitados, seguindo a mesma observação nas demais.

GRÁFICO 1: Carta de Skempton.

Fonte: Simões de Oliveira, Jesus e Miranda (2006).

Na Tabela 5 está uma correlação entre o índice de atividade da argila, de Skempton (1953), e sua atividade, de forma qualitativa.

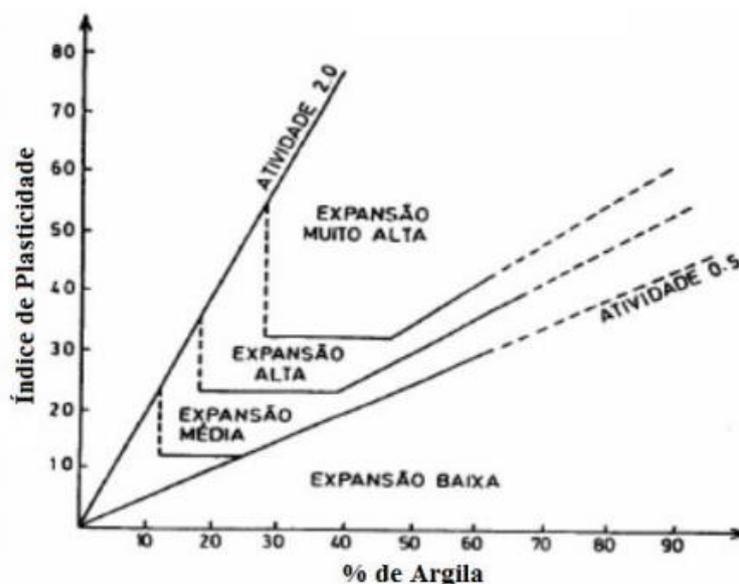
TABELA 5: Atividade de uma argila através do Índice de atividade.

Ia = IP/ % < 0,002 mm	Qualitativo
> 2,00	Muito Ativo
Entre 1,15 e 2,00	Ativo
Entre 0,75 e 1,25	Pouco Ativo
< 0,75	Inativo

Fonte: A Autora (2018).

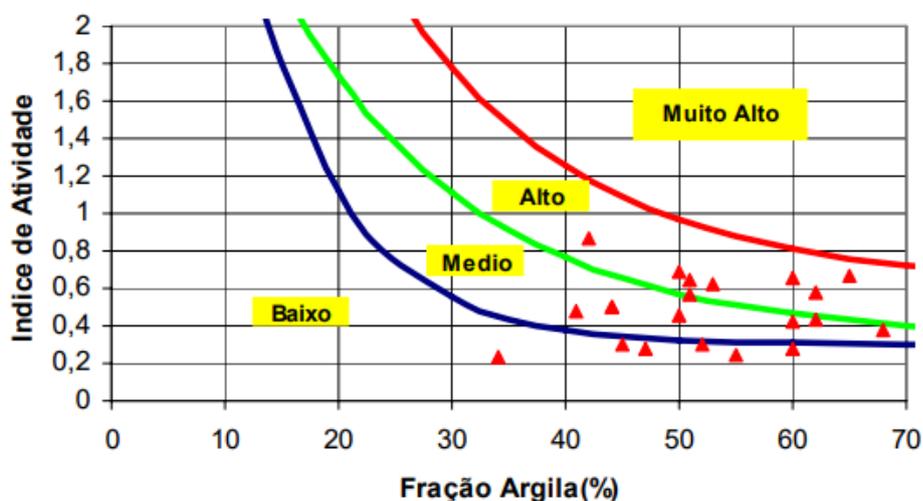
Nota: Adaptado de Skempton (1953 *apud* PAIVA, 2016).

Na classificação de expansibilidade de materiais argilosos, proposta Williams e Donaldson (1980), apresentada no Gráfico 2 relaciona a porcentagem de argila no solo e seu índice de plasticidade, resultando em uma classificação da expansão que pode ser baixa, média, alta ou muito alta.

GRÁFICO 2: Classificação da expansibilidade de materiais argilosos por Williams & Donaldson (1980).

Fonte: Souza (2014).

Há também uma carta de Seed (1962) onde há uma correlação com a fração de argila e o Índice de Atividade desta, resultando no potencial de atividade dela. No Gráfico 3 está a carta de Seed (1962), usada no trabalho de Simões de Oliveira, Jesus e Miranda (2006).

GRÁFICO 3: Carta de Seed (1962).

Fonte: Simões de Oliveira, Jesus e Miranda (2006).

Segundo o Critérios de USBR – HOLTZ (1953) estes classificam grau de expansão de um solo segundo o Índice de Plasticidade (IP), o limite de contração (WC) e o percentual de colóides menores que 0,001 mm. Na Tabela 6 estão os dados referentes a este critério.

TABELA 6: Critérios de USBR – HOLTZ (1953).

Percentual de Colóides < 0,001 mm	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).

No critério de Cuellar (1978), há uma correlação com o grau de expansão os Limites de Contração e o Índice de Plasticidade. Na Tabela 7 estão estas disposições.

TABELA 7: 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 *apud* PAIVA, 2016).

2.2 Estabilização de solos expansivos

Medidas corretivas devem ser aplicadas nos solos potencialmente expansivos. As estabilizações que podem ser físicas, mecânicas ou químicas.

Palmeira (1990) afirma que para a estabilização ou reforço de um solo é necessário que se utilize um meio químico ou um meio físico que melhore as condições do solo.

- **Estabilização Física**

Pinto (2008) aborda em seu trabalho a característica da estabilização física. Pinto (2008) ainda relata sobre a influência, quando aplicada a correção granulométrica de solos, da forma, tamanho e distribuição das partículas usadas. Sales (2006 *apud* PINTO, 2008) comenta que a estabilização física altera as propriedades do solo, alterando-se a textura dele e que equivale à utilização de um ou mais tipos de materiais, sendo que estes materiais estejam enquadrados em uma especificação, e dá como exemplo também, a correção granulométrica, fazendo então, combinações entre os materiais.

- **Estabilização Química**

Bento (2006) discorre sobre a estabilização química, na qual utiliza aditivos orgânicos ou inorgânicos, como cal, cimento, materiais betuminosos, resinas e outros. Houben e Guillaud (1994 *apud* PINTO, 2008) comentam que a estabilização química dos solos são mudanças que são produzidas na massa deste solo a partir da colocação de um quantitativo de

aditivo. Houben e Guillaud (1994 *apud* PINTO, 2008) dizem que este tipo de estabilização, quando aplicados em solos granulares, busca, de forma principal, melhorar a resistência ao cisalhamento neste solo, através da adição de um pouco de ligantes entre o contato dos grãos.

- **Estabilização Mecânica**

Gondim (2008) fala sobre a estabilização mecânica e aborda que este procedimento altera apenas a forma como as partículas de solo estão dispostas ou a granulometria dele e afirma que se sobressai, desta forma, a compactação e a correção granulométrica. Villibor (1982 *apud* GONDIM, 2008), que não considera a compactação como estabilização de forma única, mas como parte integrante de um processo de estabilização depois que há a mistura com o agente estabilizante. Gondim (2008) ainda fala da estabilização granulométrica, onde segundo Villibor (1982 *apud* GONDIM, 2008), esta estabilização utiliza de combinação e manipulação de solos, em determinadas proporções adequadas, para alcançar a estabilização do solo, sendo um o produto final com maior estabilidade em relação ao solo de origem.

2.2.1 Estabilização química com cal

2.2.1.1 A cal

Azevêdo (2010) relata que a cal provém da calcinação do metal de cálcio, sendo um óxido de cálcio (CaO) ou misturas de cálcio e magnésio (CaO.MgO) e que ainda antes de sofrer o processo de hidratação, ambas as fórmulas moleculares são conhecidas como “cal virgem”. Azevêdo (2010) ainda relata sobre a presença ou ausência de magnésio na composição da cal, sendo determinado pela origem do calcário. Azevêdo (2010) ainda diz que a adição de água na cal virgem gera a cal hidratada, através de uma reação química exotérmica, que gera vapor de água durante a reação.

É indicado que se avalie a composição química da cal. A ABNT NBR 7175/2003 é quem regulamenta a cal no Brasil e traz os parâmetros que são necessários a serem avaliados nas cals para serem usadas e classificadas.

2.2.1.2 Solo-cal

O solo-cal nada mais é que uma mistura entre solo e cal. Há vários métodos de dosagem para o solo-cal, que serão abordados posteriormente. Quando se adiciona cal ao solo, observa-se que há algumas variações nas propriedades dele.

Segundo Bento (2006), quando adicionada cal ao solo, modifica alguns aspectos deste solo, como plasticidade, expansão, contração, entre outros.

2.2.1.3 Trocas de íons e floculação

Segundo Azevêdo (2010), a troca de íons e a floculação são duas reações que são interdependentes, que são ocasionadas logo após a mistura, reduzindo o índice de plasticidade do solo, que pode ser pelo aumento do limite de plasticidade e/ou pela diminuição do limite de liquidez. Azevêdo (2010) ainda explana sobre a contração e a expansão do solo, que diminui, deixando-o mais estável as variações de umidade. Azevedo *et al* (1998 *apud* AZEVÊDO, 2010), retrata sobre o agrupamento das partículas, geradas pelo aumento da atração entre elas, atração esta, causada pela concentração de cátions de cálcio, considerando o efeito físico da floculação entre as partículas no aumento do diâmetro destas.

2.2.1.4 Cimentação pozolânica

Millet (1979 *apud* BARBOSA, 2013) aborda que as reações que ocorrem lentamente são responsáveis pelo ganho de resistência da mistura entre solo e cal com o passar do tempo. Millet (1979 *apud* BARBOSA, 2013) ainda afirma que isso se deve ao caráter pozolânico dos minerais estabilizados e diz que um material que apresente característica pozolânica é aquele que quando combinado com a cal e na presença de água, sob condições de temperatura ambiente, consegue produzir compostos hidratados estáveis e que tem propriedades ligantes.

Hilt e Davidson (1960 *apud* BARBOSA, 2013) traz que a adição de água a cal gera uma crosta cimentante envolta das partículas de cal e em resultado, a parte externa do aglomerado se hidrata, transformando-se em cal hidratada, e seu núcleo ainda permanece como óxido de cálcio e com a formação da crosta, a velocidade de mistura entre a água e a cal diminui e as condições de equilíbrio podem não serem atingidas rapidamente.

Serafini *et al.* (2004 *apud* BENTO, 2006) estudaram o efeito do tempo e da temperatura no processo de reações pozolânicas, observando que houve um aumento significativo na

resistência nas misturas, ao longo do tempo de cura, propondo curas de 28 dias nos seus estudos.

2.2.1.5 Carbonatação

Bento (2006, p.14) traz a seguinte explicação sobre a carbonatação:

“A carbonatação também é de ação imediata, sendo sua resultante cimentante a combinação do óxido de cálcio do hidróxido com o anidrido carbônico presente nas minúsculas bolhas de ar existente nos poros do solo e da cal hidratada, assim como aquelas adicionadas ao sistema devido ao processo de mistura e homogeneização. Esta reação tende a refazer o carbonato de cálcio, surgindo um novo corpo sólido que se entrelaça com os demais componentes do sistema.”

2.2.1.6 Métodos de dosagem para misturas

Para a realização das misturas, diversos tipos de metodologia para as dosagens já foram estudados. Uma das metodologias bastante recorrida é o Método do pH, proposto por Eades e Grim (1966). Eades e Grim (1966) afirmam que a menor porcentagem de cal aplicada ao solo e que gere a este um pH de 12,4, após uma hora de realizada a mistura, é a necessária para estabilizar o solo. Há também outros métodos de dosagem do solo-cal, como o método de Thompson (1966) e o método do ICL (Initial Consumption of Lime), porposto por Rogers *et al.* (1997).

2.2.2 Estudos de estabilização com solo-cal

Alguns estudos foram desenvolvidos estabilizando solos expansivos com o uso de cal. Pode-se citar o estudo desenvolvido por Barbosa (2013) e Paiva (2016).

Barbosa (2013) usou, em sua pesquisa, um solo originário de Cabrobó, interior de Pernambuco, usando cal hidratada, em três diferentes porcentagens (3%, 5% e 7%), para estabilizar este solo. Esses teores foram dosados a partir do método indicativo de Eades e Grim (1966).

Na pesquisa de Paiva (2016), foram estudados três solos: Cabrobó, Ipojuca e Paulista. Os teores de cal aplicados neste solo foram de 1%, 3%, 5% e 7%, também dosados a partir do método de Eades e Grim (1966).

A partir desses estudos é possível obter parâmetros comparativos de resultados do solo em estudo, assim como estabelecer os teores necessários para o desenvolvimento da pesquisa. Como se pode inferir, os estudos utilizam o acréscimo de cal na proporção de 2% em relação a porcentagem anterior, sendo a menor aplicação com 1% de cal. Na Tabela 8 estão todos os dados relativos aos estudos supracitados.

TABELA 8: Dados dos solos e misturas dos estudos apresentados.

		Barbosa (2013)		Paiva (2016)					
Local		Cabrobó		Ipojuca		Cabrobó		Paulista	
LL (%)	Solo + 0% Cal	37		Solo + 0% Cal	81	Solo + 0% Cal	37	Solo + 0% Cal	61
	Solo + 3% Cal	45		Solo + 1% Cal	-	Solo + 1% Cal	-	Solo + 1% Cal	-
	Solo + 5% Cal	42		Solo + 3% Cal	95	Solo + 3% Cal	45	Solo + 3% Cal	55
	Solo + 7% Cal	39		Solo + 5% Cal	93	Solo + 5% Cal	42	Solo + 5% Cal	54
	-	-		Solo + 7% Cal	93	Solo + 7% Cal	39	Solo + 7% Cal	58
LP (%)	Solo + 0% Cal	18		Solo + 0% Cal	44	Solo + 0% Cal	18	Solo + 0% Cal	31
	Solo + 3% Cal	26		Solo + 1% Cal	-	Solo + 1% Cal	-	Solo + 1% Cal	-
	Solo + 5% Cal	27		Solo + 3% Cal	59	Solo + 3% Cal	26	Solo + 3% Cal	36
	Solo + 7% Cal	26		Solo + 5% Cal	54	Solo + 5% Cal	27	Solo + 5% Cal	42
	-	-		Solo + 7% Cal	56	Solo + 7% Cal	26	Solo + 7% Cal	41
IP (%)	Solo + 0% Cal	19		Solo + 0% Cal	37	Solo + 0% Cal	19	Solo + 0% Cal	30
	Solo + 3% Cal	17		Solo + 1% Cal	-	Solo + 1% Cal	-	Solo + 1% Cal	-
	Solo + 5% Cal	15		Solo + 3% Cal	36	Solo + 3% Cal	19	Solo + 3% Cal	18
	Solo + 7% Cal	13		Solo + 5% Cal	39	Solo + 5% Cal	15	Solo + 5% Cal	12
	-	-		Solo + 7% Cal	39	Solo + 7% Cal	13	Solo + 7% Cal	17

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de Barbosa (2013) e adaptado de Paiva (2016).

TABELA 8: Dados dos solos e misturas dos estudos apresentados (Continuação).

		Barbosa (2013)		Paiva (2016)					
Local		Cabrobó		Ipojuca	Cabrobó		Paulista		
Compactação – Peso Específico Aparente Seco Máximo e Umidade (kN/m³ e %)	Solo + 0% Cal	15,97 e 8,5 / 17,80 e 15,20		Solo + 0%Cal	13,19 e 18,30 / 12,4 e 38	Solo + 0% Cal	15,97 e 8,5 / 17,9 e 15,2	Solo + 0% Cal	14,8 e 12,5 / 15,0 e 21,0
	Solo + 3% Cal	17,30 e 11,19		Solo + 1%Cal	-	Solo + 1% Cal	-	Solo + 1% Cal	-
	Solo + 5% Cal	17,10 e 10,96		Solo + 3%Cal	13,01 e 30,14	Solo + 3%Cal	17,30 e 11,19	Solo + 3%Cal	15,49 e 22,88
	Solo + 7% Cal	17,60 e 12,45		Solo + 5% Cal	14,32 e 25,86	Solo + 5% Cal	17,10 e 10,96	Solo + 5% Cal	15,65 e 20,78
				Solo + 7%Cal	14,10 e 7,21	Solo + 7% Cal	17,60 e 12,45	Solo + 7% Cal	15,65 e 3,78

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de Barbosa (2013) e adaptado de Paiva (2016).

TABELA 8. Dados dos solos e misturas dos estudos apresentados (continuação).

		Barbosa (2013)		Paiva (2016)					
Local	Cabrobó			Ipojuca	Cabrobó		Paulista		
Expansão (%)	Solo + 0% Cal	7,45		Solo + 0%Cal	14	Solo + 0% Cal	7,45	Solo + 0% Cal	12,3
	Solo + 3% Cal	0,4		Solo + 1%Cal	-	Solo + 1% Cal	-	Solo + 1% Cal	-
	Solo + 5% Cal	0,06		Solo + 3%Cal	12,16	Solo + 3%Cal	0,40	Solo + 3%Cal	1,10
	Solo + 7% Cal	0		Solo + 5%Cal	7,90	Solo + 5% Cal	0,06	Solo + 5% Cal	0,20
	-	-		Solo + 7%Cal	4,63	Solo + 7% Cal	0,00	Solo + 7% Cal	0,00
Tensão de Expansão (kPa)	Solo + 0% Cal	87		Solo + 0%Cal	248	Solo + 0% Cal	90	Solo + 0% Cal	280
	Solo + 3% Cal	10		Solo + 1%Cal	-	Solo + 1% Cal	-	Solo + 1% Cal	-
	Solo + 5% Cal	5		Solo + 3%Cal	180	Solo + 3%Cal	10	Solo + 3%Cal	10
	Solo + 7% Cal	0		Solo + 5%Cal	100	Solo + 5% Cal	5	Solo + 5% Cal	6
	-	-		Solo + 7%Cal	40	Solo + 7% Cal	0	Solo + 7% Cal	0
Resistência à Compressão Simples Média (kPa)	Solo + 0% Cal	37,3		Solo + 0%Cal	-	Solo + 0% Cal	37	Solo + 0% Cal	200
	Solo + 3% Cal	211,55		Solo + 1%Cal	-	Solo + 1% Cal	-	Solo + 1% Cal	-
	Solo + 5% Cal	177,93		Solo + 3%Cal	-	Solo + 3%Cal	212	Solo + 3%Cal	342
	Solo + 7% Cal	230,33		Solo + 5%Cal	-	Solo + 5% Cal	178	Solo + 5% Cal	788
	-	-		Solo + 7%Cal	-	Solo + 7% Cal	230	Solo + 7% Cal	1194

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de Barbosa (2013) e adaptado de Paiva (2016).

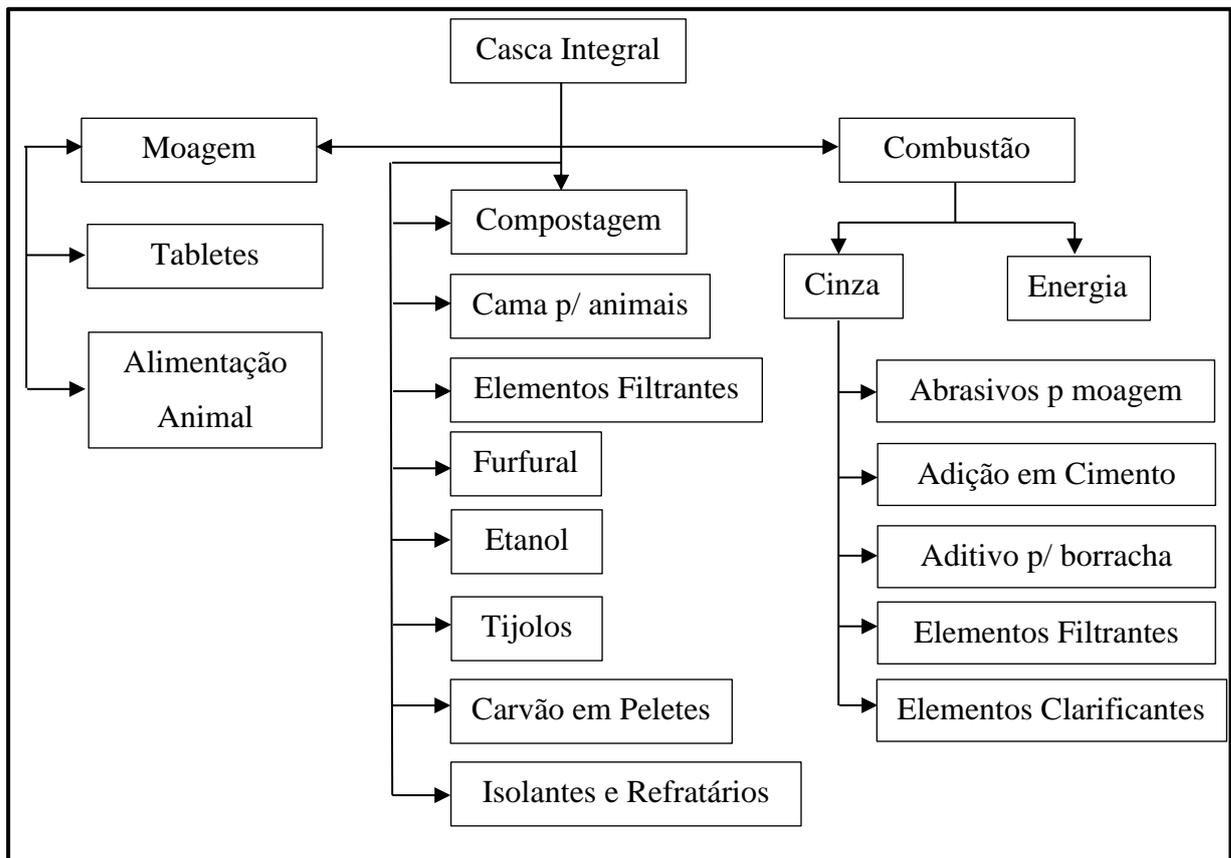
2.2.3 Estabilização química com cinza de casca de arroz

2.2.3.1 A cinza da casca de arroz

A casca de arroz é um dos resíduos agrícolas que tem atraído a atenção dos ambientalistas. Devido à alta produção de arroz no mundo, é estimado que 20% da quantidade produzida seja casca (Tashima *et al.*, 2011). Levando em consideração a vultuosa quantidade, tornou-se uma preocupação, para os especialistas, determinar caminhos viáveis para seu reaproveitamento e evitar o descarte destes resíduos no ambiente.

Diversas aplicações vêm sendo estudadas, assim como algumas outras já são consolidadas. O Fluxograma 1 traz as principais aplicações para as quais vêm sendo utilizada a casca de arroz.

FLUXOGRAMA 1: Principais aplicações para as cascas de arroz.



Fonte: Silva (2009 *apud* TASHIMA *et al.* 2011).

Tashima *et al.* (2011) fala que a principal aplicação das cascas de arroz é a sua utilização no processo de secagem e parboilização do arroz, pois oferece um alto poder calorífico, se tornando uma boa fonte alternativa de energia. Tashima *et al.* (2011) dizem que ao final deste processo, há uma geração elevada de cinza e que é comum ser descartada de forma inadequada.

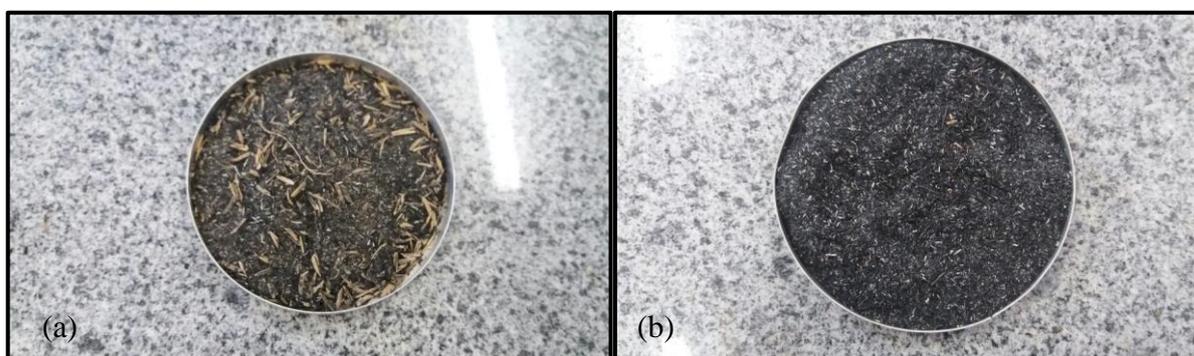
Visto muitas vezes como uma fonte poluidora para o meio ambiente e diante desta problemática, diversos estudiosos têm se motivado para encontrar novos caminhos de reutilização da cinza da casca de arroz (CCA), já que atualmente o foco ambiental está em alta no mundo.

Até o momento o uso das CCA na estabilização de solos como um material aditivo, combinado com outros tradicionais, tem sido bastante estudada. No entanto, ainda são poucos os pesquisadores que desenvolvem estudos apenas com CCA na estabilização de solos, sendo uma necessidade estudar tal material para melhorar as propriedades dos solos (Adhikary e Jana, 2016). Neste contexto, a Universidade Federal de Pernambuco se enquadra como uma das precursoras no Brasil, na pesquisa de estabilização dos solos com o uso de CCA.

2.2.3.2 Propriedade das cinzas da casca de arroz

É de conhecimento no meio científico que as cinzas de casca de arroz, mostrada na Fotografia 2, apresentam o potencial pozolânico.

FOTOGRAFIA 2: (a) CCA misturada com palha de casca de arroz, (b) CCA após o peneiramento.



Fonte: A Autora (2018).

Sobre este ponto, Tashima *et al.*, (2011) relata que para haver a reação pozolânica é necessário que o material utilizado para a adição tenha elevada finura, grandes quantidades de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ em sua composição e uma estrutura mineralógica amorfa.

A CCA quando sofre um processo de combustão em temperaturas inferiores a 600°C , ela se apresenta em um estado amorfo. Quando o tempo de combustão e a temperatura de queima da CCA é baixo, a sílica que está contida na CCA é predominantemente amorfa (Payá *et al.* (2001 *apud* TASHIMA ET AL., 2011)).

A superfície específica da CCA, que está correlacionada com a finura do material, influencia a sua atividade pozolânica. Isso se deve pela influência da distribuição, forma e rugosidade das partículas, assim como os poros existentes estão distribuídos (Tiboni, 2007).

Para identificar as fases cristalinas no material, recorre-se aos ensaios de difração de raios – X, podendo não só identificar como também realizar uma análise qualitativa destas fases (Tashima *et al.*, 2011).

Pouey (2006) citou em seu trabalho autores como Cook, (1976), Dass (1983), Ferreira (1996), Hamad e Khattab (1981), James e Rao (1986), Metha e Pitt (1977), onde relatam que a composição mineralógica das cinzas provenientes da queima em diferentes temperaturas e em diferentes tempos, afeta a estrutura da sílica presente no CCA.

Adhikary e Jana (2016) comentam sobre a propriedade cimentícia entre as partículas, quando explicam algumas mudanças observadas nas misturas de solo com CCA em relação ao solo natural, ocasionadas por esse fenômeno. Alhassan (2008) comenta que a sílica, no estado amorfo, pode vir a sofrer reação com o CaOH , composto liberado no processo de endurecimento do cimento, gerando assim, compostos cimentícios.

Devido a esta propriedade de cimentação, estudos começaram a se desenvolver aplicando CCA na estabilização de solos expansivos, com a intenção de solucionar o problema de expansão utilizando estes rejeitos, refletindo em uma solução ambientalmente adequada para a destinação final das cinzas e possíveis economias nas estabilizações destes solos.

2.2.4 Estudos de estabilização com solo-cca

Alguns estudos vêm sendo desenvolvidos no mundo com a utilização de cinza de casca de arroz, por ser um passivo ambiental e requerer uma destinação adequada e/ou reaproveitamento. Alguns deles estão relacionados abaixo.

No estudo de Adhikary e Jana (2016), estes estudaram uma argila expansiva da Índia, com porcentagens de 5, 10, 15 e 20% de cinza adicionado no solo. Já no estudo de Patel e Mahiyar (2014), estudou-se a adição de cinza de casca de arroz, dentre outros materiais, em um solo expansivo, sendo referente a CCA, os teores de adição de 5, 10, 15 e 20%. No estudo de Alhassan (2008), analisou-se a adição de cinza de casca de arroz, entre as porcentagens de 2 a 12% de CCA num solo da área de Maikunkele de Minna. Os dados destes estudos estão apresentados na Tabela 9.

TABELA 9: Dados de ensaios de estudos com cinza de casca de arroz.

	Alhassan (2008)		Adhikary e Jana (2016)		Patel e Mahiyar (2014)	
Composição da CCA (%)	SiO ₂	67,30	Celulose	40 – 45	Fe ₂ O ₃	0,21
	Al ₂ O ₃	4,90	Lignina	25 – 30	SiO ₂	90,23
	Fe ₂ O ₃	0,95	Cinza	15 – 24	CaO	1,58
	CaO	1,36	Outros	8 – 15	Al ₂ O ₃	2,54
	MgO	1,81	-	-	MgO	0,53
	Outros	17,78	-	-	Carbono	2,23
	-	-	-	-	KaO	0,39
	Teor	(Mg/m³ e %)	Teor	(gm/cc e %)	Teor	(gm/cc e %)
Compactação – Peso Específico Aparente Seco Máximo e Umidade *	0% CCA		0% CCA	1,61 e 20	0% CCA	1,71 e 18
	2% CCA	Entre 1,37	5% CCA	1,43 e 23,5	5% CCA	1,66 e 15
	4% CCA	Mg/m ³ e 1,48	10% CCA	1,39 e 25,4	10%	1,62 e 15
		Mg/m ³			CCA	
	6% CCA		15% CCA	1,35 e 28,3	15%	1,64 e 18
		e			CCA	
	8% CCA		20% CCA	1,29 e 30,8	20%	1,57 e 18
		Entre 18% e			CCA	
10% CCA	28%	-	-	-	-	
12% CCA		-	-	-	-	

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de Alhassan (2008), de Adhikary e Jana (2016) e de Patel e Mahiyar (2014).

