



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

CAMILA DE SOUZA CONSTANTINO

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE
PAULISTA COM USO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Recife

2018

CAMILA DE SOUZA CONSTANTINO

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE
PAULISTA COM USO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

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

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- C758e Constantino, Camila de Souza.
Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz / - 2018.
97 folhas, il., figs., quads., e tab.
- Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências e Apêndices.
1. Engenharia Civil. 2. Solo não-saturado. 3. Solo expansivo. 4. Estabilização.
5. Cinza de casca de arroz. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-082

CAMILA DE SOUZA CONSTANTINO

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE
PAULISTA COM USO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 28/08/2018

Prof^o. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira - UFPE
(Orientador)

Prof^a. Dr^a Stela Fucale Sukar - UPE
(Examinadora Externa)

Prof^a. Dr^a Maria Isabela Marques Vieira Bello - UFPE
(Examinadora Externa)

Aos meus pais, Creuza e Edilson.

À minha irmã, Bruna.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao professor Silvio Romero, pela confiança, orientação, pela disposição de tempo, conhecimentos e pelo apoio dedicado do início ao fim deste trabalho.

Aos meus familiares, em especial Edilson Constantino (Pai), Creuza Nunes (Mãe) e Bruna Constantino (irmã) pelo apoio incondicional, paciência e incentivo durante todas as fases desse projeto e da minha vida.

Aos meus amigos, pelos sorrisos durante os momentos de diversão e pelo ombro amigo nos momentos difíceis, em especial à Manuela Albuquerque e Amanda Carvalho.

Aos meus colegas geotécnicos, em especial àqueles que hoje são mais que colegas de profissão, que me apoiaram e contribuíram para essa conquista: Bruna Naiane, André Bezerra, Danisete Neto e Andréa Batista.

Agradeço aos professores da área de Geotecnia da Pós-Graduação de Engenharia Civil pelos conhecimentos transmitidos.

Ao CNPQ, pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

À equipe técnica do Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco, Gutemberg, Antônio Brito e professor Joaquim Oliveira, por toda a orientação durante os ensaios realizados para esta pesquisa.

À equipe do Laboratório de Solos da Universidade de Pernambuco, pela disponibilidade dos equipamentos para os ensaios de compressão diametral.

Ao professor Sergio Paiva da Universidade Católica de Pernambuco pelos execução dos ensaios químicos que ajudaram a completar este trabalho.

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

RESUMO

Solos expansivos apresentam variação de volume quando há mudança de umidade devido à presença de argilominerais que facilitam a absorção da água. A engenharia geotécnica estuda o comportamento desses solos e possíveis medidas de mitigação de problemas por eles causados, como o uso de aditivos. Solos expansivos são identificados em várias regiões do mundo e Pernambuco é um dos Estados Brasileiros que apresenta uma significativa presença desse tipo de solo. Existem vários métodos utilizados com o intuito de estabilizar os solos expansivos e a cinza de casca de arroz é um resíduo que pode auxiliar na redução da expansibilidade. A presente pesquisa tem como objetivo caracterizar física, química e mecanicamente o solo expansivo localizado no município de Paulista no Estado de Pernambuco, juntamente com as misturas de solo compactado e cinza de casca de arroz em diferentes percentuais. A metodologia consistiu em realizar ensaios laboratoriais no solo natural e nas misturas solo com cinza de casca de arroz nos percentuais, em peso, de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. A mistura do solo com a cinza de casca de arroz chegou a reduzir em até 80% dos valores de expansão “livre”, 91% da tensão de expansão do solo natural e aumento da resistência à compressão simples e diametral do solo natural para os percentuais de 4%. O percentual de 8% mostrou-se o mais indicado para garantir que não haja danos às edificações.

Palavras-chave: Solo não-saturado. Solo expansivo. Estabilização. Cinza de casca de arroz.

ABSTRACT

Expansive soils present volume variation when there is moisture change due to the presence of clay minerals that facilitate water's absorption. Geotechnical engineering studies the behavior of soils and possible measures to mitigate problems caused by them, such as the use of additives. Expansive soils are identified in several regions of the world and Pernambuco is one of the Brazilian States that presents a significant presence of this type of soil. There are several methods used to stabilize the expansive soils and the rice husk ash is a residue that can help reduce the expandability. The present research has as objective to characterize physically, chemically and mechanically the expansive soil located in the municipality of Paulista in the State of Pernambuco, together with mixtures of compacted soil and rice husk ash in many different percentages. The methodology consisted in carrying out laboratory tests in natural soil and its compound with RHA, substitution, in weight, of 2%, 4%, 6%, 8%, 10%. The mixture of soil and rice husk ash reduced up to 80% the values of "free" expansion, 91% of the natural soil expansion tension and the increased the simple and diametral compression resistance of the natural soil to the percentages of 4%. The percentage of 8% was the most indicated to guarantee that there is no damage to the buildings.

Keywords: Unsaturated soil. Expansive soil. Stabilization. Rice husk ash.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Ocorrência de Solos Expansivos no Mundo	24
Quadro 1 -	Ocorrência de Solos Expansivos no Brasil	25
Figura 2 -	Mapa de suscetibilidade à expansão dos solos no estado de Pernambuco	26
Figura 3 -	Histórico Bibliográfico do Solo Expansivo de Paulista-PE	27
Figura 4 -	Técnicas de melhoramento de solo expansivo	28
Figura 5 -	Áreas de produção de arroz em Pernambuco com destaque da cidade de Cabrobó	30
Figura 6 -	Cinza e Casca do Arroz	32
Figura 7 -	Resquícios de casca de arroz devido a queima não controlada	33
Figura 8 -	Resultado dos ensaios de limites de consistência em diferentes percentuais de CCA, a) limite de liquidez, b) limite de plasticidade, c) índice de plasticidade	35
Figura 9 -	Resultado dos ensaios de limites de consistência em diferentes percentuais de CCA	36
Figura 10 -	Resultado de ensaios de compressão simples	37
Figura 11 -	Resultado de ensaios de compressão simples	37
Figura 12 -	Esquema do programa de Investigação Geotécnica	38
Figura 13 -	Localização da cidade de Paulista	40
Figura 14 -	Dados pluviométricos e de temperatura do município de Paulista-PE	40
Figura 15 -	Características pedológicas do município de Paulista – PE	41
Figura 16 -	Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Paulista: a) Expansão sob tensão, b) Método 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 - Expansão e colapso	42
Figura 17 -	Preparação e armazenamento das amostras	43
Figura 18 -	Ensaio de Sedimentação e Densidade real dos grãos	44
Figura 19 -	Ensaio químicos - definição de PH	45
Figura 20 -	Preparação dos corpos de prova	45
Figura 21 -	Moldagem dos corpos de prova	47
Figura 22 -	Execução do ensaio de compressão simples	48
Figura 23 -	Ensaio de compressão diametral	49
Figura 24 -	Curva granulométrica da cinza de casca de arroz	50
Figura 25 -	Curva de compactação da cinza de casca de arroz	51

Quadro 2 -	Caracterização granulométrica do solo de Paulista e misturas com CCA	52
Figura 26 -	Curva granulométrica do solo natural e misturas	53
Figura 27 -	Critérios utilizados para determinar o potencial de expansão: a) Skempton (1953) e Williams (1957), b) Daksanamurthy e Raman (1973), c) Seed et al. (1962), d) Limites de consistência	55
Figura 28 -	Carta de Plasticidade-Atividade para argilas expansivas de Pernambuco	56
Figura 29 -	Peso específico real dos grãos do solo natural e misturas	56
Figura 30 -	Curva de compactação do solo natural e misturas com CCA	57
Figura 31 -	Variação na umidade ótima e peso específico seco máximo no solo natural e solo-CCA	58
Figura 32 -	Representação gráfica da expansão livre do solo natural e das misturas solo-CCA	62
Figura 33 -	Expansão “livre” segundo critério de Cuellar (1978)	63
Figura 34 -	Percentual de grãos de solo, CCA e água e ar para um mesmo volume de solos e misturas	64
Figura 35 -	Tensão de expansão versus Teor de cinza de casca de arroz	66
Figura 36 -	Expansão “livre” do solo de Paulista/PE e das misturas com adição de CCA, Areia e Cal	68
Figura 37 -	Tensão de Expansão do solo de Paulista/PE e das misturas com adição de CCA, Areia e Cal	70
Figura 38 -	Taxa de redução da tensão do solo natural e misturas com CCA, Cal e Areia	70
Figura 39 -	Redução de Tensão de Expansão (RTE)	71
Quadro 3 -	Resistência à Compressão Simples	73
Figura 40 -	Tensão máxima de ruptura x Teor de Cinza	73
Figura 41 -	Resistência a Compressão Simples do solo e misturas com 0 Dias de Tempo de Cura	74
Figura 42 -	Resistência a Compressão Simples do solo e misturas com 7 Dias de Tempo de Cura	74
Figura 43 -	Resistência a Compressão Simples do solo e misturas com 28 Dias de Tempo de Cura	75
Figura 44 -	Comportamento na ruptura das amostras com 0 dia de cura: a) Solo Puro; b) Solo + 2%; c) Solo + 4%; d) Solo + 6%; e) Solo + 8%; f) Solo + 10%; g) Misturas, h) Tipos de ruptura segundo a ABNT NBR 5739	75

Quadro 4 - Resistência a Compressão Diametral	77
Figura 45 - Compressão diametral em relação ao tempo de cura das amostras	77
Figura 46 - Resultados da compressão diametral para o tempo de cura de 0 dias	78
Figura 47 - Resultados da compressão diametral para o tempo de cura de 7 dias	78
Figura 48 - Resultados da compressão diametral para o tempo de cura de 28 dias	79
Figura 49 - Ensaio de compressão diametral – amostra 0% - 0 dia de cura	79
Figura 50 - Ensaio de compressão diametral – amostra 2% - 0 dia de cura	80
Figura 51 - Ensaio de compressão diametral – amostra 4% - 0 dia de cura	80
Figura 52 - Ensaio de compressão diametral – amostra 6% - 0 dia de cura	80
Figura 53 - Ensaio de compressão diametral – amostra 8% - 0 dia de cura	81
Figura 54 - Ensaio de compressão diametral – amostra 10% - 0 dia de cura	81
Figura 55 - Ensaio de compressão simples – 7 dias de cura	93
Figura 56 - Ensaio de compressão simples – 28 dias de cura	94
Figura 57 - Ensaio de compressão diametral – 7 dias de cura	96
Figura 58 - Ensaio de compressão diametral – 28 dias de cura	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Fatores que influenciam na expansão do solo	18
Tabela 2 -	Situações que influenciam na expansão dos solos	19
Tabela 3 -	Identificação de solos expansivos	21
Tabela 4 -	Critério de Cuellar (1978)	22
Tabela 5 -	Critério de USBR – HOLTZ (1953)	23
Tabela 6 -	Critério de Seed, Woodward e Lundgren (1962)	23
Tabela 7 -	Critério de Cuellar (1978)	23
Tabela 8 -	Critério de Rodriguez e Ortiz (1975)	24
Tabela 9 -	Composição química da cinza da casca de arroz	34
Tabela 10 -	Caracterização física da cinza de casca de arroz	51
Tabela 11 -	Limites de consistência do solo de Paulista e misturas com CCA	54
Tabela 12 -	Valores da umidade ótima e peso específico aparente seco máximo do solo e solo-CCA	58
Tabela 13 -	Resultado das análises químicas do solo de Paulista e misturas com CCA ..	59
Tabela 14 -	Resumo de alguns parâmetros do solo natural e misturas solo-CCA	60
Tabela 15 -	Valores dos percentuais dos óxidos e perda ao fogo	61
Tabela 16 -	Valores de expansão livre no solo natural e misturas solo-CCA	61
Tabela 17 -	Classificação da expansão “livre” segundo dois critérios	63
Tabela 18 -	Resultado da expansão livre de outros autores utilizando Cinza de Casca de Arroz	64
Tabela 19 -	Valores das tensões de expansão obtidas pelo método do volume constante	65
Tabela 20 -	Classificação segundo Jimenez Salas (1980)	66
Tabela 21 -	Valores de Expansão “Livre” do solo de Paulista e misturas solo-CCA, solo-Cal e solo-Areia	67
Tabela 22 -	Valores de Tensão de Expansão do solo de Paulista e misturas solo-CCA, solo-Cal e solo-Areia	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL.....	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	SOLOS EXPANSIVOS	17
2.1.1	Definição	17
2.1.2	Identificação de Solos Expansivos	20
2.1.2.1	Método Indireto – Critério de Skempton (1953)	22
2.1.2.2	Método Indireto – Critério de Cuellar (1978)	22
2.1.2.3	Método Indireto – Critério de USBR - HOLTZ (1953)	22
2.1.2.4	Método Direto – Critério de Seed, Woodward e Lundgren. (1962)	23
2.1.2.5	Método Direto – Critério de Cuellar (1978)	23
2.1.2.6	Método Direto – Critério de Rodriguez e Ortiz (1975)	23
2.1.3	Locais de Ocorrência de Solos Expansivos no Brasil e no Mundo	24
2.2	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS	28
2.3	ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ	29
2.3.1	Cinza de Casca de Arroz (CCA)	29
2.3.2	Propriedades da Cinza de Casca de Arroz	32
2.3.3	Estabilização Solo-Cinza	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO	38
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	39
3.2.1	Solo de Paulista	39
3.2.2	Cinza de Casca de Arroz	42
3.3	MÉTODOS	42
3.3.1	Preparação das amostras	42
3.3.2	Caracterização Física	43
3.3.3	Caracterização Química	44
3.3.4	Caracterização da Expansão	45
3.3.4.1	Ensaio de Expansão “Livre”	46

3.3.4.2	Ensaio de Tensão de Expansão	46
3.3.5	Ensaio de Compressão	47
3.3.5.1	Ensaio de Compressão Simples	48
3.3.5.2	Ensaio de Compressão Diametral	49
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	50
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	50
4.1.1	Caracterização física da cinza de casca de arroz	50
4.1.2	Caracterização física do solo natural e misturas	51
4.1.2.1	Caracterização granulométrica	51
4.1.2.2	Limites de consistência	54
4.1.2.3	Peso específico real dos grãos	56
4.1.2.4	Compactação do solo e misturas	57
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	59
4.3	EXPANSÃO “LIVRE” E TENSÃO DE EXPANSÃO	61
4.3.1	Ensaio de Expansão “Livre”	61
4.3.2	Ensaio de Tensão de Expansão	65
4.3.3	Comparação da Tensão de Expansão do Solo de Paulista com misturas de Cinza de casca de arroz, Areia e Cal	67
4.4	ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	72
4.5	ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	76
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS.....	82
5.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	82
5.2	PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS	84
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A – COMPRESSÃO SIMPLES	91
	APÊNDICE B – COMPRESSÃO DIAMETRAL	94

1 INTRODUÇÃO

Solos expansivos são solos argilosos não saturados que tem seu comportamento relacionado à instabilidade volumétrica ao sofrer variação de umidade ou sucção. O comportamento desses solos caracteriza-se pelo acréscimo de volume (expansão) quando há aumento na umidade e redução de volume (contração) ao perderem umidade.

Destaca-se que o fenômeno de expansão não ocorre em todos os solos argilosos não saturados, e sim naqueles que apresentam em sua composição minerais de argila de estrutura laminar do tipo 2:1 do grupo das vermiculitas e esmectitas, em especial as montmorilonitas. Também se verifica tal fenômeno nos interstratificados de montmorilonita com clorita, ilita e vermiculita.

Ocorrem em diversas regiões do mundo, como Canadá, Estados Unidos, Brasil, China, Turquia, Israel, França. No Brasil, a presença de solos expansivos é identificada em várias regiões, de norte a sul do País.

Segundo Ferreira (2015, p. 415):

“Os solos expansivos são encontrados em várias regiões do país, em especial, no Nordeste, onde aparecem em camadas de formação cretácea, aproximadamente, ao longo do meridiano da Bahia para o norte, até atravessar Pernambuco e Ceará.”

O solo é a base para a maior parte das obras na construção civil e solos que, apresentam instabilidade volumétrica, podem comprometer as construções causando danos ou levando-as à ruína.

Segundo Nelson & Miller (1992), a Sociedade Americana de Engenheiros Civil estima que uma em cada quatro casas tem alguns danos causados por solos expansivos. Em um ano típico, solos expansivos podem causar maior perda financeira para os proprietários do que danos causados por tremores de terra, inundações, tornados e furações combinados.

Na Inglaterra, a Associação de Seguradoras Britânicas estimou que o custo médio com solo expansivo para a indústria de seguros está em mais de 400 milhões de libras por ano (DRISCOLL & CRILLY, 2000). No Brasil não se têm dados específicos dos custos com danos causados por esses solos, quando inundados.

A construção de obras de Engenharia Civil em solos que apresentam instabilidade volumétrica, quando umedecidos, pode causar sérios problemas. Em solos expansivos, em campo, observam-se fissuras ou fendas características, nas estações secas. Já nas

edificações, fissuras diagonais embaixo das janelas e acima das portas ondulações e rupturas nos pavimentos, fissuras generalizadas longitudinais e transversais junto a bueiros, etc. (FERREIRA, 2015).

De maneira a eliminar tais problemas, técnicas de estabilização são adotadas visando melhorar os parâmetros geotécnicos dos solos expansivos. Por exemplo, a remoção do solo expansivo e substituição por outro sem essa característica, adições de cal, cinza volante, cinza de casca de arroz (CCA), cinza de resíduos sólidos, pó de brita, resíduo cerâmico, materiais fibrosos, cloretos (cálcio, potássio, ferro e sódio), entre outros.