TABELA 9: Dados de ensaios de estudos com cinza de casca de arroz (continuação).

Compressão Simples (kN/m ²)**	% CCA	7 dias	14 dias	28 dias	% CCA	0 dias	7 dias	28 dias	% CCA	Sem data (Kg/cm ²)
	2					0				0
4	Entre	Entre	Entre	Entre	5	Entre	Entre	Entre	5	1,39
6	200	240	250	250	10	90	150	150	10	1,48
8	e	e	e	e	15	e	e	e	15	1,92
10	230	280	300	300	20	150	250	220	20	1,64
12					-				-	-
Limite de Liquidez (%)	-		-		0% CCA		48		0% CCA	55
	-		-		5% CCA		56,6		5% CCA	49
	-		-		10% CCA		58,3		10% CCA	50
	-		-		15% CCA		61,7		15% CCA	52
	-		-		20% CCA		63,5		20% CCA	NP
Limite de Plasticidade (%)	-		-		0% CCA		26		0% CCA	32
	-		-		5% CCA		37,2		5% CCA	29
	-		-		10% CCA		39,4		10% CCA	29
	-		-		15% CCA		43,95		15% CCA	31
	-		-		20% CCA		45,69		20% CCA	NP
Índice de Plasticidade (%)	-		-		0% CCA		22		0% CCA	-
	-		-		5% CCA		19,4		5% CCA	-
	-		-		10% CCA		18,9		10% CCA	-
	-		-		15% CCA		17,75		15% CCA	-
	-		-		20% CCA		17,81		20% CCA	-

* e ** Dados extraídos de gráficos ilustrativos dos estudos de Alhassan (2008) e Adhikary e Jana (2016), sendo, portanto, faixa de valores aproximados.

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de Alhassan (2008), de Adhikary e Jana (2016) e de Patel e Mahiyar (2014).

2.3 Caracterização por difração de raio – x (drx)

A difração de raio X é uma das diversas técnicas utilizadas para identificar o argilomineral em argilas. A caracterização de materiais, segundo Albers *et al.* (2002), é possível de ser realizada com a difração de raio X pois na maioria dos sólidos, o ordenamento dos átomos se dá em planos cristalinos entre si, com mesmas distâncias que os comprimentos de onda dos raios X.

Segundo Albers *et al.* (2002), com a difração de raio X, há a incidência de um feixe de raios X em um cristal, que interage com os átomos e resulta no fenômeno da difração. A lei de Bragg, na Equação 1, mostra as variáveis que tem relação entre si na difração de raio X.

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen}\theta \quad (1)$$

Onde:

n = número inteiro

λ = comprimento de onda dos raios X incidentes

d = distância interplanar

θ = ângulo de difração

Os mesmos autores, Albers *et al.* (2002), ainda falam das vantagens de usar o este método para caracterizar as fases dos materiais, destacando a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados, a possibilidade de se analisar materiais que são compostos por várias fases e poder realizar uma análise quantitativa delas.

Albers *et al.* (2002) ainda adentram sobre a caracterização dos argilominerais com a difração de raio X, pois afirmam que ela se torna bastante indicada porque em uma análise química do material resultaria aos elementos químicos dele, porém não seria possível avaliar a forma que estão ligados.

Quanto à caracterização das argilas, que é o maior foco do presente trabalho, Albers *et al.* (2002) trazem em seu estudo que o elevado teor de quartzo da amostra resulta em comprometimentos, muitas vezes, na identificação das demais fases da amostra em análise, pois geram picos bem definidos e de grande intensidade ocasionados por esta fase, o que gera dificuldade na identificação das outras fases constituintes. Por este motivo, é necessário realizar a separação da argila e após este procedimento, realizar o ensaio. Assim, gera-se os picos da fase desejada.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área da presente pesquisa está localizada na cidade de Agrestina, em Pernambuco (Mapa 3), onde o solo nas cartas geotécnicas do estado, características de expansibilidade. A investigação geotécnica ocorreu com a finalidade de identificar os parâmetros e comportamento do solo, para execução de uma obra civil.

Segundo o IBGE (2016), a cidade de Agrestina conta com 22.679 habitantes, uma área de 200,581 Km² e apresenta um bioma de Caatinga e Mata Atlântica. Está situada a 22,5 Km de Caruaru e 149 Km de Recife.

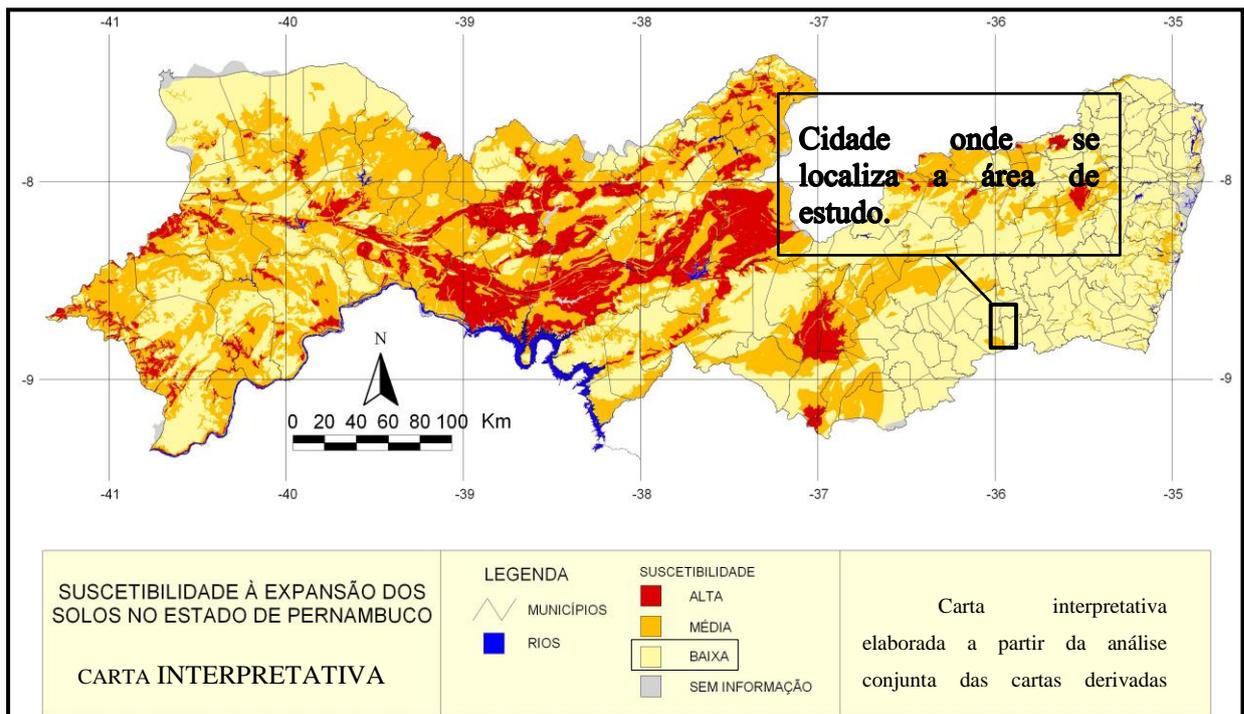
MAPA 3: (a) Localização do estado de Pernambuco no mapa do Brasil e (b) da cidade de Agrestina no mapa de Pernambuco.



Fonte: (a) Site [blogs.diariodepernambuco](http://blogs.diariodepernambuco.com.br/) (2018) e (b) Site [Wikipédia](https://pt.wikipedia.org/wiki/Pernambuco) (2018).

Pelo mapa de susceptibilidade à expansão dos solos em Pernambuco, de Amorim (2004), a cidade de Agrestina está destacada, como mostra-se na MAPA 4, onde apresenta-se, também, o potencial de expansão da região, considerada baixa.

MAPA 4: Localização da cidade de Agrestina no mapa de susceptibilidade à expansão dos solos em Pernambuco.



Fonte: A Autora (2018).

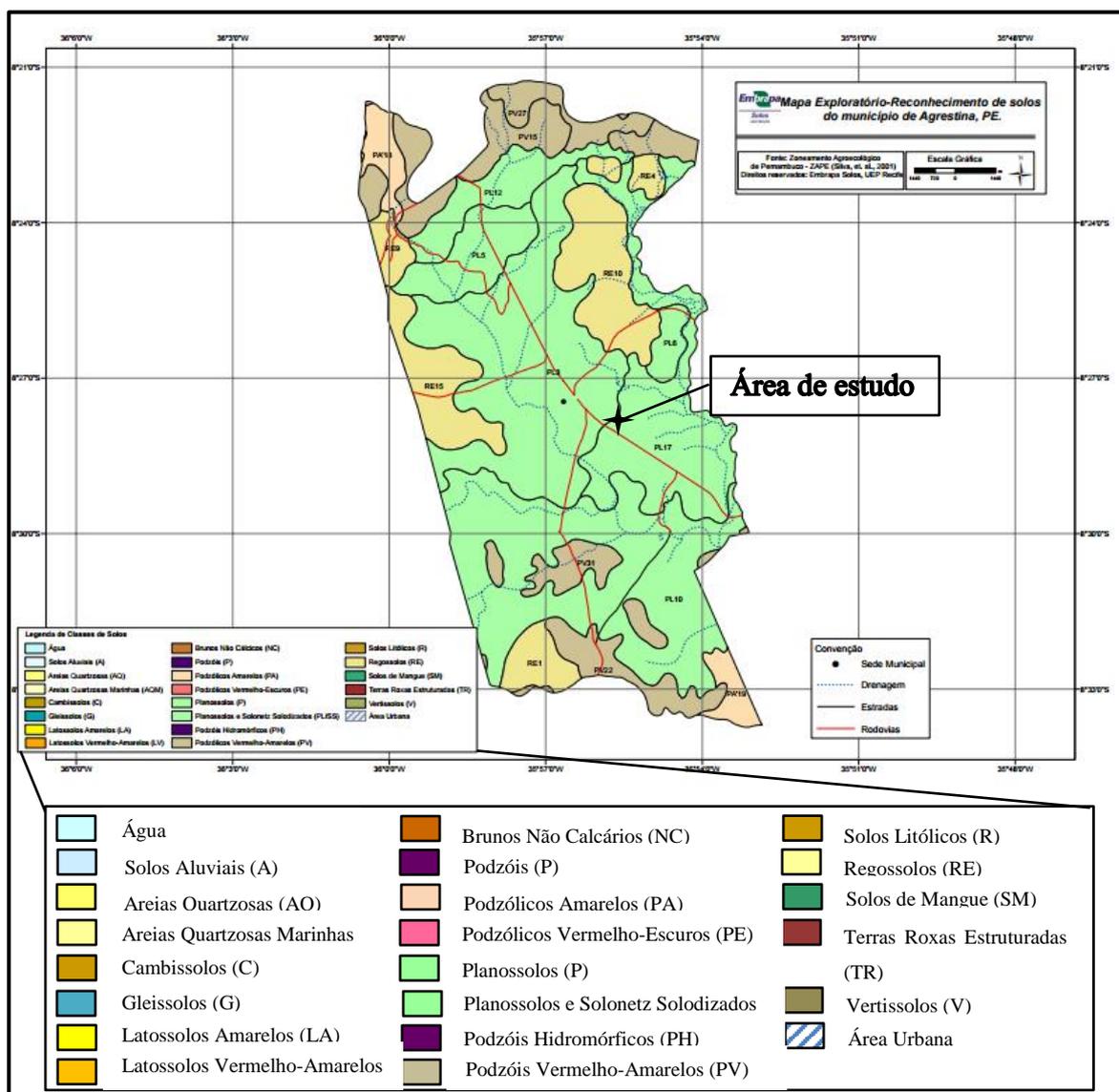
Nota: Adaptado de Amorim (2004).

A obra civil que motivou esse estudo foi uma obra para sediar atendimento ao público, situada na BR 104, de apenas um pavimento térreo, com uma área de aproximadamente 1000 m² construída. Na fase de projeto, a investigação geotécnica foi realizada com as sondagens à percussão (SPT). Já durante a fase de execução da obra, um dos engenheiros responsáveis pela obra percebeu pequenas fissuras no solo e suspeitou que fosse um solo não saturado. Diante deste pré-diagnóstico, resolveu-se contratar a Universidade Federal de Pernambuco para realizar uma consultoria e avaliar o tipo de solo em questão. Com a retirada das amostras por uma empresa terceirizada e realizado os ensaios de caracterização e adensamento, detectou-se ser um solo expansivo.

O Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina – PE, disponibilizado pela EMBRAPA, como mostra no MAPA 5, mostra as classes de solos que

estão presentes no território do município, representando a pedologia local. Pode-se observar a predominância dos Planossolos e Solonetz Solodizados (PL/SS). Há também a presença de Regossolos (RE), Podzólicos Vermelho-Amarelos (PV) e Podzólicos Amarelos (PA). Este mapa também mostra o traçado de estradas, rodovias e sistema de drenagem, provenientes do relevo.

MAPA 5: Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina – PE.



Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado EMBRAPA (2017).

O Planossolo ocorre normalmente nos terraços de rios ou riachos ou no terço superior de encosta, e pode apresentar hidromorfismo, não sendo uma característica obrigatória de todo o solo. Há uma mudança de textura entre os horizontes superficial e subsuperficial, que podem ser percebida facilmente, já que ocorre de forma repentina. É um solo que, se apresentar potencial de ser eutrófico, oferece uma boa condição enraizamento em profundidade (PRADO, 1995).

O Solonetz Solodizado está presente normalmente nos terraços de rios e riachos, onde há topografias mais suaves. A diferença entre os teores de argila deste solo é notável entre os horizontes superficial e subsuperficial. Este solo apresenta uma estrutura colunar no exame de trincheira. No horizonte B deste solo, a reação do solo é neutra ou alcalina (PRADO, 1995).

O clima do município de Agrestina é tropical. A pluviometria durante os meses do ano varia de forma bastante considerável. Nos meses de Julho e Novembro, respectivamente, encontra-se as maiores e menores precipitações do ano, de acordo com séries históricas, sendo a maior precipitação média registrada de aproximadamente 130 mm e a menor precipitação média registrada de aproximadamente 13 mm, como apresentado na Tabela 10. O gradiente térmico durante o ano é de aproximadamente 4°C, sendo a maior temperatura média registrada de 24°C e a menor temperatura média registrada de 20°C (CLIMATE-DATA, 2017).

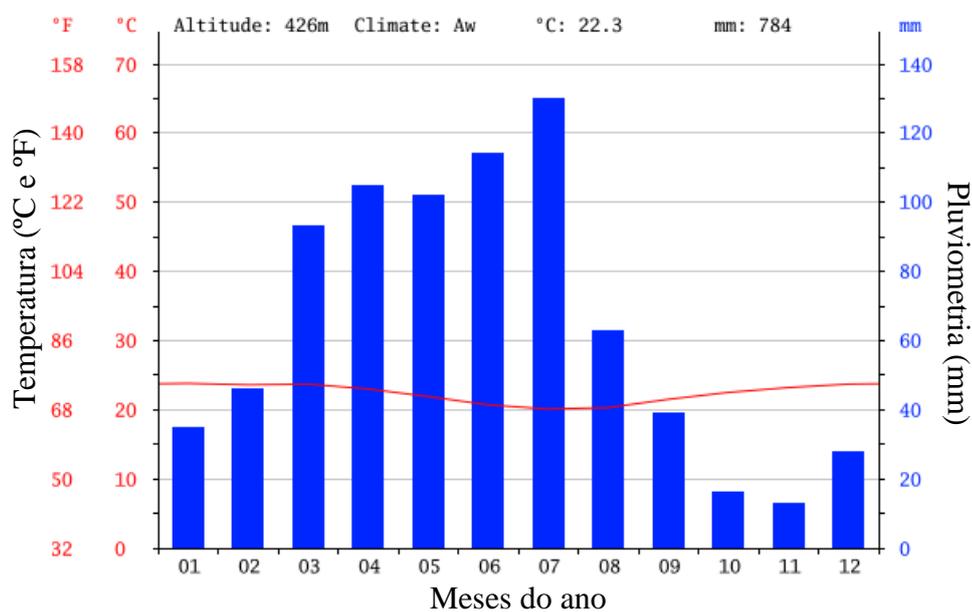
TABELA 10: Dados pluviométricos e térmicos de Agrestina, relativos a cada mês.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura Média (°C)	23,8	23,6	23,7	23	21,9	20,7	20,1	20,3	21,5	22,5	23,2	23,7
Temperatura Mínima (°C)	18,6	18,6	18,9	18,7	18,2	17,2	16,5	16,5	17,3	17,7	18	18,5
Temperatura Máxima (°C)	29,1	28,7	28,6	27,4	25,7	24,2	23,7	24,1	25,7	27,4	28,5	28,9
Chuva (mm)	35	46	93	105	102	114	130	63	39	16	13	28

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado do Site Climate-data.org (2017).

No Gráfico 4 mostra-se os dados de cada mês com relação a temperatura e pluviometria, expressos numericamente.

GRÁFICO 4: Dados pluviométricos e de temperatura do município de Agrestina.

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Modificado do Site Climate-data.org (2017).

De acordo com a coordenada geográfica retiradas do GPS e sobrepostas no Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina – PE (Mapa 5) e na carta derivada de Suscetibilidade de ocorrências de solos expansivos do Estado de Pernambuco (Mapa 4), o local se encontra sobre um solo PL (Planossolo).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

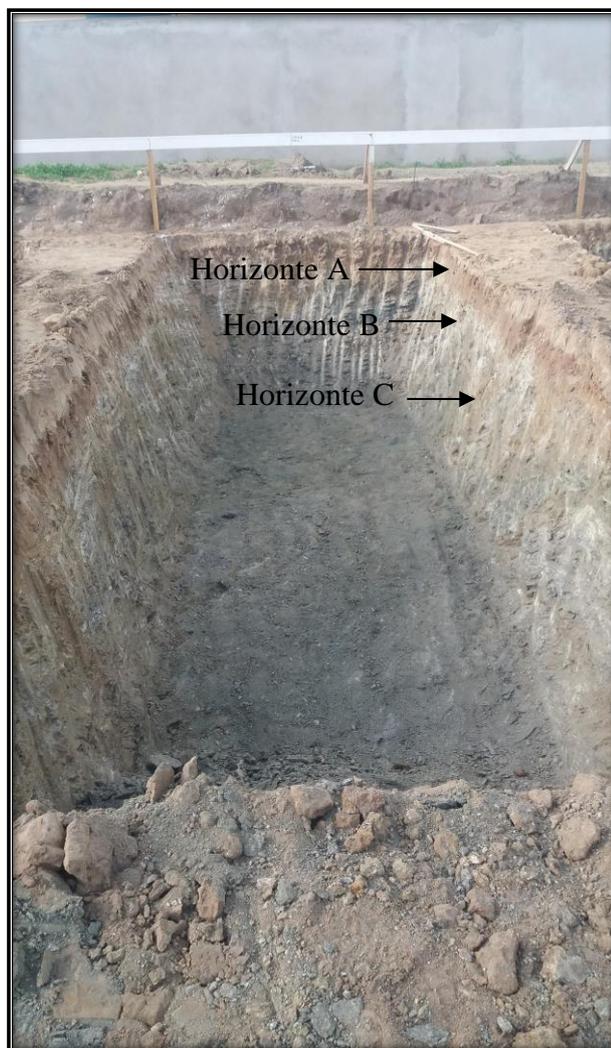
4.1 Amostras de solo

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram retiradas amostras deformadas e indeformadas do local de estudo. Um bloco de amostra indeformada foi retirado do local para análise de seus parâmetros naturais e 130 Kg de solo deformado foram recolhidos para moldagem dos corpos de prova a serem ensaiados nas umidades ótimas, tanto do solo *in natura*, quanto das misturas em diferentes proporções de cal. Todos os procedimentos seguiram as recomendações da ABNT NBR 9604: 2016. Também foram retiradas amostras por profundidade para análise química. Havia um horizonte com 3 transições, como mostra a Fotografia 3. O primeiro horizonte tinha 40 cm de profundidade, constituído de um solo mais solto. O segundo horizonte, também com 40 cm de profundidade, situada abaixo da anterior, continha um solo mais resistente. O terceiro horizonte, com 1 m de profundidade, era constituída de rocha alterada, sendo, claramente, mais resistente que as demais.

O bloco extraído teve um formato cúbico, de 30 cm x 30 cm x 30 cm, sendo moldado a 40 cm de profundidade. Foi aberto uma trincheira em volta da região de onde seria extraído o bloco. A moldagem do bloco foi realizada com o auxílio de uma espátula, sendo então envolto por papel filme, tecido, parafina e papel alumínio, nesta ordem, para preservar a umidade natural da amostra. Após o isolamento da amostra, colocou-se dentro de uma caixa de madeira, com folga e preenchendo os vazios com pó-de-serra para evitar o amolgamento da amostra nas regiões superficiais devido a instabilidades. Na região envolta do bloco, foram retirados os sacos com solo amolgado.

Após a retirada das amostras, estas foram identificadas e levadas para o laboratório de solos e instrumentação – LSI da UFPE, no campus Recife, para o laboratório de Geotecnia da UFPE, no campus Caruaru e para o laboratório de análises químicas da Universidade Católica de Pernambuco (Unicap), em Recife.

FOTOGRAFIA 3: Perfil do solo em profundidade, apresentado as transições das camadas analisadas.



Fonte: A Autora (2018)

4.2 Cal-hidratada

A Cal-Hidratada utilizada na mistura solo-cal é uma cal hidratada, do tipo CH -I. Esta cal foi caracterizada e os resultados estão expostos na Tabela 11 e encontrados na dissertação de Barbosa (2013). Barbosa (2013) caracterizou a cal para avaliar de forma concreta sua composição, trazendo todas as determinações solicitadas pela ABNT NBR 6473:2003 para sua caracterização. Barbosa (2013) ainda traz uma análise feita segundo as Normas Brasileiras e discorre sobre a ótima qualidade da cal, classificando-a, segundo a ABNT NBR 6473:2003(a), como CH I e também, os valores da Espectrometria de Fluorescência de Raio

X para avaliar o teor de óxido de cálcio (CaO), tendo um valor de 66,42% e sendo apresentado na Tabela 12.

TABELA 11: Resultado das análises químicas da cal.

Determinações	Unidades	Resultados
Umidade	%	1,31
Perda ao fogo	%	24,23
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	%	0,22
Óxido de cálcio total (CaOT)	%	66,93
Óxido de cálcio disponível (CaOD)	%	58,93
Anidrido carbônico (CO ₂)	%	4,09
Massa específica	g/mL	0,445
Peneira 30 – 0,600 mm	%	0,1
Finura Peneira 200 – 0,075 mm	%	0,13
Retenção de água	%	87

Fonte: Barbosa (2013).

TABELA 12: Resultado dos Óxidos da Cal.

Amostra	Óxidos											Total
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	
Cal	0,00	1,50	0,00	1,93	0,00	66,42	0,00	0,12	0,06	0,01	27,44	97,48

Fonte: Barbosa (2013).

4.3 Cinza de casca de arroz

A cinza da casca de arroz que foi utilizada nesta pesquisa foi caracterizada Lacerda *et. al.* (2018), trazendo em seu trabalho algumas das propriedades da CCA pura, que estão relacionadas na Tabela 13. A caracterização da CCA ocorreu no seu estado bruto, sem nenhum tipo de beneficiamento prévio.

TABELA 13: Caracterização das propriedades da CCA no estado bruto.

Determinações	Unidades	Resultados
Granulometria (Diâmetros)	mm	Entre 0,03 e 5,00
Peso Específico Aparente Seco	kN/m ³	5,15
Umidade	%	109
Peso Específico dos Grãos	kN/m ³	19,10
Limite de Plasticidade	%	NP**
Limite de Liquidez	%	NL*

* NL: Não Líquido

** NP: Não Plástico

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de Lacerda *et al.* (2018).

A cinza tem uma tonalidade acinzentada, com granulometria fina e presença de alguns resíduos de casca de arroz. A cinza foi previamente peneirada na peneira #16 (1,18 mm), para que fosse retirada as cascas presentes, deixando apenas o material de tonalidade acinzentada, que é o que oferece o potencial pozolânico.

4.4 Métodos

4.4.1 Preparação das amostras

Cada ensaio precisou de um tipo de preparação das amostras para serem realizados. Foram realizados os ensaios de caracterização física, que compreendem a umidade, a granulometria, densidade real dos grãos e limites de Atterberg, o ensaio de compactação, adensamento, tensão de expansão, compressão axial simples e ensaios de identificação da mineralogia, sendo utilizado a difração de raio X. Houve também a realização da caracterização química de algumas amostras.

4.4.2 Misturas solo-cal-hidratada e solo-cca

As misturas de solo com cal e solo com cinza foram realizadas com amostras de solo seco, propondo acrescentar as porcentagens de 3%, 5%, 7%, 9% e 13% de cal e 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14% de cinza em relação ao peso da amostra seca para avaliar a evolução da

estabilização. Após a homogeneização e preparação dos corpos de prova na umidade ótima de cada mistura, estes foram ensaiados com idades de 7, 14 e 21 dias e 7, 14, 28 e 120 dias, respectivamente para cinza e cal, no edométrio e feito os ensaios químicos. As porcentagens de cal foram escolhidas seguindo acréscimo de 2 em 2%, como na maioria dos estudos desenvolvidos com solo-cal, tomando como base a porcentagem indicada pelo método do pH, após 1 hora de realizada a mistura, que resultou em 13% de cal no solo para alcançar um pH de 12,42. Já as porcentagens com CCA, também seguiu o mesmo procedimento, de 2 em 2%, para avaliar gradativamente o comportamento com pequenos acréscimos de CCA.

4.4.3 Caracterização física do solo e misturas

4.4.3.1 Granulometria

A análise granulométrica das misturas e solo natural foi feita de acordo com a ABNT NBR 7181:2016. Realizou-se os ensaios de peneiramento e sedimentação.

4.4.3.2 Limites de atterberg

Dentro dos Limites de Atterberg, foram realizados os ensaios de Limites de Liquidez e Limites de Plasticidade tanto para o solo natural quanto para as misturas em questão. Os ensaios de Limite de Plasticidade seguiram os procedimentos da ABNT NBR 7180:2016. Já os ensaios de Limite de Liquidez seguiram os procedimentos ABNT NBR 6459:2016.

4.4.3.3 Densidade real

Os ensaios de densidade real, nos solos e misturas, foram realizados seguindo os procedimentos da ABNT NBR 6508:2016, usando o método do picnômetro.

4.4.3.4 Compactação

O ensaio de compactação do solo e misturas seguiram os procedimentos propostos pela ABNT NBR 7182:2016, aplicando-se a energia de Proctor Normal nos ensaios.

4.4.4 Caracterização química

Os ensaios químicos foram realizados no laboratório da Universidade Católica de Pernambuco – Unicap. As análises químicas foram embasadas nas instruções propostas pela EMBRAPA (2017). Os ensaios de pH foram realizados no solo natural, nas misturas de solo com cal-hidratada (1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11% e 13%), solo com cinza (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14%) e por horizontes, sendo estas análises feitas 1 hora após realizadas as misturas. Ressalta-se que na medida de pH nas amostras de solo-cal-hidratada, utilizou-se a metodologia proposta para avaliação da fertilidade do solo, chamada de “cachimbada” pela EMBRAPA (2017). Também foram realizados os ensaios de Carbono Orgânico e Matéria Orgânica nas amostras de solo-CCA e nas amostras dos horizontes. Outras análises químicas foram realizadas nas amostras de solo natural, por horizontes e nas amostras de solo-CCA, como Al^{++} , $Ca^{++} + Mg^{++}$, Na^+ e K^+ trocável, $H^+ + Al^{+++}$ extraível, entre outras.

4.4.4.1 Espectrômetro de fluorescência de raio – x

Um outro ensaio, o em espectrômetro de fluorescência de raios-X, foi realizado para a cinza pura, para as três camadas de solo em profundidade e para as misturas com cinza de casca de arroz nas porcentagens de 2, 4, 6, 8 e 10%. O equipamento usado foi Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores, realizado no Laboratório Núcleo de Estudos Geoquímicos (LABISE). Os resultados da varredura semi-quantitativa foram recalculados para 100% após a incorporação do valor da perda ao fogo.

Não foi realizado este ensaio para as misturas com 12% e 14% de CCA e nem para as misturas de cal pois não houve tempo suficiente para realiza-los. As misturas de 12% e 14% de CCA só foram inseridas no estudo após o envio para realização deste ensaio, pois durante o ensaio de expansão, verificou-se que a mistura com 10% de CCA ainda apresentava uma expansão elevada.

4.4.5 Difração de raio x

O ensaio de DRX foi realizado para os três horizontes em estudo e no solo usado nos ensaios laboratoriais. Os procedimentos específicos na preparação das lâminas para cada camada em profundidade do solo em estudo estão descritos a seguir. As lâminas foram

preparadas no laboratório de química da Unicap, em Recife, através dos seguintes tratamentos:

1. Tratamento do solo com Potássio, na temperatura ambiente e aquecida a 550°C;
2. Tratamento do solo com Magnésio Glicol, na temperatura ambiente.

No Capítulo 7 do livro Solos não saturados no contexto geotécnico, de José Camapum Carvalho *et al.* (2015), está descrito todo o processo de separação da areia (quartzo), do silte e da argila de solos, assim como a metodologia de preparação das lâminas.

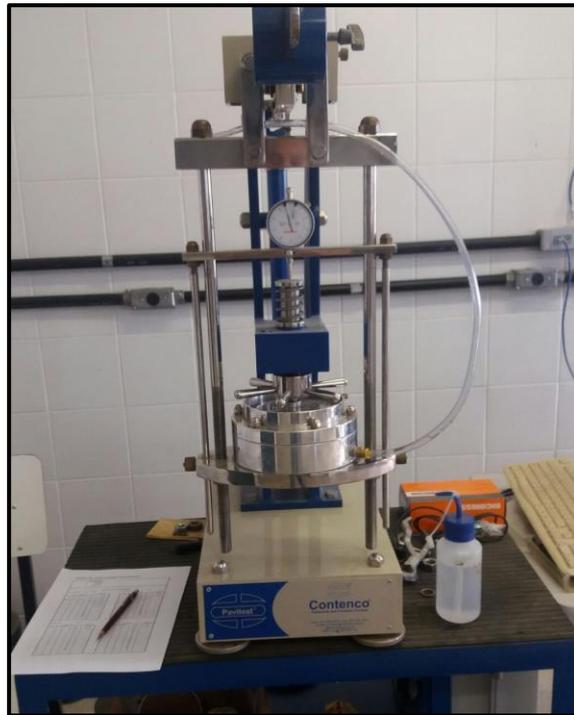
O ensaio foi realizado com o emprego do Difratômetro de Raios – X Bruker D8 Advance Davinci, com radiação Tubo de Cu K (alfa), tensão de 40 KV, corrente de 40 mA, com passo de 0,020U, com incremento a cada 1 s e velocidade de varredura de 2°/min, varrendo o intervalo da angulação de 2° a 42°.

4.4.6 Caracterização mecânica

Após a compactação das amostras na umidade ótima e moldagem dos anéis, esperou-se as idades de 7, 14 e 21 dias de cura (mistura realizada com cinza) e foram realizado nas idades de 7, 14, 28 e 120 dias de cura (mistura realizada com Cal-Hidratada) para realização dos ensaios de expansão a volume constante e expansão livre, no edometro, para avaliar a influência das porcentagens de aditivos e idades nas respectivas expansões.

Para avaliar a expansão máxima que cada mistura alcançava, moldou-se um corpo de prova para cada uma delas e deixou-as no edômetro, sob umidade por 4 dias, com uma tensão aplicada de 10 kPa, até que seu potencial expansivo se tornasse constante. Na Fotografia 4 mostra-se um edômetro similar ao usado.

FOTOGRAFIA 4: Edômetro utilizado nos ensaios de expansão.



Fonte: A Autora (2018).

Aplicou-se neste estudo as seguintes metodologias para caracterização mecânica da expansividade e das tensões de expansão dos solos: (a) Expansão “Livre”, (b) Carregamento após expansão com diferentes tensões de consolidação, (c) Expansão e Colapso sob Tensão, (d) Tensão de Expansão a Volume Constante. Nas misturas, as Tensões de Expansão foram determinadas com a metodologia de Tensão de Expansão a Volume constante e a caracterização da expansão com a metodologia de Expansão “Livre”.

Todas estas metodologias aplicadas ao solo e misturas foram aplicadas no estudo de Barbosa (2013) e Paiva (2016), onde Barbosa (2013) também caracterizou a tensão de expansão do solo com as metodologias propostas por Rao et al. (1988) e Justo et al. (1984).

4.4.6.1 Expansão “livre”

O ensaio de expansão livre mede a expansão do solo quando submetido a variação da umidade com uma pequena carga aplicada, que pode ser de 7 kPa ou 10 kPa. O procedimento ocorreu de acordo com a ASTM D4829/95. O objetivo é avaliar a deformação do solo, medindo-se as variações dele ao longo do tempo até sua completa estabilização, com uma

carga aplicada de 10 kPa. A sua altura final com relação à altura inicial permite saber o potencial de expansão deste solo.

4.4.6.2 Tensão de expansão a volume constante

O ensaio de Tensão de Expansão a Volume Constante, apresentado por Ferreira (1995) é realizado para saber a carga que impede este solo de expandir quando sua umidade varia.

4.4.6.3 Expansão sob tensão

No ensaio de Expansão sob Tensão, acompanha-se a evolução da expansão de um corpo de prova com uma tensão aplicada previamente. As sobrecargas aplicadas, que neste estudo foram de 10 kPa, 20 kPa, 40 kPa, 80 kPa e 160 kPa.

4.4.6.4 Carregamento após expansão com diferentes tensões de consolidação

No ensaio de Carregamento após Expansão, descrito por Ferreira e Ferreira (2009), avalia-se a tensão necessária para regredir a expansão máxima do solo, aplicando-se incrementos de tensões e avaliando a diminuição desta.

4.4.6.5 Expansão e colapso

Já o ensaio de expansão e colapso é descrito por Ferreira e Ferreira (2009).

4.4.6.6 Edométrio duplo

O edométrio duplo, descrito por Ferreira e Ferreira (2009), avalia os coeficientes de compressão do solo e de re-compressão.

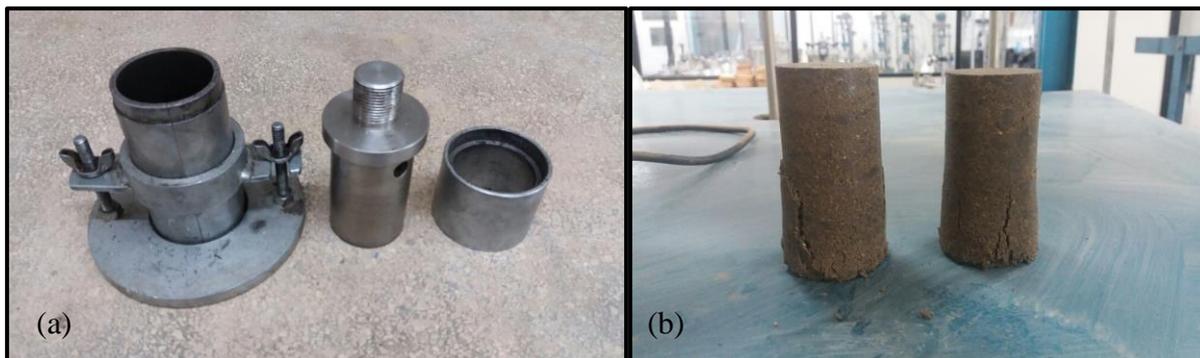
Foi realizado este processo para duas amostras: uma inundada previamente, por 24 horas e uma sem inundação, sendo as duas extraídas do bloco indeformado.

4.4.7 Ensaio de resistência a compressão simples

Para o ensaio de compressão simples, foram moldados 2 corpos de prova para o solo natural e para cada mistura do solo com aditivos. A compressão foi feita após uma cura úmida de 0 dia para a mistura com cinza, seguindo a ABNT NBR 12025/2012.

Na Fotografia 5, mostra-se o molde usado na preparação dos corpos de prova usado no ensaio de compressão simples, com 10 cm de altura, 5 cm de diâmetro e 196,34 cm³ de volume, assim como dois corpos de prova após submetidos ao ensaio.

FOTOGRAFIA 5: (a) Molde usado na preparação do corpo de prova para compressão simples; (b) corpos de prova após o ensaio de compressão axial simples.



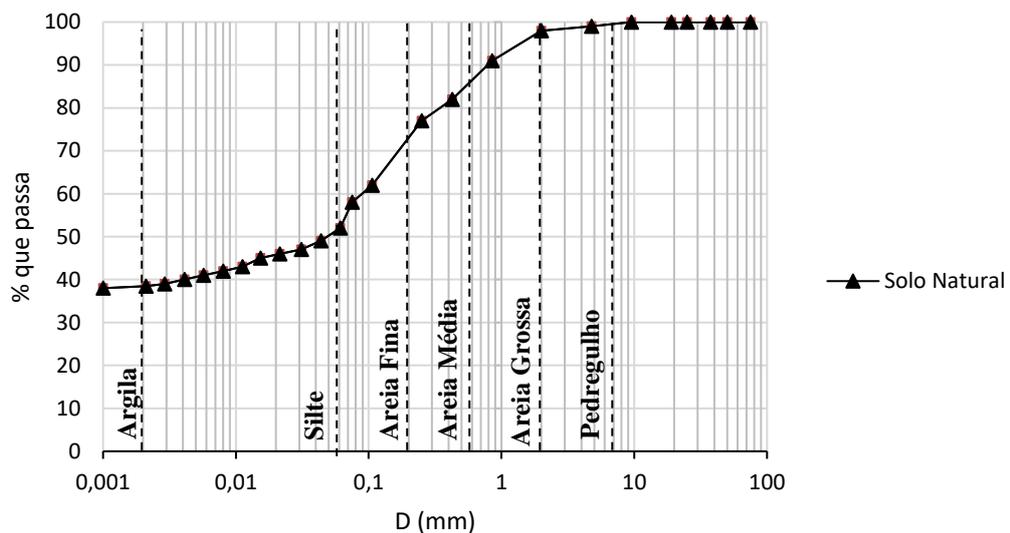
Fonte: A Autora (2018).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Solo

O ensaio de granulometria realizado no solo natural, mostrou, através da curva, conforme o Gráfico 5, que o solo é bem graduado. A fração mais fina, aproximadamente 52% do solo (silte e argila) é a de maior interesse, já que ocasiona, junto com o argilomineral, o efeito de expansão neste solo. O argilomineral presente no solo e o teor de silte e argila define o grau de expansão que o mesmo terá. Segundo a Classificação Unificada dos Solos, este solo pode ser classificado como um CH ou CL.

GRÁFICO 5: Granulometria do solo natural.



Fonte: Adaptado de LSI (2017).

A Tabela 14 traz os dados de alguns dos ensaios realizados neste solo. No momento da retirada da amostra, a umidade que o solo apresentou foi de 14%, o que se pode chamar de umidade de campo. De acordo com Das (2007), que apresenta valores típicos de Limite de Liquidez e de Limite de Plasticidade para algumas argilas, a Caulinita apresenta valores de LL entre 35 – 100 e de LP de 20 – 40, englobando, então, os valores obtidos no solo através dos ensaios realizados, já que o mesmo apresentou LL de 50% e LP de 20%. Segundo Burmister (1949 *apud* DAS, 2007), argilas que tenham IP entre 20 – 40 são consideradas de plasticidade alta, podendo então, ser classificada desta forma o solo em estudo, já que apresentou o IP de 30.

TABELA 14: Características do solo estudado.

Ensaio	Resultado
Umidade (%)	14,00
Peso Específico Natural (kN/m ³)	19,66
Peso Específico Real dos Grãos (kN/m ³)	26,80
Limite de Liquidez (%)	50
Limite de Plasticidade (%)	20
Índice de Plasticidade (%)	30
Umidade Ótima (%)	16,00
Peso específico Aparente Seco Máximo (kN/m ³)	17,90

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de LSI (2017).

Pelas Cartas de Skempton (1953), de Williams e Donaldson (1980) e a de Seed (1962), que associam a atividade da argila e a sua expansibilidade com o Índice de Plasticidade do solo e a fração fina de argila (< 0,002 mm), foi possível obter os resultados expostos no Quadro 3. O Índice de atividade do solo foi de 0,73. Verificou-se grande variação nos resultados de caracterização do potencial de expansão entre as três cartas mencionadas.

QUADRO 3: Potencial de expansão do solo de estudado através de cartas de atividade.

Carta de Atividade	Parâmetros relacionados	Potencial de Expansão
Skempton (1953)	IP x fração fina de argila (< 0,002 mm)	Inativo
Williams e Donaldson (1980)	IP x % de argila	Alto
Carta de Seed (1962)	Ia x % de argila	Médio

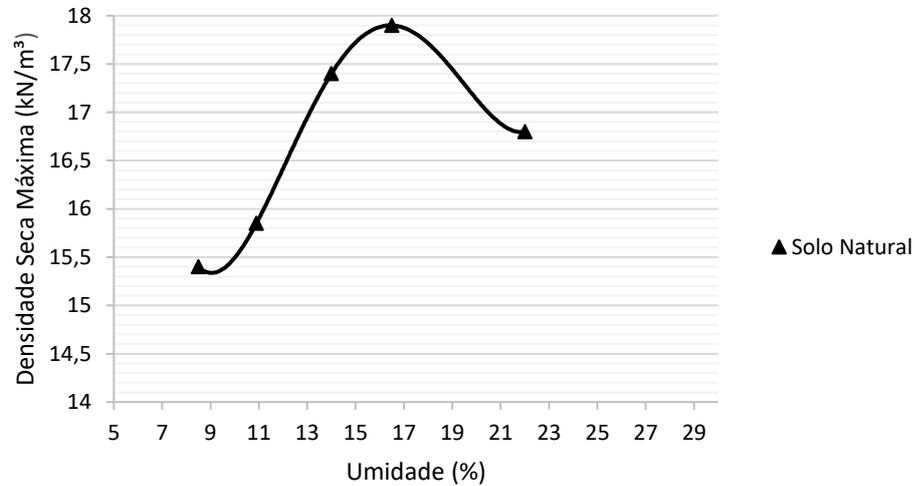
Fonte: A Autora (2018)

A curva de compactação deste solo, exposta no Gráfico 6, apresentou uma umidade ótima de 16% e uma densidade seca máxima de 17,9 kN/m³. O formato da curva é típico de solos mais argilosos.

Com o bloco extraído em campo, moldou-se os anéis para ensaio de expansão e tensão de expansão na umidade e densidade de campo. As cargas de tensão de inundação foram de

10, 20, 40, 80 e 160 kPa, para avaliar o comportamento expansivo do solo e a carga necessária para combater a expansão. Com a sobrecarga de 10 kPa, a expansão foi de 6,58%.

GRÁFICO 6: Curva de compactação do solo natural.



Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de LSI (2017).

5.1.2 Critérios de expansibilidade

De acordo com o mapa de susceptibilidade à expansão de Amorim (2004), no Mapa 2, a região em estudo possui uma probabilidade de baixa expansão. Já pelo mapa pedológico da EMBRAPA, a região apresenta Planossolos e Solonetz-Solodizado, que através dos critérios de suscetibilidade à expansão e ao colapso para as unidades de solo componente compostos, através de critérios para cada unidade taxonômica, (levantamento do ZAPE *apud* Amorim (2004)), possui um grau de expansão baixo/alto e alto, respectivamente. No Quadro 4 estão as classificações segundo alguns critérios como WES, Chen (1975), Seed *et al.* (1962), Daksanamurthy e Raman (1973), o Holtz e Gibbs (1956), que são orientativos, Vijayvergiya e Ghazzaly (1973) e Cuellar (1978), que é um método qualitativo e o USBR – HOLTZ (1953).

QUADRO 4: Critério de classificação quanto a expansão do solo em estudo (métodos qualitativos).

Susceptibilidade ou Critério de Classificação	Grau de Expansão
Amorim (2004)	Baixo
EMBRAPA - (ZAPE <i>apud</i> Amorim (2004))	Baixo/Alto
WES	Médio/Alto
Chen (1975)	Alto/Médio
Seed <i>et al.</i> (1962)	Alto
Daksanamurthy e Raman (1973)	Médio
Vijayvergiya e Ghazzaly (1973)	Alto
Holtz e Gibbs (1956)	Alto
USBR – HOLTZ (1953)	Muito Alta/Média
Cuellar (1978)	Média

Fonte: A Autora (2018)

Em comparação com alguns estudos desenvolvidos com solo da região pernambucana, como o de Barbosa (2013), com o solo de Cabrobó e o de Paiva (2016), com o solo de Ipojuca, Cabrobó e Paulista, foram classificados pelos diversos métodos citados, utilizando os dados disponíveis em seus trabalhos. Os resultados constam no Quadro 5. Verificou-se grande variação nos resultados de caracterização do potencial de expansão entre os diferentes critérios e entre os cinco locais comparados.

QUADRO 5: Critério de classificação quanto a expansão do solo de Barbosa (2013), Paiva (2016) e presente trabalho.

Probabilidade ou Critério de Classificação	Grau de expansão				
	Barbosa (2013)	Paiva (2016)			Presente trabalho
	Cabrobó	Ipojuca	Cabrobó	Paulista	Agrestina
Amorim (2004)	Médio/Alto	Baixo/Médio	Médio/alto	Baixo	Baixo
EMBRAPA	Alto	Baixo	Alto	-	Baixo/Alto
WES	Baixo	Alto	Baixo/Alto	Médio/Alto	Médio/Alto
Chen (1975)	Baixo	Muito Alto	Médio	Alto/Muito Alto	Alto/Médio
Seed <i>et al.</i> (1962)	Médio	Muito Alto	Médio	Alto	Alto
Daksanamurthy e Raman (1973)	-	Muito Alto	Médio	Alto	Médio
Vijayvergiya e Ghazzaly (1973)	Alto	Muito Alto	Alto	Muito Alto	Alto
Holtz e Gibbs (1956)	Baixo	Alto	Baixo	Médio	Alto
USBR – HOLTZ (1953)	Muito Alta / Média	Muito Alta / Muito Alta	Muito Alta / Média	Muito Alta / Alta	Muito Alta/Média
Cuellar (1978)	Média	Muito Alta	Média	Alta	Média

Fonte: A Autora (2018).

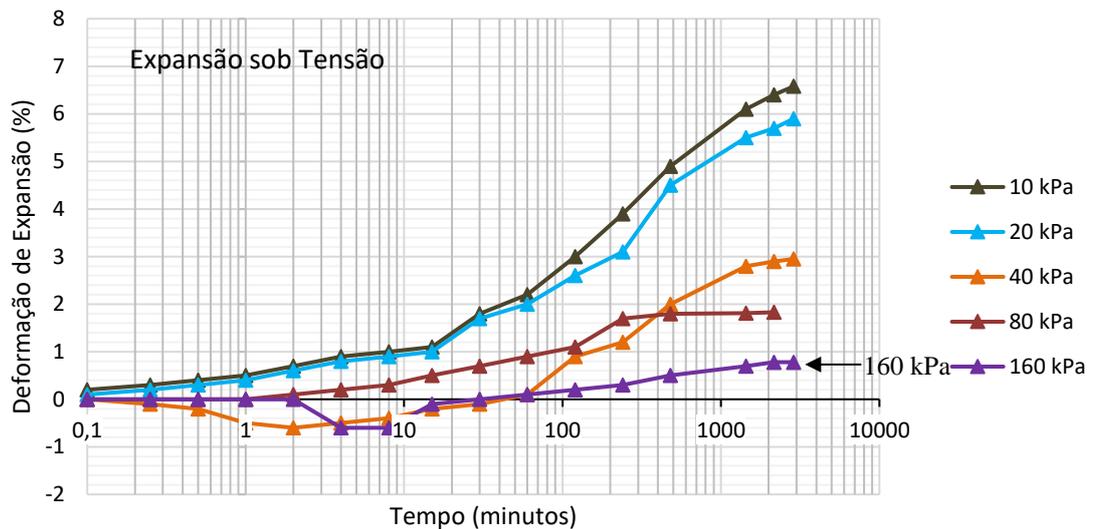
Nota: adaptado de Barbosa (2013), adaptado de Paiva (2016) e LSI (2017).

5.1.3 Ensaios de expansão

No Gráfico 7 mostra-se a expansão do solo com diferentes tensões aplicadas. A Expansão sob Tensão é um dos métodos utilizados para determinar a tensão que deverá ser aplicada ao solo e que evitará sua expansão quando houver uma variação de umidade, ou que apresente em uma porcentagem irrisória. O comportamento compressivo apresentado nas cargas de 40 kPa e 160 kPa ocorre devido ao fato da pressão externa, no intervalo de tempo determinado, ser maior que a pressão interna no solo, levando a esta compressão por alguns minutos. Quando a pressão interna supera a externa, o solo volta a expandir e elevar seus

valores para patamares positivos. Após 48 horas de inundação, na sobrecarga de 160 kPa, houve apenas uma expansão de aproximadamente 0,8 % no solo natural, o que pode ser concluído como a tensão de expansão por este método.

GRÁFICO 7: Curva de expansão sob tensão do solo natural com diferentes tensões.



Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de LSI (2017).

Na Tabela 15 mostra-se alguns índices físicos antes e após a inundação do solo, como a umidade (h), índice de vazios, peso específico aparente seco (ρ_d), peso específico úmido (ρ_h), grau de saturação (S_r) e potencial de expansão (SP). Para avaliar a expansão, um dos métodos a ser aplicado pode ser o de expansão livre. Este método usa a aplicação de uma tensão baixa (7 kPa ou 10 kPa) para obter o valor de expansão do solo quando inundado. A expansão com 10 kPa, mostrou que o solo consegue expandir 6,58%. Já a tensão de 160 kPa praticamente combateu a expansão, tornando-a baixa (valor de 0,78%).

TABELA 15: Índices físicos do solo indeformado no início término dos ensaios Edométricos Simples.

Tensão de Inundação	Índices Físicos Antes da Inundação					Índices Físicos Depois da Inundação					SP (%)
	W (%)	e	ρ_a kN/m ³	ρ_h kN/m ³	Sr (%)	W (%)	e	ρ_a kN/m ³	ρ_h kN/m ³	Sr (%)	
10 kPa	14,21	0,588	16,87	19,27	64,73	20,71	0,555	17,23	20,80	100	6,58
20 kPa	13,20	0,562	17,16	19,43	63,01	18,66	0,500	17,87	21,20	100	6,24
40 kPa	12,97	0,609	16,66	18,82	57,08	19,81	0,531	17,50	20,97	100	2,95
80 kPa	12,54	0,617	16,57	18,65	54,46	19,15	0,513	17,71	21,10	100	1,84
160 kPa	13,95	0,649	16,25	18,51	57,58	22,20	0,594	16,81	20,54	100	0,78

Fonte: LSI (2017).

O estudo de Barbosa (2013), que apresentou em seu solo uma expansão de 7,45%, ou seja, 0,87 ponto percentual a mais no valor de expansão em relação ao solo em estudo, mostrou que por este método, a tensão de expansão foi de 320 KPa, induzindo assim, que este solo estudado no presente trabalho pudesse ser submetido a mais uma tensão, que seria de 320 kPa, e que poderia apresentar o mesmo comportamento do solo da autora citada. Porém, não se prosseguiu nos ensaios com esta tensão pois com a tensão de 160 KPa já havia ocorrido uma boa redução da expansão do solo.

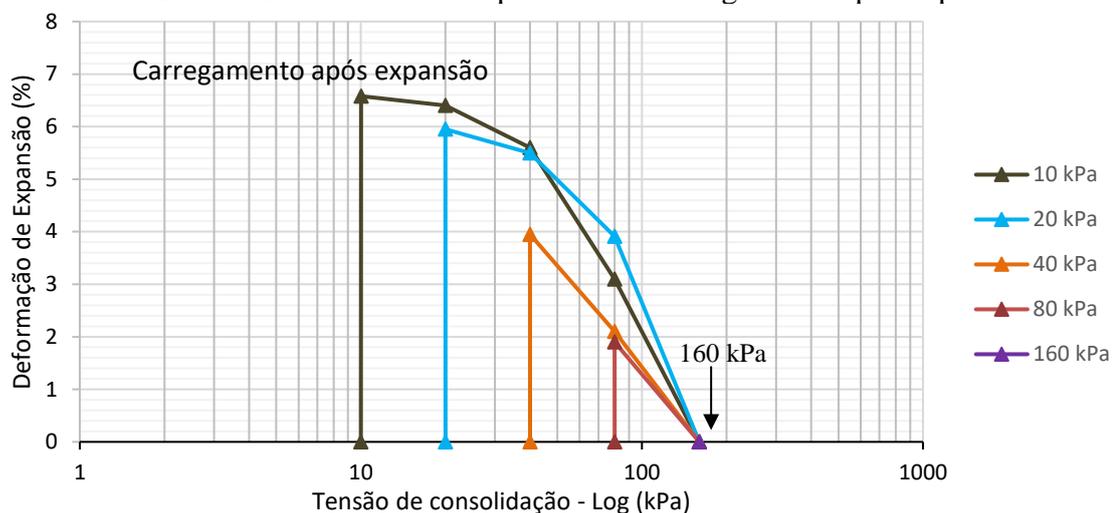
Já quando consultado os valores dos solos de Paiva (2016), observou-se que este não realizou este ensaio nos solos estudados por ele.

Já pelo método de Carregamento após Expansão, pode-se concluir que a tensão que não haverá expansão é a de 160 KPa, como pode ser observado no Gráfico 8. Por este método, o solo estudado por Barbosa (2013) apresentou uma tensão de expansão 90 KPa e os solos estudados por Paiva (2016), apresentaram 90 kPa, 190 kPa e 300 kPa, respectivamente aos solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.

Pelo método de Expansão e Colapso, com os resultados mostrados no Gráfico 9, a tensão de expansão foi de 201 KPa. Neste estudo, como foram aplicadas as cargas até 160 KPa e a mesma não levou a uma expansão nula ou ao colapso, utilizando-se da equação da linha de tendência para determinar o valor de tensão de expansão, obtendo-se uma boa correlação entre os dados.

Por este método, o solo de Barbosa (2013) apresentou uma tensão de expansão 100 kPa e os de Paiva (2016), uma expansão de 100kPa, 220 kPa e 180 kPa, respectivamente aos solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.

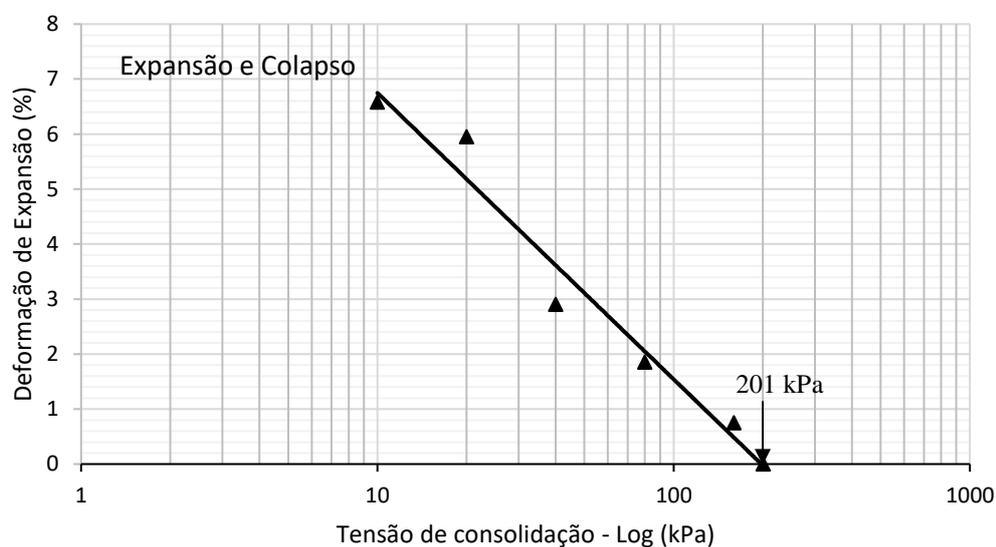
GRÁFICO 8: Curva de expansão com carregamento após expansão.



Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de LSI (2017).

GRÁFICO 9: Curva de expansão e colapso.



Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de LSI (2017).

Já pelo método de Tensão de Expansão a Volume Constante, o solo apresentou uma Tensão de Expansão de 100 kPa (LSI, 2017). O de Barbosa (2013) apresentou 87 kPa e os de

Paiva (2016) 87 kPa, 245 kPa e 275 kPa, respectivamente aos solos de Cabrobó, Ipojuca e Paulista.

Realizando-se uma média entre as tensões resultantes de cada método estudado, pode-se inferir que o solo em campo oferece uma Tensão de Expansão de 155,25 kPa. Na Tabela 16 estão concentradas as tensões pelos diversos métodos.

Na Tabela 17 está um resumo das tensões de expansão do solo em estudo e dos autores citados, podendo gerar rapidamente uma comparação entre estes valores.

TABELA 16: Tensões de expansão aplicadas por diversos métodos no solo natural nas condições de campo.

Método	Tensão de Expansão (kPa)
Expansão sob tensão com diferentes tensões aplicadas	160
Carregamento após expansão	160
Expansão e colapso	201
Volume constante	100

Fonte: LSI (2017).

TABELA 17: Tensões de expansão aplicadas por diversos métodos no solo natural nas condições de campo - Barbosa (2013), Paiva (2016) e presente trabalho.

Método de Ensaio para Tensão de Expansão	Tensão de Expansão (kPa)				
	Presente Trabalho	Barbosa (2013)	Paiva (2016)		
	Agrestina	Cabrobó	Cabrobó	Ipojuca	Paulista
Expansão sob tensão com diferentes tensões aplicadas	160	320	-	-	-
Carregamento após expansão	160	90	90	190	300
Expansão e colapso	201	100	100	220	180
Volume constante	100	87	87	245	275

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de LSI (2017), Barbosa (2013) e Paiva (2016).

Aplicando o critério de Jimenez (1980), que relata os possíveis danos causados com as tensões de expansões, há, de acordo com a tensão encontrada pelos métodos de Expansão sob Tensão, Carregamento após Expansão, Tensão de Expansão a Volume Constante e média entre as tensões resultantes dos métodos aplicados, a possibilidade de danos graves a estruturas. Já pelo método de Expansão sob Tensão, pode-se inferir que há a possibilidade de demolição de estruturas.