A cinza de casca de arroz (CCA), é um resíduo agrícola com característica pozolânica, pois contém sílica e possui grande superfície específica (Adhikary & Jana, 2016). Representa aproximadamente, 20% da produção de arroz (Habeeb & Mahmud, 2010). Como o Brasil é responsável por produzir 10,6 milhões de toneladas de arroz anualmente, segundo FAO (2016), a produção desse resíduo torna-se significativa e um problema ambiental a ser resolvido.

O acréscimo de cinza de casca de arroz desenvolve a formação de compostos cimentícios no solo ao reagir com o hidróxido de cálcio, em função das suas características pozolânicas. A atividade da CCA é a principal responsável pela estabilização do solo expansivo, pois está relacionada ao quanto a sílica constituinte reage com hidróxido de cálcio (CaOH). A pozolana auxilia na formação de compostos cimentícios no solo ao reagir com o hidróxido de cálcio (CaOH), (Alhassan, 2008).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa consiste em analisar o comportamento geomecânico de um solo expansivo do município de Paulista-Pe no seu estado natural deformado e misturado com cinza de casca de arroz (CCA).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física, química e mecanicamente o solo natural e suas misturas solo com cinza de casca de arroz;
- Identificar qual o teor em percentual de peso mais apropriado para a estabilização do solo;

- Analisar a contribuição do tempo de cura nas características de expansividade do solo com adição de CCA;
- Comparar o comportamento do solo estabilizado com a CCA estudada com a literatura.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No item 1 é apresentado um breve resumo acerca dos solos expansivos e a importância da sua identificação e o melhoramento para a Engenharia Civil. Também são apresentados os objetivos dessa pesquisa.

No item 2, é realizada a revisão bibliográfica que dará suporte e justifica o estudo do solo expansivo, métodos de identificação, melhoramento e procedimentos utilizados para análise do solo natural e misturas solo-CCA.

No item 3, são exibidos os materiais e métodos adotados. É apresentado o programa de investigação do solo e das misturas, os materiais utilizados e os métodos baseados nas normas e literatura.

No item 4, os resultados encontrados serão apresentados os ensaios de caracterização Física (granulometria, limites de consistência, umidades e densidades); caracterização Química, Fluorescência de Raio-x, Expansão “Livre”, Tensão de Expansão, Compressão Simples e Compressão Diametral. Os resultados serão discutidos através de dados encontrados na literatura.

No item 5, apresentam-se as principais conclusões desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item, é realizada uma revisão da literatura sobre o tema, sendo dividida em três partes. A primeira parte aborda os solos expansivos e a forma de identificação. Na segunda parte são descritos alguns métodos para estabilização dos solos expansivos. Por fim, a terceira parte discorre sobre a cinza de casca de arroz, suas propriedades e influência nos solos expansivos.

2.1 SOLOS EXPANSIVOS

A seguir é apresentado um breve resumo a respeito da definição e identificação de solos expansivos.

2.1.1 Definição

Solos expansivos são solos argilosos não saturados que tem seu comportamento relacionado à instabilidade volumétrica ao sofrer variação de umidade ou sucção. Segundo Frascá & Sartori (1998), solos expansivos aumentam de volume quando a umidade cresce e diminui quando há a perda de umidade, devido a presença de argilominerais expansivos como a montmorilonita e a vermiculita, pois facilitam a adsorção de moléculas de água entre as cadeias tetraédricas e octaédricas.

Para Pereira (2004), um solo é considerado expansivo quando apresenta variação e volume superior a 1%, sendo resultante da mudança de umidade ou sucção, onde esse aumento é ocasionado apenas pela alteração da umidade, sem qualquer variação nas cargas aplicadas nesse solo.

A atividade expansiva do solo se manifesta quando o equilíbrio entre a umidade do solo com a transpiração da vegetação, evaporação do terreno e a ascensão capilar da água é temporariamente interrompido, seja pela ação antrópica ou por fatores naturais (FERREIRA, 1988).

A expansão de um solo pode ser devido a alterações estruturais ou devido a sua composição mineralógica. A primeira geralmente devido a um alívio de carga ou pelo aumento da umidade, ocorrendo em solos ricos em minerais não expansivos como a caulinita ou em solos ricos em minerais expansivos como a montmorilonita. Ocorrendo a

expansão em consequência da entrada de água entre as camadas do mineral influenciadas pelas variações de energia externa como interna e principalmente, pela composição química e arranjo estrutural que é característica de cada mineral de argila expansivo (CAMPOS et al 2008 apud PAIVA, 2016).

Os solos expansivos, por sofrerem variação de volume, experimentam em períodos de estiagem uma aparência bastante fissurada, causada pela contração 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 et al., 2006).

Nas Tabelas 01 e 02 são apresentados alguns dos fatores e situações que podem influenciar no mecanismo de contração e expansão dos solos.

Tabela 1 - Fatores que influenciam na expansão do solo.

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

Fonte: Nelson; Miller, 1992 apud Paiva (2009).

Tabela 2 - Situações que influenciam na expansão dos solos.

FATOR	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
1.0 – Condições de umidade inicial	Um solo expansivo ressecado terá uma elevada afinidade por água ou sucção elevada, enquanto o mesmo com elevado teor de umidade diminuirá a sucção. De modo inverso, um perfil de solo úmido perderá umidade mais rápido do que um perfil de solo inicialmente seco.	_____
2.0 – Variações de umidade	Variações de umidade na parte superior do perfil próximo a zona de ativa definem principalmente os levantamentos. É nestas camadas que ocorrerão extensas variações de umidade e volume.	Johnson, (1978)
2.1 – Clima	A quantidade e variação de precipitação e evapotranspiração influenciam fortemente a umidade e o perfil devido às variações climáticas. Em climas semiáridos ocorrem levantamentos periódicos devido aos curtos períodos de chuva.	Holland; Lawrence, (1980)
2.2 – Água no subsolo	Lençóis rasos de água fornecem uma fonte de umidade e lençóis de águas superficiais contribuem para o aumento da umidade.	_____
2.3 – Drenagem e fontes de águas superficiais	Estruturas de drenagem superficiais, como por exemplo, tubulações, canaletas, etc., próximas a fundações de casas, podem se tornar uma fonte de água superficial. Vazamento de tubulações pode umidificar o solo até grandes profundidades.	Donaldson, (1965)
2.4 – Vegetação	Árvores, arbustos e gramas retiram a umidade do solo por transpiração, e tornam dificilmente úmido o solo para os variados tipos de vegetação.	Buchley, (1974)
2.5 – Permeabilidade	Camadas com elevada permeabilidade particularmente devido a fissuras, de rachaduras na massa do solo, permite uma rápida migração de água e promove uma rápida velocidade de expansão.	Wise; Hudson, (1971); Debruijin, (1965)
2.6 – Temperatura	Aumentos de temperatura causam a difusão de umidade para áreas mais frias abaixo de pavimentos e edifícios.	Johnson, (1978); Hamilton, (1969)
3.0 - Condições de tensão		
3.1 - Histórias de tensões	Um solo sobreadensado é mais expansivo que um solo com igual índice de vazios, porém normalmente adensado. Pressões de expansão podem aumentar com o envelhecimento de argilas compactas, mas o valor de expansão sob pequenos carregamentos não tem demonstrado ser afetado pelo envelhecimento de argilas compactas. Repetidos ciclos de umedecimento e secagem tendem, a reduzir a expansão em amostras de laboratórios, mas após um certo número de ciclos, a expulsão não é afetada.	Mitchell, (1976); Kassif; Baker, (1971)
3.2 – Condições in situ	O estado de tensão inicial no solo pode ser estimado a fim de avaliar as prováveis consequências do carregamento sob a massa de solo e/ou alteração do ambiente inerente a umidade. As tensões efetivas iniciais podem ser grosseiramente determinadas através de amostragem e testes em laboratório, ou por medidas e observações in situ.	_____

Fonte: Nelson; Miller, 1992 apud Paiva (2009).

Tabela 02 – Situações que influenciam na expansão dos solos. Fonte: Nelson; Miller, 1992 apud Paiva, 2009. (Continuação)

3.3 – Carregamento	A grandeza de sobrecarga aplicada influi quantitativamente na mudança de volume que ocorrerá, para um, dado teor de umidade e densidade. Uma carga externa aplicada atua para balanceamento das forças repulsivas entre partículas e reduzindo a expansão.	Holtz, (1953)
3.4 – Perfil do solo	A espessura e posição da camada potencialmente expansiva influencia consideravelmente no momento do solo. Os maiores movimentos ocorrem em perfis que tem argilas expansivas desde a superfície até a região abaixo da zona ativa. Movimentos menores ocorreram se o solo expansivo for recoberto por material não expansivo ou leito rochoso superficial.	Holland; Lawrence, (1980)

Fonte: Nelson; Miller (1992) apud Paiva (2009).

2.1.2 Identificação de Solos Expansivos

A atração superficial das partículas, a hidratação de cátions e a repulsão osmótica, são os mecanismos físico-químicos que determinam o potencial expansivo de um argilomineral (SNETHEN et al, 1977).

A identificação da expansividade de um solo pode ser avaliada de duas formas: a primeira é uma pesquisa no local, verificando vários fatores como topografia, vegetação, sinais de contração no solo, fissuras nas edificações e dados com os moradores da região. A segunda forma é interpretar os ensaios de laboratório dos métodos de identificação que pode ser na forma de ensaios mineralógicos, métodos diretos e indiretos (PAIVA, 2009).

Para o solo ser expansivo deve ter características mineralógicas que são: argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1, combinação de duas folhas tetraédricas (Te) e uma folha octaédrica (Oc), principalmente do grupo esmectitas, nas montmorilonita e vermiculita verifica-se uma maior instabilidade volumétrica, além dos interstratificados de montmorilonita como a clorita, ilita e vermiculita ou até mesmo de outros minerais, como a haloisita também apresentam capacidade de expansão, porém mais limitada (FERREIRA, 1995).

Os argilominerais são minerais que apresentam estrutura bastante complexa, tendo comportamento diferente na presença da água. A composição química das argilas apresenta duas estruturas, a primeira de tetraedros organizados num plano com o silício ligado a quatro átomos de oxigênio, formando o SiO₂ e a segunda, de octaedros formados com alumínio ligados em volta com átomos de oxigênios ou hidroxilas, formando o íon [Al(OH)₃] (PINTO, 2013; MELLO et al. 2011).

Além dos interestratificados de montmorilonita com a clorita, illita e vermiculita ou até de outros minerais, como a halosita também exibem capacidade de expansão, porém mais limitada (FERREIRA, 1995).

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

Há dois métodos utilizados para a identificação de solos expansivos: métodos indiretos e diretos, Tabela 03. Os métodos indiretos consistem na realização de ensaios de laboratórios, tais como ensaios de granulometria, ensaios químicos, mineralógicos e limites de Atterberg. Os métodos diretos, são métodos que utilizam os parâmetros de Expansão Livre e Tensão de Expansão. Esses parâmetros são identificados em ensaios de laboratório, onde a expansão pode ser induzida ou impedida.

Tabela 3 - Identificação de solos expansivos.

Métodos	Subdivisão	Base para a definição do critério	Referências Bibliográficas
INDIRETOS	Identificativos	Difração de raio-X	Carcedo et al, (1986)
		Microscopia Eletrônica de varredura	Fink et al. (1971)
	Qualitativos	Analise termodiferencial	
Analise Físico-químicos			
		Capacidade de troca de Cátions (CTC)	
		Analise por sedimentação Coloidal	
		Granulometria	Priklonskij, (1952) Skempton(1953)
		Geomorfologia	Seed et al. (1962); Van Der Merwe (1964); Chen (1965); USBR (1953)
		Pedologia	Vijayverviya e Ghazzaly.(1973);
		Identificação visual	Rodriguez Ortiz (1975); Ranganathan e Satyma(1965)
	Orientativos	Geologia, Pedologia;	Patrick e Sneath (1976); Carcedo et al. (1986); Ferreira (1990 e 1993);
		Geomorfologia, Identificação visual. Baseado no estado do solo (Umidade natural e Saturação)	

		Baseado nas características organolépticas (Aspectos e Estruturas)	
DIRETOS	Avaliativos	Ensaio de expansão de Lambe Índices Endométricos	Lambe (1960)
	quantitativos	Ensaio de expansão livre e pressão de expansão	Seed et al., (1960); Chen(1965) Vijayverviya e Ghazzaly.(1973);
		Ensaio edométricos simples e duplos	Rodriguez Ortiz (1975); Cuellar (1978) Jimenez Salas (1980);
		Ensaio edométricos com sucção controlada	Escario (1967 e 1969) Aitchison et al., (1974); Johnson (1978);Mc Keen, (1980).

Fonte: Ferreira (1995).

2.1.2.1 Método Indireto – Critério de Skempton (1953)

Define a atividade coloidal de uma argila com o índice de atividade (I_a). Quanto maior a quantidade de argila mais alto é potencial de expansão.

Equação 2.1

$$I_a = \frac{IP}{\% < 0,002 \text{ mm}}$$

$I_a > 2,00$	Muito ativo
I_a entre 1,15 e 2,00	Ativo
I_a entre 0,75 e 1,25	Pouco ativo
$I_a > 0,75$	Inativo

2.1.2.2 Método Indireto – Critério de Cuellar (1978)

Através de argilas expansivas da Espanha, relacionam o limite de contração (WC) e o índice de plasticidade (IP).

Tabela 4 - Critério de Cuellar (1978).

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

2.1.2.3 Método Indireto – Critério de USBR - HOLTZ (1953)

Classifica o grau de expansão de um solo segundo o índice de plasticidade (IP), o limite de contração (WC) e o percentual de coloides menores que 0,001 mm.

Tabela 5 - Critério 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

2.1.2.4 Método Direto – Critério de Seed, Woodward e Lundgren. (1962)

Correlaciona a expansão “livre”, para amostras compactadas na umidade ótima e densidade máxima, com uma tensão vertical de 7 kPa com o grau de expansividade do solo.

Tabela 6 - Critério de Seed, Woodward e Lundgren (1962).

Expansão Livre (%) pressão 7 kPa > 25	Muito alta
Expansão Livre (%) pressão 7 kPa entre 5 - 25	Alta
Expansão Livre (%) pressão 7 kPa entre 1 - 5	Média
Expansão Livre (%) pressão 7 kPa entre 0 – 1	Baixa

2.1.2.5 Método Direto – Critério de Cuellar (1978)

Baseado em análises de argilas expansivas, é realizada uma relação entre a tensão de expansão e o inchamento livre da amostra compactada à densidade máxima e umidade ótima, sendo a amostra ressecada ao ar.

Tabela 7 - Critério de Cuellar (1978).

Tensão de Expansão (kPa)	Expansão Livre % (1)	Expansão Livre % (2)	Grau de Expansividade
> 300	> 10	> 30	Muito Alta
125 – 300	5 - 10	20 - 30	Alta
25 – 125	1,5 - 5	10 - 20	Média
< 25	< 1,5	< 10	Baixa

(1) Amostra compactada a densidade máxima e umidade ótima

(2) Amostra ressecada ao ar

2.1.2.6 Método Direto – Critério de Rodriguez e Ortiz (1975)

A partir dos critérios práticos de expansividade de diferentes autores.

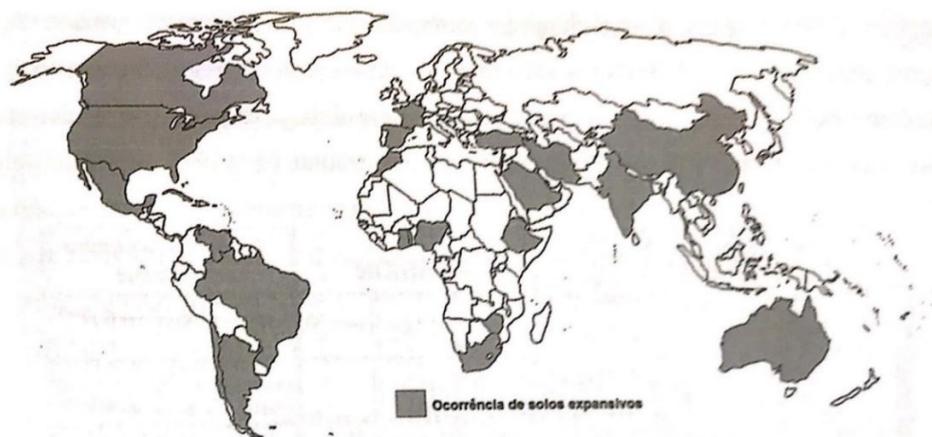
Tabela 8 - Critério de Rodriguez e Ortiz (1975).

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

2.1.3 Locais de Ocorrência de Solos Expansivos no Brasil e no Mundo

O estudo dos solos expansivos vem sendo amplamente desenvolvido devido os diversos danos que os mesmos podem causar à estabilização de residências e estruturas diversas. Segundo Paiva (2016), companhias de seguro gastam milhões de dólares todos os anos para reparar lares afetados por solos expansivos. Chen (1975) apresentou em seu estudo a ocorrência de solos expansivos em todo o mundo como: México, Marrocos, Cuba e Turquia. Arábia Saudita, Brasil, Chile, China, França, Nigéria e Zimbabwe foram citados nos estudos de Mahler (1994). Quispe, et al (2014) acrescenta a essa lista países como Nova Zelândia, África Meridional, Estados Unidos, Costa Rica, Canadá, Israel, Colômbia e Equador.

Figura 1 - Ocorrência de Solos Expansivos no Mundo



Fonte: Santos (2015).

A ocorrência de solos expansivos no Brasil se dá em diversas regiões. Ferreira (2012) realizou um levantamento da ocorrência de solos expansivos no Brasil e identificou solos expansivos nas regiões Sul-Sudeste, nos Estados do Paraná, São Paulo e Santa Catarina, Região Central, como Mato Grosso e em Estados da região Nordeste, como Pernambuco, Bahia, Sergipe, Ceará e Maranhão, Quadro 01.