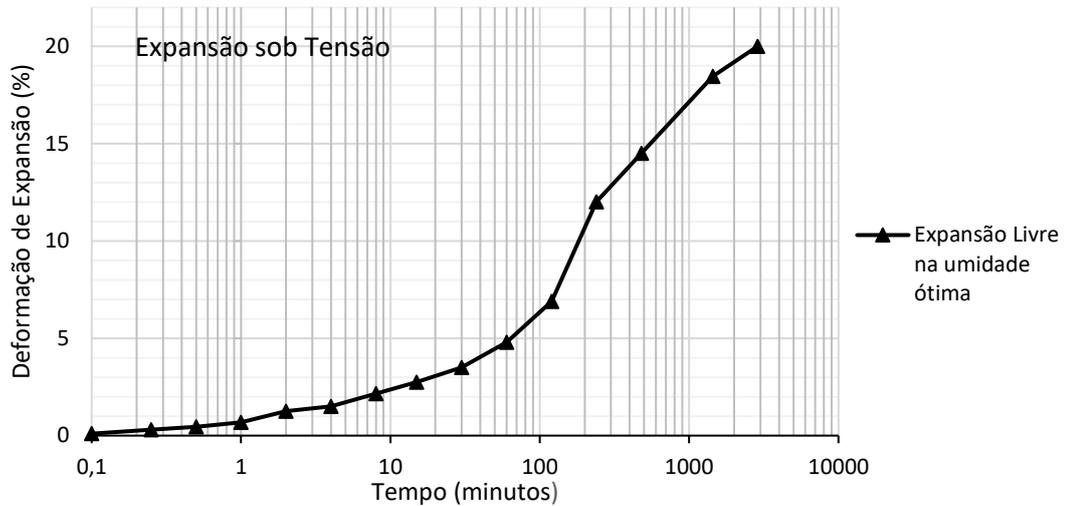
5.1.4 Solo compactado em laboratório

Até o momento, o solo havia sido ensaiado no seu estado natural, com densidade e umidade de campo, utilizando corpos de prova moldados a partir de bloco indeformado.

Para avaliar a expansão deste solo após a sua compactação em umidade ótima, onde alcança-se a maior densidade seca máxima em um corpo de prova, ainda que sem mistura, aplicou-se a sua umidade ótima (16%) e foram realizados os ensaios de Expansão Livre sob uma tensão de 7 kPa e Tensão de Expansão.

Para a Expansão Livre se obteve o resultado mostrado no Gráfico 10. O solo expandiu, nestas condições, 20%. Observando ainda esta figura, consegue-se inferir que o método de estabilização mecânica não é eficiente para combater a expansão deste solo, pois houve um aumento da expansão em relação ao corpo de prova moldado com o solo indeformado.

A densidade superior entre um corpo de prova em bloco indeformado e um corpo de prova moldado após a compactação revela que há um maior peso de solo no segundo caso. Isso também auxilia na compreensão de que, com uma maior superfície específica de solo em um mesmo volume, a expansão apresentaria a tendência de ser mais alta, como realmente revelou o resultado. O grau de compactação (GC) deste solo, foi de 96,34%.

GRÁFICO 10: Curva de expansão após compactação do solo em umidade ótima.

Fonte: A Autora (2018).

O efeito da compactação eleva o peso específico do solo através da remoção do ar, aplicando-se energia mecânica para isto. Quando se adiciona água em um solo, ela age como um lubrificante das partículas de solo, favorecendo então o deslizamento entre estas partículas, tomando desta forma posição compacta entre si e elevando, portanto, a densidade (DAS, 2007).

Com esta ideia, observa-se também que a compactação afeta no comportamento da percolação da água, pois diminuiu os vazios da amostra e por densificá-la, acaba elevando, desta forma e na maioria dos casos, o potencial de expansão do solo.

Para os corpos de prova ensaiados, os valores dos respectivos ensaios estão na Tabela 18.

TABELA 18: Dados de expansão e tensão de expansão na umidade ótima.

h (%)	Expansão (%)	Tensão de Expansão (kPa)
16	20	215

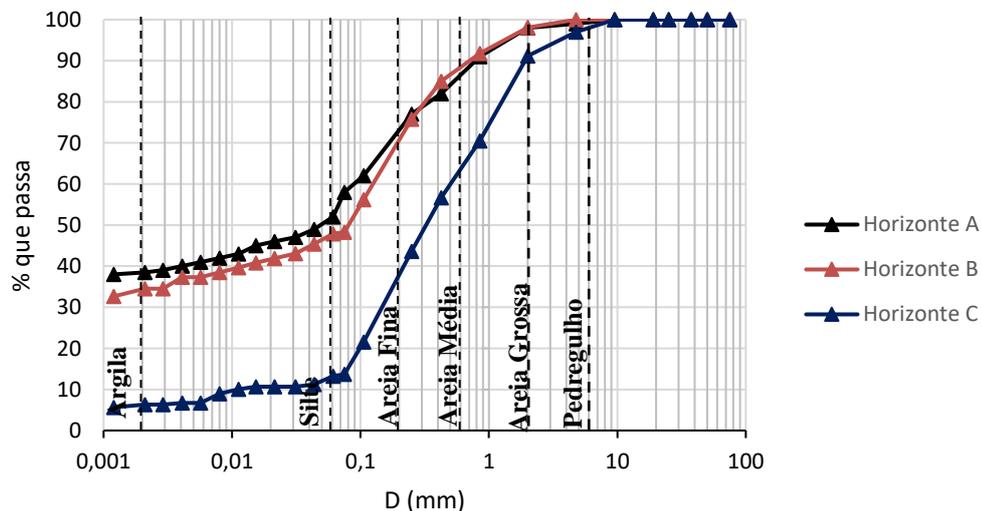
Fonte: A Autora (2018).

5.2 Granulometria dos horizontes

No Gráfico 11 encontra-se o gráfico com as respectivas granulometrias dos horizontes. Na Tabela 19 está a caracterização destes horizontes. Como se pode observar, as granulometrias dos horizontes mais próximos a superfície apresentam uma grande proximidade em suas curvas, com teores de argila entre 30 e 40% de sua caracterização granulométrica. Já o último horizonte, apresenta uma granulometria predominantemente grossa, com um teor de finos, silte e argila, inferior a 15% de sua caracterização. Todos os ensaios de caracterização granulométrica, compactação, Limites de Atteberg, Tensões de Expansão e Expansão “Livre”, acima expostos, foram realizados no Horizonte A.

Estes dados confirmam que o solo em questão é um solo residual, que segundo Pinto (2006), são solos residuais aqueles solos que tiveram origem através da decomposição da rocha no próprio local, sendo que a velocidade de decomposição dela é maior que a velocidade de remoção de agentes externos, condições estas apresentadas por regiões tropicais, que são favoráveis para que ocorra este tipo de degradação e que ocorre também no território brasileiro.

GRÁFICO 11: Granulometria dos horizontes em análise.



Fonte: A Autora (2018).

TABELA 19: Caracterização dos horizontes.

Caracterização Física (%)	Horizonte A	Horizonte B	Horizonte C
Pedregulho	1	0	3
Areia	47	52	83
Silte	11	13	8
Argila	41	35	6
Relação Silte/Argila (%)	27	37	133

Fonte: A Autora (2018).

Segundo Vargas (1981 *apud* PINTO, 2006) o solo residual pode ser maduro, onde apresenta um horizonte poroso e que perdeu toda a estrutura original da rocha-mãe e é levemente homogêneo, e o saprolítico, que pode ser confundido com uma rocha alterada, mantendo a sua estrutura de origem da rocha-mãe, porém apresenta pouca resistência quando manuseada.

Neste conceito, pode-se classificar os horizontes A e B como um solo residual maduro e o horizonte C, como um solo saprolítico, sendo neste possível observar que há alguns fragmentos de rochas junto com o solo bastante compacto. Segundo o Manual Técnico de Pedologia do IBGE (2007), o Horizonte A é o horizonte mineral, superficial, com acúmulo de matéria orgânica decomposta e extravio ou decomposição de elementos minerais como Fe, Al e argila. O Horizonte B é o horizonte subsuperficial de aglomeração de argila, Fe, Al, Si, húmus, CaCO₃, CaSO₄, ou de extravio de CaCO₃, ou de aglomeração de sesquióxidos; ou com bom avanço estrutural. O Horizonte C é o horizonte com material não consolidado embaixo do *solum*, levemente afetado por processos pedogenéticos, a contar do qual o *solum* pode ter se formado ou não, sem expressão ou com pouca expressão de propriedades que levem a identificação de outro horizonte. É seguindo estas definições que se classificou os horizontes em estudo.

Como pode-se observar na Tabela 20 os dois primeiros horizontes apresentam valores dos Limites de Atteberg, enquanto o último, não apresenta valores. Isto mostra que existe um teor de finos considerável nos dois primeiros horizontes e o último, tem uma granulometria predominantemente grossa, resultados já esperados pelo comportamento das curvas granulométricas destes horizontes.

Usando métodos indiretos, como os valores de Limites de Liquidez, Limites de Plasticidade e Índice de Plasticidade, pode-se tomar como um indicativo do potencial expansivo de um solo, pois estes não avaliam a expansão de forma numérica mas associam estes valores a um potencial de expansão. Fazendo uma analogia disto com os valores destes limites ao longo da profundidade estudada, pode-se inferir que os horizontes que apresentam um potencial de expansão, são os dois primeiros, necessitando de uma atenção especial a eles quanto ao tratamento à expansão.

TABELA 20: Dados dos Limites de Atteberg dos horizontes estudados.

Horizonte	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
A	50	20	30
B	45,29	21,43	23,86
C	NL*	NP**	NP**

*NL: não líquido

**NP: não plástico

Fonte: A Autora (2018).

Analisando o terceiro horizonte, sabe-se que por apresentar uma granulometria grossa, e conseqüentemente não apresentar limites de Atteberg, seu potencial a expansão é muito baixo, o que não exclui a possibilidade de ser constituído do mesmo argilomineral expansivo dos demais horizontes, mas não apresentar potencial expansivo significativo.

5.2.1 Espectrometria de raio x dos horizontes

Na Tabela 21 estão os valores do ensaio de espectrometria de raio X para os três horizontes de solo da área de estudo, ao longo da profundidade. Este ensaio serve para avaliar os constituintes químicos do solo e seus teores. Os mais observados são a Sílica (SiO₂) e o Óxido de Magnésio (MgO). Percebe-se altos teores de Sílica e Óxido de Magnésio no solo natural, nos três horizontes. No horizonte A, a Sílica constitui 71,90% do solo e o Óxido de Magnésio, 1,33%. No horizonte B, a Sílica constitui 56,41% do solo e o Óxido de Magnésio, 2,69%. No horizonte C, a Sílica constitui 61,65% do solo e o Óxido de Magnésio, 1,99%.

O que se pode concluir destas informações é que, devido as composições químicas próximas ao longo da profundidade, o solo foi formado através da decomposição da rocha mãe presente no local, através de intemperismo físico, confirmando ainda, segundo a

composição química do solo, o que foi afirmado no item anterior. Devido ao intemperismo, pode-se explicar as variações de alguns constituintes ao longo da profundidade.

Ainda é possível obter um maior indício destas afirmações, avaliando o argilomineral nos três horizontes. Isto será apresentado e discutido em um item posterior.

TABELA 21: Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raio X para as camadas de solo.

Constituinte Químico	Horizonte A	Horizonte B	Horizonte C
Na ₂ O	1,68	2,17	3,97
MgO	1,33	2,69	1,99
Al ₂ O ₃	14,03	20,80	15,99
SiO ₂	71,90	56,41	61,65
P ₂ O ₅	0,05	0,04	0,15
SO ₃	0,04	0,03	0,02
K ₂ O	1,96	1,92	2,43
TiO ₂	0,82	1,19	0,89
V ₂ O ₅	ND	ND	0,02
Cr ₂ O ₃	0,04	0,02	0,03
MnO	0,03	0,06	0,11
Fe ₂ O _{3t}	3,02	7,62	5,84
Co ₂ O ₃	ND	TR	TR
NiO	ND	0,01	0,01
ZnO	0,01	0,01	0,01
Ga ₂ O ₃	ND	TR	TR
Rb ₂ O	0,01	0,01	0,01
SrO	0,04	0,04	0,05
Y ₂ O ₃	TR	TR	0,01
ZrO ₂	0,09	0,02	0,03

*ND – Não detectado *TR – traços

Fonte: A Autora (2018).

TABELA 21: Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raio X para as camadas de solo. (Continuação).

Constituinte Químico	Horizonte A	Horizonte B	Horizonte C
BaO	0,08	0,07	0,08
P.F	2,77	5,18	3,67
Total	100,00	100,00	100,00

*ND – Não detectado *TR – traços

Fonte: A Autora (2018).

5.2.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS HORIZONTES

Na Tabela 22 estão os resultados de alguns ensaios químicos realizados nos três horizontes do solo.

TABELA 22: Dados dos ensaios químicos realizados nos três horizontes do solo.

Determinação	Horizonte A	Horizonte B	Horizonte C – Rocha	Horizonte C – Solo
pH em água	6,92	6,61	6,52	8,14
pH em KCl	4,08	4,37	8,01	6,02
pH em CaCl ₂	4,61	5,46	7,46	6,63
Carbono Orgânico (g/Kg)	43,60	40,00	40,00	41,00
Matéria Orgânica (g/Kg)	0,00	0,11	0,11	0,01
Alumínio Trocável (Al ⁺⁺⁺) (cmol _c /Kg)	0,20	0,20	0,00	0,00
Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺ Trocável (cmol _c /Kg)	3,13	15,00	13,25	4,38
Ca ⁺⁺ Trocável (cmol _c /Kg)	1,25	2,50	12,13	1,00
Mg ⁺⁺ Trocável (cmol _c /Kg)	1,88	12,50	1,13	3,38
Na ⁺ Trocável (cmol _c /Kg)	0,534	4,722	4,26	5,50
K ⁺ Trocável (cmol _c /Kg)	0,461	0,515	2,291	1,968
H ⁺ + Al ⁺⁺⁺ Extraível (cmol _c /Kg)	20,80	18,80	12,20	14,50
Valor de S (Soma de Cátions) (cmol _c /Kg)	4,125	20,237	19,811	11,848
Hidrogênio Extraível (H ⁺) (cmol _c /Kg)	20,60	18,60	12,20	14,50

Fonte: A Autora (2018)

TABELA 22: Dados dos ensaios químicos realizados nos três horizontes do solo
(Continuação).

Determinação	Horizonte A	Horizonte B	Horizonte C – Rocha	Horizonte C – Solo
Capacidade de Troca Catiônica (cmolc/Kg)	24,925	39,037	32,011	26,348
% de Fe ₂ O ₃ no Extrato Sulfúrico (g/Kg)	1,30	2,10	3,00	4,50
% SiO ₂ na Terra Fina (g/Kg)	89,24	81,80	89,60	86,88
% Al ₂ O ₃ no Extrato Sulfúrico (g/Kg)	3,00	4,30	2,50	8,10
Água no Extrato de Saturação (%)	19,00	62,00	31,00	30,00
Condutibilidade Elétrica no Extrato de Saturação (mS/cm/25°)	33,73	251,70	830,00	103,20
Saturação da Base (%)	56,48	82,24	92,45	90,71
Saturação de Sódio (%)	12,30	49,08	28,99	38,74
Saturação de Alumínio (%)	0,74	0,23	0,00	0,00

Fonte: A Autora (2018).

Os cátions que favorecem a acidez, neutralidade e basicidade de uma amostra. Estes foram calculados e apresentados na Tabela 22, como os Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e os íons H⁺ + Al³⁺, para conhecer a acidez extraível, ou seja, a quantidade de cátions presentes nas amostras que podem ser observadas dispersas em solução.

Os pHs em água, realizado nos horizontes A, B e na amostra de rocha encontrada no horizonte C, tiveram valores que mostram uma proximidade da neutralidade, segundo Feltre (2004). O solo do próprio horizonte C se mostra básico, segundo Feltre (2004). Já nas demais soluções, apenas a amostra de rocha do horizonte C se mostrou básica, sendo as demais, ácidas, ainda considerando as faixas de valores segundo Feltre (2004).

A Matéria Orgânica presente no solo mostrou-se com baixos percentuais em todas as amostras, sendo o maior valor encontrado de 0,11 g/Kg (0,011%). Segundo a EMBRAPA (1997), este solo é pobre em matéria orgânica, pois classifica que solos são ricos em matéria orgânica quando seu teor é superior a 5%.

A soma do valor S e da acidez extraível resulta no valor de capacidade de troca catiônica da amostra (CTC). Segundo a EMBRAPA (2001), valores de capacidade de troca catiônica superiores a 27 cmol_c/Kg, como é o caso das amostras do horizonte B e horizonte C - Rocha em estudo, são classificadas com alta capacidade de troca catiônica.

Os teores de Óxido de Ferros nas amostras variaram entre 1,30 g/Kg e 4,50 g/Kg, que segundo a Ageitec (2018a), estando com valores inferiores a 80 g/Kg, caracterizando as amostras de solo como hipoférricas.

Quanto a condutividade elétrica, as amostras dos horizontes A, B, C (Rocha) e C (Solo) apresentaram 33,73 μ S, 251,70 μ S, 830 μ S e 103,20 μ S, respectivamente. A EMBRAPA (1999 *apud* PAIVA, 2016) expõe que, para valores maiores que 7 μ S, pode-se inferir que há uma alta condutividade elétrica, com indicação de alta salinidade nas amostras.

Os valores de saturação na base são, em todas as amostras, superiores a 50%, o que as caracteriza como eutróficas, sendo, portanto, consideradas férteis, segundo a Ageitec (2018b).

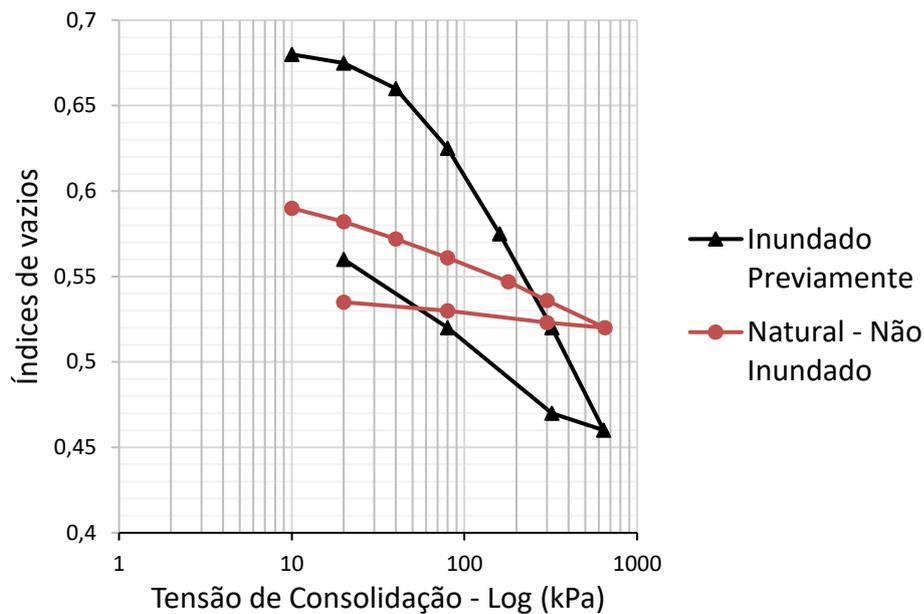
Os valores de saturação com sódio no horizonte A apresenta valores entre 6% e 15% (12,30%), caracterizando-o com o caráter solódico, segundo Ageitec (2018c). Já os demais horizontes, apresentam valores maiores que 15%, que caracterizam o caráter sódico do solo, segundo Ageitec (2018d).

Já a saturação por alumínio, observa-se que os valores foram menores que 1% nas amostras. Quando a saturação por Al³⁺ é menor que 5%, segundo Osaki (1991), é considerada um valor de saturação muito baixo.

5.3 Edométrio duplo

No Gráfico 12 estão as curvas de edométrio duplo do solo inundado previamente e sem inundação. Pode-se observar um comportamento mais expansivo do solo quando inundado.

GRÁFICO 12: Edométrio duplo do solo inundado previamente ao ensaio e natural – sem inundação prévia.



Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de LSI (2017).

Apesar de ser um solo expansivo, mesmo quando inundado, a aplicação dos estágios de cargas resultou na diminuição dos vazios na amostra. O índice de vazios com o solo inundado previamente se mostrou com um valor mais elevado em relação à amostra não inundada exatamente pelo fato de haver a expansão do solo quando em contato com a água e afastando os grãos uns dos outros. Por este motivo, na primeira aplicação de carga, 10 kPa, a amostra apresentava um índice de vazios de 0,68. Já no solo não inundado, este índice era um pouco inferior a 0,60.

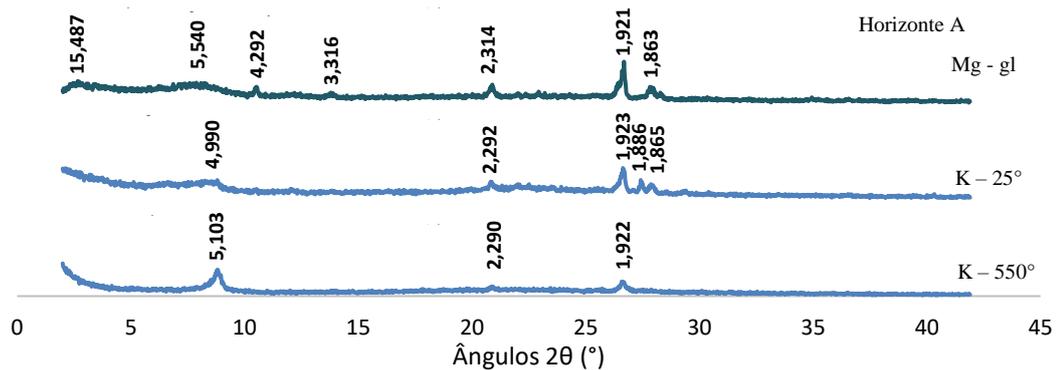
Quanto aos coeficientes de compressão e re-compressão, pode-se também observar uma maior inclinação das retas referentes a estes coeficientes na curva com a amostra pré-inundada. Isto ocorre exatamente pelo fato da amostra inundada obter um alto valor de índice de vazios em relação à amostra não inundada, favorecendo uma maior compressibilidade e também re-compressão.

Para a amostra inundada previamente, teve-se um coeficiente de compressão (C_C) de 0,1777 e um coeficiente de re-compressão (C_r) de 0,08306. Para a amostra não inundada, teve-se um coeficiente de compressão (C_C) de 0,04114 e um coeficiente de re-compressão (C_r) de 0,01219. Segundo o LSI (2017), o índice de expansão (C_S) apresentado por estas amostras foram de 0,050 na amostra não inundada e de 0,077 na amostra previamente inundada.

5.4 Caracterização mineralógica - drx

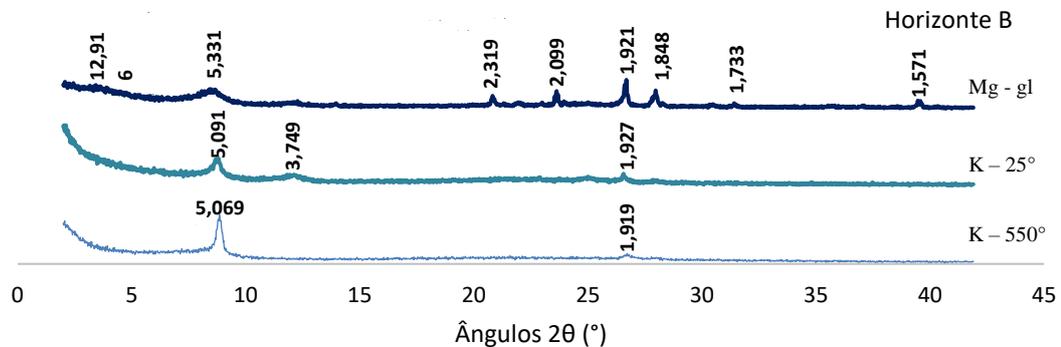
Nos Gráficos 13(a), 13 (b) e 13 (c), estão os gráficos resultantes do ensaio de DRX para os horizontes A, B e C em estudo, respectivamente.

GRÁFICO 13(a): Gráfico DRX do Horizonte A.

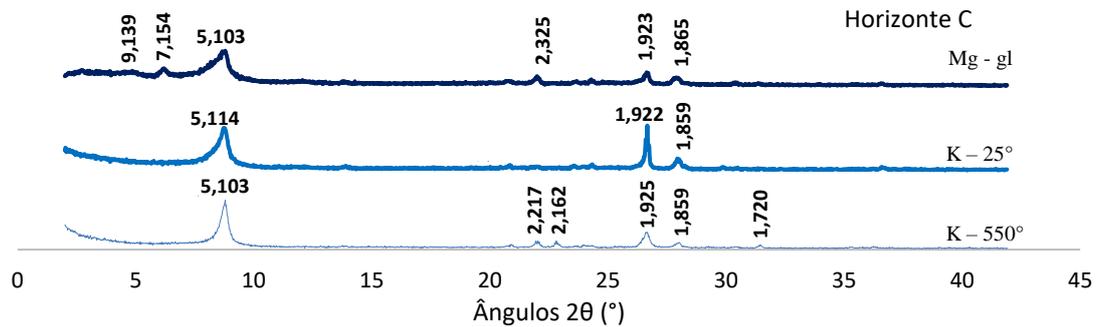


Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 13(b): Gráfico DRX do Horizonte B.



Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 13(c): Gráfico DRX do Horizonte C.

Fonte: A Autora (2018).

Como é possível observar nestes gráficos, de acordo com os picos gerados e seus respectivos valores, os argilominerais presentes em cada horizonte são:

Horizonte A: Caulinita e Montmorilonita;

Horizonte B: Caulinita e Mica;

Horizonte C: Caulinita e Vermiculita.

Como já foi discutido, havia fortes indícios de uma possível caracterização do argilomineral como sendo Caulinita, de acordo com o Índice de Plasticidade do solo, e de acordo com a Espectrometria de Raio X dos horizontes, que era um solo decomposto, através do intemperismo, da rocha no mesmo local. Com a identificação do argilomineral em cada horizonte, é possível confirmar estes indícios, pois em todos os horizontes apresentou, em comum, a Caulinita.

A presença da Montmorilonita, Vermiculita e Mica nos horizontes é o que caracteriza mais fortemente a condição de expansão deste solo, pois a Caulinita, como já discutido, tem uma expansão relativamente baixa em relação às demais.

5.5 Espectrometria da cinza da casca de arroz

Este ensaio, com os dados na Tabela 23, traz a composição da cinza de casca de arroz estudada, na sua forma pura. Como já foi citado antes, sabe-se que quanto maior o teor de Dióxido de Silício ou Sílica (SiO_2) e de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) maior será o potencial para a reação pozolânica. Como pode ser observado, o teor de SiO_2 foi bastante elevado, sendo igual a 95,37% da composição da cinza de casca de arroz, o de MgO com um valor baixo, 0,37%, o de CaO com um valor de 0,75% e o de Al_2O_3 com um valor igual a 0,80%.

TABELA 23: Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raio X para a CCA.

Componente	Teor (%)	Componente	Teor (%)
Na ₂ O	0,08	Fe ₂ O _{3t}	0,36
MgO	0,37	NiO	ND
Al ₂ O ₃	0,80	CuO	TR
SiO ₂	95,37	ZnO	0,01
P ₂ O ₅	0,48	Rb ₂ O	TR
SO ₃	0,23	SrO	0,01
K ₂ O	1,39	Y ₂ O ₃	ND
CaO	0,75	ZrO ₂	ND
TiO ₂	0,04	BaO	ND
V ₂ O ₅	ND	P.F	-
Cr ₂ O ₃	0,01	Total	100,00
MnO	0,09	-	-

*ND – Não detectado

* TR - traços

Fonte: A Autora (2018).

Nos estudos de Patel e Mahiyar (2014), a caracterização da cinza pura utilizada por eles apresentou o valor de Sílica igual a 90,23%, Óxido de Magnésio igual a 0,53%, Óxido de Cálcio igual a 1,58% e Al₂O₃ igual a 2,54% da sua composição. Desta forma, em comparação a cinza de estudo, há um percentual similar, comprovando que a cinza analisada tem bons indicativos de excelência para ser aplicada na estabilização.

Shrivastava, Singhai e Yadav (2014) também caracterizaram a cinza de casca de arroz por eles utilizada para avaliar o percentual de sílica constituinte. Eles encontram um teor de 85,14% de sílica.

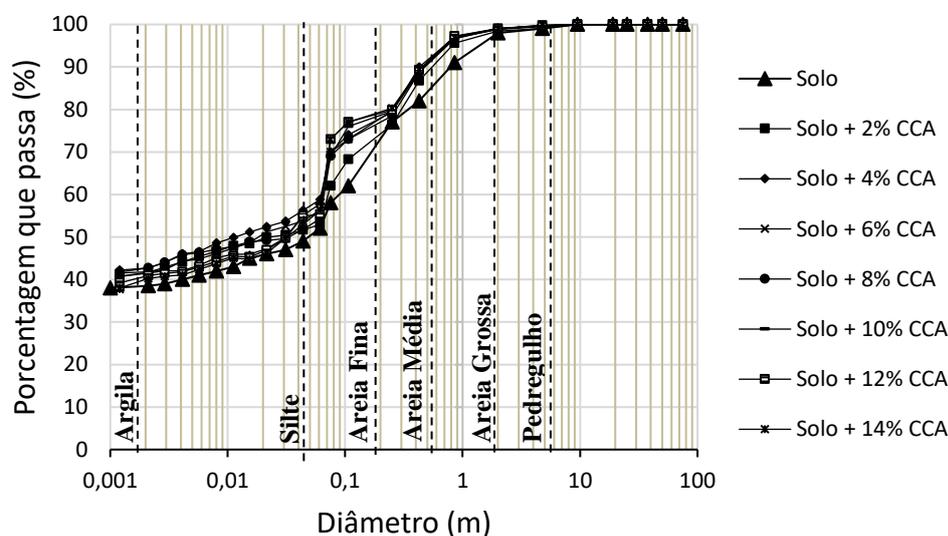
No estudo de Alhassan (2008), a caracterização da cinza pura apresentou o valor de Sílica igual a 67,3%, Óxido de Magnésio igual a 1,81%, Óxido de Cálcio igual a 1,36% e Al₂O₃ igual a 4,90%. Pode-se observar que há um bom percentual de Sílica, fundamental para o processo de reação pozolânica.