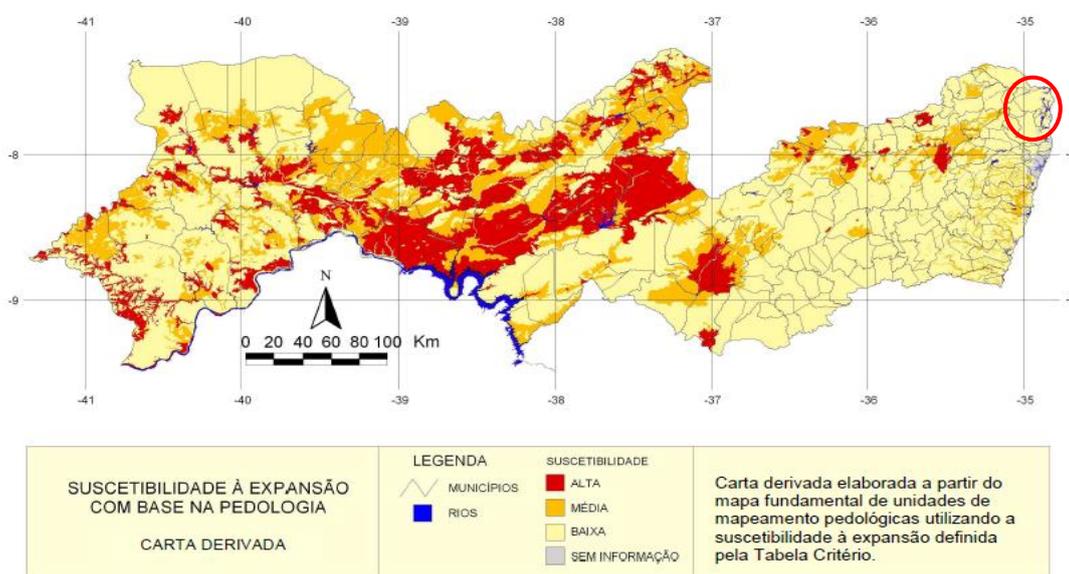
Quadro 1 - Ocorrência de Solos Expansivos no Brasil.

Nº	Local	Referência	Origem/ Solo/ Classe Pedológica
1	Paulo Dutra - MA	FERREIRA (1988)	-----
2	Parelhas - RN	LINS et al. (1986)	Formação Seridó
3	Carnaíba - PE	FERREIRA (1988)	Compl. Monteiro/Bruno N-Cálcico
4	Afrânio - PE	FERREIRA (1989)	Grupo Salgueiro/Cachoeirinha/Areia Quartzosa/Bruno não Cálcico
5	Petrolina - PE	FERREIRA (1989)	Grupo Salgueiro/Areia Quartzosa/Bruno não Cálcico
6	Cabrobó - PE	FERREIRA (1989)	Complexo Presidente Juscelino/Bruno não Cálcico
7	Salgueiro - PE	FERREIRA (1989)	Bruno não Cálcico
8	Serra Talhada - PE	FERREIRA (1989)	Complexo Monteiro/Bruno não Cálcico
9	Petrolândia - PE	FERREIRA (1989)	Areia Quartzosa
10	Ibimirim - PE	FERREIRA (1989)	Bruno não Cálcico
11	Pesqueira - PE	SILVA e FERREIRA (2007)	Planossolo
12	Nova Cruz - PE	FERREIRA (1997)	Formação Barreiras
13	Paulista - PE	FERREIRA (1989)	Formação Maria Farinha
14	Olinda - PE	COSTA NUNES et al. (1982)	Formação Maria Farinha/Silticos
15	Olinda - PE	JUCA et al. (1992)	Formação Maria Farinha
16	Cabo - PE	COSTA NUNES et al. (1982)	Rochas Extrusivas Básicas
17	São Francisco - PE	LEITE e FERREIRA (2012)	Sedimento do Recôncavo, Tucano e Jatobá.
18	Suape - PE	FERREIRA et al. (2012)	Formação Maria Farinha do Grupo Barreiras
19	Reservatório de Itaparica - PE - BA	SIGNER et al. (1989);	Silticos e Argilitos
20	Reservatório de Itaparica - PE - BA	SANTOS e MARINHO (1990)	Sedimentos da Bacia do Jatobá da Formação Aliança
21	Maceió - AL	FERREIRA (1988)	Bruno não Cálcico
22	Aracaju - SE	CAVALCANTE (2007)	Formação Calimbi
23	Juazeiro - BA	FERREIRA (1989)	Grupo Salgueiro
24	Recôncavo Baiano - BA	SIMÕES e COSTA FILHO (1981)	Grupos Ilha e Santo Amaro e Formação São Sebastião/ Vertissolo
25	Baía de Aratu - BA	BARRETO et al. (1982)	Vertissolo
26	Feira de Santana - BA	PRESA (1986)	Solos Residuais/Vertissolo
27	Recôncavo Baiano - BA	SIMÕES (1986)	Grupos Ilha e Santo Amaro e Formação São Sebastião/ Vertissolo
28	Salvador - BA	PRESA (1986)	-----
29	Cuiabá - MT	RIBEIRO JÚNIOR et al (2006)	Grupo Cuiabá / Filito
30	Campinas - SP	SÂMARA (1981)	Podzólico
31	Sudeste de SP e PR	VARGAS et al (1989)	Formação Tubarão
32	Curitiba - PR	PEREIRA e PEJON (2004)	Formação Guabirotuba
33	Porto Alegre - RS	VARGAS et al (1989)	Formação Rosário do Sul
34	Laranjeiras - SE	GUSMÃO FILHO et al (2002)	Formação Barreiras
35	N. S. do Socorro - SE	GUSMÃO FILHO et al (2002)	Formação Barreiras
36	Grajaú - MA	GUSMÃO FILHO et al (2002)	-----
37	Agrestina - PE	SILVA (2018)	-----
38	Brejo da Madre de Deus - PE	BEZERRA (2018)	-----
39	Bonito - PE	SILVA, T. C. R. (2018)	-----
40	Sta. Maria da Boa Vista - PE	MARINHO (2018)	-----

Fonte: Adaptado de Ferreira et al (2012).

Pernambuco apresenta solos expansivos em várias cidades, sendo essas do sertão ao litoral do Estado. Devido a impossibilidade de se realizar estudos de expansividade em diversos pontos de todas as cidades de Pernambuco, Amorim (2004) desenvolveu o mapa de suscetibilidade de solos expansivos em Pernambuco com seu grau de expansibilidade, utilizando informações geológicas, pedológicas, climatológicas e o conhecimento geotécnico do estado de Pernambuco, classificando como alto, médio e baixo. A partir do mapeamento apresentado por Amorim (2004), é possível identificar os locais que requerem maior atenção durante a investigação geotécnica preliminar às construções, Figura 02.

Figura 2 - Mapa de suscetibilidade à expansão dos solos no estado de Pernambuco.



Fonte: Amorim (2004).

Cidades como Olinda, Paulista, Recife e Petrolândia, são as que apresentam os maiores valores de tensão de expansão. O solo do município de Paulista tem sido amplamente estudado ao longo dos últimos anos. Moraes (2017) apresenta em seu estudo o histórico bibliográfico do solo expansivo de Paulista, onde pode-se destacar diversos autores como, Paiva (2009), Justino da Silva (2016), Jucá (1992), dentre outros. Após a publicação de Moraes (2017) novos trabalhos a respeito do solo de Paulista foram produzidos, Figura 03.

Figura 3 - Histórico Bibliográfico do Solo Expansivo de Paulista-PE.

1992 • **Jucá, José Fernando Thomé et al.** Laboratory and field tests on an expansive soil in Brazil. 7th International Conference on Expansive Soils - Dallas - Texas.

1994 • **Bastos, Edinalva Gomes.** Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva do Litoral Norte de Pernambuco. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande - PB.

2001 • **Justino da Silva, José Maria.** Variação Volumétrica de uma argila contráctil-expansiva não saturada submetida a diferentes condições climáticas. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo - São Paulo - SP.

2002 • **Justino da Silva, José Maria.** Um Processo Simples para Extração de Amostra Indeformada Tipo "Shelby" em Argila Fissurada. Artigo Científico - Cobramseg 2002 - São Paulo - SP.

2004 • **Justino da Silva, José Maria.** Caracterização física, química e mineralógica de um depósito de argila expansiva e sua relação com o comportamento de deformação. Artigo Científico - São Carlos - SP.

2004 • **Justino da Silva, José Maria.** Medidas de campo e de laboratório da variação de volume em um solo expansivo não saturado. Artigo Científico - São Carlos - SP.

2008 • **Santos, Gerson Marques dos.** Estudo do comportamento histerético de uma argila expansiva não-saturada. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco - Recife - PE.

2009 • **Paiva, William de.** Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Pernambuco - Recife - PE.

2013 • **Delmiro, Thayse Dayse.** Aplicações dos Solos na Construção Civil: Avaliação da Expansão Livre e Tensão de Expansão. Relatório de Iniciação Científica - Universidade Católica de Pernambuco - Recife - PE.

2016 • **Paiva, Sérgio 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 - Universidade Federal de Pernambuco - Recife - PE.

2016 • **Justino da Silva, José Maria.** Acompanhamento Sazonal do Movimento do Terreno e da Umidade de um Depósito de Argila Expansiva Não Saturado. Artigo Científico - Cobramseg 2016 - Belo Horizonte - MG.

2017 • **Cavalcanti, Luiza Cardoso.** Estabilização Granulométrica de uma Argila Expansiva de Paulista-PE. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Católica de Pernambuco - Recife - PE.

2017 • **Morais, Joanderson James Oliveira.** Caracterização Geotécnica da Expansividade de um Solo Argiloso do Município de Paulista-PE. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco - Recife - PE.

2018 • **Morais, Joanderson James Oliveira.** Identification and classification of an expansive soil of Paulista in Pernambuco, Brazil. Artigo Científico - UNSAT 2018 - Hong Kong - China.

2018 • **Constantino, Camila de Souza et al.** Influência da Adição de Cinza de Casca de Arroz, Areia e Cal em Solo Expansivo no Município de Paulista/Brasil. Artigo Científico - 16^o CNG - Ponta Delgada - Portugal.

2018 • **Constantino, Camila de Souza et al.** 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. Artigo Científico - 16^o CNG - Ponta Delgada - Portugal.

2018 • **Constantino, Camila de Souza et al.** Comportamento Geomecânico de um Solo Expansivo no Município de Paulista no Estado de Pernambuco com a adição de Cal, Areia e Cinza de Casca de Arroz. Artigo Científico - 19^o COBRAMSEG - Salvador - Brasil.

Fonte: adaptado de Moraes (2017).

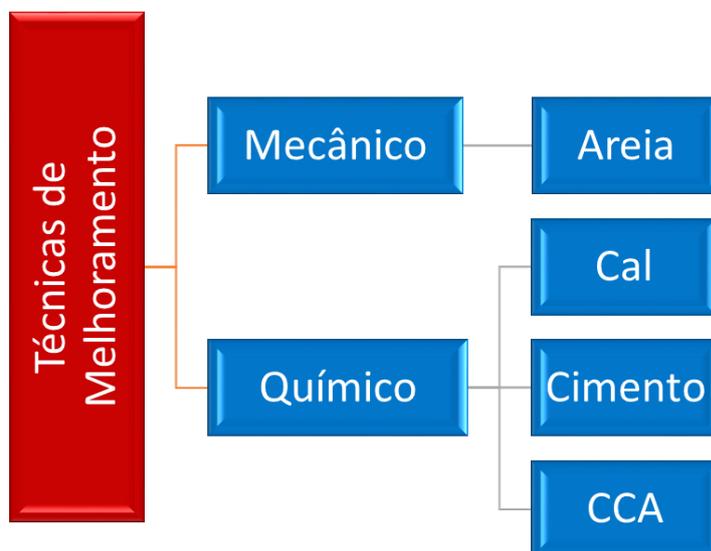
2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS

Técnicas de estabilização são adotadas visando melhorar as características geotécnicas dos solos expansivos. Tais técnicas são as que permitem obter efetivamente melhores resultados na estabilização de solos expansivos, pois técnicas preventivas como impermeabilização da área em que será construída a obra, apenas tem a missão de evitar possíveis problemas, não garantindo solução definitiva para a obra, visto que danos à camada impermeabilizante possibilitam a infiltração de água e conseqüentemente à variação de volume do solo.

Executar obras de Engenharia Civil sobre solos com potencial de expansão sem utilizar técnicas para a melhoria destes pode gerar diversos problemas às construções, como trincas diagonais, ondulações e fissuras em trechos rodoviários, causadas pelos movimentos diferenciais do solo.

A escolha do método a ser utilizado deve levar em consideração as particularidades de cada solo e a necessidade da obra a ser realizada. Fatores econômicos, características do solo, objetivo da construção a ser realizada são os principais itens a serem analisados na definição do método.

Figura 4 - Técnicas de melhoramento de solo expansivo.



Fonte: A autora, 2018.

Entre os métodos de estabilização citados por Baptista (1976), pode-se empregar o processo físico de adição de areia, a fim de se obter um produto de estabilidade

volumétrica superior ao solo original, com aumento da fração grossa e redução da parcela fina do solo.

É possível ainda aplicar o processo químico de estabilização através da adição de outros materiais de modo alterar as propriedades do solo por meio de reações físico-químicas, tais como cimento, cinza de casca de arroz e cal hidratada. A adição de cimento portland ao solo proporciona ganho de resistência mecânica à mistura e menor susceptibilidade à água, após a hidratação do cimento (INGLES e METCALF, 1972). O acréscimo de cinza de casca de arroz desenvolve a formação de compostos cimentícios no solo ao reagir com o hidróxido de cálcio, em função das suas características pozolânicas.

Por sua vez, a cal tem propriedades físico-químicas capazes de conferir aos solos mudanças na microestrutura das partículas dos mesmos, através de mecanismo de troca catiônica, floculação, compressão da dupla camada elétrica, assim como reações de cimentação pozolânicas e a carbonatação (BARBOSA, 2013).

Ainda há a possibilidade de realizar a estabilização mecânica dos solos. 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. Processos como a compactação do solo alteram o arranjo das partículas do solo ou sua granulometria. A redução do volume devido a compactação também tem relação com o ganho de resistência do mesmo, reduzindo sua expansão.

2.3 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ

A seguir, será apresentada a cinza de casca de arroz (CCA), suas propriedades e características.

2.3.1 Cinza de Casca de Arroz (CCA)

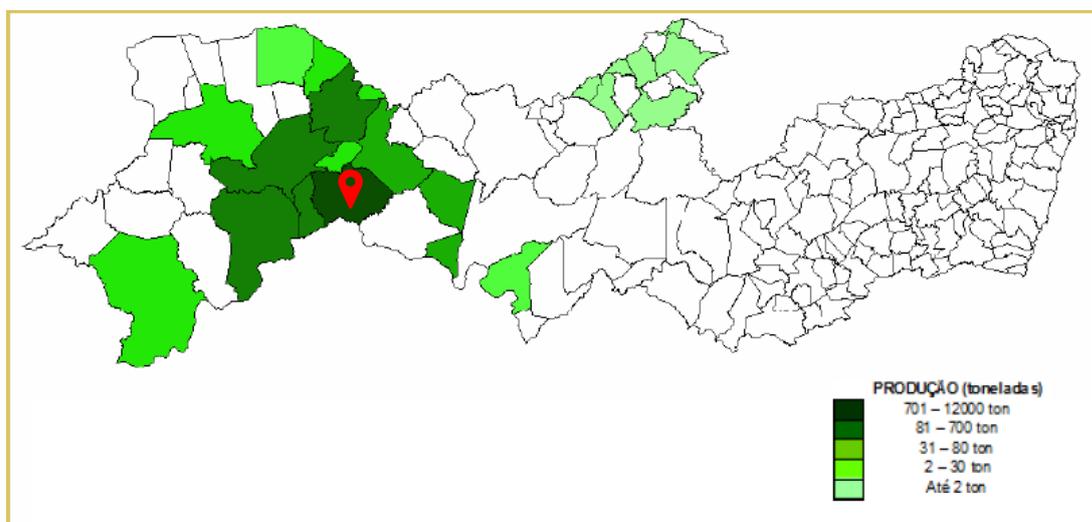
O arroz é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, caracterizando-se como o principal alimento de mais da metade da população mundial. Somente na Ásia, de 60 a 70% do consumo calórico de mais de 2 bilhões de pessoas é proveniente do arroz e seus subprodutos de acordo com a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2004). A produção mundial estimada do grão

é mais de 475 milhões de toneladas, sendo 8,3 milhões de toneladas produzidas no Brasil (USDA/FAS, 2015 apud A cultura do arroz, CONAB, 2015).

O arroz beneficiado é o produto maduro que foi submetido a algum processo de beneficiamento e se encontra desprovido, no mínimo, da sua casca. O arroz parboilizado é o produto que foi submetido à parboilização, que consiste em um processo hidrotérmico – anterior às etapas de descasque e polimento – no qual o arroz em casca é imerso em água, a uma temperatura acima de 58°C, seguido de gelatinização parcial ou total do amido e secagem. Neste processo, algumas substâncias hidrossolúveis, como vitaminas e minerais, são transportadas para o centro do grão, aumentando o valor nutritivo deste arroz em relação ao polido. O arroz parboilizado é disponibilizado na forma de parboilizado polido e parboilizado integral (BRASIL, 2009; FERREIRA; YOKOYAMA, 1999, apud A cultura do arroz, CONAB, 2015).