5.6 Misturas de solo com cinza de casca de arroz

5.6.1 Granulometria

No Gráfico 14 estão as curvas granulométricas, tanto do solo natural quanto das misturas nas diferentes porcentagens com a cinza de casca de arroz (CCA) realizadas com o horizonte A. Como é possível observar, as curvas se mantiveram muito próximas umas das outras. Isto ocorre pelo fato da cinza de casca de arroz ter uma densidade leve e a substituição de solo pelo teor de cinza não influenciou muito durante as pesagens nos ensaios granulométricos. Por este motivo, a fração fina das misturas apresentaram comportamentos similares entre si. Em um peso padrão qualquer, aplicado a todas as misturas, é possível observar um aumento do volume, devido à baixa densidade da cinza em relação ao mesmo peso apenas com o solo natural.

GRÁFICO 14: Curvas granulométricas do solo natural e suas misturas com cinza de casca de arroz.



Fonte: A Autora (2018).

Na Tabela 24 estão as caracterizações físicas do solo e das misturas com cinza de casca de arroz. Nela é possível observar os percentuais da caracterização granulométrica das amostras com cinza de casca de arroz e solo natural. É possível observar que houve uma redução da relação silte e argila, pois ocorreu o aumento do teor de argila nas misturas em relação ao solo natural.

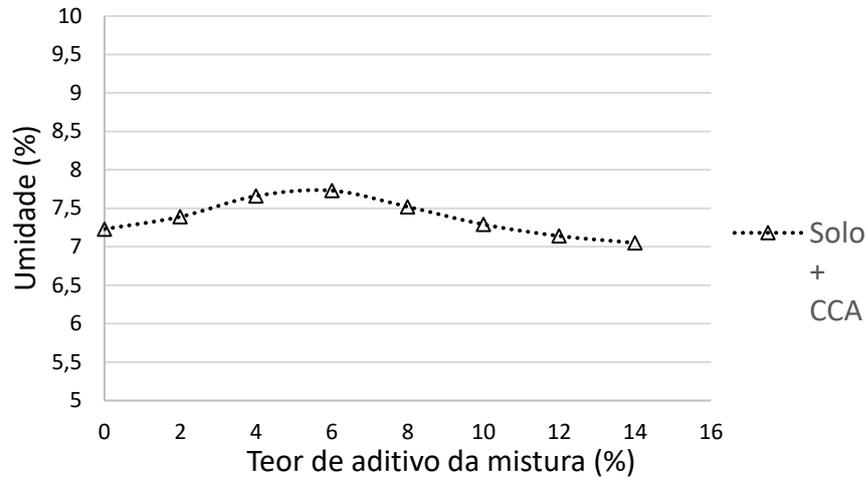
TABELA 24: Caracterização do solo e das misturas solo-cinza.

Caracterização Física (%)	Solo	Solo + 2%CCA	Solo + 4%CCA	Solo + 6%CCA	Solo + 8%CCA	Solo + 10%CCA	Solo + 12%CCA	Solo + 14%CCA
Pedregulho	1	1	0	1	0	0	0	0
Areia	47	46	42	43	45	44	45	40
Silte	11	11	15	14	13	15	14	15
Argila	41	42	43	42	42	41	41	40
Relação Silte/Argila (%)	27	26	35	33	31	37	24	38

Fonte: A Autora (2018).

5.6.2 Umidade das misturas

Já na análise dos teores de umidade higroscópica, encontrados no Gráfico 15, observou-se uma pequena variação na umidade nas misturas com cinza, flutuando dos valores entre os valores de 7 a 7,8%. O solo e a CCA estavam secos ao ar no momento dos ensaios. Neste momento, a CCA se apresentava com um aspecto mais seco, quando comparado ao solo. Com a substituição de uma fração de solo pela CCA, a umidade final acabou sendo inferior a uma amostra pura, sem CCA. As umidades não foram realizadas em um mesmo dia, podendo ter influenciado em alguns acréscimos nas misturas.

GRÁFICO 15: Teores de umidade das misturas nas porcentagens em estudo.

Fonte: A Autora (2018).

5.6.3 Densidade real dos grãos

No Gráfico 16 estão os resultados relativos aos ensaios de densidade real dos grãos das misturas com cinza e na Tabela 25 o Peso específico real dos grãos das misturas com CCA. As misturas com cinza apresentaram uma variação média de aproximadamente 0,07% entre os resultados, ou seja, valores próximos a zero. A mistura com 14% de cinza obteve uma redução em sua densidade na ordem de 17,68% do valor de densidade, em relação ao solo natural.

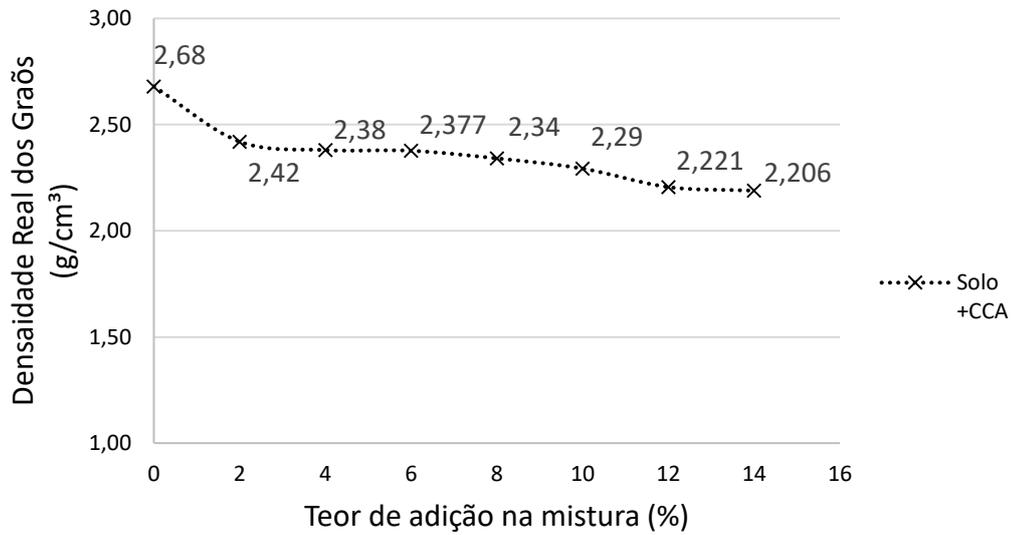
Como houve a substituição de uma porcentagem do solo, mais denso, por uma fração de cinza, menos densa, o volume da mistura em relação ao volume do solo sem mistura se torna maior ao longo dos teores, levando em consideração o mesmo peso entre eles. Por este motivo já era esperado que houvesse uma redução gradativa dos valores de densidade. Isso afeta, durante uma substituição de um solo expansivo por uma mistura com um teor que o estabilize, no volume a ser recolocado no local, que será menor que o retirado, gerando sobras de solo.

TABELA 25: Peso específico real dos grãos das misturas com CCA.

γ_s	Solo + 0% CCA	Solo + 2% CCA	Solo + 4% CCA	Solo + 6% CCA	Solo + 8% CCA	Solo + 10% CCA	Solo +12% CCA	Solo + 14% CCA
(KN/m ³)	26,80	24,20	23,80	23,77	23,41	22,93	22,21	22,06

Fonte: A Autora (2018).

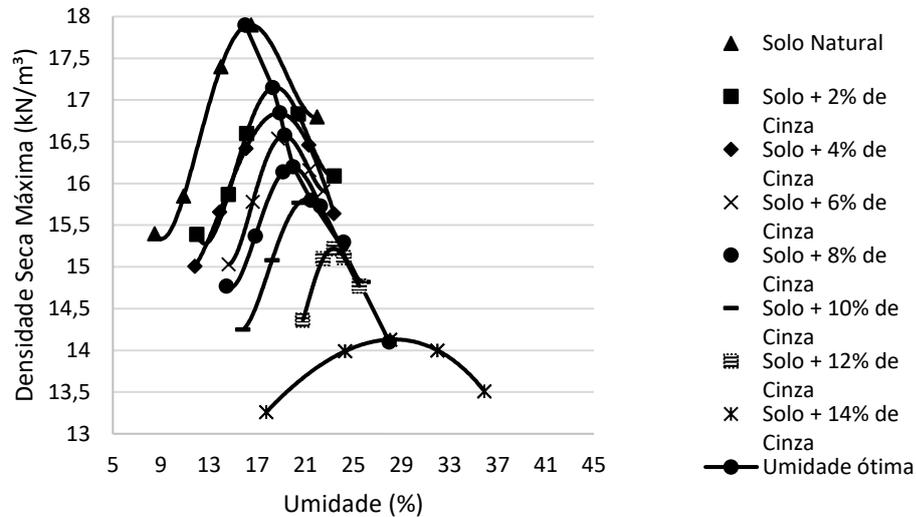
Nota: Adaptado de Silva *et al.* (2018).

GRÁFICO 16: Densidade real dos grãos.

Fonte: A Autora (2018).

5.6.4 Compactação

O Gráfico 17 traz as curvas de compactação do solo natural e das misturas com cinza, assim como uma linha de tendência da umidade ótima das misturas. O comportamento apresentado com o aumento do teor de cinza nas misturas foi a diminuição da densidade seca máxima e um aumento da umidade ótima. O aumento desta umidade é ocasionado pela maior absorção de água pelas cinzas adicionadas. Observa-se um aumento de 8 pontos percentuais na umidade ótima da mistura com 14% de cinza em relação a umidade ótima do solo natural.

GRÁFICO 17: Curvas de Compactação do solo natural e misturas com cinza.

Fonte: A Autora (2018).

Os picos de umidade ótima e densidade seca máxima apresentam uma tendência decrescente, constituindo uma envoltória, que descreve o comportamento ao longo das misturas, sendo uma linha de tendência que permite inferir o comportamento de misturas com maiores teores de CCA.

Na Tabela 26 estão os valores de densidade seca máxima e umidade ótima extraídos das curvas de compactação do solo e das misturas com CCA. O Gráfico 18 traz um esquema mais simplificado para identificação rápida do comportamento dos dados interpretados das curvas de compactação do Gráfico 17. Fica ainda mais nítido o comportamento crescente da umidade e decrescente da densidade seca máxima. Também é possível verificar uma envoltória com os valores de umidade ótima e densidade seca máxima ao longo dos teores de CCA.

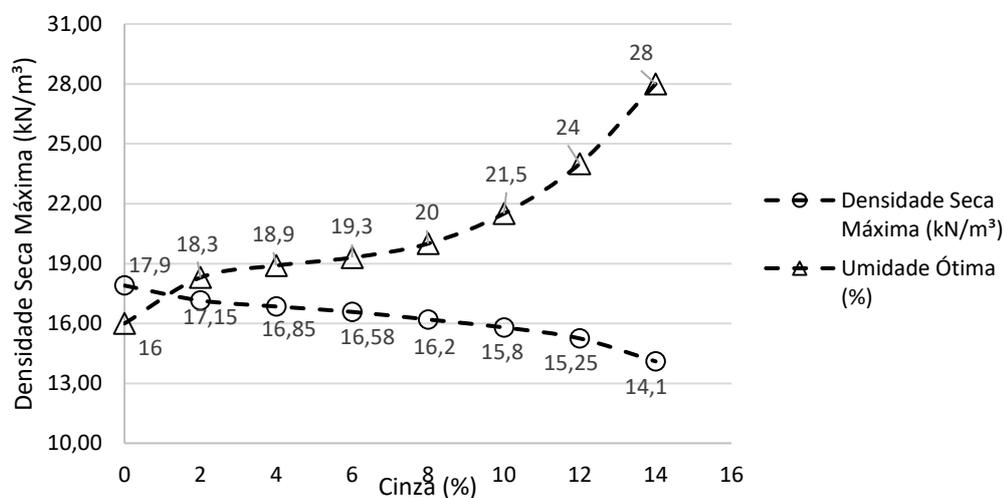
TABELA 26: Densidade seca máxima e umidade ótima do solo e das misturas com CCA.

γ_d e $h_{ótima}$	Solo + 0% CCA	Solo + 2% CCA	Solo + 4% CCA	Solo + 6% CCA	Solo + 8% CCA	Solo + 10% CCA	Solo + 12% CCA	Solo + 14% CCA
(KN/m ³)	17,90	17,15	16,85	16,58	16,20	15,80	15,25	14,10
(%)	16,00	18,30	18,90	19,30	20,00	21,50	24,00	28,00

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de Silva *et al.* (2018).

GRÁFICO 18: Gráfico da massa específica aparente seca do solo com as diversas porcentagens de CCA e suas respectivas umidades ótimas.

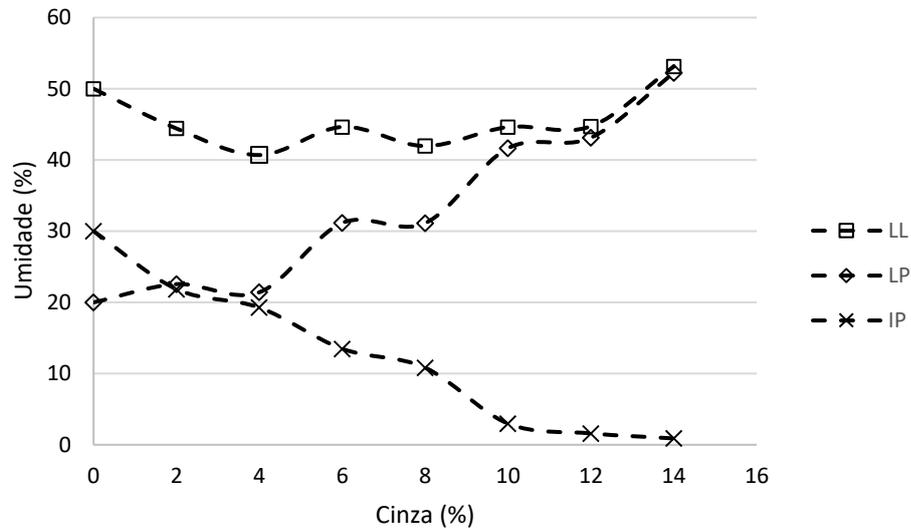


Fonte: A Autora (2018).

Adhikary e Jana (2016 *apud* Lacerda *et al.* (2018)) comenta sobre o CCA ser um resíduo agrícola com características pozolânicas porque contém sílica e que este também possui uma elevada superfície específica. Isto é que explica a maior absorção de água quando aumentado os incrementos de CCA nas misturas, elevando sua umidade ótima. No estudo destes autores e no de Patel e Mahiyar (2014) também mostram o mesmo comportamento na compactação das misturas em relação ao solo natural. Com o aumento do teor de cinza houve um decréscimo da densidade seca máxima e um aumento na umidade ótima.

5.6.5 Limites de atterberg

No Gráfico 19 estão os resultados dos Limites de Atterberg com CCA, mostrados numericamente na Tabela 27. No gráfico o comportamento ao longo da adição mostrou um aumentando os índices de Limite de Plasticidade e uma certa constância nos Limite de Liquidez, decaindo os Índices de Plasticidade.

GRÁFICO 19: Limites de Atteberg para as diversas misturas com CCA.

Fonte: A Autora (2018).

TABELA 27: Limites de Atteberg das misturas solo com CCA.

% de CCA	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0	50	20	30
2	44,42	22,56	21,86
4	40,69	21,42	19,27
6	44,64	31,16	13,48
8	41,96	31,13	10,83
10	44,63	41,65	2,98
12	44,73	43,13	1,60
14	53,12	52,23	0,89

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de Silva *et al.* (2018).

Com a mistura de solo com 14% de CCA, conseguiu-se trazer a muito próximo de zero o índice de plasticidade. Quanto ao Limite de Liquidez, os valores se mostraram aproximadamente constantes, ocorrendo uma leve redução deste valor, em relação ao solo sem CCA, para as porcentagens entre 2 a 12%, sofrendo um acréscimo de 3,12% na umidade na mistura de 14%. Já os Limites de Plasticidade sofreram uma forte influência da reação pozolânica característica destas misturas, elevando seus valores diretamente, sofrendo um decréscimo de 97,03% em comparação com o valor do solo sem mistura.

Com o aumento da CCA na mistura, eleva-se a necessidade da absorção de água por esta, podendo ser constatado, nestas misturas com solo, com o aumento dos valores de Limite de Plasticidade, onde houve a necessidade de um maior teor de água para tornar a mistura plástica e aproximando-se, cada vez mais, dos valores do respectivo Limite de Liquidez. Como o Índice de Plasticidade é a diferença entre as umidades do LL e LP, justifica-se assim, o decréscimo deste índice, tornando, então, as misturas cada vez menos plásticas. Segundo Burmister (1949 *apud* DAS, 2007), Índices de Plasticidade entre 1 e 5, classifica-se como ligeiramente plástica, sendo o valor encontrado para o IP da mistura com 14% de CCA muito próximo a este intervalo descrito.

No estudo de Adhikary e Jana (2016), observou-se o mesmo comportamento nos Índice de Plasticidade com o aumento da umidade. No estudo deles, os Limites de Liquidez e Plasticidade se elevaram gradativamente ao longo das misturas em relação aos valores do solo sem CCA, mas o acréscimo destes índices não ocorreu na mesma proporção, resultando na queda dos valores dos Índices de Plasticidade. Adhikary e Jana (2016) associam este comportamento a propriedade cimentícia entre as partículas, e afirmam que houve um impacto direto sobre os dois Limites.

Já no estudo de Patel e Mahiyar (2014), os Índices de Plasticidade se mantiveram quase que constantes e no maior teor de CCA aplicado na mistura (20% CCA), já não houve valores para os Limites de Atteberg. No estudo deles, o Limite de Liquidez do solo natural obteve um valor maior do que os Limites de Liquidez das misturas apresentando um comportamento similar ao observado nas análises deste trabalho. Os valores de Limite de Plasticidade se mantiveram quase constantes nas misturas, assim como os Índices de Plasticidade.

Pode-se compreender que houve uma junção de dois comportamentos descritos nos estudos apresentados nesta pesquisa, com os Limites de Liquidez com comportamento similar aos de Patel e Mahiyar (2014) e o Limite de Plasticidade com comportamento similar aos de Adhikary e Jana (2016), tornando os valores obtidos aceitáveis.

5.6.6 Ensaios químicos das misturas de solo com cca

Na Tabela 28 estão os dados dos ensaios químicos das misturas de solo – CCA. Apesar de não haver nenhum indicativo de associação do método de Eades e Grim (1966) para este tipo de mistura, realizou-se o pH nestas misturas para investigar alguma correlação entre este

método e as misturas solo-CCA, para observar se poderia utilizá-lo como método de dosagem para este tipo de mistura. Ao início da pesquisa, era esperado que o solo estabilizasse com teores próximos a 10% de CCA, porém, não foi obtido este comportamento quando realizado os ensaios de expansão. Então, seguiu-se os ensaios com teores superiores a 10% de CCA e, por limite de tempo, não se realizou os ensaios químicos para os teores de 12% e 14% de CCA.

TABELA 28: Dados químicos das misturas de solo-CCA.

Determinação	Solo	Solo + 2%CCA	Solo + 4%CCA	Solo + 6%CCA	Solo + 8%CCA	Solo + 10%CCA
pH em água	7,10	7,26	7,26	7,18	7,17	7,01
pH em KCl	5,98	6,03	6,19	6,18	6,26	6,45
pH em CaCl ₂	6,91	6,92	6,91	6,92	6,86	6,82
Carbono Orgânico (g/Kg)	40,0	34,80	31,20	22,00	20,00	30,40
Matéria Orgânica (g/Kg)	0,11	0,63	0,99	1,92	2,12	1,07
Alumínio Trocável (Al ⁺⁺⁺) (cmol _c /Kg)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺ Trocável (cmol _c /Kg)	22,5 0	25,63	25,38	23,00	21,88	21,25
Ca ⁺⁺ Trocável (cmol _c /Kg)	6,88	8,75	8,13	7,50	7,75	6,50
Mg ⁺⁺ Trocável (cmol _c /Kg)	15,6 3	16,88	17,25	15,50	14,13	14,75
Na ⁺ Trocável (cmol _c /Kg)	14, 26	15,59	15,88	14,92	17,40	16,35
K ⁺ Trocável (cmol _c /Kg)	0,33	0,57	0,76	0,97	1,62	1,89
H ⁺ + Al ⁺⁺⁺ Extraível (cmol _c /Kg)	16,20	15,50	16,70	16,00	16,10	15,60
Valor de S (Soma de Cátions) (cmol _c /Kg)	37,10	41,79	42,02	38,89	40,90	39,49

Fonte: A Autora (2018).

TABELA 28: Dados químicos das misturas de solo-CCA (continuação).

Determinação	Solo	Solo + 2%CCA	Solo + 4%CCA	Solo + 6%CCA	Solo + 8%CCA	Solo + 10%CCA
Hidrogênio						
Extraível (H ⁺) (cmol _c /Kg)	16,20	15,50	16,70	16,00	16,10	15,60
Capacidade de Troca Catiônica (cmol _c /Kg)	53,30	57,29	58,72	54,89	57,00	55,09
% de Fe ₂ O ₃ no Extrato Sulfúrico (g/Kg)	1,60	2,40	2,10	1,90	1,50	2,20
% SiO ₂ na Terra Fina (g/Kg)	81,98	80,51	78,42	80,67	80,08	81,47
% Al ₂ O ₃ no Extrato Sulfúrico (g/Kg)	5,00	5,10	6,30	3,70	4,10	6,20
Água no Extrato de Saturação (%)	83,00	85,60	84,00	82,00	79,00	82,00
Condutibilidade Elétrica no Extrato de Saturação (mS/cm/25°)	1814	1877	1949	1912	1947	1758
--Saturação da Base (%)	92,22	93,40	93,22	93,37	94,50	94,63
Saturação de Sódio (%)	75,31	73,04	70,93	68,10	65,44	61,96
Saturação de Alumínio (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: A Autora (2018).

Os pHs em água e CaCl₂ das misturas apresentaram-se com valores próximos da neutralidade, segundo Feltre (2004), já na solução de KCl, mostrou valores levemente ácidos.

A Matéria Orgânica presente nas misturas mostrou-se com baixos percentuais em todas as amostras, sendo o maior valor encontrado de 2,12 g/Kg (0,212%). Segundo a EMBRAPA (1997), este solo é pobre em matéria orgânica, pois classifica que solos são ricos em matéria orgânica quando seu teor é superior a 5%.

A soma do valor S e da acidez extraível resulta no valor de capacidade de troca catiônica da amostra (CTC). Segundo a EMBRAPA (2001), as amostras em estudo são classificadas com alta capacidade de troca catiônica, por ter valores superiores ao de referência.

Os teores de Óxido de Ferro nas amostras variaram entre 1,60 g/Kg e 2,40 g/Kg, estando com valores inferiores a 80 g/Kg, caracterizando as misturas como hipoférricas, segundo a Ageitec (2018a).

Quanto a condutividade elétrica, as misturas apresentaram-se com valores entre 1758 μS e 1949 μS . Segundo a EMBRAPA (1999 *apud* PAIVA, 2016), como todos estes valores são maiores que 7 μS , pode-se inferir que há uma alta condutividade elétrica, com indicação de alta salinidade nas misturas.

Os valores de saturação na base, em todas as misturas, são superiores a 50%, o que as caracterizam como eutróficas, sendo, portanto, consideradas férteis, segundo a Ageitec (2018b).

Os valores de saturação com sódio nas misturas, apresentam-se com valores maiores que 15%, que caracterizam o caráter sódico delas, segundo Ageitec (2018d).

Já a saturação por alumínio, observa-se que os valores foram nulos (0%). Quando a saturação por Al% é menor que 5%, segundo Osaki (1991), é considerada um valor de saturação muito baixo.

5.6.7 Espectrômetro de fluorescência de raio-x para solo e misturas com cinza de casca de arroz

Na Tabela 29 estão os valores deste ensaio para as misturas de solo com cinza de casca de arroz e solo natural. Pode-se perceber que em todas as análises de Sílica, os valores variaram de 60 a 69% e o Óxido de Magnésio com valores baixos, abaixo de 1,2%.

TABELA 29: Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raio X para o solo e misturas solo-cinza.

Constituinte Químico	Teor (%)					
	Solo	Solo +2%CCA	Solo +4%CCA	Solo +6%CCA	Solo +8%CCA	Solo +10%CCA
Na ₂ O	0,80	1,04	0,91	0,82	0,79	0,67
MgO	0,91	1,19	1,05	0,94	0,89	0,85
Al ₂ O ₃	12,15	17,60	14,83	12,31	11,92	11,23
SiO ₂	68,42	60,45	65,01	67,37	67,11	67,13
P ₂ O ₅	0,35	0,13	0,22	0,33	0,34	0,39
SO ₃	0,11	0,06	0,08	0,11	0,11	0,13
K ₂ O	1,33	1,41	1,35	1,29	1,31	1,30
CaO	1,13	1,25	1,15	1,06	1,11	1,06
TiO ₂	1,09	1,20	1,05	0,98	1,07	0,98
V ₂ O ₅	ND	0,01	ND	ND	ND	ND
Cr ₂ O ₃	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
MnO	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Fe ₂ O _{3t}	6,64	7,14	6,83	6,19	6,51	6,28
Co ₂ O ₃	ND	ND	ND	ND	ND	0,01
NiO	0,01	0,01	TR	TR	TR	0,01
ZnO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ga ₂ O ₃	TR	TR	0,01	TR	TR	TR
Rb ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
SrO	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03
Y ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ZrO ₂	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
BaO	0,12	0,11	0,14	0,13	0,12	0,16
P.F	6,81	8,28	7,24	8,35	8,59	9,68
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

*ND – Não detectado

*TR – traços

Fonte: A Autora (2018).

O solo sem adição de CCA tem em sua constituição um valor mais elevado de SiO_2 em relação as misturas. Houve uma queda de quase 8% deste constituinte na primeira mistura, solo + 2% CCA, e ao longo do aumento do teor de CCA, o SiO_2 foi aumentando, mas se tornou praticamente constante a partir de 6% de CCA. Já o Al_2O_3 teve seus valores crescentes em relação ao solo natural nas três primeiras misturas e nas misturas de 8 e 10%, seus valores foram inferiores ao solo natural. O CaO mostrou o mesmo comportamento nas misturas. O FeO_3 se comportou da mesma forma que o anterior, mas seu decréscimo se deu apenas na última porcentagem analisada, sendo neste, menor que no solo natural. Já o MgO, apresentou um comportamento similar ao FeO_3 .

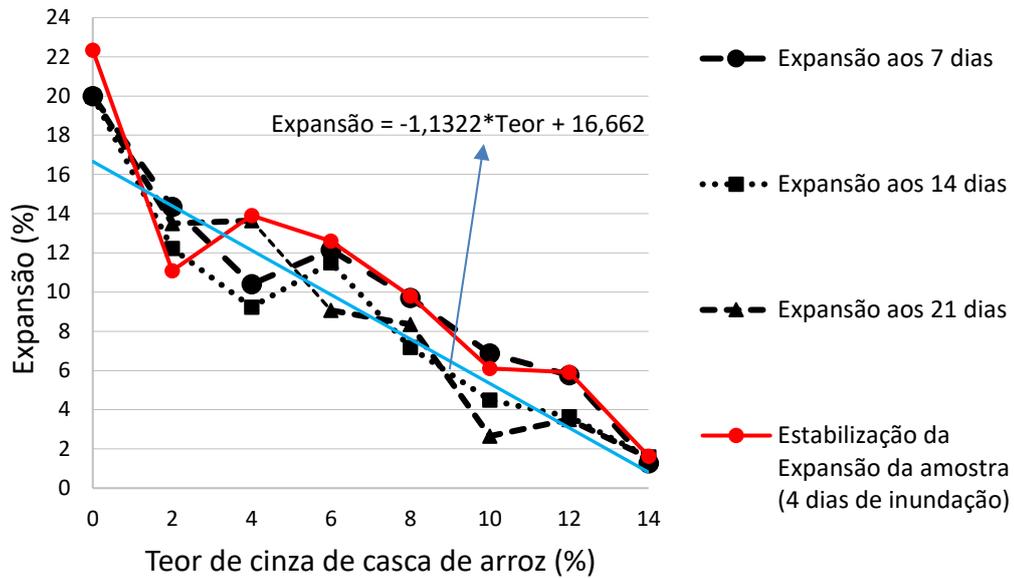
5.6.8 Expansão das misturas com cinza de casca de arroz

As expansões que serão expostas a seguir são as resultantes do solo natural compactado em laboratório e das misturas de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14% de CCA, nas idades de 7, 14 e 21 dias.

No Gráfico 20 apresenta-se o comportamento expansivo das misturas ao decorrer das idades de ensaio em seus respectivos períodos de cura. De forma geral, é perceptível o comportamento com tendência decrescente às expansões ao longo do aumento dos teores das amostras e com os diferentes períodos de cura, influenciado diretamente, pelas propriedades cimentícias geradas na reação solo-CCA, onde o teor de sílica presente na CCA, que é superior a 95%, favorece uma boa reação pozolânica devido ao seu potencial a esta reação. Quanto maior o teor de sílica presente na amostra de CCA, maior o potencial em relação a reação pozolânica, provando a eficiência do material na aplicação de estabilização.