O cultivo de arroz no estado de Pernambuco possui a finalidade de atendimento ao mercado local. O consumo aparente per capita anual para o estado de Pernambuco estimado é de 13,3 quilogramas de arroz (WANDER; CHAVES, 2011). O arroz produzido no estado de Pernambuco concentra-se na mesorregião do São Francisco, devido a disponibilidade de irrigação além da utilização de cultivares mais produtivos e resistentes a pragas e doenças, contrastando com as demais regiões produtoras. A cidade de Cabrobó é uma das grandes produtoras da região, responsável por cerca de 90% da produção estadual. Pernambuco representa apenas 0,09% da área produtiva no país (IBGE, 2015), Figura 5.

Figura 5 - Áreas de produção de arroz em Pernambuco com destaque da cidade de Cabrobó.



Fonte: IBGE (2015).

Houston (1972) descreve diversas formas de utilização na agricultura ou na indústria para a cinza de casca de arroz. A utilização como pozolana é só uma das muitas possibilidades. Beagle & Beagle (apud Houston, 1972) afirmam que cinzas contendo pouco ou nenhum carbono residual possuem muitos usos potenciais adicionais. Os autores listam mais de 30 outras possíveis formas de utilização que vão desde o uso para correção do solo até o uso como abrasivo na fabricação de pasta de dente.

Hoje em dia, a casca do arroz é utilizada na geração de energia e produção de vapor, como também na confecção de tijolos, e seu resíduo, o objeto de estudo desta pesquisa, a CCA, é utilizada como adição no cimento Portland, em pneus, em cerâmicas e até em áreas como a eletrônica.

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. Eles dizem que ao final deste processo, há uma geração elevada de cinza e que é comum ser descartada de forma inadequada.

A casca de arroz é constituída de quatro camadas fibrosas, esponjosas ou celulares, que são altamente silicosas. Acredita-se que a sílica da casca de arroz exista na forma opalina (a opala é uma fase hidro-amorfa da sílica). Aparentemente, a sílica é transportada a partir do solo pela planta como ácido monossílico, o qual concentra-se na casca e no caule da planta por evaporação da água e, finalmente, se polimeriza para formar a membrana sílico-celulósica (HOUSTON, 1972).

Devido a necessidade de se buscar fontes alternativas de energia renovável e a crise energética mundial, a cinza da casca de arroz vem sendo material de pesquisa para o aproveitamento da casca de arroz como combustível vegetal. A elevada produção do arroz no Brasil e no mundo, o volume da casca do arroz é significativo e a sua queima no processo de energia gera uma grande quantidade de resíduo, a cinza de casca de arroz.

A adição de cimento portland ao solo proporciona ganho de resistência mecânica à mistura e menor susceptibilidade à água, após a hidratação do cimento (INGLES E METCALF, 1972). O acréscimo de cinza de casca de arroz desenvolve a formação de compostos cimentícios no solo ao reagir com o hidróxido de cálcio, em função das suas características pozolânicas. Assim, a utilização da cinza de casca de arroz (CCA), vem sendo estudada como aditivo a solos expansivos no intuito de estabilizar os solos a partir das reações pozolânicas geradas a partir do elevado percentual de sílica na cinza.

2.3.2 Propriedades da Cinza de Casca de Arroz

A CCA é um resíduo agrícola com característica pozolânica, pois contém sílica e possui grande superfície específica (ADHIKARY & JANA, 2016). Representa aproximadamente, 20% da produção de arroz, Habeeb & Mahmud (2010) apud Bezerra, Izabelle M. T. et al (2011), como o Brasil é responsável por produzir 10,6 milhões de toneladas de arroz anualmente, segundo FAO (2016) a produção desse resíduo torna-se significativa e um problema ambiental a ser resolvido, Figura 6.

Figura 6 - Cinza e Casca do Arroz.



Fonte: Google (2018).

A atividade da CCA é a principal responsável pela estabilização do solo expansivo, pois está relacionada ao quanto a sílica constituinte reage com hidróxido de cálcio (CaOH) e, segundo Vinh (2012), quanto menor a partícula de CCA, maior será a superfície específica e, conseqüentemente, maior o índice de atividade pozolânica. Por sua vez, a pozolana auxilia na formação de compostos cimentícios no solo ao reagir com o hidróxido de cálcio (CaOH) (ALHASSAN, 2008).

Na cinza amorfa com características pozolânicas, fatores como temperatura de queima, taxa de aquecimento, tempo de residência e ambiente de queima (disponibilidade de oxigênio), são responsáveis pela reatividade da cinza, pois influenciam na forma

estrutural da sílica, na superfície específica das partículas e no teor de carbono remanescente (CORDEIRO et al., 2009b). A superfície específica da CCA tem grande influência na atividade pozolânica em virtude de estar diretamente correlacionada à finura do material, afetando o grau de atividade pozolânica; este comportamento é influenciado pela distribuição, forma e rugosidade superficial das partículas e pela distribuição dos poros existentes (TIBONI, 2007, apud BEZERRA, IZABELLE M. T. et al, 2011).

Vários estudos foram conduzidos com o intuito de determinar as condições de queima mais adequadas para a produção de cinza da casca de arroz com alta reatividade (JAMES; SUBBA RAO, 1986; HANAFI et al., 1980; MEHTA; PITT, 1976; SUGITA, 1994).

A casca de arroz pode ser queimada sem controle (de forma livre) ou com temperatura controlada. Durante a queima, a água e matéria orgânica são evaporadas, havendo assim uma redução na massa do material. Além da cinza gerada no processo de queima, rica em sílica, parte da matéria orgânica não consegue ser 100% eliminada, reduzindo as propriedades pozolânicas do material, pois parte dos componentes atuarão como filler, Figura 7.

Figura 7 - Resquícios de casca de arroz devido a queima não controlada.



Fonte: A autora, 2018.

O ambiente, a temperatura e a taxa de aquecimento, são fatores que determinam o teor de sílica, a superfície específica da cinza da casca de arroz e até mesmo sua reatividade. Assim, é possível produzir cinzas da casca de arroz com teores de sílica amorfa acima de 95% e superfícies específicas em torno de 40.000 m²/kg, o que confere ao material elevada atividade pozolânica.

Há um aumento de aproximadamente 9% na quantidade de sílica quando a casca do arroz é queimada de forma controlada (AKINYELE et al., 2015). Isto ocorre em virtude da estrutura da sílica que influencia na atividade do material apresenta sensibilidade à temperatura e ao tempo de queima, fazendo com que as propriedades da CCA dependam fortemente das condições de queima (VINH, 2012).

2.3.3 Estabilização Solo-Cinza

Devido ao elevado teor de sílica, o que gera propriedades pozolânicas ao material, o estudo da adição de cinza de casca de arroz a solos expansivos vem sendo bastante desenvolvido por autores como Brooks (2009), Fattah et al (2013), Adhikary e Jana, (2016), dentre outros, no intuito de que as reações pozolânicas gerem o processo de cimentação e, assim, estabilize solos expansivos.

Os estudos realizados por estes autores em relação a composição química da cinza de casca de arroz indicam uma grande variação nos resultados, o que pode ser explicado pela diferença entre a região, clima, espécie do arroz e temperatura de queima. Ainda que haja uma variação nos resultados, é comum entre todos os estudos o elevado percentual de dióxido de silício (SiO₂), Tabela 09.

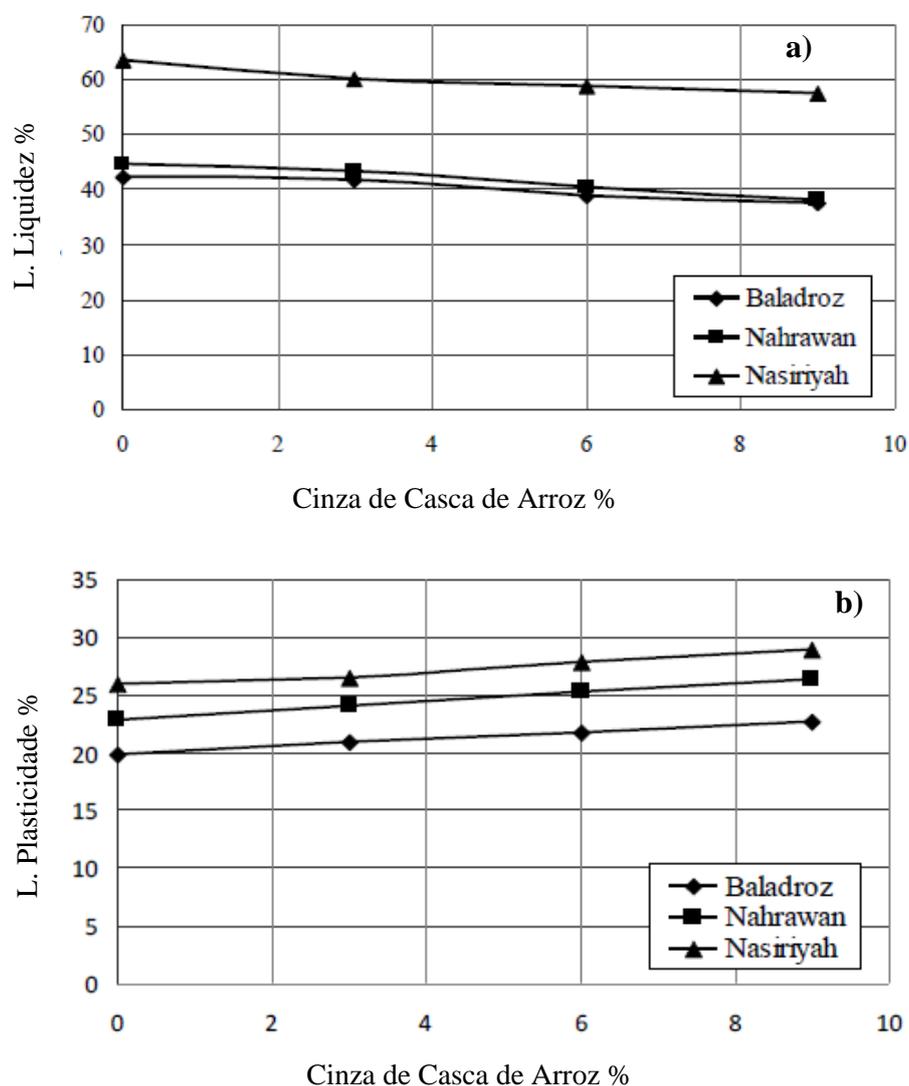
Tabela 9 - Composição química da cinza da casca de arroz.

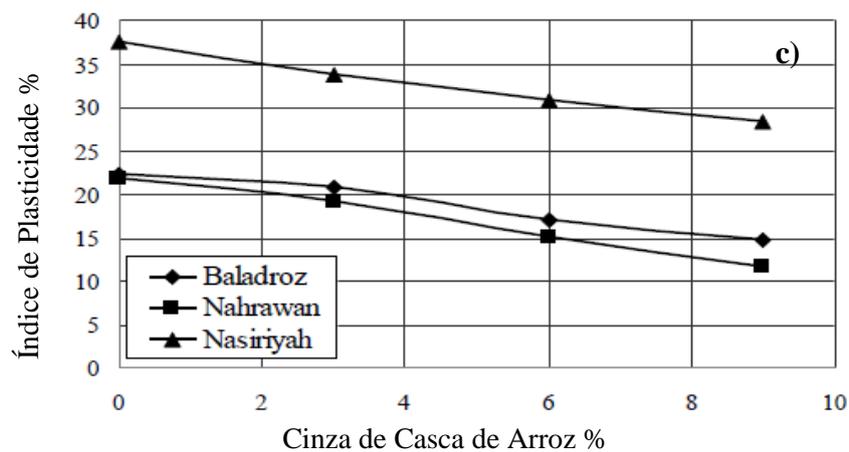
Constituinte	BROOKS (2009)	FATTAH et al (2013)	PATEL e MAHIYAR (2014)	HRIVASTAV A et al (2014)
SiO ₂	90,23	86,00	90,23	85,14
Al ₂ O ₃	2,54	2,60	2,54	2,07
Fe ₂ O ₃	0,21	1,80	0,21	1,43
CaO	1,58	3,60	1,58	3,08
MgO	0,53	0,27	0,53	4,03
Na ₂ O	0,39	-	-	-
K ₂ O	-	-	0,39	-
SO ₃	-	-	-	-
L.O.I	2,23	4,20	2,23	5,08

L.O.I – Perda ao Fogo

Fattah et al (2013), estudou o efeito da adição de cinza de casca de arroz em solos argilosos. A adição de diferentes teores de CCA resultou na diminuição do limite de liquidez, aumento no limite de plasticidade e redução no índice de plasticidade. Esse comportamento é atribuído ao fato de que a reação da cinza de casca de arroz com o solo natural forma compostos com propriedades cimentícias, Figura 08. Comportamento semelhante foi observado por (ADHIKARY e JANA, 2016), Figura 09.

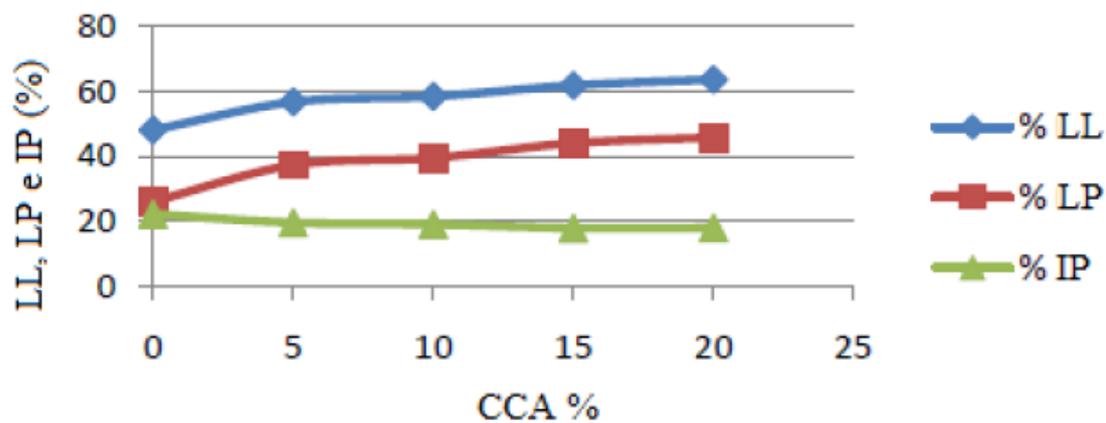
Figura 8 - Resultado dos ensaios de limites de consistência em diferentes percentuais de CCA, a) limite de liquidez, b) limite de plasticidade, c) índice de plasticidade.





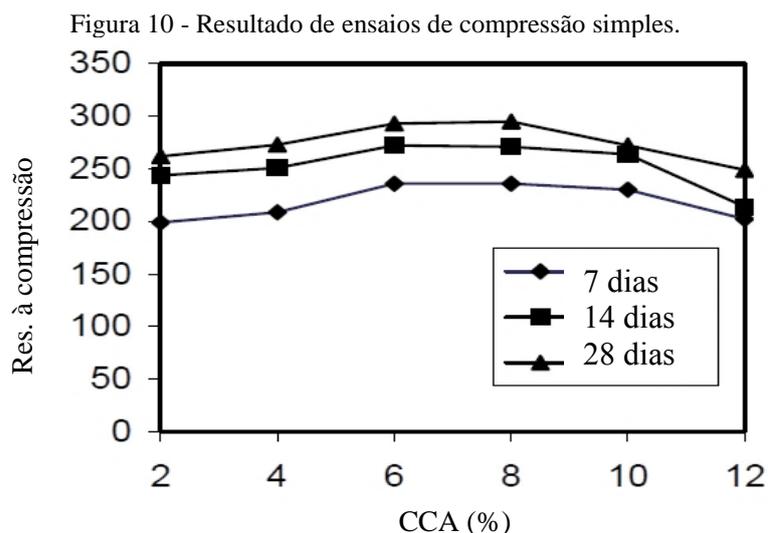
Fonte, Fattah et al (2013).

Figura 9 - Resultado dos ensaios de limites de consistência em diferentes percentuais de CCA.



Fonte, Adhikary e Jana (2016).

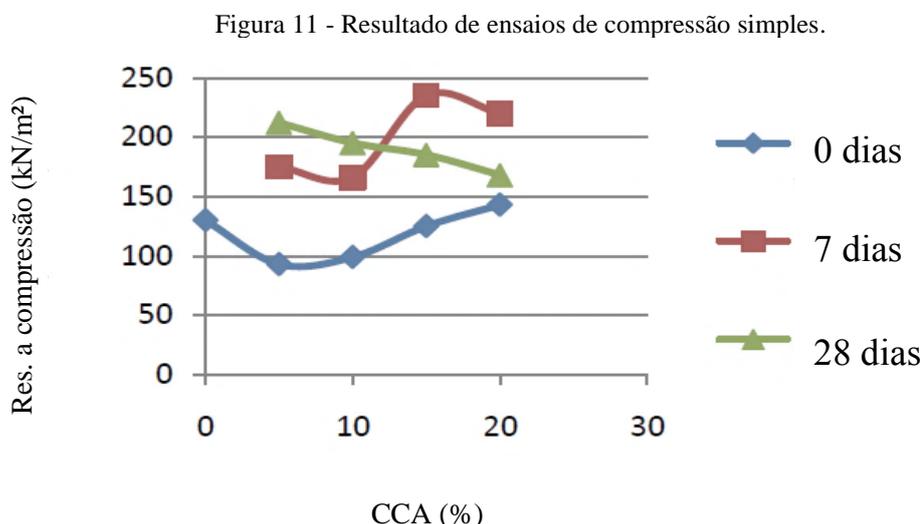
Em relação a resistência do solo quando misturado com cinza de casca de arroz, Alhassan (2008), apresenta resultados com 7 dias, 14 dias e 28 dias de tempo de cura para os percentuais de 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12% de cinza de casca de arroz, Figura 10.



Fonte: Alhassan (2008).

O autor observa um leve aumento na resistência à compressão simples das amostras até os percentuais de 6% e 8%, após isso as amostras perdem resistência, o que pode ser justificado pelo excesso de CCA no solo, o que formaria ligações fracas entre o solo e os compostos cimentícios da CCA.

Adhikary e Jana (2016), também avaliaram a resistência à compressão de misturas solo-CCA, Figura 11.



Fonte: Adhikary e Jana (2016).

Os resultados encontrados por eles são semelhantes aos de Alhassan (2008), onde há incremento na resistência até um certo percentual de CCA e posterior decréscimo, o que também pode ser explicado pela reação cimentícia inicial e fragilidade nas ligações com o excesso de cinza, apontando para um percentual ótimo, entre 6% e 10% de CCA.

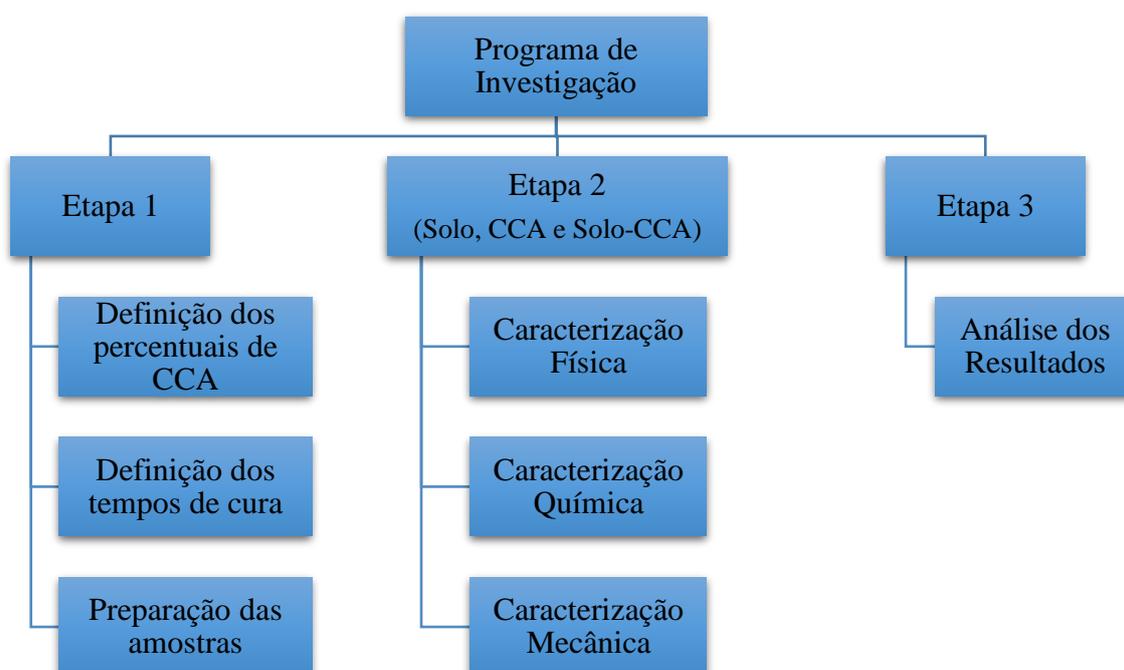
3 MATERIAIS E MÉTODOS

São apresentados os materiais e métodos utilizados no programa de investigação geotécnica de um solo expansivo no município de Paulista-PE, com o objetivo de obter a caracterização física, química e mecânica do solo natural e de suas misturas solo-CCA e de avaliar a influência da adição da cinza de casca de arroz no comportamento do solo e de sua expansividade.

3.1 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

O programa de investigação foi definido em três etapas, Figura 12:

Figura 12 - Esquema do programa de Investigação Geotécnica.



Etapa 1: Consistiu na definição dos percentuais de cinza de casca de arroz a serem adicionados ao solo expansivo de Paulista. Os percentuais definidos foram 2%, 4%, 6%, 8% e 10% e foram escolhidos inicialmente através dos resultados encontrados na literatura. A definição dos tempos de cura a serem estudados também ocorreu nesta fase. Foram realizados ensaios com 0 dias da moldagem, 7 dias, 28 dias e 120 dias, com o intuito de avaliar a influência da cinza de casca de arroz ao longo do tempo. Após definidos os percentuais, tempos de cura e ensaios a serem realizados, foi separado em

sacos plásticos a quantidade de solo e cinza de casca de arroz necessários para os ensaios. Tanto o solo quanto a cinza de casca de arroz foram armazenados da forma que chegaram da coleta, sendo peneirados e pesados previamente a cada ensaio. Os materiais foram guardados no laboratório de solos da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e mantidos à temperatura ambiente, podendo variar de acordo com a umidade e temperatura.

Etapa 2: A segunda etapa consta da execução dos ensaios do solo natural, da CCA e das misturas solo-CCA, determinando suas características físicas, químicas e mecânicas.

Etapa 3: Esta etapa contempla a análise dos resultados individuais e a comparação entre o solo natural e as misturas com incremento da cinza de casca de arroz.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

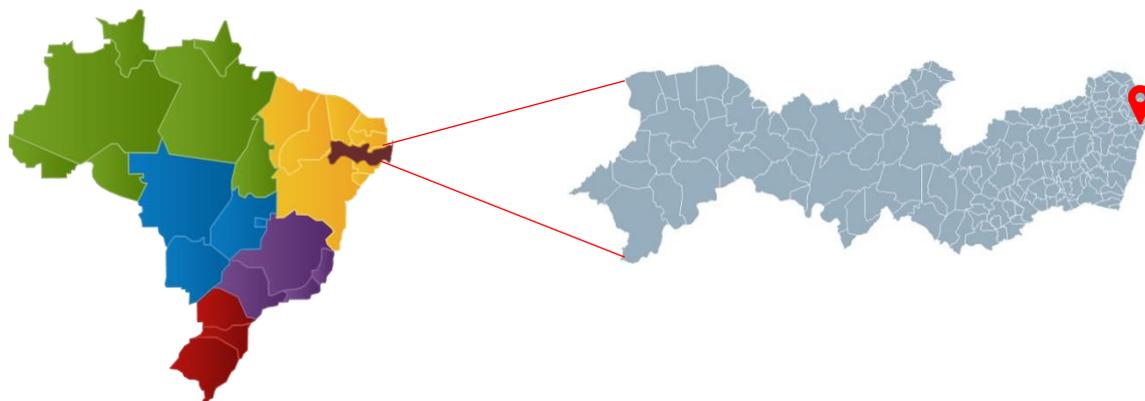
A seguir será apresentada a metodologia utilizada nesta pesquisa.

3.2.1 Solo de Paulista

Foram coletadas amostras deformadas do solo argiloso do município de Paulista-PE. O solo estudado é localizado na estação de tratamento de esgoto da Companhia de Saneamento do Estado de Pernambuco (COMPESA) localizada no bairro do Janga, litoral sul do município de Paulista. O município de Paulista está localizado em uma área de baixa suscetibilidade à expansão (AMORIM, 2004).

O município de Paulista localiza-se no litoral norte do estado de Pernambuco, pertencendo à Mesorregião Metropolitana do Recife, distando 18 quilômetros da capital do estado. De acordo com o censo 2017 estimado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Paulista ocupa uma área de 97,312 km² tendo uma população estimada em 328.353 habitantes, apresentando a quinta colocação entre os municípios do estado de Pernambuco, Figura 13.

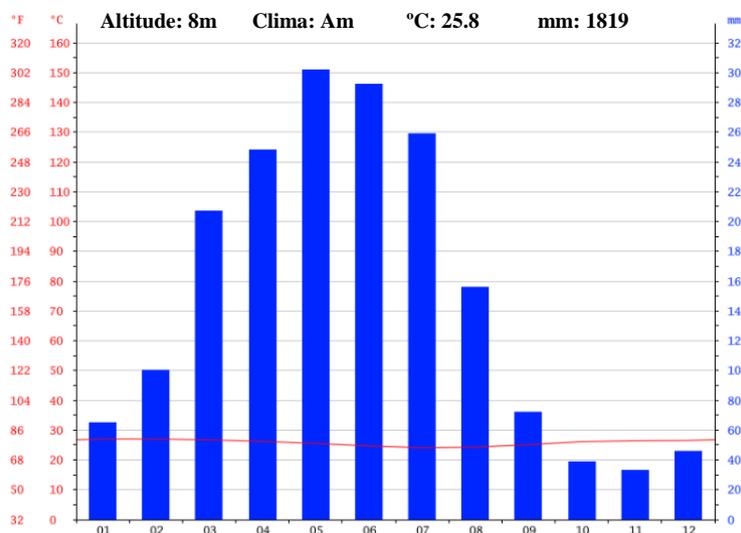
Figura 13 - Localização da cidade de Paulista.



Fonte: Google (2018).

De clima tropical úmido, a temperatura média anual do município é de 25,8 °C. Apresenta períodos chuvosos e de estiagem (PAIVA 2016). Na maioria dos meses do ano exista uma pluviosidade significativa. Só existe uma curta época seca e não é muito eficaz. De acordo com Koppen e Geiger, seu clima é classificado como Am e a pluviosidade média anual é de 1819 mm, Figura 14.

Figura 14 - Dados pluviométricos e de temperatura do município de Paulista-PE.



Fonte: Site Climate-data.org (2018).

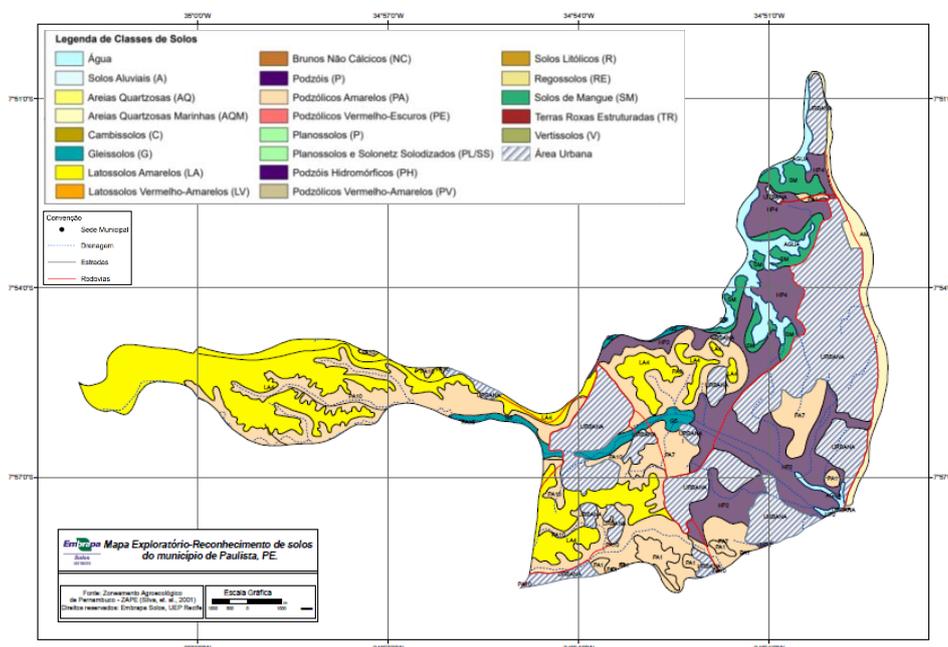
Suas vegetações nativas e predominantes são a mata atlântica e a restinga. Aproximadamente 100 % da sua população vive na zona urbana. O relevo é constituído por tabuleiros, cuja altitude varia de 40 a 50 metros, próximo à planície costeira e até mais de 160 metros, na porção oeste, estendendo-se para o leste.

O município faz parte da Região Metropolitana do Recife, que polariza fluxos econômicos, com predominância do setor de serviços e funciona como centro distribuidor de mercadorias. Além de concentrar maior número de indústrias de transformação do Estado, outro pilar da economia metropolitana é a agroindústria voltada para o álcool e o açúcar. Destaca-se também o cultivo de frutas e hortaliças, como banana, coco, inhame, mandioca, entre outros.

A geomorfologia da região é frequentemente aplainado na faixa costeira e na porção oeste do município se sobressaem formações colinosas, arredondadas e baixas altitudes, constituídas por sedimentos areno-argilosos ou por solos residuais de calcário, (JUSTINO DA SILVA 2001).

O Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Paulista – PE, Figura 15, apresenta as características pedológicas do município de Paulista. Essas informações foram elaboradas e disponibilizadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) através do Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco (ZAPE).

Figura 15 - Características pedológicas do município de Paulista – PE.



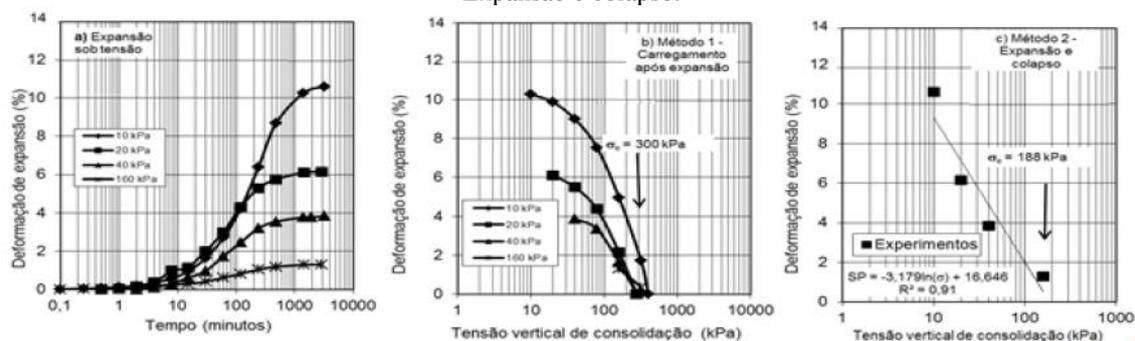
Fonte: EMBRAPA (1999).

Quanto a Pedologia do local, a região litorânea do município de Paulista é formada por Latossolos Amarelos (LA4) de textura argilosa; Podzólicos Amarelos Latossólicos e não Latossólicos de textura média a argilosa; Gleissolos distróficos de textura média e

argilosa; Podzóis Hidromórficos álicos e distróficos de textura arenosa; e solos de mangue. O bairro do Janga, onde foram coletadas as amostras para esse estudo, é predominantemente uma área urbana.

Paiva (2016) apresentou a caracterização mecânica do solo natural de Paulista a partir de amostras indeformadas, onde apresentou grau de expansividade alta pelo critério de Rodriguez e Ortiz (1975), Figura 16.

Figura 16 - Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Paulista: a) Expansão sob tensão, b) Método 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 - Expansão e colapso.



Fonte: Paiva (2016).

3.2.2 Cinza de Casca de Arroz

A cinza de Casca de Arroz utilizada neste estudo é oriunda da queima não controlada da casca de arroz e foi coletada em uma fábrica de arroz na cidade de Cabrobó-PE que utiliza a queima da casca do arroz como combustível no processo de parboilização do arroz.

3.3 MÉTODOS

A seguir, serão apresentados os ensaios realizados neste estudo.

3.3.1 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas segundo as recomendações da ABNT, NBR 6457/16. Os teores utilizados nas misturas solo-CCA foram 2%, 4%, 6%, 8% e 10% em peso, Figura 17. As misturas foram realizadas no momento de cada ensaio. As amostras para os ensaios realizados com 7 dias, 28 dias e 120 dias, foram moldadas no mesmo dia

em que as amostras utilizadas para os ensaios com 0 dias de cura e armazenadas em um reservatório cuja umidade foi mantida constante afim de evitar variação nos resultados.

Figura 17 - Preparação e armazenamento das amostras.



Fonte: A autora, 2018.

3.3.2 Caracterização Física

Os ensaios de caracterização Física do solo argiloso de Paulista e das misturas de solo-CCA foram: análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, limites de Atterberg e densidade real dos grãos. Também foi realizado o ensaio de compactação para determinar os valores da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo, Figura 18.

- Granulometria por peneiramento e sedimentação: ABNT, NBR 7181/2016;
- Limite de Liquidez: ABNT, NBR 6459/2016;
- Limite de Plasticidade: ABNT, NBR 7180/2016;
- Densidade Real dos Grãos: ABNT, NBR 6508/16;
- Ensaio de Compactação: ABNT, NBR 7182/2016.

Figura 18 - Ensaio de Sedimentação e Densidade real dos grãos.



Fonte: A autora, 2018.

3.3.3 Caracterização Química

A determinação dos resultados químicos foi realizada de acordo com as Metodologia de Análise de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA (1997) e EMBRAPA (2011). Os ensaios químicos foram realizados no laboratório de Análises Químicas da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP).

Com a finalidade de avaliar a qualidade do solo e sua suscetibilidade à expansão, foram realizados os ensaios de: Potencial Hidrogeniônico em água ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$), Condutividade Elétrica no Extrato de Saturação (CE), Capacidade de Troca Catiônica de Cátions (CTC-T), Percentagem de Saturação de Base (V), Percentual de Saturação de Sódio ($100\text{Na}^+/\text{T}^{-1}$), Saturação por Alumínio (m), Soma das Bases (S) e Saturação por Sódio e óxidos.

A composição dos óxidos dos solos e misturas solo-CCA foram determinadas através da técnica analítica da espectrometria de fluorescência de raio-X (FRX) em amostras fundidas com determinação de teores dos óxidos: Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , K_2O , CaO , TiO_2 , MnO e $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{t}}$.

Figura 19 - Ensaio químicos - definição de PH.



Fonte: A autora, 2018.