Pode-se considerar que houve uma forte tendência à redução das expansões pois, em 4 pontos, notou-se um comportamento fora do esperado, mas que, diante da quantidade de amostras analisadas, mostra que há a redução da expansão do solo com a adição de CCA neste. Analisando ponto a ponto, pode-se discutir alguns comportamentos. O gráfico foi iniciado com a expansão do solo sem nenhum teor de CCA, mas com o valor da expansão do solo obtida após a compactação da amostra no laboratório, pois, quando adicionado 2% de CCA, a expansão da amostra foi bastante superior ao valor obtido na expansão do solo nas condições de campo, e que só passou a apresentar valores próximos ou inferiores a ele, com porcentagens a partir de 10% de CCA.

GRÁFICO 20: Expansão das misturas ao longo das idades.



Fonte: A Autora (2018)

Analisando o comportamento dentro da mesma idade de cura, o decréscimo das expansões foi alcançado em todas idades propostas para serem ensaiados os corpos de prova. Uma peculiaridade, visível na Tabela 30, foi um leve aumento da expansão nas idades de 7 e 14 dias de cura, na mistura com 6% CCA, quando se era esperado um valor menor ao obtido no ensaio de expansão com 4% de CCA. Ambas as expansões tiveram acréscimos próximos a 2% em relação ao anterior, comportamento diferente do esperado. Avaliando os índices físicos no Apêndice A deste trabalho, é possível perceber que dentro das porcentagens de 6% de CCA, os corpos de prova se mantiveram basicamente iguais quanto aos seu volume de solo. Desta forma, pode-se justificar esta elevação da expansão nos corpos de prova de 6% de CCA aos 7 e 14 dias, com uma perda de umidade durante a preparação do ensaio, que modificaram a suas condições de sucção iniciais e que permitiu uma maior absorção de umidade e uma expansão mais elevada que as demais. Esta variação de umidade não pode ser verificada, e por este motivo, os valores de controle de umidade permaneceram muito próximos entre si. Existe também, a possibilidade de criar uma linha de tendência entre os teores de 2 a 14% de CCA, que mostrariam ainda mais claramente o sentido decrescente da expansão.

Buscando a máxima expansão das amostras, pois foi observado que ainda havia uma certa tendência delas expandirem, inundou-se as amostras nas diferentes porcentagens para extrair este valor. As amostras se mostraram saturadas em 96 horas, ou quatro dias, onde

cessaram o processo expansivo. Os valores estão na Tabela 30. Um fato que merece destaque é que não foi acompanhado a idade de cura destas amostras saturadas, o que gerou, em alguns casos, uma expansão abaixo das obtidas anteriormente. Isto ocorreu devido ao processo de cimentação pozolânica ir se efetivando ao decorrer do tempo, e conseqüentemente, impactar na expansão.

TABELA 30: Valores de expansões para as misturas.

% de CCA	Expansão aos 7 dias (%)	Expansão aos 14 dias (%)	Expansão aos 21 dias (%)	Média das expansões (%)	Expansão Máxima (96h)
0* (Campo)	6,58	6,58	6,58	6,58	-
0** (Compactado)	20	20	20	20	22,34
2	14,35	12,23	13,5	13,36	11,09
4	10,4	9,23	13,65	11,09	13,91
6	12,15	11,5	9,07	10,91	12,6
8	9,7	7,18	8,35	8,41	9,80
10	6,87	4,5	2,65	4,67	6,11
12	5,77	3,65	3,5	4,31	5,91
14	1,27	1,6	1,55	1,47	1,63

* e ** Valores repetidos ao obtido no ensaio da data zero, pois foi dispensada análises nas referidas datas, por não haver aditivo na amostra.

Fonte: A Autora (2018).

Avaliando dentro da mesma idade, houve uma diminuição da expansão, relativa ao corpo de prova compactado em laboratório, nos valores de 93,65% na idade de 7 dias, 93% na idade de 14 dias e 92,25% na idade de 21 dias no solo com 14% de CCA. Com relação à expansão da amostra indeformada de campo, que se apresentou com potencial expansivo de 6,58%, houve uma redução na expansão em um valor igual a 80,69% na idade de 7 dias, 75,68% na idade de 14 dias e de 76,08% na idade de 21 dias para o solo com 14% de CCA.

Quando avaliado por mesmas porcentagens com idades distintas, ou seja, por linhas, percebe-se alguns comportamentos mais destoantes. Avaliando a Tabela 30, nota-se que não há uma diminuição gradativa entre as idades em todas as misturas. Algumas amostras decresceram os valores de expansão ao longo dos períodos de cura, enquanto outras, mais

especificamente as amostras de 2% CCA e 4% CCA na cura de 21 dias, elevaram seus valores quando observados os valores anteriormente ensaiados nos mesmos teores. Um outro ponto a ser destacado é o valor obtido no ensaio com a amostra de 14% de CCA aos 7 dias, que foi inferior aos valores subsequentes, mas que estes dois últimos mostram novamente uma tendência, mesmo que sutil, de diminuição dos valores ao longo do tempo, mas pode-se concluir que o tempo de cura influencia pouco na redução da expansão dos solos.

Foi possível observar que o fator de maior impacto na aplicação da CCA é o teor utilizado nas amostras e não o tempo de cura dessas amostras, pois este apresentou pouca influência na expansão destas amostras.

Na Tabela 31 estão os dados relativos aos constituintes de cada corpo de prova analisado, com as respectivas porcentagens de solo, CCA, água e ar da amostra. Como é possível observar, o teor de solo vai diminuindo, para ser substituído por CCA, água e ar. O teor de CCA aumenta gradativamente, como esperado, interferindo assim, no aumento da água, pois como foi observado nas curvas de compactação, a umidade ótima aumentava paralelamente ao teor de CCA e também há o aumento da porção de ar, pois ainda observando as curvas de compactação, a densidade seca máxima diminuiu e com isto, há mais vazios na amostra, sendo preenchidos por água e ar.

TABELA 31: Porcentagem constituinte das amostras de solo-CCA analisadas.

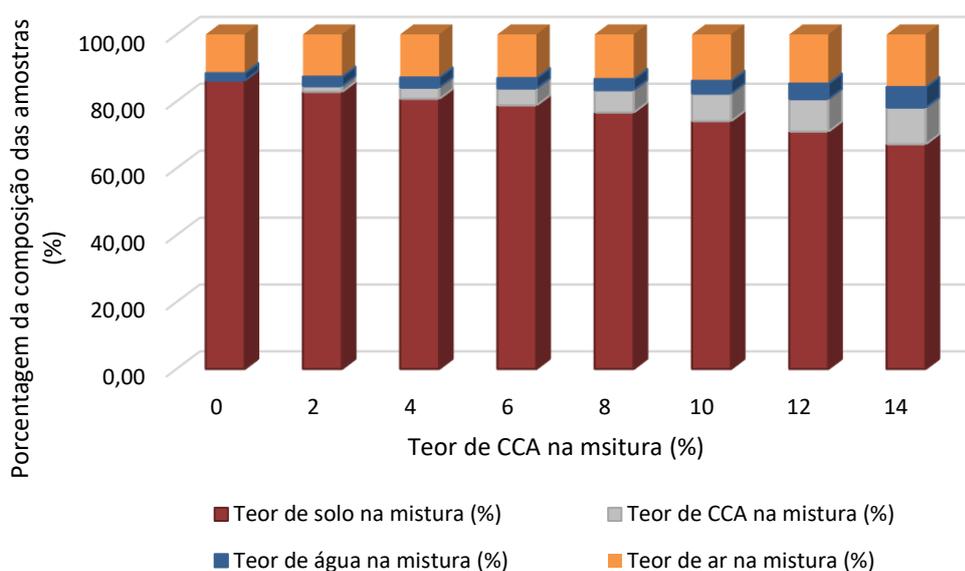
Misturas	Solo (%)	CCA (%)	Água (%)	Ar (%)
Solo (compactação ótima)	86,21	0	2,21	11,59
Solo + 2% de CCA	82,84	1,69	2,83	12,64
Solo + 4% de CCA	80,74	3,36	3,00	12,89
Solo + 6% de CCA	78,79	5,03	3,12	13,06
Solo + 8% de CCA	76,67	6,67	3,33	13,33
Solo + 10% de CCA	74,07	8,23	3,80	12,89
Solo + 12% de CCA	70,97	9,68	4,65	14,71
Solo + 14% de CCA	67,19	10,94	6,13	15,75

Fonte: Silva *et al.* (2018).

No Gráfico 21 mostra-se os valores apresentados na Tabela 31 em um gráfico de barras, facilitando a visualização dos percentuais constituintes de cada amostra estudada. Através desta figura, é mais fácil compreender a redução dos valores para o solo e o aumento dos valores para CCA, devido aos teores, de água, pois se eleva a umidade ótima em relação ao solo sem CCA e, conseqüentemente, o teor de água na amostra, e o de ar, pois além do aumento da umidade ótima ao longo das misturas, há uma queda do peso específico destas, ocasionando um maior teor de vazios ocupados por água e ar.

No Apêndice A, encontram-se os valores de umidade inicial e final após o ensaio de Expansão Livre destas amostras. Estes valores serviram para observar a perda de umidade durante o processo de cura das amostras e os valores destas umidades após o ensaio. O que se pode garantir, a partir da observação do comportamento da expansão das amostras é que estas, não alcançaram sua saturação após as 48 horas inundadas. Este Apêndice também pode ajudar a verificar as condições de expansão das amostras, pois, caso haja uma discrepância entre os valores de umidade inicial, a amostra poderá obter um valor de sua expansão muito mais elevado em relação a uma amostra com mesmo teor de CCA, mas com uma umidade maior. Isto ocorre pelo fato de mudar as condições de sucção da amostra. Um outro ponto que pode ser observado é que nas amostras de expansão livre, o teor de umidade é maior que nas amostras submetidas a expansão sob tensão, pois esta tensão impede a expansão e acaba por não favorecer a infiltração vertical da água na amostra, em grandes quantidades.

GRÁFICO 21: Percentual dos constituintes de cada amostra com CCA em análise.



Fonte: A Autora (2018).

Na Tabela 32 estão as tensões de expansão referentes a cada amostra em suas respectivas idades de cura. Dentro das mesmas porcentagens, as amostras não mostraram um comportamento uniforme nestas tensões. Na maioria das tensões obtidas se pode observar que houve um decréscimo delas na idade de 21 dias de cura em relação a idade de 7 dias. Apenas na amostra com 4% de CCA este comportamento não foi observado, havendo um acréscimo na tensão de 21 dias de cura em relação a de 7 dias de cura, mantendo os valores de Tensão de Expansão, nas demais idades, ainda superior ao de 7 dias. No geral, houve uma diminuição das tensões de expansão com o aumento do teor de CCA.

Na Tensão de Expansão aos 21 dias com 14% de CCA foi a que mostrou ter o menor valor em relação aos demais. Esta diminuição representou, em relação ao solo nas condições de campo, um decréscimo de 94,79% da tensão obtida pelos ensaios de Carregamento após Expansão e Expansão com Diferentes Tensões Aplicadas, 95,85% da tensão obtida com o ensaio de Expansão e Colapso e 91,67% da tensão obtida no ensaio de Tensão a Volume Constante. Já em relação a amostra obtida após a compactação em laboratório (215 kPa), o decréscimo foi de 96,12%. Nas médias das Tensões de Expansão, observa-se um comportamento de decréscimo com o aumento do teor de CCA.

Pelo critério de Jimenez (1980), as tensões oferecidas para a mistura de 14% de CCA não oferece nenhuma possibilidade de danos às estruturas, estando todas inferiores a 20 kPa.

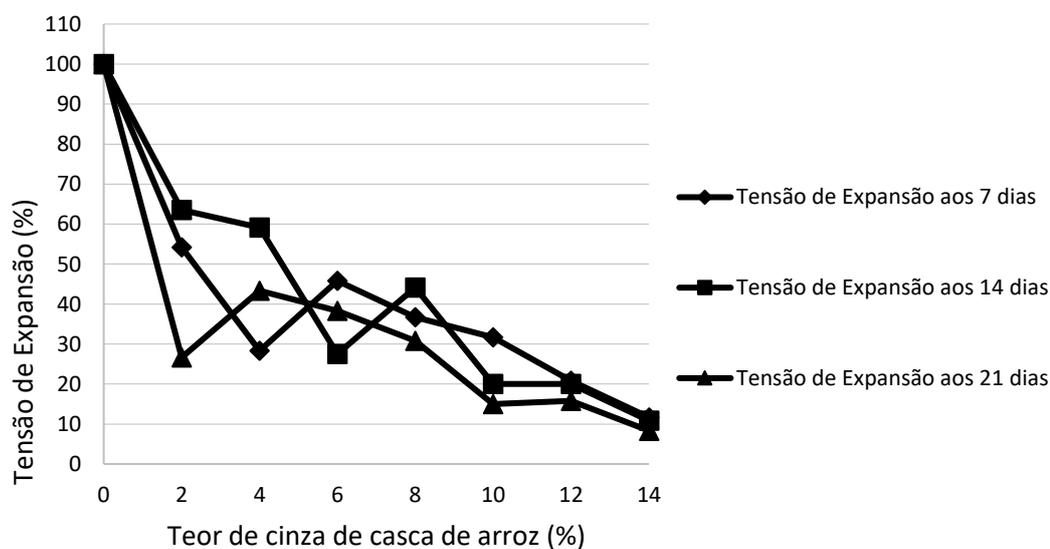
TABELA 32: Tensão de Expansão a Volume Constante nas misturas.

% de CCA	Tensão de Expansão (kPa)			Média das Tensões
	aos 7 dias	14 dias (kPa)	21 dias	
0* (Campo)	100	100	100	100
0** (Compactado)	215	215	215	215
2	54,17	63,50	26,66	48,11
4	28,33	59,17	43,33	43,61
6	45,83	27,5	38,33	37,22
8	36,67	44,17	30,83	37,22
10	31,67	20,00	15,00	22,22
12	20,83	20,00	15,83	18,88
14	11,67	10,83	8,33	10,27

* e ** Valores repetidos ao obtido na data zero, pois foi dispensada análises nas referidas datas por não haver aditivo na amostra.

Fonte: A Autora (2018).

Os valores da Tabela 32 estão apresentados no Gráfico 22 para que se possa observar o comportamento de forma mais clara.

GRÁFICO 22: Tensão de expansão.

Fonte: A Autora (2018).

Os valores de Tensão de Expansão diminuíram com a substituição das parcelas de solo por CCA, pois a reação pozolânica ocasionada entre eles oferecem resistência à expansão e é necessária cada vez uma menor tensão a ser aplicada para combater a expansão resiliente.

No Apêndice A estão as umidades iniciais e finais das amostras submetidas ao ensaio de Tensão de Expansão. Estes valores serviram para observar a perda de umidade durante o processo de cura das amostras e os valores destas umidades após o ensaio. As umidades finais deste ensaio em relação as obtidas no ensaio de Expansão livre são inferiores, como citado anteriormente. Os teores de umidade infiltrado nestas amostras são ainda mais baixos dos que os teores infiltrados nos ensaios de Expansão Livre, pois a Tensão aplicada na amostra impede-a de absorver mais umidade, condição não imposta nas amostras do ensaio de Expansão Livre.

5.6.9 Compressão simples das misturas com cinza de casca de arroz

Para o ensaio de compressão simples foi necessário calcular os dados que estão dispostos na Tabela 33.

TABELA 33: Dados de controle de umidade das misturas para as amostras submetidas aos ensaios de Tensão de Expansão.

% CCA	Yd (g/cm ³)	h _{ótima} (%)	V _{cilindro} (cm ³)	P _{seco} (g)	P _{úmido} (g)
0	1,79	16	196,34	351,49	407,68
2	1,715	18,3	196,34	336,72	398,34
4	1,685	18,9	196,34	330,83	393,36
6	1,658	19,3	196,34	325,53	388,36
8	1,62	20	196,34	318,07	381,68
10	1,58	21,5	196,34	310,21	376,91
12	1,525	24	196,34	299,41	371,27
14	1,41	28	196,34	276,84	354,35

Fonte: A Autora (2018).

Com os dados de densidade seca máxima e umidade ótima das misturas de CCA, o volume do cilindro utilizado nas moldagens, sabia-se aproximadamente o valor de massa úmida necessária a ser colocado no cilindro e realizar a compressão da amostra e deixá-la na densidade seca máxima referente a sua porcentagem de CCA. O valor da massa úmida usada no ensaio está representado na tabela por Púmido.

Como pode-se verificar, o valor a ser compactado é decrescente, pois enquanto a umidade se eleva, a densidade seca máxima diminui, resultando numa menor massa a ser colocada em um determinado volume para alcançar a densidade seca máxima da amostra.

Na Tabela 34 estão os valores das tensões de compressão simples dos dois corpos de prova avaliados para cada mistura de CCA na idade 0 (zero). Observa-se que o valor do solo sem CCA tem um valor médio de compressão simples de 308 kPa. Na porcentagem que se obteve uma baixa expansão, que foi a de 14% de CCA, o valor médio de compressão simples foi de 43,5 kPa, representando um decréscimo de 85,87% em relação ao valor do solo natural. Ao longo da substituição do solo por CCA foi notado uma diminuição na tensão de compressão simples nas porcentagens de 2% a 8% de CCA, sendo diminuições sutis. Estas diminuições já eram esperadas, pois há um aumento gradativo da umidade das amostras, e conseqüentemente, diminui a quantidade de massa por volume, influenciando nos valores de tensões de compressão, que são maiores quando há um maior contato entre os grãos.

TABELA 34: Valores das tensões de compressão para o solo natural e para as misturas de CCA.

Solo e Misturas	Tensão de Compressão Simples (kPa)		
	CP1	CP2	Média (CP1 e CP2)
Solo Natural	286	330	308
Solo + 2% CCA	131	165	148
Solo + 4% CCA	123	143	133
Solo + 6% CCA	143	105	124
Solo + 8% CCA	130	116	123
Solo + 10% CCA	132	132	132
Solo + 12% CCA	124	83	103,5
Solo + 14% CCA	41	46	43,5

Fonte: A Autora (2018).

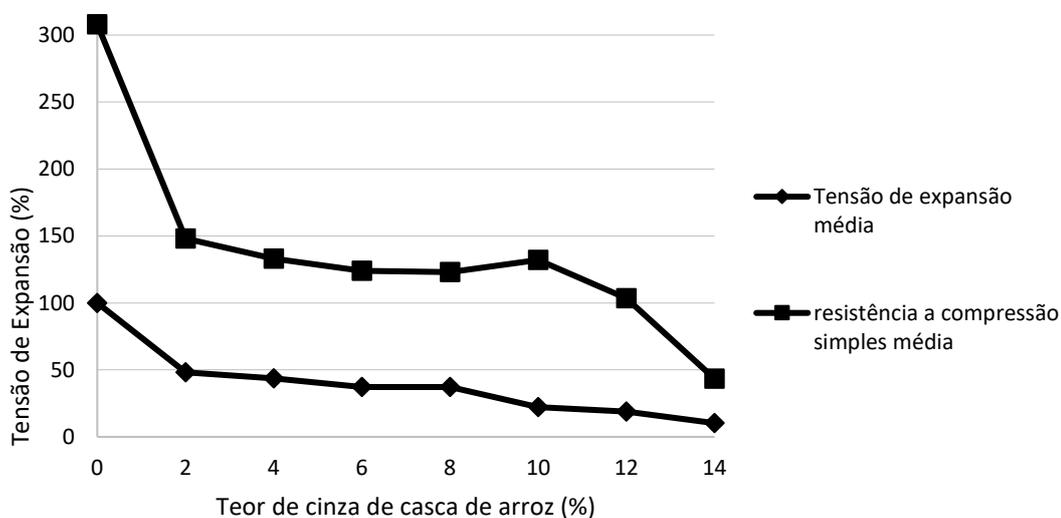
Para Millet (1979 *apud* BARBOSA, 2013) o um material com características pozolânicas é aquele que quando misturado com cal, água e em condições de temperatura ambiente, gera compostos com propriedades ligantes. Este autor também fala sobre o ganho de resistência da mistura solo-cal com o tempo. Como as misturas de CCA também tratam de reações pozolânicas, entende-se que um fenômeno similar ocorre. Ainda seguindo o raciocínio, é possível compreender que as ligações das reações pozolânicas são resistentes e acabam por absorver parte das tensões nas quais são submetidas as amostras, porém, no caso de amostras com CCA, não se mostraram neste estudo o suficiente para atingir valores suficientemente maiores que o solo sem a presença de CCA.

Nas porcentagens de 8% e 10% observa-se uma elevação dos valores desta resistência a compressão simples, que pode ser explicado por uma maior eficácia da reação pozolânica e da cimentação entre os grãos, quando comparada as demais porcentagens. Os valores apresentados pelas amostras de 10% de CCA são próximos aos das amostras com 2% de CCA, e apresentaram valores iguais nos dois corpos de prova, mostrando a eficiência da cimentação pozolânica, pois na porcentagem de 10%, há um menor contato grão a grão em relação a amostra com 2% de CCA e mesmo assim, apresenta um valor próximo de resistência a compressão.

Porém, nas porcentagens de 12% e 14% os valores decaem. Adhikary e Jana (2016) e Alhassan (2008) relatam que o aumento na tensão de compressão simples é atribuído à formação de compostos cimentícios entre o Hidróxido de Cálcio, presente no solo, e CCA e os compostos pozolânicos presentes na CCA. Os autores ainda afirmam que a diminuição dos valores de tensão de compressão pode ser devido ao excesso de CCA introduzido no solo e que geram ligações fracas entre o solo e os compostos formados. Esta ideia pode ser também observada neste estudo.

Adhikary e Jana (2016) mostrou um comportamento, na data zero de cura, com valores decrescentes de compressão em porcentagens anteriores as de 10% de CCA, subindo estes valores em 10% de CCA, mas não superando o valor do solo natural com porcentagens menores de 15% de CCA, divergindo com este estudo apenas nas porcentagens superiores a 10% de CCA. Já no estudo de Alhassan (2008), mesmo não estudando a compressão simples na data zero, pode-se observar que após o teor de 10% de CCA, sempre há uma diminuição da tensão de compressão, independente do período de cura das amostras.

No Gráfico 23 está o gráfico com os valores das tensões de expansão média e resistência a compressão simples média para as misturas de CCA estudadas.

GRÁFICO 23: Tensões de expansão média e resistência a compressão simples média.

Fonte: A Autora (2018).

5.7 Misturas de solo com cal-hidratada

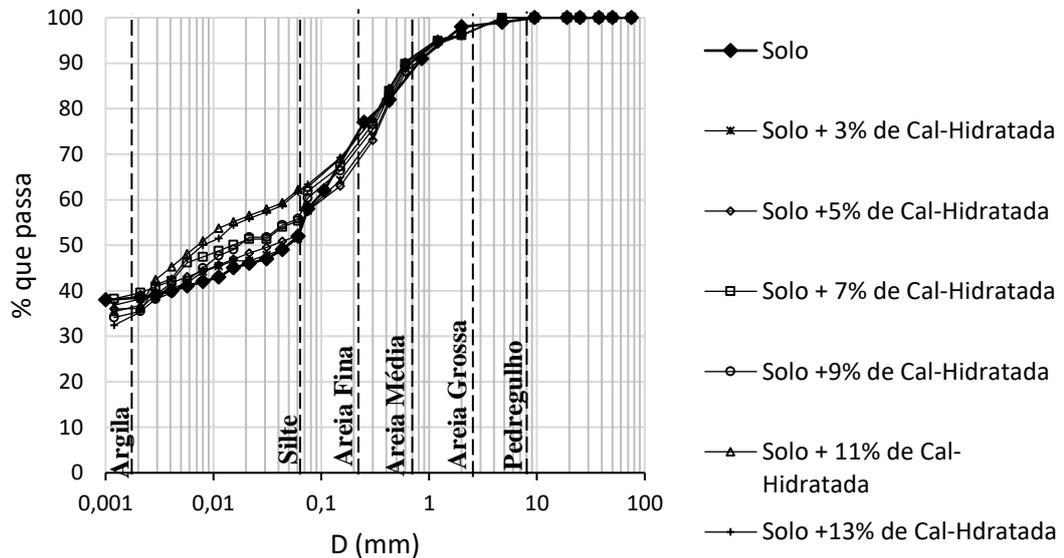
5.7.1 Granulometria das misturas de solo com cal-hidratada

No Gráfico 24 estão as curvas granulométricas, tanto do solo natural quanto das misturas nas diferentes porcentagens com a cal-hidratada. Como é possível observar, as curvas permaneceram próximas entre si. Na Tabela 35 estão os dados relativos a caracterização das curvas, tanto do solo, quanto das misturas com cal-hidratada. A maior influência da cal-hidratada na granulometria das misturas ocorre na fração fina das amostras, silte e argila. Para compreender o comportamento desta adição, calcula-se a relação de silte/argila, tanto para o solo, quanto para as misturas. Observando isso, na Tabela 35, observa-se que, em relação ao solo natural, todas as misturas elevaram a porcentagem de silte, diminuindo a fração de argila.

A avaliação da relação silte/argila é necessária para compreender se houve o processo de floculação. Nas misturas solo-cal-hidratada, um fenômeno comumente observado é a floculação, onde há o aumento das partículas argila, ficando retidas na fração de silte das amostras. Azevedo *et al.* (1998 *apud* AZEVÊDO, 2010) fala sobre este aumento da dimensão das partículas. Por este motivo, há uma diminuição da fração argilosa e um aumento da fração siltosa em algumas das misturas expostas na Tabela 35.

Na Tabela 35 estão os dados da caracterização do solo e das misturas com cal-hidratada.

GRÁFICO 24: Curvas granulométricas do solo natural e suas misturas com cal-hidratada.



Fonte: A Autora (2018).

TABELA 35: Caracterização do solo e das misturas com cal-hidratada.

Caracterização Física (%)	Solo	Solo + 3% de Cal	Solo + 5% de Cal	Solo + 7% de Cal	Solo + 9% de Cal	Solo + 11% de Cal	Solo + 13% de Cal
Pedregulho	1	0	0	0	0	0	0
Areia	47	49	48	45	44	37	38
Silte	11	13	16	15	20	26	27
Argila	41	38	36	40	36	37	35
Relação Silte/Argila (%)	27	35	44	38	55	70	77

Fonte: A Autora (2018).

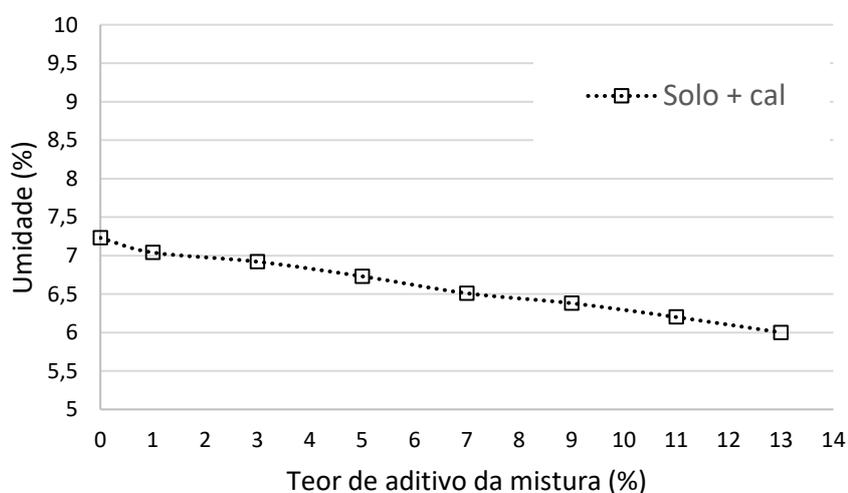
As curvas granulométricas de Barbosa (2013) e Paiva (2016) também apresentam o comportamento da floculação, porém, em todas as curvas estudadas, quando comparadas com o solo natural, estando todas as curvas das misturas próximas as curvas do solo natural.

5.7.2 Umidade

No Gráfico 25, estão os resultados das umidades das misturas de solo com cal hidratada. Com o aumento do teor de cal-hidratada no solo, houve um decréscimo deste valor, como pode ser observado, havendo uma diminuição de cerca de 1,3% na umidade na mistura com 13% de cal-hidratada em relação ao solo natural.

Esta variação é ocasionada pela substituição do solo pelo aditivo, cal-hidratada, que praticamente não apresentava umidade. O solo natural se encontrava seco ao ar. Quando em uma mesma massa há a retirada de parte deste solo e substituída por um material que tenha uma umidade menor, há a tendência deste decréscimo ao longo do aumento das porcentagens no solo, como foi comprovado com os resultados obtidos. Estes ensaios foram realizados em um mesmo dia.

GRÁFICO 25: Umidade das misturas de solo e cal-hidratada.



Fonte: A Autora (2018).

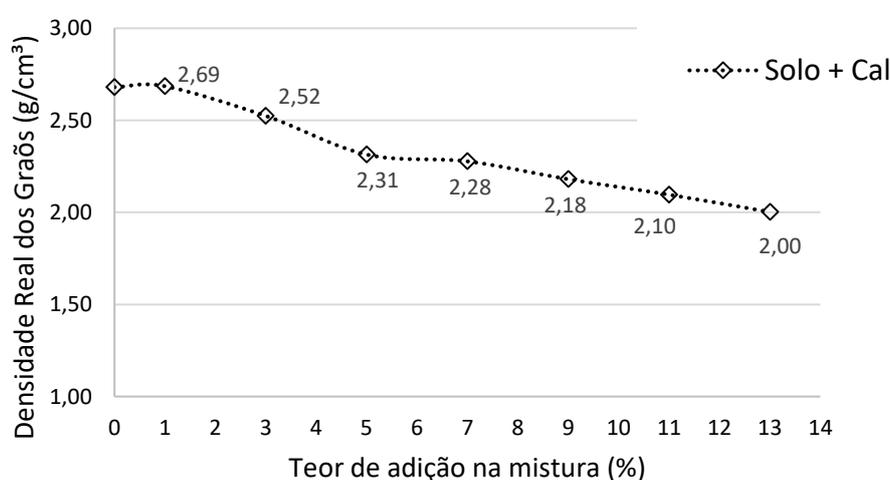
5.7.3 Densidade real específica dos grãos

No Gráfico 26 estão os resultados relativos aos ensaios de densidade real dos grãos das misturas com cal-hidratada. Estes dados apresentaram uma variação média de aproximadamente 9,71% entre os resultados. A mistura com 13% de cal-hidratada obteve uma

redução em sua densidade na ordem de 25,37% do valor de densidade, em relação ao solo natural.