3.3.4 Caracterização da Expansão

Para a caracterização da expansão do solo natural e misturas solo-CCA, foram utilizados ensaios edométricos com células convencionais para os ensaios de expansão livre e tensão de expansão a volume constante. Os corpos de prova das amostras de solo natural e misturas solo-CCA foram compactados estaticamente na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, obtidos do ensaio de compactação, moldados em anéis de cravação e inseridos nas células convencionais de ensaios edométricos, Figura 20.

Figura 20 - Preparação dos corpos de prova.





Fonte: A autora, 2018.

3.3.4.1 Ensaio de Expansão “Livre”

A execução dos ensaios de Expansão “Livre” ocorreu em células edométricas convencionais, seguindo os procedimentos da Norma ASTM D4829/95 e da ABNT, NBR 12007/90. Após a compactação dos corpos de prova, os mesmos foram talhados em anéis de aço inoxidável de diâmetro 87,4 mm e altura 20 mm. Com a amostra moldada no anel, o mesmo era inserido na prensa de adensamento, adicionado água e realizadas as leituras das variações de espessura de cada amostra. As leituras eram realizadas durante o intervalo de 48h e foi utilizada uma sobrecarga de 7 kPa.

3.3.4.2 Ensaios de Tensão de Expansão

A tensão de expansão das amostras de solo natural e misturas solo-CCA foi obtida através do método Volume Constante. O método consiste em inundar o corpo de prova quando o mesmo já estiver na prensa de adensamento e, à medida que apresentar expansão e variar de volume, é adicionada uma sobrecarga com o intuito de inibir essa variação de volume. O acréscimo de sobrecarga foi realizado até a estabilização da amostra e ao final do ensaio eram somadas as sobrecargas aplicadas, onde as mesmas são consideradas a tensão de expansão do solo.

3.3.5 Ensaio de Compressão

Para a realização dos ensaios de compressão simples e diametral, corpos de prova foram moldados em três camadas mediante compactação estática. Os corpos de prova eram moldados em um cilindro tripartido de bronze com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Após a compactação de cada camada, era realizada a escarificação da superfície afim de garantir a aderência à próxima camada. Após a compactação, o corpo de prova era desmoldado e realizado o ensaio. Para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias, os corpos de prova eram protegidos por papel filme e papel alumínio, devidamente identificados e armazenados em recipiente com umidade constante, Figura 21.

Figura 21 - Moldagem dos corpos de prova.



Fonte: A autora, 2018.

3.3.5.1 Ensaio de Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples utilizaram como base a Norma ASTM D5102/96, onde foram moldados dois corpos de prova para cada amostra. Após moldados, os corpos de prova foram pesados e colocados na prensa de compactação, Figura 22. O anel dinamométrico utilizado foi o de capacidade máxima de 50 kN e velocidade de 0,48 mm/min. A resistência à compressão de cada amostra foi obtida através da média aritmética de cada amostra.

Figura 22 - Execução do ensaio de compressão simples.



Fonte: A autora, 2018.

3.3.5.2 Ensaio de Compressão Diametral

O ensaio de compressão diametral foi realizado no laboratório de solos da Universidade de Pernambuco (UPE) e utilizou a mesma base do ensaio de compressão simples (Norma ASTM D5102/96), porém o carregamento se deu no sentido de seu diâmetro. Foi utilizado o equipamento EMIC DL30000N com célula de carga de capacidade máxima de 300 kN e velocidade de 0,50 mm/min, Figura 23.

Figura 23 - Ensaio de compressão diametral.



Fonte: A autora, 2018.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

São apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados no solo de Paulista e suas misturas. Esta análise tem como objetivo avaliar a influência da cinza de casca de arroz (CCA) quando adicionada a um solo expansivo. Os resultados das misturas com 2%, 4%, 6%, 8% e 10% são comparados aos resultados encontrados para o solo natural e com a literatura.

Serão apresentados os resultados da caracterização física da CCA, do solo natural e das misturas, a composição granulométrica, limites de Atteberg, peso específico real dos grãos, compactação, análise química, avaliação da expansão livre, tensão de expansão, resistência à compressão simples e a resistência à compressão diametral.

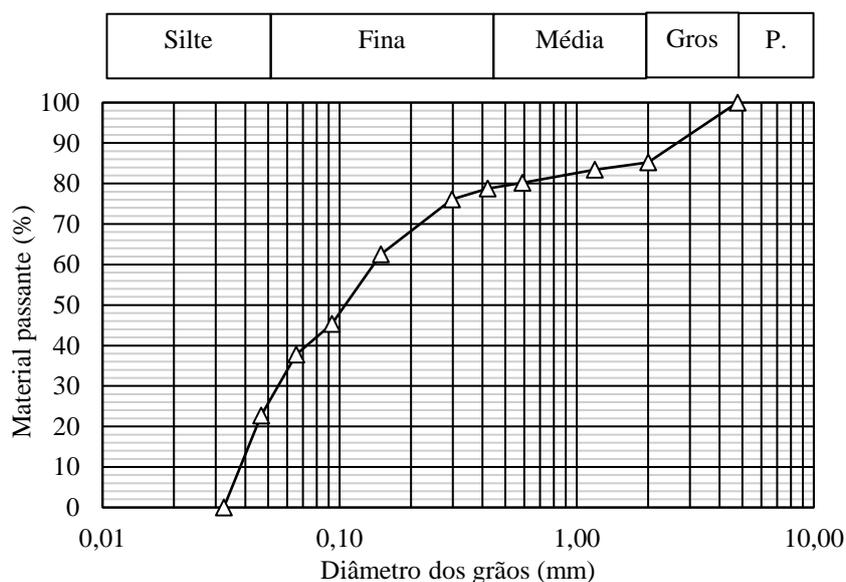
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A seguir, são apresentados os resultados da caracterização física da cinza de casca de arroz, solo natural e misturas solo-CCA.

4.1.1 Caracterização física da cinza de casca de arroz

Para a cinza de casca de arroz, foram realizados os mesmos ensaios de caracterização dos solos. A Figura 24 apresenta a curva granulométrica da CCA, onde o tamanho dos grãos varia entre 0,03 e 5,00 mm.

Figura 24 - Curva granulométrica da cinza de casca de arroz.



Fonte: Lacerda et al (2018).

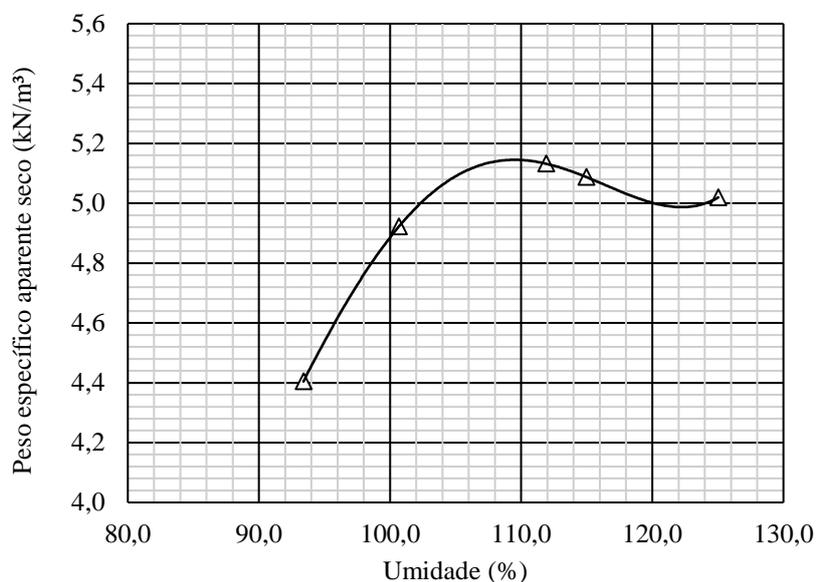
A Tabela 10 e a Figura 25, mostram a caracterização física da CCA e a curva de compactação, respectivamente. Observa-se que a CCA apresenta um peso específico seco máximo de 5,15 kN/m³, peso específico dos grãos de 19,1 kN/m³ e uma umidade ótima elevada, 109%. Os ensaios de limite de liquidez e plasticidade indicam o comportamento não plástico da CCA.

Tabela 10 - Caracterização física da cinza de casca de arroz.

Caracterização física	CCA
Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)	5,15
Umidade ótima (%)	109
Peso específico dos grãos (kN/m ³)	19,1
Limite de liquidez (%)	-
Índice de plasticidade (%)	NP

Fonte: Lacerda et al (2018).

Figura 25 - Curva de compactação da cinza de casca de arroz.



Fonte: Lacerda et al (2018).

Os resultados dos ensaios químicos e de fluorescência de raio-x da cinza de casca de arroz estão apresentados no item 4.2, juntamente com os resultados do solo natural e misturas solo-CCA.

4.1.2 Caracterização física do solo natural e misturas

Nos próximos itens, são apresentados os resultados da caracterização física do solo em seu estado natural e das misturas com cinza de casca de arroz.

4.1.2.1 Caracterização granulométrica

A análise granulométrica do solo de Paulista e misturas consistiu no ensaio por peneiramento, para os grãos acima da peneira N°. 200, e por sedimentação com defloculante para a parcela de finos do solo. O Quadro 02 apresenta as frações do solo natural e misturas com CCA.

Quadro 2 - Caracterização granulométrica do solo de Paulista e misturas com CCA.

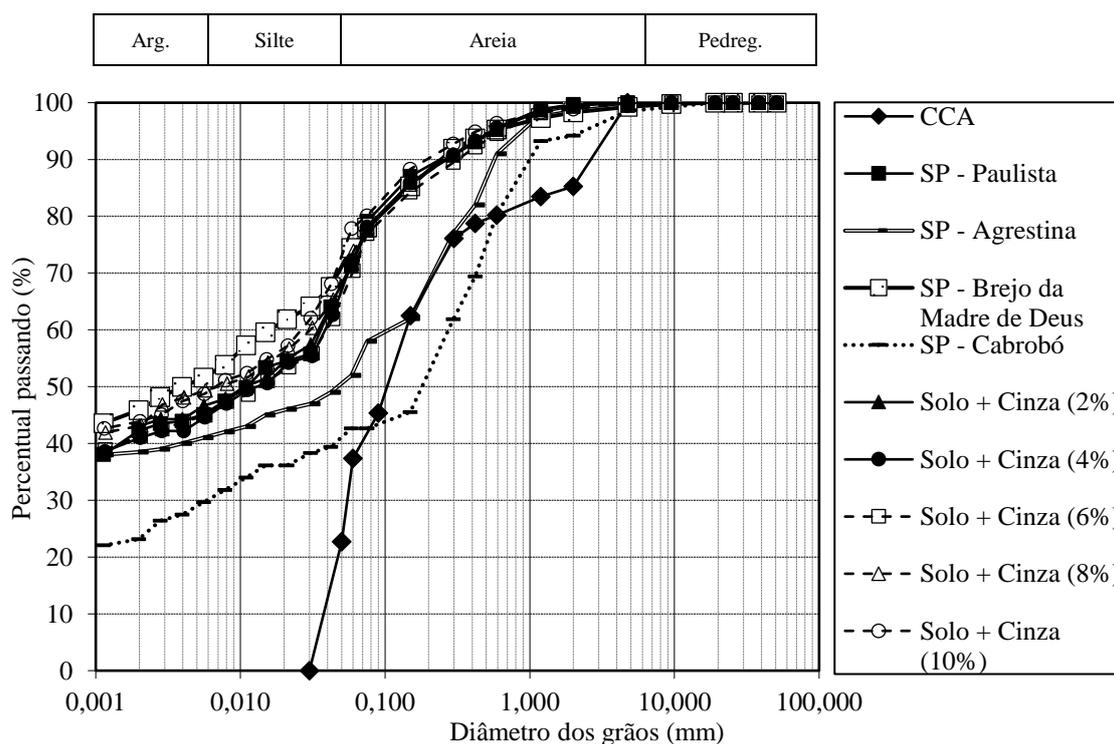
Caracterização Granulométrica									
Amostra			Solo Puro	Solo Puro + 2%	Solo Puro + 4%	Solo Puro + 6%	Solo Puro + 8%	Solo Puro + 10%	
Granulometria NBR 7181/1984	Peneiramento (% passante)	2"	50,80	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		1 1/2"	38,10	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		1"	25,40	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		3/8"	9,52	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		No. 4	4,76	99,98	99,98	99,96	99,98	99,96	99,92
		No. 10	2,00	99,72	99,52	99,57	99,48	99,57	98,88
		No. 16	1,19	98,83	98,66	98,78	98,28	98,78	98,28
		No. 30	0,59	95,52	95,31	95,58	94,54	95,58	96,37
		No. 40	0,42	93,26	93,05	93,29	92,16	93,29	94,86
		No. 50	0,30	91,28	90,71	90,84	89,48	90,84	92,72
		No. 100	0,15	87,03	85,92	85,85	84,24	85,85	88,28
	No. 200	0,08	79,11	77,49	78,13	76,94	78,13	80,07	
	Sedimentação	% das amostras por tamanho dos grãos	0,058	71,15	71,70	72,25	70,41	72,25	77,85
			0,042	64,05	64,54	62,64	61,93	62,64	68,13
			0,030	55,77	57,39	55,43	55,87	55,43	62,07
			0,021	54,58	55,00	54,23	53,45	54,23	57,21
			0,015	53,40	51,43	50,62	51,03	50,62	54,78
			0,011	49,85	50,23	49,42	48,61	49,42	52,35
			0,008	47,48	47,85	47,02	47,40	47,02	51,14
0,006			45,12	46,66	44,62	44,97	44,62	48,71	
0,004			43,93	44,27	42,21	43,76	42,21	47,50	
0,003			43,46	44,27	42,21	42,55	42,21	45,07	
0,002			42,28	43,08	41,01	41,34	41,01	43,86	
0,001	38,02	39,50	38,61	38,92	38,61	42,64			
Pedregulho %			0,28	0,48	0,43	0,52	0,43	1,12	
Areia %			28,57	27,83	27,31	29,07	27,31	21,03	
Silte %			17,75	20,27	21,63	19,38	21,63	23,06	
Argila %			53,40	51,43	50,62	51,03	50,62	54,78	
Relação silte/argila			0,33	0,39	0,43	0,38	0,43	0,42	

Fonte: A autora, 2018.

O solo de Paulista e as misturas solo-cinza apresentam uma textura fina, com mais de 70% dos grãos passando na peneira N° 200, o que indica uma grande presença de finos no solo. Esse percentual de finos é característico de solos expansivos, pois os mesmos são de natureza argilosa ou argilo-siltosa. O percentual de argila no solo natural é de 53% e de silte 18%, apresentando, assim, uma relação silte/argila de 0,33. O percentual de areia é de 30% e apresenta pouca fração de pedregulho, 0,28%. A adição de cinza elevou a relação silte/argila em todos os percentuais das misturas solo-CCA, Quadro 2.

A Figura 26 apresenta a curva granulométrica do solo natural e misturas com CCA. Observa-se que o acréscimo de cinza de casca de arroz ao solo de Paulista tem pouco impacto na distribuição granulométrica, mantendo-se, assim, as mesmas características do solo natural. Isso se deve ao fato de que a CCA tem menor peso específico real dos grãos do que os grãos do solo, assim, a fração fina das misturas apresentam comportamentos similares.

Figura 26 - Curva granulométrica do solo natural e misturas.



*Agrestina: Silva (2018)

Brejo da Madre de Deus: Bezerra (2018)

Cabrobó: Lacerda (2018)

Fonte: A autora, 2018.

O comportamento da curva granulométrica do solo natural de Paulista e das misturas com CCA se assemelha a solos argilosos dos municípios de Cabrobó (Lacerda, 2018), Brejo da Madre de Deus (Bezerra, 2018) e Agrestina (Silva, 2018) adicionados, também, com a cinza de casca de arroz. Nos municípios de Cabrobó e Brejo da Madre Deus há uma leve redução na fração de argila, cerca de 10%. Quando adicionado cal ao solo de Paulista há, também, o acréscimo na relação silte/argila, mas quando adicionado areia há a diminuição da relação silte/argila.

4.1.2.2 Limites de consistência

Os resultados dos limites de consistência e índice de atividade do solo natural e do solo-CCA são apresentados na Tabela 11. O limite de liquidez, tanto do solo natural quanto das misturas solo-CCA, ficou acima de 50%; o limite de plasticidade cresce variando entre 25% e 31%; e o índice de plasticidade acima dos 29%, o que indica alta plasticidade do solo e misturas solo-CCA ($IP > 15\%$). Houve tendência na diminuição do índice de plasticidade a medida que foi incrementado com a CCA. Efeitos semelhantes foram observados nos estudos de Fattah et al. (2015). O índice de atividade da presente pesquisa variou entre 0,55 e 0,62, sendo assim considerado pelo critério de Skempton (1953) como amostras inativas ($Ia < 0,75$).

Tabela 11 - Limites de consistência do solo de Paulista e misturas com CCA.

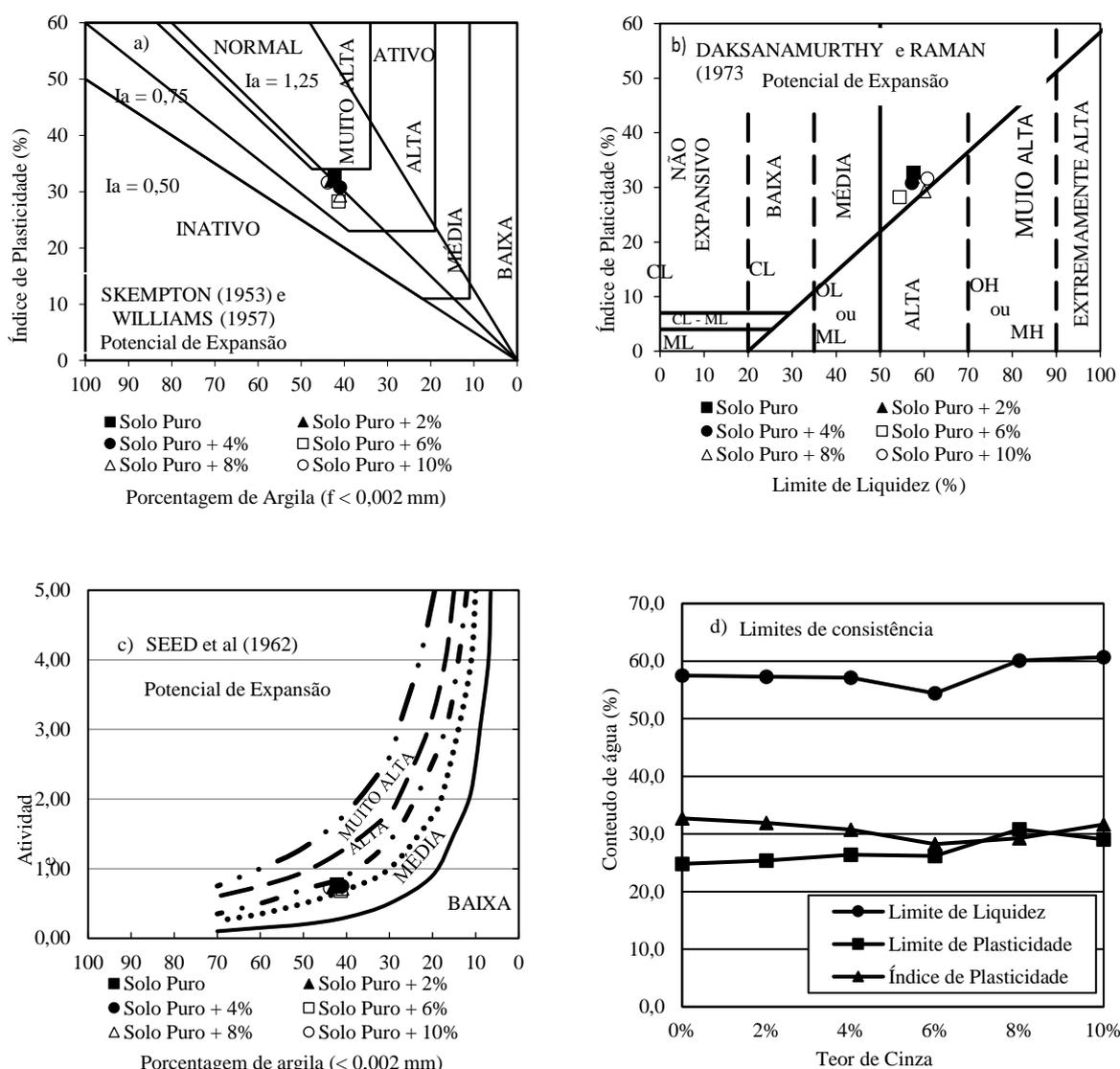
AMOSTRA	Solo Puro	Solo Puro + 2%	Solo Puro + 4%	Solo Puro + 6%	Solo Puro + 8%	Solo Puro + 10%
Limite de liquidez	58	57	57	54	60	61
Limite de plasticidade	25	25	26	26	31	29
Índice de plasticidade	33	32	31	28	29	32
Índice de atividade	0,61	0,62	0,61	0,55	0,58	0,58
Classificação AASHTO	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-5	A-7-6
Classificação SUCS	CH	CH	CH	CH	CH	CH
Umidade média %	3,72	3,98	3,81	4,39	4,96	5,77
Peso específico real (kn/m^3)	26,60	26,28	25,91	25,77	25,35	25,97

Fonte: A autora, 2018.

O solo natural e misturas solo-CCA apresentam alto potencial de expansão pelos critérios de Daksanamurty e Ramam (1973), Seed et al. (1962) e Williams (1957), Figura

27. Pela classificação SUCS, o solo de Paulista é uma argila muito plástica e altamente compressível (CH) e pela classificação AASHTO, um solo argiloso fraco (A-7-6). Nas misturas solo-CCA, a classificação SUCS se manteve a mesma, argila muito plástica (CH), porém na classificação AASHTO houve a variação entre solo argiloso com moderado IP (A-7-5) e com alto IP (A-7-6).

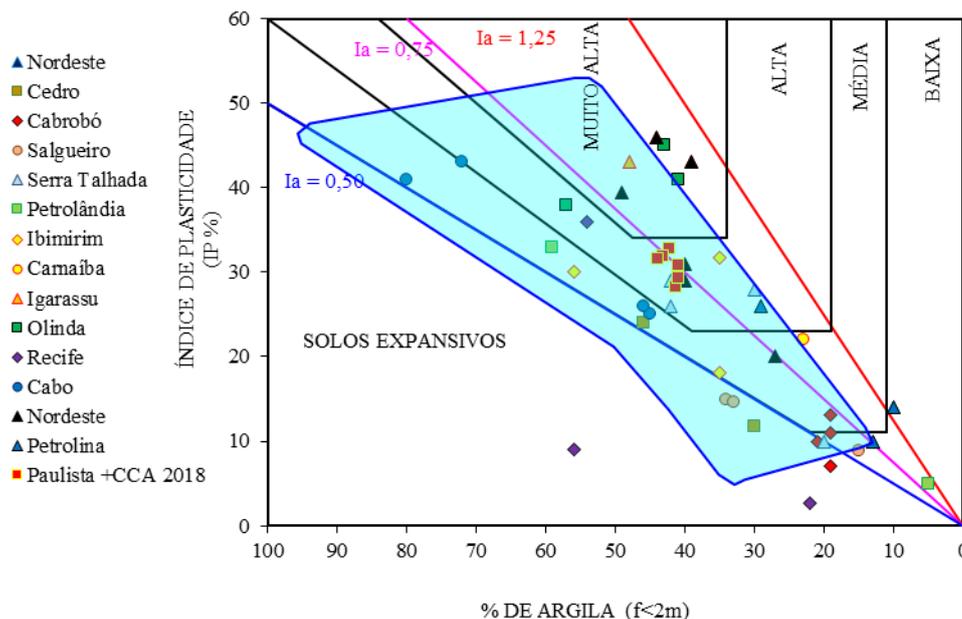
Figura 27 - Critérios utilizados para determinar o potencial de expansão: a) Skempton (1953) e Williams (1957), b) Daksanamurthy e Raman (1973), c) Seed et al. (1962), d) Limites de consistência.



Fonte: A autora, 2018.

Observa-se na Figura 28 que Paulista é uma das cidades do Estado de Pernambuco onde o solo apresenta alta atividade, assim como as cidades de Petrolina, Serra Talhada, Recife e Olinda.

Figura 28 - Carta de Plasticidade-Atividade para argilas expansivas de Pernambuco.

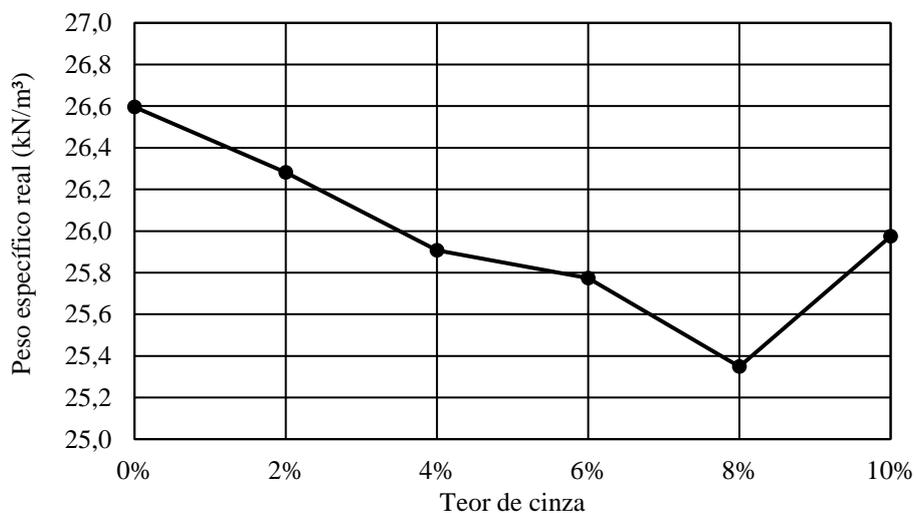


Fonte: Adaptado de Ferreira (2010).

4.1.2.3 Peso específico real dos grãos

A Figura 29 apresenta o comportamento do peso específico real dos grãos do solo natural e das misturas solo-CCA. O ensaio foi executado pelo método do picnômetro e mostra a tendência na redução do peso específico real à medida que adicionada a cinza de casca de arroz. Apenas para o percentual de 10% (25,97 kN/m³) o peso específico real dos grãos volta a aumentar, porém, ainda bem abaixo do valor para o solo natural (26,60 kN/m³).

Figura 29 - Peso específico real dos grãos do solo natural e misturas.

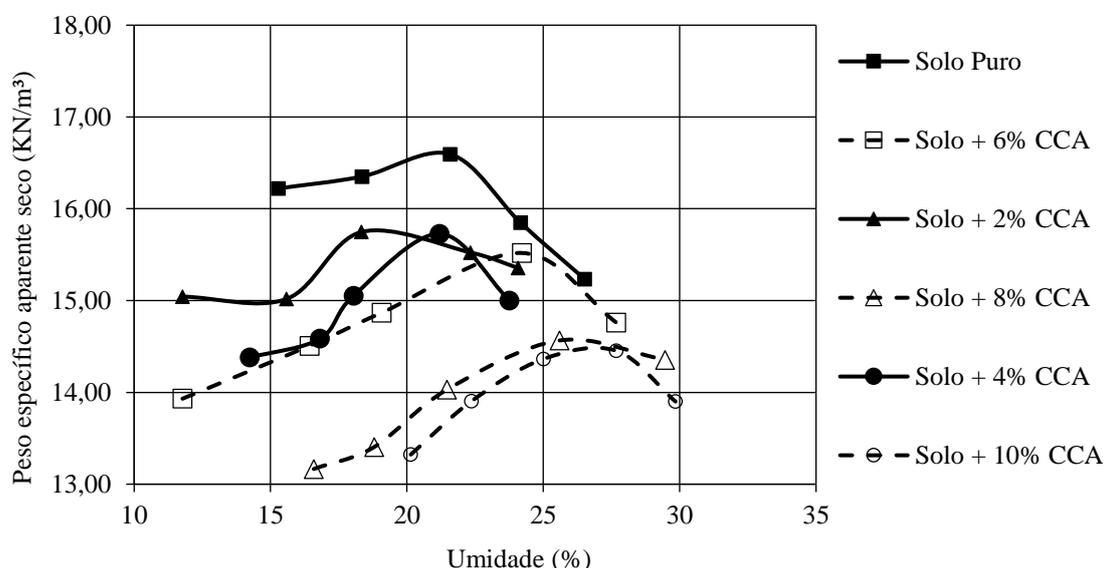


Fonte: A autora, 2018.

4.1.2.4 Compactação do solo e misturas

A Figura 30 apresenta as curvas de compactação do solo natural e das misturas solo-CCA obtidas através da adição de pequenas quantidades de água. Todas as amostras apresentam comportamento similar com um único pico. O formato das curvas de compactação para as amostras de solo e para os percentuais 6%, 8% e 10% são do tipo D e para os percentuais de 2% e 4% do tipo B, segundo a classificação de (LEE E SUEDEKAMP, 1972). As curvas apresentam formato típico de solos com predominância de finos em sua composição.

Figura 30 - Curva de compactação do solo natural e misturas com CCA.



Fonte: A autora, 2018.

O incremento proporcional no teor de CCA aos solos causa um aumento contínuo na umidade ótima e uma diminuição do peso específico seco máximo das misturas, Tabela 12. A relação da umidade ótima observada no solo de Paulista e nas misturas solo-CCA são similares à constatada na literatura, onde se encontra o crescimento da umidade ótima com o incremento no quantitativo de CCA ao solo.

O aumento da absorção de água nas misturas é justificado por Adhikary e Jana (2016) como sendo a cinza de casca de arroz um resíduo agrícola com características pozolânicas e de grande superfície específica, a mesma acaba absorvendo mais água. Apenas no percentual de 2% em solo-CCA ocorreu uma leve redução na umidade ótima

quando se adiciona a proporção, porém o crescimento se manteve com os demais acréscimos.

Tabela 12 - Valores da umidade ótima e peso específico aparente seco máximo do solo e solo-CCA.

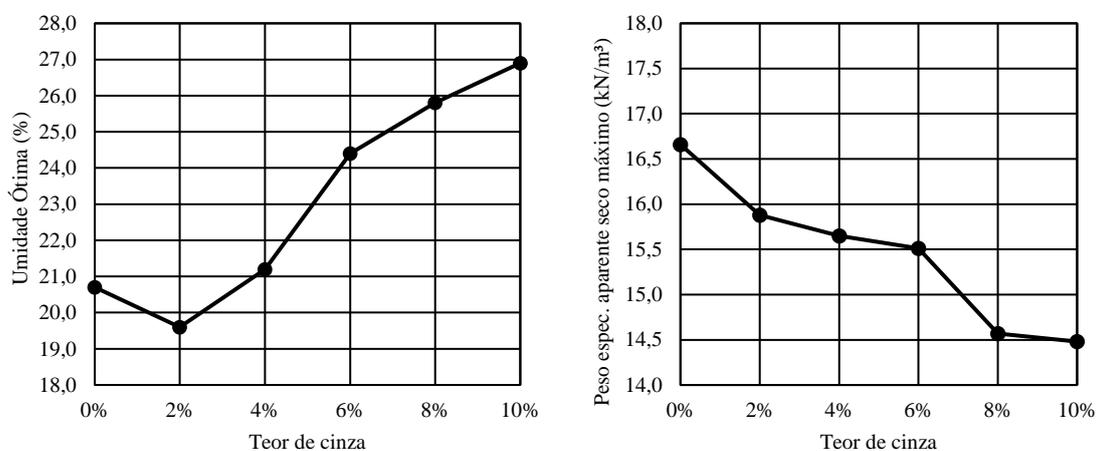
AMOSTRA	PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO MÁXIMO (kN/m ³)	UMIDADE ÓTIMA (%)
Solo Puro	16,66	20,7
Solo Puro + 2%	15,88	19,6
Solo Puro + 4%	15,65	21,2
Solo Puro + 6%	15,51	24,4
Solo Puro + 8%	14,57	25,8
Solo Puro + 10%	14,48	26,9

Fonte: A autora, 2018.

No que se refere aos resultados de peso específico aparente seco máximo, verifica-se uma redução significativa ao aumentar o teor de CCA, resultados similares foram encontrados no estudo de FATTAH et al., (2013) e SILVA (2018). A CCA tem capacidade de absorver mais água do que o solo, elevando a umidade ótima da mistura e reduzindo o peso específico aparente seco máximo para a mesma energia de compactação aplicada.

Além do mais, o acréscimo do teor de CCA reduz a quantidade de partículas sólidas (de maior peso específico) para um mesmo volume e energia aplicada. A redução no peso específico aparente seco máximo foi cerca de 13,08% para o teor de 10% de CCA, Figura 31.

Figura 31 -Variação na umidade ótima e peso específico seco máximo no solo natural e solo-CCA.



Fonte: A autora, 2018.

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A Tabela 13 apresenta os resultados da caracterização química do solo natural, da cinza de casca de arroz e das misturas solo-CCA onde foram obtidos os valores do pH, condutividade elétrica no extrato de saturação, a soma das bases (S), a capacidade de troca catiônica (CTC-T), o grau de saturação por bases (V), a saturação por alumínio (m), a saturação por sódio ($100\text{Na}^+/\text{T}$), as bases Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} e os ácidos Al^{3+} e H^+ .

Tabela 13 - Resultado das análises químicas do solo de Paulista e misturas com CCA.

Mistura	pH	CE	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H^+	S	CTC-T	V	m	$100\text{Na}^+/\text{T}$
	H_2O	μS	cmol _c /kg									%	
Solo Puro	5,01	113,90	55,24	25,34	1,75	5,38	11,20	46,00	87,71	144,91	60,53	11,32	38,12
Solo Puro + 2%	4,62	188,80	54,19	58,92	2,00	5,75	10,50	36,60	120,86	167,96	71,96	7,99	32,26
Solo Puro + 4%	4,66	235,70	48,95	59,97	2,13	6,50	10,30	29,70	117,55	157,55	74,61	8,06	31,07
Solo Puro + 6%	4,64	283,50	45,81	64,17	2,88	5,00	10,00	25,80	117,86	153,66	76,70	7,82	29,81
Solo Puro + 8%	4,74	369,40	53,41	111,39	2,63	5,75	7,40	26,10	173,18	206,68	83,79	4,10	25,84
Solo Puro + 10%	5,32	379,20	52,10	114,54	3,50	5,63	7,30	26,30	175,77	209,37	83,95	3,99	24,88
CCA	7,60	2590,00	22,37	111,39	7,75	4,50	0,00	20,80	146,01	166,81	87,53	0,00	13,41

Fonte: A autora, 2018.

O solo de Paulista e suas misturas solo-CCA apresentam pH variando entre 4,62 a 5,32. Segundo a classificação de Guimarães (2002), o solo natural apresenta pH ácido e as misturas solo-CCA apresentam pouca variação no pH com o acréscimo de cinza de casca de arroz, sendo classificadas entre fortemente ácido a ácido. A CCA apresenta PH 7,6, considerado um PH alcalino.