Houve uma redução gradativa dos valores de densidade, mostrando-se mais acentuada ao longo dos acréscimos das porcentagens em relação a CCA, pois a densidade da cal-hidratada aparentava ser maior que a densidade da cinza e conseqüentemente, a substituição do solo pela cal-hidratada precisaria de um volume menor de cal-hidratada do que necessitaria em relação a cinza.

GRÁFICO 26: Densidade real dos grãos do solo e das misturas com cal-hidratada.



Fonte: A Autora (2018).

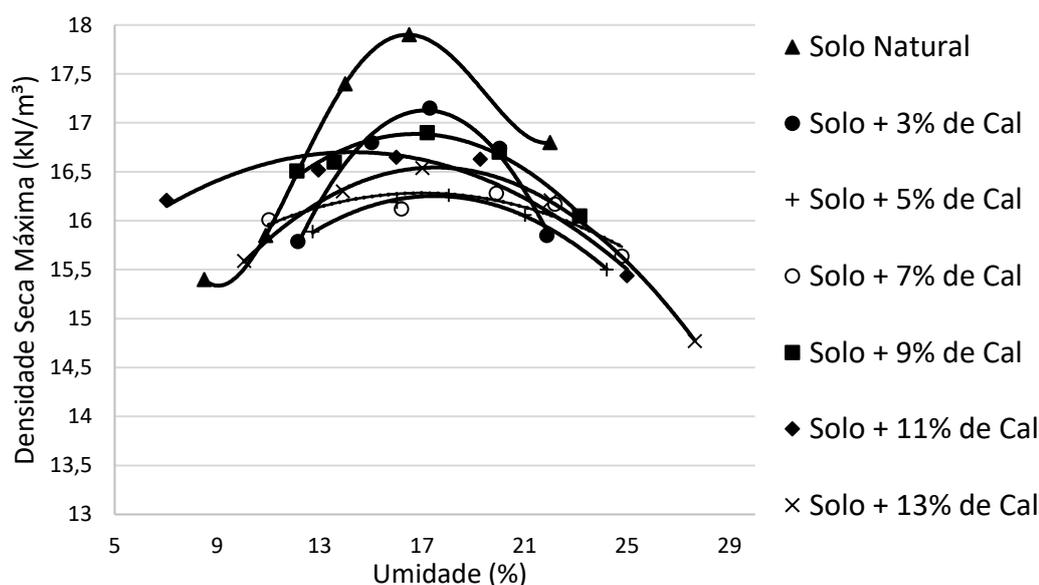
No estudo de Barbosa (2013), o solo natural apresentou um valor de 26,06 kN/m³ e, com o aumento das porcentagens de cal-hidratada no solo, estes valores tenderam a um leve aumento, voltando ao valor próximo de 26,1 kN/m³ na porcentagem estabilizante, 7% de cal-hidratada.

Nos estudos de Paiva (2016), os valores de Peso Específico Real dos Grãos foram praticamente iguais. O solo de Cabrobó apresentou-se com valor de 26,06 kN/m³, Ipojuca, 36,36 kN/m³ e Paulista, 26,14 kN/m³. Com a porcentagem estabilizante, os valores obtidos foram respectivamente 26,10 kN/m³, 26,75 kN/m³ e 26,48 kN/m³, respectivamente.

5.7.4 Compactação

O Gráfico 27 traz as curvas de compactação do solo natural e das misturas com cal-hidratada. O comportamento apresentado com o aumento do teor de cal-hidratada nas misturas foi a diminuição da densidade seca máxima e um aumento da umidade ótima.

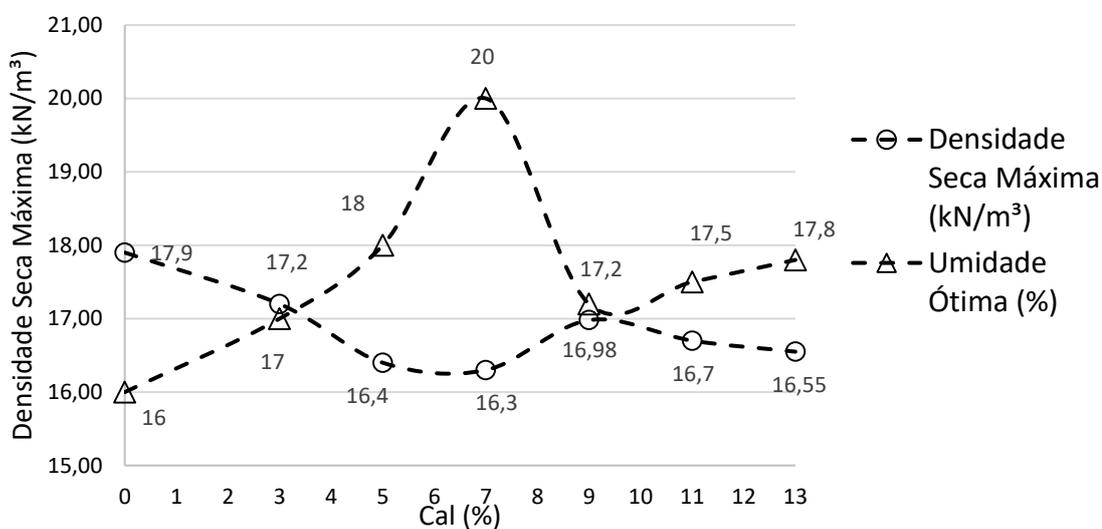
GRÁFICO 27: Curvas de Compactação do solo natural e misturas com cal-hidratada.



Fonte: A Autora (2018).

O Gráfico 28 traz um esquema mais simplificado para identificação rápida dos dados interpretados das curvas de compactação do Gráfico 27. Nesta figura, há as respectivas densidades seca máximas e as umidades ótimas em cada teor de cal-hidratada aplicado no estudo. Fica ainda mais nítido o comportamento pouco crescente da umidade e decrescente da densidade seca máxima., comportamento este que pode ser observado até nas misturas de 7% de cal-hidratada. Depois há a inversão deste comportamento, mas observa-se que as variações da densidade seca máxima e da umidade ótima são baixas entre as misturas de 9% a 13% de cal-hidratada.

GRÁFICO 28: Gráfico da massa específica aparente seca do solo com as diversas porcentagens de cal-hidratada e suas respectivas umidades ótimas.



Fonte: A Autora (2018).

Uma peculiaridade que pode ser observada no Gráfico 28 é um acréscimo da umidade e decréscimo da densidade seca máxima nos teores de 3%, 5% e 7% de cal-hidratada. O comportamento não segue o padrão subsequente nas demais porcentagens, mesmo que nelas, o fenômeno do aumento da umidade e decréscimo da densidade seca máxima ocorra. Isto aconteceu pelo fato de que, nas três primeiras porcentagens, usou-se uma amostra de solo e nas demais, 9%, 11% e 13%, usou-se uma outra amostra de solo, todas provenientes da mesma área de estudo. Mesmo sendo do mesmo local, não foi possível observar um comportamento seguido entre todas, podendo gerar uma envoltória, como ocorreu nas amostras com CCA.

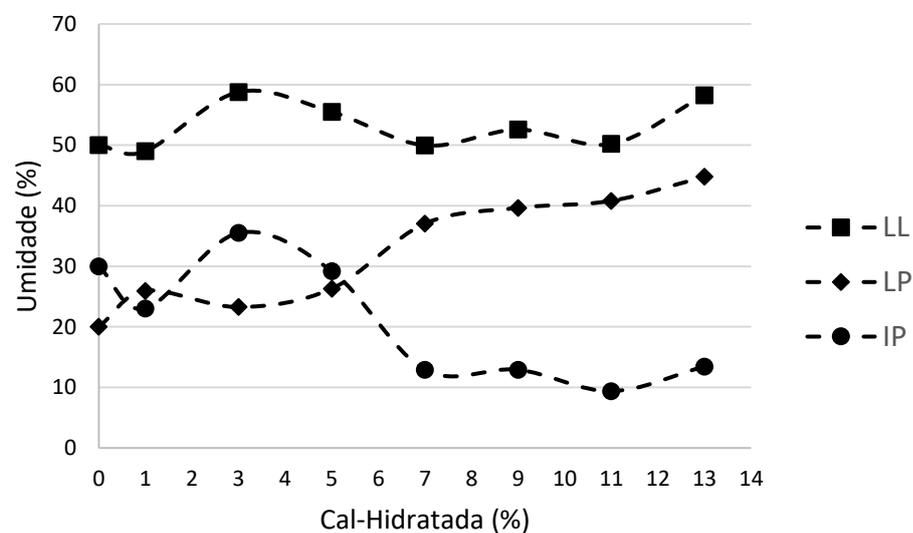
Principalmente nas amostras acima de 9% de cal-hidratada, percebe-se que o aumento da umidade ótima é muito sutil, aumentando em relação a porcentagem anterior em apenas 0,3%. A partir de certa porcentagem de cal-hidratada na amostra, a elevação da umidade e a diminuição da densidade seca máxima se tornou cada vez menor.

Nos estudos de Barbosa (2013) e Paiva (2016) também foi observado este fenômeno nas misturas de solo-cal-hidratada, onde no estudo de Barbosa (2013) o fenômeno foi observado a partir da porcentagem de 5% de cal-hidratada no solo e no de Paiva (2016), no teor de 5% de cal-hidratada nos três solos analisados.

5.7.5 Limites de atterberg

No Gráfico 29 estão os resultados dos Limites de Atterberg com cal. Com as misturas de cal-hidratada, o comportamento, no geral, se manteve como o da cinza, crescentes para Limites de Plasticidade, praticamente constantes para os Limites de Liquidez e decrescentes para os índices de plasticidade. O maior teor de cal, 13%, trouxe o índice de plasticidade para valores próximo a 13%, reduzindo aproximadamente 55,13% em relação ao valor inicial.

GRÁFICO 29: Limites de Atterberg para as diversas misturas com cal-hidratada.



Fonte: A Autora (2018).

Na Tabela 36 estão os valores dos Limites de Atterberg de forma numérica, das misturas de solo com cal-hidratada. Brandl (1981) relata que as variações que ocorrem rapidamente nos valores dos Limites de Atterberg quando se adiciona a cal no solo, ocorre devido as modificações na estrutura e devido a flocculação desse material.

TABELA 36: Limites de Atteberg das misturas de solo com cal-hidratada.

% de Cal-Hidratada	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0	50	20	30
1	48,99	25,95	23,04
3	58,77	23,27	35,50
5	55,50	26,31	29,19
7	49,96	37,06	12,90
9	52,57	39,65	12,92
11	50,20	40,81	9,39
13	58,23	44,77	13,46

Fonte: A Autora (2018).

Segundo Burmister (1949 *apud* DAS, 2007), Índices de Plasticidade entre 5 e 10, classifica-se como de plasticidade baixa e entre 10 e 20, plasticidade média; sendo os valores encontrado para os IP's das duas últimas misturas com 11% e 13% de Cal-Hidratada, muito próximo a este intervalo descrito. Em relação ao valor obtido no solo natural, confirma-se mais uma vez a diminuição da plasticidade do solo quando adicionado Cal-Hidratada.

No estudo de Barbosa (2013) foi possível observar o decréscimo dos Índices de Plasticidade com o aumento das porcentagens de cal-hidratada. Já nos estudos de Paiva (2016), observou-se uma elevação do Índice de Plasticidade no solo de Ipojuca e um comportamento decrescente no solo de Paulista.

5.7.6 Ensaios químicos

5.7.6.1 Ph das misturas com cal realizados em $CaCl_2$, H_2O e KCl

Os valores de pH com as misturas de Cal-Hidratada estão apresentados na Tabela 37. Este ensaio foi realizado para encontrar o teor mínimo necessário para atender o critério de Eades e Grim (1966), que era o pH 12,42. O pH foi realizado após uma hora da mistura. Apesar de se avaliar alguns parâmetros com idades superiores, não se realizou o ensaio de pH com misturas em outras idades, apenas após uma hora da realização da mistura. A partir disso, determinar os teores que seriam aplicados à pesquisa da estabilização do solo com adição de cal. De acordo com este método, a porcentagem estabilizante química do solo foi de 13%. Os

valores de pH nas misturas em estudo estão na Tabela 37. Ressalta-se que a metodologia usada para estas análises foi a da EMBRAPA (2017).

TABELA 37: pH das misturas de solo-cal em CaCl₂, H₂O e KCl.

Teor de cal na mistura (%)	pH		
	H ₂ O	CaCl ₂	KCl
0	7,49	7,19	6,18
1	9,97	9,68	9,28
3	11,62	11,11	11,06
5	11,94	11,75	12,35
7	11,98	12,03	12,53
9	11,99	12,15	12,60
11	12,22	12,70	12,62
13	12,42	12,72	12,64

Fonte: A Autora (2018).

Este mesmo ensaio foi aplicado aos estudos com cal de Barbosa (2013) e Paiva (2016) e que atenderam aos critérios de Eades e Grim (1966) com os respectivos teores: 3% e 7% de cal-hidratada no solo de Ipojuca e 5% de cal-hidratada no solo de Paulista.

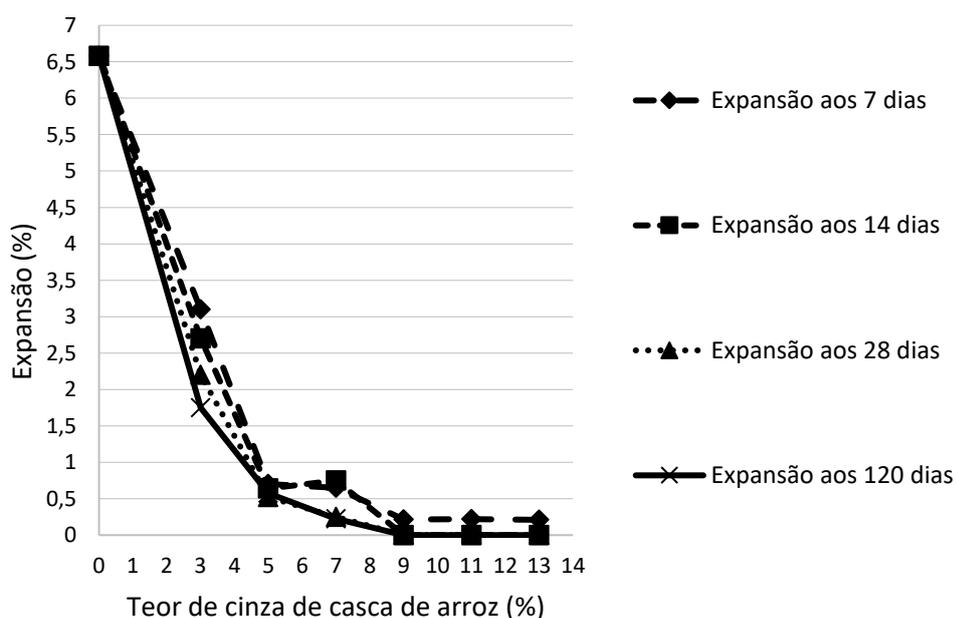
5.7.7 Expansão das misturas com cal-hidratada

No Gráfico 30 estão os valores de expansão do solo natural e das misturas de solo-cal-hidratada, nos quatro períodos de cura escolhidos para análise da expansão neste estudo, avaliados pelo método da expansão livre. Como se pode observar, tanto no comportamento através do Gráfico 30, quanto na Tabela 38, com o aumento da porcentagem de cal-hidratada, houve uma redução da expansão tanto ao longo dos teores quanto ao longo dos períodos de cura. O gráfico se iniciou com o valor da expansão do solo obtida na amostra indeformada, nas condições de campo, pois com a adição de 3% de Cal-Hidratada, percebeu-se que a expansão foi inferior a esta, ocorrendo o inverso ao comportamento obtido com a CCA, como já explicado.

Com 9% de cal-hidratada, houve a estabilização quase que completa, valor próximo do nulo, da mistura, mantendo um valor quase que constante nas misturas subsequentes. Pode-se dizer que houve a estabilização do solo com o teor de 9% de cal-hidratada adicionada e que esta estabilização mecânica ocorreu anteriormente ao pH de 12,42 que atendia o método de Eades e Grim (1966), que apresentou o valor de 13% de cal-hidratada.

A partir de 9% de cal-hidratada, não foi mais avaliada a expansão em períodos de cura superiores a 7 dias, pois como pode ser analisado nas porcentagens anteriores ao longo dos períodos de cura, há uma tendência de redução com o aumento da idade das amostras. Como as amostras acima de 9% de cal-hidratada apresentaram valores de expansão baixos aos 7 dias, dispensou-se as análises posteriores, pois estas apresentariam valores inferiores aos obtidos aos 7 dias.

GRÁFICO 30: Gráfico com o comportamento de Expansão Livre das misturas em diferentes períodos de cura das misturas solo-cal-hidratada.



Fonte: A Autora (2018).

TABELA 38: Expansão Livre das misturas de solo com cal-hidratada.

% de Cal	Expansão (%)				
	aos 7 dias	aos 14 dias	aos 28 dias	aos 120 dias	Média
0* (Campo)	6,58	6,58	6,58	6,58	-
0** (Compactado)	20	20	20	20	22,34
3	3,1	2,7	2,2	1,75	2,44
5	0,7	0,64	0,52	0,575	0,61
7	0,65	0,75	0,25	0,225	0,47
9	0,215	-	-	-	0,215
11	0,22	-	-	-	0,22
13	0,21	-	-	-	0,21

* e ** Valores repetidos ao obtido no ensaio da data zero, pois foi dispensada análises nas referidas datas, por não haver aditivo na amostra.

Fonte: A Autora (2018).

Com isto, houve uma redução de 96,73% da expansão do da mistura com 9% de cal-hidratada em relação ao solo natural de campo, que apresentou uma expansão de 6,58% e uma redução de 98,93% em relação ao solo natural, sem mistura, compactado em laboratório, que apresentou uma expansão de 20%.

A redução da expansão do solo com a adição de cal-hidratada ocorre devido a cimentação pozolânica que ocorre entre o solo e a cal-hidratada quando umedecidos, como já discutido. Segundo Herrin e Mitchell (1961), a cal gera influência no comportamento expansivo dos solos e que até certa quantidade, existe a redução de volume. Ao contrário das misturas com CCA, onde em determinado teor há uma máxima resistência à compressão e após este valor, há um de caimento desta resistência, nas misturas com cal-hidratada, quanto maior o teor aplicado, maior será o valor de resistência a compressão simples, como observado nos estudos com cal-hidratada.

Todos estes fatores, tanto à expansão quanto à compressão simples, podem ser observados nos estudos de Barbosa (2013) e de Paiva (2016). Nestes estudos também ocorreu a redução da expansão dos solos com o aumento dos teores de cal-hidratada, que foi a mesma aplicada neste trabalho, e embora neste estudo tenha sido dispensado a análise da resistência a compressão, nos estudos destes dois autores citados anteriormente, foi realizado este ensaio e comprovado o aumento da resistência à compressão simples.

No Apêndice A estão os valores de umidade inicial e final das amostras após o ensaio de Expansão Livre das amostras nos diferentes teores de cal-hidratada. Estes valores foram avaliados tanto para observar o processo de cura destas amostras, avaliando a conservação da umidade nelas nos diferentes períodos de cura, como para auxiliar na elaboração dos respectivos índices físicos das amostras. Como pode ser analisado, os valores de umidade inicial permaneceram praticamente constantes ao longo dos períodos de cura, mostrando uma boa conservação das amostras. Isto também reflete na expansão e na avaliação destas amostras dentro da mesma porcentagem e em diferentes idades, pois quando há uma perda da umidade nas amostras, favorece-se uma maior sucção e conseqüentemente, uma maior expansão. Mantendo uma certa constância destes valores, há uma melhor análise e compreensão do processo de redução da expansão ao longo dos períodos de cura.

Na Tabela 39 estão os valores de Tensão de Expansão avaliados pelo método da Tensão a Volume Constante. Nesta tabela, observa-se a redução das tensões ao longo do aumento das porcentagens de cal-hidratada nas misturas. Na porcentagem de 9% de cal-hidratada a Tensão Média de Expansão foi de 0,83 kPa, representando uma redução de 99,48% da tensão do solo obtida em relação aos métodos de Expansão sob tensão e Carregamento após Expansão, de 99,58% em relação a tensão obtida através do método de Expansão e Colapso e de 99,17% em relação a tensão obtida pelo método de Tensão de Expansão a Volume Constante.

Com a redução volumétrica das misturas, também se observa a redução da Tensão de Expansão das misturas com cal-hidratada. Evans e Bell (1981) afirmam que nos primeiros acréscimos de cal é onde ocorrem as maiores reduções do comportamento expansivo do material, que podem ser constatadas tanto nos valores obtidos neste estudo, quanto nos valores obtidos nos estudos dos já citados autores Barbosa (2013) e Paiva (2016), sendo um comportamento típico das misturas de solo com cal-hidratada.

Avaliando o Apêndice A também foi observado as umidades iniciais e finais das amostras submetidas ao ensaio de Tensão de Expansão, com a mesma finalidade aplicada com o acompanhamento destas umidades no ensaio das amostras de solo-cal-hidratada submetidas ao ensaio de Expansão Livre. Pode-se observar aqui, comportamento similar ao obtido nas amostras submetidas a Expansão Livre, mas com uma umidade final inferior àqueles valores obtidos no ensaio de Expansão Livre, pois a imposição de uma tensão nas amostras favorece o impedimento de uma maior absorção de água nas amostras em relação ao ensaio anterior, que permite uma maior infiltração de água nos corpos de prova.

TABELA 39: Tensão de Expansão a Volume Constante das misturas de solo com cal-hidratada.

% de CAL	Tensão de Expansão (kPa)				
	aos 7 dias	aos 14 dias	aos 28 dias	aos 120 dias	Média
0* (Campo)	100	100	100	100	100
0** (Compactado)	215	215	215	215	215
3	17,5	15	10	19,17	15,42
5	5	3,75	5	4,17	4,48
7	1,25	2,5	2,5	2,5	2,19
9	0,83	-	-	-	0,83
11	0,83	-	-	-	0,83
13	0,83	-	-	-	0,83

* e ** Valores repetidos ao obtido no ensaio da data zero, pois foi dispensada análises nas referidas datas, por não haver aditivo na amostra.

Fonte: A Autora (2018).

Na Tabela 40 estão os dados relativos aos constituintes de cada corpo de prova analisado, com as respectivas porcentagens de solo, cal-hidratada, água e ar da amostra. Como é possível observar, o teor de solo vai diminuindo, para ser substituído pela cal-hidratada, água e ar. O teor de cal-hidratada aumenta gradativamente, como esperado, interferindo assim, no aumento da água, pois como foi observado nas curvas de compactação, a umidade ótima aumentava paralelamente ao teor de cal-hidratada e também há o aumento da porção de ar, pois ainda observando as curvas de compactação, a densidade seca máxima diminui e com isto, há mais vazios na amostra, sendo preenchidos por água e ar. Este conceito é aplicado em todas as amostras, mas vale ressaltar que, pela mudança de solo usado nas amostras entre 3% e 7% e entre 9% e 13%, houve uma certa variação na composição das amostras entre 7% e 9%

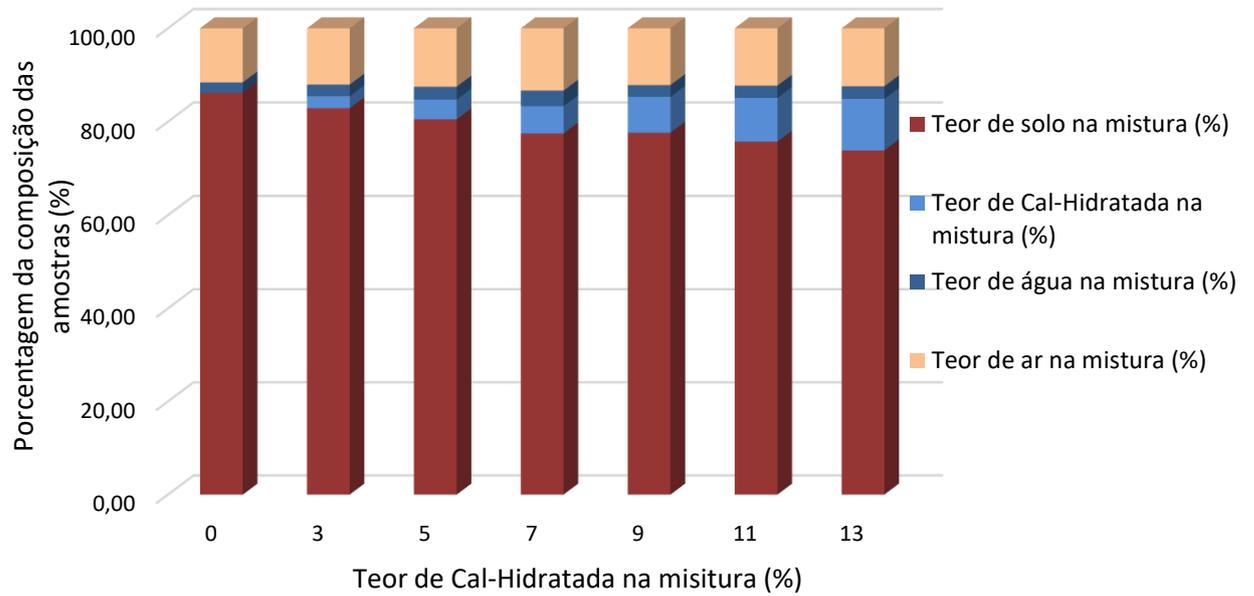
de cal-hidratada, mas com comportamentos similares ao explicado acima nas amostras dentre de seus intervalos com mesmo uso de solo.

TABELA 40: Porcentagem constituinte das amostras de solo-cal-hidratada analisadas.

Teor de Cal nas Misturas (%)	Solo (%)	Cal-Hidratada (%)	Água (%)	Ar (%)	Total (%)
0	86,21	0	2,21	11,59	100
3	86,21	2,56	2,47	12,06	100
5	82,91	4,24	2,75	12,51	100
7	80,51	5,83	3,33	13,33	100
9	77,50	7,68	2,52	12,15	100
11	77,65	9,36	2,61	12,29	100
13	73,85	11,04	2,69	12,42	100

Fonte: A Autora (2018).

No Gráfico 31 mostra-se os valores apresentados na Tabela 40 em um gráfico de barras, facilitando a visualização dos percentuais constituintes de cada amostra estudada. Através desta figura, é mais fácil compreender a redução dos valores para o solo e o aumento dos valores para cal-hidratada, devido aos teores, de água, pois se eleva a umidade ótima em relação ao solo sem mistura e, conseqüentemente, o teor de água na amostra, e o de ar, pois além do aumento da umidade ótima ao longo das misturas, há uma queda do peso específico destas, ocasionando um maior teor de vazios ocupados por água e ar.

GRÁFICO 31: Percentual dos constituintes de cada amostra com Cal-Hidratada em análise.

Fonte: A Autora (2018).

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusão

O solo foi classificado pela Classificação Unificada dos Solos como CH ou CL, sendo considerado altamente plástico, com umidade ótima de 17,9 kN/m³, expansão de 6,58% e Tensão de Expansão entre 100 e 201 kPa, pelos métodos aplicados no estudo.

Os Horizontes A e B apresentam características granulométricas e Limites de Atterberg próximos, sendo considerado como um solo residual, enquanto o Horizonte C é predominantemente grosso e classificado como saprolítico, com fortes indícios de decomposição da rocha sã no local, resultando nos três horizontes.

De acordo com o DRX, há a presença de Caulinita, Montmorilonita, Vermiculita e Mica nos horizontes.

A Cinza de Casca de Arroz (CCA) apresenta um valor elevado de Óxido de Sílica em sua composição, oferecendo excelente potencial pozolânico nas reações químicas.

As misturas de solo com CCA apresentaram granulometrias próximas, pois a substituição do solo por CCA ofereceu pouca influência, devido a leveza da CCA.

A densidade foi decrescente ao longo do aumento das porcentagens de CCA, pois esta apresenta baixa densidade e quando substituída no solo, diminui a massa da amostra.

Houve o aumento da umidade ótima e diminuição da densidade seca máxima nas amostras com CCA, ocasionada pela maior necessidade de absorção de água pela CCA quando se eleva seu teor.

O acréscimo de CCA influenciou diretamente nos Limites de Plasticidade das misturas, elevando-os, e decaindo os Índices de Plasticidade, ocasionado pela cimentação pozolânica.

A CCA se mostrou muito eficaz no combate a expansão do solo, necessitando na estabilização deste solo analisado, um teor de 14% de CCA para alcançar valores de expansão próximos a 1,5%, reduzindo a Tensão de Expansão a Volume Constante para valores inferiores a 10 kPa.

Influenciou na resistência a compressão axial simples das amostras, diminuindo estes valores em relação ao solo natural e mostrando que há um limite ótimo entre as misturas quando se trata de compressão axial simples, que neste estudo foi de 135 kPa, referente ao teor de 10% de CCA, decaindo consideravelmente estes valores após isto.

As fases das misturas com CCA mostram o decréscimo da porcentagem de solo e o aumento gradativo da porcentagem de água, CCA e ar.

As granulometrias das curvas de solo com cal-hidratada apresentaram uma elevação da relação silte/argila, mostrando que houve o fenômeno da floculação, chegando a 77% esta relação aos 13% de cal-hidratada.

A densidade das amostras decaiu com o aumento do teor de cal-hidratada, também ocasionado pela menor densidade da cal-hidratada, em relação ao solo.

As curvas de compactação, apesar de em algumas porcentagens apresentarem comportamentos atípicos, mostraram que houve o aumento da umidade ótima e a diminuição da densidade seca máxima nas misturas.

O Limite de Plasticidade decaiu com a elevação da porcentagem de cal-hidratada, apresentando uma tendência ao decréscimo do Índice de Plasticidade.

A porcentagem de cal-hidratada no sol que atendeu o pH proposto por Eades e Grim (1966) foi 13%.

A expansão do solo diminuiu ao longo do aumento das porcentagens, mostrando que houve uma estabilização com o teor de 9% de cal-hidratada, ocorrendo a estabilização mecânica antes da estabilização química.

A Tensão de Expansão do solo também diminuiu ao longo dos teores das misturas, alcançando valores próximos a 1 kPa a partir da porcentagem de 9% de cal-hidratada.

As fases, em geral, também se mostraram com um decréscimo da fração de solo e um aumento das frações de água, ar e cal-hidratada nas misturas.

O solo em estado natural e umidade e densidade de campo, apresenta expansão livre de 6,58% (com sobrecarga de 10 kPa) e tensão de expansão média de aproximadamente 155 kPa. A substituição do solo por Cal-Hidratada e CCA reduziu significativamente a expansão, influenciando em suas características físicas e químicas, em relação ao solo natural, e mostrando-se eficaz na aplicação em solos expansivos para reduzir e/ou combater a expansão associada.

Com relação aos mapas de susceptibilidade a expansão de solos, pode-se inferir que ele é bastante útil para fases de sondagem da área de estudo, principalmente na fase de projeto, onde se avalia toda a caracterização do solo, e podendo levar a uma investigação geotécnica mais minuciosa em áreas que possam ainda não ter seu potencial expansivo comprovado, como foi o caso da área de estudo deste trabalho, eximindo de possíveis problemas construtivos posteriormente.

6.2 Sugestões

Para estudos futuros, sugere-se a realização de:

Ensaio de Termogravimetria nas amostras de solo;

Ensaio de resistência ao cisalhamento nas misturas com CCA e com Cal-Hidratada;

Ensaio de compressão nas idades de 7, 14 e 21 dias nas misturas com CCA e nas idades de 7, 14, 28 e 120 dias, para avaliar a influência do fator tempo sobre os valores de compressão axial simples;

Ensaio químico nas amostras com Cal-Hidratada;

Ensaio de Microscopia Óptica, tanto para o solo quanto para as misturas, para avaliar as ligações entre os grãos de solo e a influência dos aditivos nestas iterações.

REFERÊNCIAS

ADHIKARY, Sudipta e JANA, koyel. **Potentials of rice-husk ash as a soil stabilizer.** Internatinal Journal of Latest Research in Engineering na Technology (IJLRET). Vol. 2, Issue 2, 2016. p 40-48.

Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Ageitec. **Teor de Óxidos de ferro.** <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_49_2212200611552.html> Acesso em: 29 maio 2018a.

Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Ageitec. **Saturação por bases.** <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_21_2212200611544.html> Acesso em: 29 maio 2018b.

Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Ageitec. **Caráter solódico.** <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_27_2212200611546.html> Acesso em: 29 maio 2018c.

Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Ageitec. **Caráter sódico.** <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_58_2212200611552.html> Acesso em: 29 maio 2018d.

ALBERS, A. P. F., MELCHIADES, F. G., MACHADO, R., BALDO, J. B. e BOSCHI, A. O. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X.** Cerâmica 48 (305) Jan/Fev/Mar, 2002. 4 p.

ALHASSAN, Musa. **Potentials of Rice Husk Ash for Soil Stabilization.** Technical Report, AU J. T. 11 (4): 246-250, 2008.

AMORIM, Samuel França. **Contribuição à Cartografia Geotécnica: Sistema de Informações Geográficas dos Solos Expansivos e Colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC-PE).** Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia e Geociências. Engenharia Civil, UFPE, 2004, 263 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

____NBR 6457: **Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**, Rio de Janeiro, 9 p., 1986.

____NBR 6459: **Solo – determinação do limite de liquidez**, Rio de Janeiro, 9 p., 2016.

____NBR 6473: **Cal virgem e cal hidratada – Análise química**. Rio de Janeiro, 31 p., 2003.

____NBR 6508: **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2016.

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

____NBR 7180: **Solo – determinação do limite de plasticidade**, Rio de Janeiro, 3 p., 2016.

____NBR 7181: **Solo – análise granulométrica**, Rio de Janeiro, 16 p., 2016.

____NBR 7182: **Ensaio de compactação**, Rio de Janeiro, 13 p., 2016

____NBR 9604: **Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostra deformada e indeformada - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 13 p., 2016.

____NBR 9289: **Cal hidratada para argamassas – Determinação da finura**. Rio de Janeiro, 4 p., 1996.

____NBR 9290: **Cal hidratada para argamassas – Determinação de retenção de água**. Rio de Janeiro, 4 p., 1998.

____NBR 12025: **Solo-cimento – ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2 p., 2012.

American Society for Testing and Materials (ASTM):

____ASTM D4829 – **Método de Teste Padrão para o Índice de Expansão de Solos**, 1995.

AZEVÊDO, André Luis Cairo de. **Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. Dissertação de Mestrado Profissional, Ouro Preto, UFOP, 2010.

BARBOSA, Valquíria. **Estudo do Comportamento Geotécnico de um Solo Argiloso de Cabrobó, Potencialmente Expansivo, Estabilizado com Cal**. Dissertação de Mestrado. Recife, UFPE, 2013, 131p.

BENTO, Priscila Fiochi. **Uso de Cal e Fibras na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Publicação G. DM– 144/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006. < <http://www.geotecnia.unb.br/downloads/dissertacoes/144-2006.pdf>> Acesso em: 13 jun 2018.

Blog Diário de Pernambuco. **Projeções Através de Censo**. <<http://blogs.diariodepernambuco.com.br/esportes/2010/11/30/projecoes-atraves-do-censo/>> Acesso em: 12 maio 2018.

Brandl, H. **Alteration of soil parameters by stabilization with lime**. In International Conference on Soil Mechanics on Foundation Engineering, 10, Stockholm. Proceeding Rotterdam: A. A. Balkema, v.1, 1981. p.587-595.

Castro, P. H. M., Vendrame, P. R. S. e Pinese, J. P. P. **Clay mineralogy of soils located on islands in the upper Paraná River, PR/MS**. Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 35, n. 2, p. 181-188, jul./dez, 2014.

CAVALCANTE, Erinaldo Hilário, CAVALCANTE JÚNIOR, Demóstenes de A. e SANTOS, Washington José. **Propriedades Geotécnicas de um Solo Expansivo de Sergipe**. GEOJOVEM 2006, Nova Friburgo, Rio de Janeiro. <<https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/IIgeojovem2006/2006-cavalcante-junior.pdf>> Acesso em: 22 Fev. 2017.

CHAGAS, Gleiber da Silva. **Estudo Experimental do comportamento mecânico de estrato silto-argiloso (massapê) para fundações superficiais**. Dissertação de mestrado, Fortaleza, CE, UFC, 2014, 112 p.

Chen, F.H. **Foundations on Expansive Soils**. Elsevier Science Publishing Company Inc., New York, 1988, 461p.

CHEN F. H. **Foundations on Expansive Soils**. Elsevier, Amsterdam, 1975.

Climate-data. **Clima: Agrestina**. < <https://pt.climate-data.org/location/43100/> > Acessado em 09 de Agosto de 2017.

CUELLAR, V. **Análisis Crítica de los Métodos Existentes para el Empleo de Arcillas Expansivas em obras de Carreteras y Recomendaciones Sobre las Técnicas Más Idóneas Para se Uso habitual en España** Laboratório del Transporte y Mecanica del suelo, Madrid, 1978. 321p.

Day, R. W. **Geotechnical and Foundation Engineering: Design and Construction**. McGraw-Hill Companies. New York, 1999.

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

DAS, Braja. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução All Tasks, revisão técnica: Pérsio Leister de Almeida Barros, Tradução da 6 ed. norte-americana, Thomson Learning, São Paulo, 2007.

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

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco**. Recife. CD-ROM. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Documentos; Nº. 35, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa. **Manual de métodos de análise de solo** / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017. 573 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do município de Agrestina – PE.** < <http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/pe/agrestina.pdf> > Acesso em 15 de Julho de 2017.

FELTRE, Ricardo. **Química – Vol 1.** 6. ed. São Paulo: Moderna, 2004.

FERREIRA, Silvio Romero de Melo. **Colapso e Expansão em Solos Naturais não Saturados Devido à Inundação.** Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1995.

FERREIRA, Silvio Romero de Melo e FERREIRA, Maria da Graça de Vasconcelos Xavier. **Mudanças de volume devido à variação do teor de umidade em um vertissolo no Semi-Árido de Pernambuco,** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, pp. 779-791, 2009.

Ferreira, S. R. M. **Volume change behaviour due to moisture variation in vertisil soil from a semiarid region in Pernambuco – Brazil,** 2010.

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

GONDIM, Lilian Medeiros. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará.** Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2008.

Headquarters Department of The Army. **Foundations in Expansive Soil.** Washington, DC, 1983.

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

HOLTZ, W. G. e GIBBS, H. J. **Engineering properties of expansive clays**. Transactions of ASCE, 121, 1956. Pp 641±663.

HOTINEANU, A., STANCIU, A., LUNGU, I. e ANICULĂESI, M. **On the active and compressible behavior of bahlui clay**. Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi, t. LX (LXIV), f. 1, 2014. < <http://www.bipcons.ce.tuiasi.ro/Archive/435.pdf> > Acesso em: 06 jun. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Senso de 2016 < <http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?codmun=260030> > Acesso em: 11 abr. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Pedologia**, 2ª Ed, Rio de Janeiro, 2007.

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

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

LACERDA, L. S. do N. de, CONSTANTINO, C. de S., BEZERRA, A. L. e FERREIRA, S. R. de M. **Influência da Adição de Cinza de Casca de Arroz em Solos Expansivos nos Municípios de Paulista, Cabrobó e Brejo da Madre de Deus no Estado de Pernambuco/Brasil**. 16º Congresso Nacional de Geotecnia, Açores, Portugal, 2018.

LSI – Laboratório de solos e instrumentação. UFPE. Relatório de solicitação de serviços nº 930/2017, certificado nº940/2017, 2017.

Manual Técnico: Foundations in Expansive Soil. Headquarters, Department of the Army, Washington, DC, USA, 1983.

Murthy, V. N. S. **Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Marcel Dekker, Inc. New York, 2003.

OSAKI, F. **Calagem e adubação**. Campinas: Instituto Brasileiro de Ensino Agrícola, 1991. 503 p.

PAIVA, S. C. de, LIMA, M. A. de A., FERREIRA, M. G. de V., FERREIRA, S. R. de M.. **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal**. Revista Matéria, Artigo 11713, V. 21, Nº 2, 2016. 437-449 p.

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**. Tese de doutorado em Engenharia Civil – UFPE, Recife, Pernambuco, 2016. 191 p.

PALMEIRA, E. M. **Melhoria de Solos**. Publicação GA 001A/90, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1990, 225 p.

PATEL, Pravin. e MAHIYAR, H. K. **A experimental study of black cotton soil, stabilized with rice husk ash, fly ash and lime**. International Journal of Engineering Research e Technology (IJERT), VOL. 3, Issue 11, 2014. 6 p.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, André Ricardo Alves Guedes. **Fibras de Carauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, 2008.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Tese de Doutorado. Porto Alegre, UFRGS, 2006. 345 p.

PRADO, Hélio do. **A pedologia simplificada**. Arquivo do agrônomo – Nº 1, 2ª ed. Ampliada e modificada. POTAFOS, Piracicaba, São Paulo, 1995. 16 p.

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

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. e ROFF, T. E. J. **Lime Modification of Clay Soils for Construction Expediency.** *Geotechnical Engineering*, v. 125, 1997, p. 242-249

SANTOS, Lucas Coelho dos.; **Estudo da Estabilização de um Solo Expansivo Através da Incorporação de Areia Verde de Fundação Residual.** Trabalho de conclusão de curso, Curso de Engenharia de Infraestrutura, UFSC, 2015, 80 p.

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

SHRIVASTAVA, D., SINGHAI, A. K. e YADAV, R. K. **Effect of lime and rice husk ash on engineering properties of black cotton soil.** *International Journal of Engineering Research and Science & Technology*, Vol. 3, No. 2, Maio, 2014. 7p.

SILVA, M. F. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Nova Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010.

Silva, J., Bello, I., Júnior, R. e Ferreira, S. **Estabilização de um solo potencialmente expansivo, de Agrestina – PE, com a utilização da cinza da casca de arroz.** 16º Congresso Nacional de Geotecnia, Ponta Delgada, Açores, Portugal, 2018.

SIMÕES DE OLIVEIRA, A. G.; JESUS, A. C.; MIRANDA, S. B. **Estudo geológico - geotécnico dos solos expansivos da região do recôncavo baiano.** Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos – Geojovem, 2006. <
<http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/IIgeojovem2006/2006-oliveira-jesus.pdf> >
Acesso em 04 Jul. de 2018.

SKEMPTON, A. W. **The collodial activity of clays.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS. 3rd., 1953 Zurich, Proceeding. Zurich, 1953. v.1, 1953. p. 57–61.

Jose Camapum de Carvalho ... [et.al.] orgs.. **Solos não saturados no contexto geotecnico** – São Paulo : Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotecnica, 2015. 792 p.

SOUZA, Rafaela Faciola Coelho de. **Estudo da influência da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com a técnica da transferência de vapor**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2014. < file:///C:/Users/Jayne/Downloads/TeseSouzaRafaelaFaciolaCdeCorrig.pdf > Acesso em: 03 jun. 2018.

SRIDHARAN, A. e PRAKASH, K.; **Classification Procedures for Expansive Soils**. Proc. Instn Civ. Engrs Geotech, 2000.

TASHIMA, M. M., SOUSA, L. C., AKASAKI, j. L., SILVA, E. J. da, MELGES, J. L. P. e BERNABEU, J. J. P. **Reaproveitamento da cinza de casca de arroz na construção civil**. HOLOS Environment, v. 11, n. 1, 2011, p. 81.

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

TIBONI, R. **A utilização da cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland**. Dissertação Mestrado, São Carlos: USP, 2007.

USBR. **Shear Testing.Gravelly Soils**.(1953) gravels 3 / 200.

VIJAYVERGIYA, V. N. e GHAZZALY, O. I. **Prediction of Swelling Potencial for Natural Clays**. Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils, Hayfa, Vol. 1, 1973. pp. 227 - 236.

WIKIPÉDIA. **Localização de Agrestina**. < [https://pt.wikipedia.org/wiki/Agrestina#/media/File:Mapa_de_Agrestina_\(2\).png](https://pt.wikipedia.org/wiki/Agrestina#/media/File:Mapa_de_Agrestina_(2).png) > Acesso em: 09 abr. 2018.

WILLIAMS, A. A. B.; DONALDSON, G. W. **Building on Expansive Soils in South Africa**. 1973 – 1980. Proceedings 4th International Conference on Expansive Soils, Vol. II, Denver, Colorado, 1980. 834 - 844 p.

APÊNDICE A - Índices físicos antes e após os ensaios de expansão livre e tensão de expansão das misturas.

Índices Físicos Antes do Ensaio de Expansão Livre com as Misturas de CCA											
	Vt (cm ³)	Ph (g)	h (%)	δ (g/cm ³)	P (g)	Yg (g/cm ³)	Vsolo (cm ³)	Vv	Ys (g/cm ³)	e	n
2% de CCA a 7 dias	120	247,98	18,58	2,42	209,12	2,42	86,42	33,58	1,74	0,39	0,28
2% de CCA a 14 dias	120	246,77	18,51	2,42	208,23	2,42	86,04	33,96	1,74	0,39	0,28
2% de CCA a 21 dias	120	232,74	18,13	2,42	197,02	2,42	81,41	38,59	1,64	0,47	0,32
4% de CCA a 7 dias	120	218,41	18,16	2,38	184,84	2,38	77,66	42,34	1,54	0,55	0,35
4% de CCA a 14 dias	120	219,39	18,22	2,38	185,58	2,38	77,97	42,03	1,55	0,54	0,35
4% de CCA a 21 dias	120	217,77	18,19	2,38	184,25	2,38	77,42	42,58	1,54	0,55	0,35
6% de CCA a 7 dias	120	222,09	19,44	2,38	185,94	2,38	78,23	41,77	1,55	0,53	0,35
6% de CCA a 14 dias	120	219,04	19,32	2,38	183,57	2,38	77,23	42,77	1,53	0,55	0,36
6% de CCA a 21 dias	120	213,30	19,21	2,38	178,93	2,38	75,27	44,73	1,49	0,59	0,37
8% de CCA a 7 dias	120	207,01	19,08	2,34	173,84	2,34	74,29	45,71	1,45	0,62	0,38
8% de CCA a 14 dias	120	193,92	18,89	2,34	163,11	2,34	69,70	50,30	1,36	0,72	0,42
8% de CCA a 21 dias	120	146,77	19,15	2,34	123,18	2,34	52,64	67,36	1,03	1,28	0,56
10% de CCA a 7 dias	120	214,08	21,75	2,29	175,84	2,29	76,78	43,22	1,47	0,56	0,36
10% de CCA a 14 dias	120	190,82	21,29	2,29	157,33	2,29	68,70	51,30	1,31	0,75	0,43
10% de CCA a 21 dias	120	211,42	21,20	2,29	174,44	2,29	76,17	43,83	1,45	0,58	0,37
12% de CCA a 7 dias	120	190,11	23,32	2,22	154,16	2,22	69,41	50,59	1,28	0,73	0,42
12% de CCA a 14 dias	120	194,04	23,35	2,22	157,31	2,22	70,83	49,17	1,31	0,69	0,41
12% de CCA a 21 dias	120	202,77	23,62	2,22	164,03	2,22	73,85	46,15	1,37	0,62	0,38
14% de CCA a 7 dias	120	194,23	27,10	2,21	152,82	2,21	69,27	50,73	1,27	0,73	0,42
14% de CCA a 14 dias	120	195,38	26,24	2,21	154,77	2,21	70,16	49,84	1,29	0,71	0,42
14% de CCA a 21 dias	120	198,55	26,53	2,21	156,92	2,21	71,13	48,87	1,31	0,69	0,41

Índices Físicos Após o Ensaio de Expansão Livre com as Misturas de CCA											
	Vt (cm ³)	Ph (g)	h (%)	δ (g/cm ³)	P (g)	Yg (g/cm ³)	Vsolo (cm ³)	Vv	Ys (g/cm ³)	e	n
2% de CCA a 7 dias	120,00	258,54	28,82	2,42	200,70	2,42	82,93	37,07	1,67	0,45	0,31
2% de CCA a 14 dias	120,00	255,36	28,52	2,42	198,69	2,42	82,10	37,90	1,66	0,46	0,32
2% de CCA a 21 dias	120,00	254,62	29,07	2,42	197,27	2,42	81,52	38,48	1,64	0,47	0,32
4% de CCA a 7 dias	120,00	240,61	29,27	2,38	186,13	2,38	78,21	41,79	1,55	0,53	0,35
4% de CCA a 14 dias	120,00	193,43	29,55	2,38	149,31	2,38	62,73	57,27	1,24	0,91	0,48
4% de CCA a 21 dias	120,00	243,26	31,74	2,38	184,65	2,38	77,58	42,42	1,54	0,55	0,35
6% de CCA a 7 dias	120,00	244,93	31,64	2,38	186,06	2,38	78,28	41,72	1,55	0,53	0,35
6% de CCA a 14 dias	120,00	238,21	27,50	2,38	186,83	2,38	78,60	41,40	1,56	0,53	0,35
6% de CCA a 21 dias	120,00	233,56	32,63	2,38	176,10	2,38	74,08	45,92	1,47	0,62	0,38
8% de CCA a 7 dias	120,00	233,24	32,77	2,34	175,67	2,34	75,07	44,93	1,46	0,60	0,37
8% de CCA a 14 dias	120,00	219,06	33,75	2,34	163,78	2,34	69,99	50,01	1,36	0,71	0,42
8% de CCA a 21 dias	120,00	228,01	30,97	2,34	174,09	2,34	74,40	45,60	1,45	0,61	0,38
10% de CCA a 7 dias	120,00	228,26	26,41	2,29	180,57	2,29	78,85	41,15	1,50	0,52	0,34
10% de CCA a 14 dias	120,00	210,94	25,85	2,29	167,61	2,29	73,19	46,81	1,40	0,64	0,39
10% de CCA a 21 dias	120,00	221,65	27,12	2,29	174,36	2,29	76,14	43,86	1,45	0,58	0,37
12% de CCA a 7 dias	120,00	211,56	34,53	2,22	157,26	2,22	70,81	49,19	1,31	0,69	0,41
12% de CCA a 14 dias	120,00	211,88	32,79	2,22	159,56	2,22	71,84	48,16	1,33	0,67	0,40
12% de CCA a 21 dias	120,00	215,54	30,60	2,22	165,04	2,22	74,31	45,69	1,38	0,61	0,38
14% de CCA a 7 dias	120,00	207,58	34,94	2,21	153,83	2,21	69,73	50,27	1,28	0,72	0,42
14% de CCA a 14 dias	120,00	208,10	30,00	2,21	160,08	2,21	72,56	47,44	1,33	0,65	0,40
14% de CCA a 21 dias	120,00	206,57	32,21	2,21	156,24	2,21	70,83	49,17	1,30	0,69	0,41

Índices Físicos Antes do Ensaio de Expansão Livre com as Misturas de Cal-Hidratada											
	Vt (cm ³)	Ph (g)	h (%)	δ (g/cm ³)	P (g)	Yg (g/cm ³)	Vsolo (cm ³)	Vv	Ys (g/cm ³)	e	n
3% de Cal a 7 dias	120	156,70	17,20	2,52	133,70	2,52	53,06	66,94	1,11	1,26	0,56
3% de Cal a 14 dias	120	219,68	17,19	2,52	187,46	2,52	74,39	45,61	1,56	0,61	0,38
3% de Cal a 28 dias	120	168,98	17,17	2,52	144,22	2,52	57,23	62,77	1,20	1,10	0,52
5% de Cal a 7 dias	120	138,71	17,56	2,31	117,99	2,31	51,08	68,92	0,98	1,35	0,57
5% de Cal a 14 dias	120	141,97	18,16	2,31	120,15	2,31	52,01	67,99	1,00	1,31	0,57
5% de Cal a 28 dias	120	150,18	18,57	2,31	126,66	2,31	54,83	65,17	1,06	1,19	0,54
7% de Cal a 7 dias	120	138,21	19,64	2,28	115,52	2,28	50,67	69,33	0,96	1,37	0,58
7% de Cal a 14 dias	120	152,01	19,63	2,28	127,07	2,28	55,73	64,27	1,06	1,15	0,54
7% de Cal a 28 dias	120	152,53	19,30	2,28	127,85	2,28	56,08	63,92	1,07	1,14	0,53
9% de Cal a 7 dias	120	218,72	16,65	2,18	187,50	2,18	86,01	33,99	1,56	0,40	0,28
11% de Cal a 7 dias	120	184,25	16,70	2,10	157,88	2,10	75,18	44,82	1,32	0,60	0,37
13% de Cal a 7 dias	120	211,73	16,75	2,00	181,35	2,00	90,68	29,32	1,51	0,32	0,24
Índices Físicos Após o Ensaio de Expansão Livre com as Misturas de Cal-Hidratada											
	Vt (cm ³)	Ph (g)	h (%)	δ (g/cm ³)	P (g)	Yg (g/cm ³)	Vsolo (cm ³)	Vv	Ys (g/cm ³)	e	n
3% de Cal a 7 dias	120,00	162,38	21,71	2,52	133,42	2,52	52,94	67,06	1,11	1,27	0,56
3% de Cal a 14 dias	120,00	226,85	24,69	2,52	181,93	2,52	72,19	47,81	1,52	0,66	0,40
3% de Cal a 28 dias	120,00	173,98	22,01	2,52	142,59	2,52	56,59	63,41	1,19	1,12	0,53
5% de Cal a 7 dias	120,00	156,86	21,57	2,31	129,03	2,31	55,86	64,14	1,08	1,15	0,53
5% de Cal a 14 dias	120,00	149,58	23,85	2,31	120,78	2,31	52,28	67,72	1,01	1,30	0,56
5% de Cal a 28 dias	120,00	153,91	20,63	2,31	127,59	2,31	55,23	64,77	1,06	1,17	0,54
7% de Cal a 7 dias	120,00	144,78	21,58	2,28	119,08	2,28	52,23	67,77	0,99	1,30	0,56
7% de Cal a 14 dias	120,00	155,12	21,79	2,28	127,37	2,28	55,86	64,14	1,06	1,15	0,53
7% de Cal a 28 dias	120,00	155,91	20,16	2,28	129,75	2,28	56,91	63,09	1,08	1,11	0,53
9% de Cal a 7 dias	120,00	224,41	19,57	2,18	187,68	2,18	86,09	33,91	1,56	0,39	0,28
11% de Cal a 7 dias	120,00	201,04	27,93	2,10	157,15	2,10	74,83	45,17	1,31	0,60	0,38
13% de Cal a 7 dias	120,00	224,17	23,41	2,00	181,65	2,00	90,82	29,18	1,51	0,32	0,24

Índices Físicos Antes do Ensaio de Tensão de Expansão com as Misturas de Cal-Hidratada											
	Vt (cm ³)	Ph (g)	h (%)	δ (g/cm ³)	P (g)	Yg (g/cm ³)	Vsolo (cm ³)	Vv	Ys (g/cm ³)	e	n
3% de Cal a 7 dias	120	152,83	17,20	2,52	130,40	2,52	51,75	68,25	1,09	1,32	0,57
3% de Cal a 14 dias	120	147,75	17,15	2,52	126,12	2,52	50,05	69,95	1,05	1,40	0,58
3% de Cal a 28 dias	120	148,93	17,10	2,52	127,18	2,52	50,47	69,53	1,06	1,38	0,58
5% de Cal a 7 dias	120	145,81	17,78	2,31	123,80	2,31	53,59	66,41	1,03	1,24	0,55
5% de Cal a 14 dias	120	140,52	18,16	2,31	118,92	2,31	51,48	68,52	0,99	1,33	0,57
5% de Cal a 28 dias	120	142,97	18,57	2,31	120,58	2,31	52,20	67,80	1,00	1,30	0,57
7% de Cal a 7 dias	120	138,21	19,64	2,28	115,52	2,28	50,67	69,33	0,96	1,37	0,58
7% de Cal a 14 dias	120	156,01	19,63	2,28	130,41	2,28	57,20	62,80	1,09	1,10	0,52
7% de Cal a 28 dias	120	148,88	19,30	2,28	124,79	2,28	54,73	65,27	1,04	1,19	0,54
9% de Cal a 7 dias	120	225,28	16,65	2,18	193,12	2,18	88,59	31,41	1,61	0,35	0,26
11% de Cal a 7 dias	120	210,26	16,70	2,10	180,17	2,10	85,80	34,20	1,50	0,40	0,29
13% de Cal a 7 dias	120	215,02	16,75	2,00	184,17	2,00	92,09	27,91	1,53	0,30	0,23
Índices Físicos Após o Ensaio de Tensão de Expansão com as Misturas de Cal-Hidratada											
	Vt (cm ³)	Ph (g)	h (%)	δ (g/cm ³)	P (g)	Yg (g/cm ³)	Vsolo (cm ³)	Vv	Ys (g/cm ³)	e	n
3% de Cal a 7 dias	120,00	156,33	20,05	2,52	130,22	2,52	51,67	68,33	1,09	1,32	0,57
3% de Cal a 14 dias	120,00	153,23	21,01	2,52	126,63	2,52	50,25	69,75	1,06	1,39	0,58
3% de Cal a 28 dias	120,00	153,03	20,84	2,52	126,64	2,52	50,25	69,75	1,06	1,39	0,58
5% de Cal a 7 dias	120,00	153,94	25,04	2,31	123,11	2,31	53,30	66,70	1,03	1,25	0,56
5% de Cal a 14 dias	120,00	147,01	24,03	2,31	118,53	2,31	51,31	68,69	0,99	1,34	0,57
5% de Cal a 28 dias	120,00	148,46	22,77	2,31	120,93	2,31	52,35	67,65	1,01	1,29	0,56
7% de Cal a 7 dias	120,00	144,78	24,59	2,28	116,21	2,28	50,97	69,03	0,97	1,35	0,58
7% de Cal a 14 dias	120,00	158,47	21,32	2,28	130,62	2,28	57,29	62,71	1,09	1,09	0,52
7% de Cal a 28 dias	120,00	151,66	21,38	2,28	124,95	2,28	54,80	65,20	1,04	1,19	0,54
9% de Cal a 7 dias	120,00	230,34	19,53	2,18	192,70	2,18	88,40	31,60	1,61	0,36	0,26
11% de Cal a 7 dias	120,00	221,96	23,26	2,10	180,07	2,10	85,75	34,25	1,50	0,40	0,29
13% de Cal a 7 dias	120,00	223,22	21,37	2,00	183,92	2,00	91,96	28,04	1,53	0,30	0,23