A condutividade elétrica no solo natural e as misturas solo-CCA é alta, variando entre 113,90 μS a 379,20 μS , e apresenta aumento à medida que é adicionado a cinza. A cinza de casca de arroz, apresenta uma elevada condutividade elétrica. Essa alta condutividade elétrica indica que tanto o solo natural quanto as misturas apresentam alta salinidade devido à grande quantidade de finos no solo e na Cinza de Casca de Arroz, o que caracteriza as amostras com caráter sálico, Tabela 15.

Em relação à capacidade de troca catiônica (CTC), considerando a referência da EMBRAPA (2001) que estabelece como “alta” valores superiores a 27 cmol_c/Kg, o solo natural, a cinza e as misturas solo-CCA apresentam alta CTC, Tabela 13. Pela

classificação de Buol et al. (1997), todas as amostras possuem alta capacidade de troca catiônica (>20 cmolc/Kg). Isso pode indicar a presença de altos teores de montmorilonita, o que caracteriza um solo expansivo.

A Saturação por Base (V) no solo de Paulista, CCA e suas misturas com cinza de casca de arroz apresentam valores superiores a 50%, o que caracteriza um solo eutrófico de alta fertilidade. A saturação por sódio é superior a 15% no solo natural e em todos os teores estudados, sendo classificados assim com caráter sódico.

Tabela 14 - Resumo de alguns parâmetros do solo natural e misturas solo-CCA.

Amostra	pH	CE	CTC-T	V	100Nat ¹	
	em água	μS	cmolcKg-1	%	%	
Cinza de casca de arroz	Solo Puro	Ácido	Sálico	Alta	Eutrófico	Sódico
	Solo Puro + 2%	Ácido	Sálico	Alta	Eutrófico	Sódico
	Solo Puro + 4%	Ácido	Sálico	Alta	Eutrófico	Sódico
	Solo Puro + 6%	Ácido	Sálico	Alta	Eutrófico	Sódico
	Solo Puro + 8%	Ácido	Sálico	Alta	Eutrófico	Sódico
	Solo Puro + 10%	Ácido	Sálico	Alta	Eutrófico	Sódico

Fonte: A autora, 2018.

Através do ensaio de fluorescência de raio-x é possível identificar os teores dos óxidos presentes no solo, misturas e CCA, Tabela 16. Em todas as amostras estudadas, os óxidos de alumínio (Al_2O_3), silício (SiO_2) e ferro (Fe_2O_3) prevalecem sobre os demais óxidos, representando 87% do solo natural e 88%, 89%, 89%, 89% e 97% para as amostras de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, respectivamente. Há insignificante variação entre o solo natural e as amostras solo-CCA. A análise química da cinza de casca de arroz, apresenta que a cinza de casca de arroz é composta por um elevado teor de sílica (95,37%). Segundo Real, et al. (1996); Chandrasekar, et al (2003), os teores dos outros óxidos podem ser considerados como impurezas.

No trabalho de Patel e Mahiyar (2014), o teor de sílica encontrado na cinza de casca de arroz foi de 90,3% e no de Alhassan (2008) 67,3%, o que ratifica que a cinza estudada nesta pesquisa tem bons indicativos de excelência na utilização de aditivo estabilizante de expansão, havendo um elevado percentual de sílica, que é fundamental para as reações pozolânicas na mistura solo-CCA.

Tabela 15 - Valores dos percentuais dos óxidos e perda ao fogo.

ÓXIDOS	Solo Puro	Solo + 2% CCA	Solo + 4% CCA	Solo + 6% CCA	Solo + 8% CCA	Solo + 10% CCA	CCA
Na ₂ O	0,22	0,12	0,14	0,16	0,08	0,08	0,08
MgO	0,71	0,71	0,69	0,66	0,62	0,59	0,37
Al ₂ O ₃	23,23	22,75	21,02	20,37	19,30	18,27	0,80
SiO ₂	58,67	60,23	63,12	64,03	64,82	65,14	95,37
P ₂ O ₅	0,04	0,06	0,11	0,14	0,16	0,21	0,48
K ₂ O	2,10	2,16	2,11	2,11	2,04	1,99	1,39
CaO	0,14	0,12	0,16	0,20	0,21	0,26	0,75
TiO ₂	0,91	0,94	0,86	0,84	0,80	0,74	0,04
MnO	0,01	0,02	nd	nd	nd	0,04	0,09
Fe ₂ O _{3t}	4,87	4,95	4,71	4,61	4,45	4,26	0,36
P.F	8,78	7,62	6,78	6,59	7,23	8,14	-
Total	99,68	99,68	99,7	99,71	99,71	99,72	99,73

Fonte: A autora, 2018.

4.3 EXPANSÃO “LIVRE” E TENSÃO DE EXPANSÃO

Abaixo, são apresentados os resultados da caracterização mecânica das amostras.

4.3.1 Ensaios de Expansão “Livre”

Os resultados dos ensaios realizados nos tempos de cura de 0 dias, 7 dias, 28 dias e 120 dias encontram-se na Tabela 17.

Tabela 16 - Valores de expansão livre no solo natural e misturas solo-CCA.

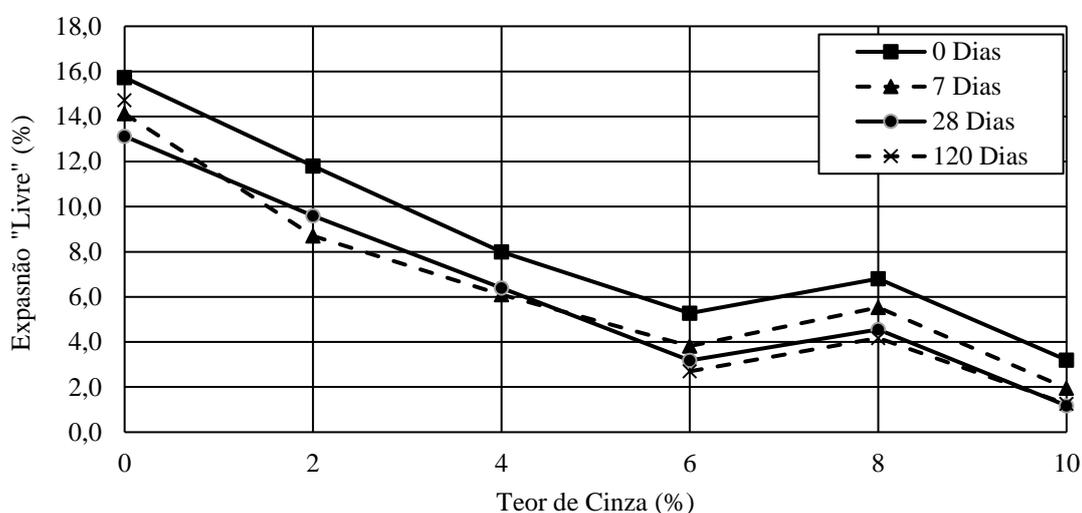
Amostra / Tempo de Cura	Expansão "Livre" (%)			
	0 Dias	7 Dias	28 Dias	120 Dias
Solo Puro (compactado)	15,7	14,1	13,1	14,7
Solo Puro + 2%	11,8	8,7	9,6	-
Solo Puro + 4%	8,0	6,1	6,4	-
Solo Puro + 6%	5,3	3,8	3,2	2,7
Solo Puro + 8%	6,8	5,5	4,6	4,2
Solo Puro + 10%	3,2	2,0	1,2	1,3
Redução da expansão "livre" Solo Puro / 10% de CCA	-80%	-86%	-91%	-92%

Fonte: A autora, 2018.

O solo natural compactado de Paulista apresentou uma expansão livre de 15,7%. Com a adição de cinza de casca de arroz, houve a tendência na redução da expansão do solo, apresentando apenas 3,2% de expansão com o percentual de 10% de CCA. A adição de 10% de cinza de casca de arroz ao solo natural de Paulista, apresentou os menores valores de expansão, reduzindo ainda mais quando elevado o tempo de cura, chegando a reduzir 92% da expansão em relação ao solo natural no tempo de cura de 120 dias.

Os ensaios realizados em diferentes tempos de cura apresentaram uma leve redução na expansão do solo quando comparado aos realizados no mesmo dia da moldagem do corpo de prova, Figura 32.

Figura 32 -Representação gráfica da expansão livre do solo natural e das misturas solo-CCA.



Fonte: A autora, 2018.

A Tabela 18, apresenta a classificação do grau de expansividade das amostras de solo natural e solo-CCA. Segundo o critério de Seed, Woodward e Lundgren (1962), para o tempo de cura de 0 dias, o solo puro apresenta Alta expansividade, reduzindo para Média expansividade apenas no percentual de 10% de CCA. Com 120 dias de cura, a partir do percentual de 6% de CCA a mistura já é considerada com Média expansividade.

Utilizando os critérios de Cuellar (1978), Figura 33, com 0 dias de tempo de cura o solo natural é classificado com uma expansividade Muito Alta, reduzindo para Média com o incremento de cinza de casca de arroz. Para o tempo de cura de 120 dias, a expansividade cai para Baixa, a partir de 6% de CCA.

Tabela 17 - Classificação da expansão "livre" segundo dois critérios.

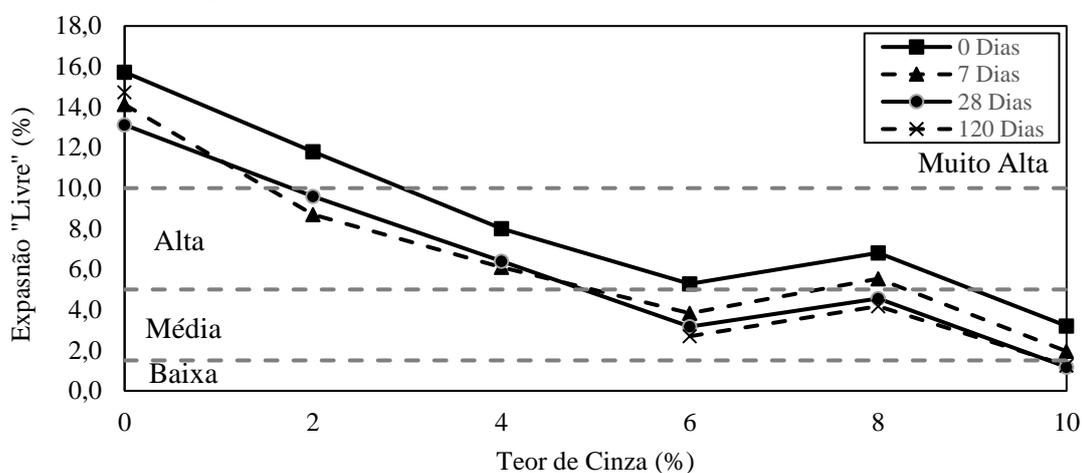
Amostra	0 Dias	Critério 1	Critério 2	120 Dias	Critério 1	Critério 2
Solo Puro	15,7	Alta	Muito Alta	14,7	Alta	Média
Solo Puro + 2%	11,8	Alta	Muito Alta	-	-	-
Solo Puro + 4%	8,0	Alta	Alta	-	-	-
Solo Puro + 6%	5,3	Alta	Alta	2,7	Média	Baixa
Solo Puro + 8%	6,8	Alta	Alta	4,2	Média	Baixa
Solo Puro + 10%	3,2	Média	Baixa	1,3	Média	Baixa

Critério 1: SEED, WOODWARD E LUNDGREN (1962)

Critério 2: CUELLAR (1978)

Fonte: A autora, 2018.

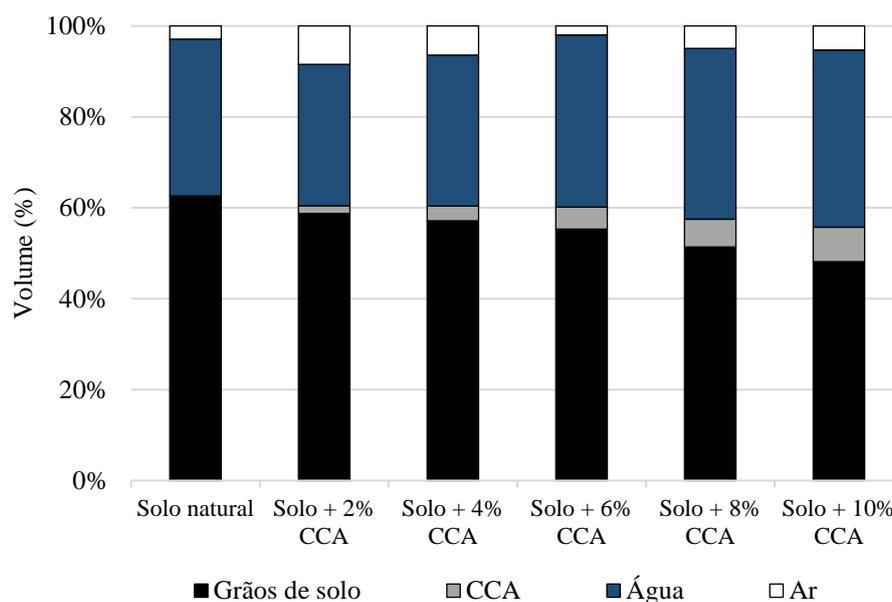
Figura 33 - Expansão "livre" segundo critério de Cuellar (1978).



Fonte: A autora, 2018.

Na Figura 34, são apresentados os valores percentuais em volume de grãos de solo, cinza de casca de arroz, água e ar do solo natural e misturas solo-CCA. Pode-se observar que houve a redução da fase sólida ao incorporar 2% de CCA na massa de solo, ocasionado pelo aumento de ar. Nas misturas de solo-CCA evidencia-se o acréscimo do volume de vazios com o aumento da umidade.

Figura 34 - Percentual de grãos de solo, CCA e água e ar para um mesmo volume de solos e misturas.



Fonte: A autora, 2018.

Outros autores vêm estudando a adição de cinza de casca de arroz em diferentes solos expansivos do estado de Pernambuco, tais como: (1) Bezerra (2018); (2) Lacerda (2018); e (3) Silva (2018). Os resultados encontrados por eles encontram-se na Tabela 19.

Em todos os trabalhos estudados em Pernambuco com a adição de cinza de casca de arroz, o percentual de 10% apresenta a menor expansão livre, com tendência em reduzir mais de 50% da expansão do solo natural.

Tabela 18 - Resultado da expansão livre de outros autores utilizando Cinza de Casca de Arroz.

Amostra	Paulista	Brejo da Madre de Deus (1)	Cabrobó (2)	Agrestina (3)
Solo Puro	15,7	24,2	0,9	20,0
Solo Puro + 2%	11,8	18,7	3,0	14,35
Solo Puro + 4%	8,0	16,3	0,7	10,4
Solo Puro + 6%	5,3	15,4	0,7	12,15
Solo Puro + 8%	6,8	13,9	0,3	9,7
Solo Puro + 10%	3,2	13,2	0,0	6,87
Redução da expansão "livre" Solo Puro / 10% de CCA	-80%	-45%	-100%	-65%

(3) Dados com 7 dias de cura*

Fonte: A autora, 2018.

4.3.2 Ensaios de Tensão de Expansão

A Tabela 20 apresenta os resultados dos ensaios de tensão de expansão do solo natural e das amostras de solo-CCA nos tempos de cura de 0 dias, 7 dias, 28 dias e 120 dias resultantes do ensaio do método do volume constante. O solo natural apresentou uma tensão de 81,70 kPa e a adição de cinza de casca de arroz resultou na redução gradativa da tensão de expansão à medida que aumentou o teor de cinza de casca de arroz. Para os percentuais estudados nesta pesquisa, não foi possível zerar a tensão de expansão, mas para o percentual de 10% de CCA a redução foi de 88%, o que pode ser administrado a depender do projeto estrutural a que o solo será exposto.

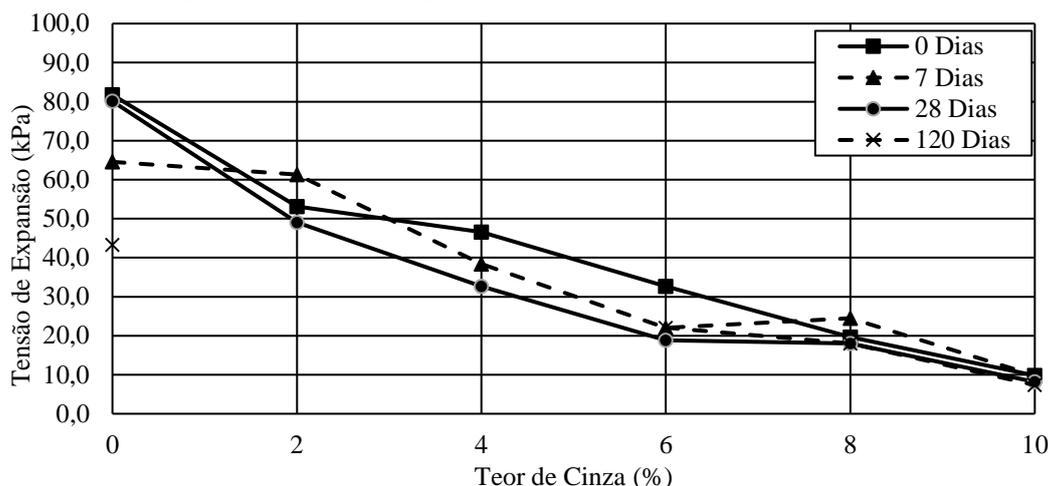
Tabela 19 - Valores das tensões de expansão obtidas pelo método do volume constante.

Tensão de expansão (kPa) - Método Volume Constante				
Amostra / Tempo de Cura	0 Dias	7 Dias	28 Dias	120 Dias
Solo Puro	81,7	64,6	80,1	43,3
Solo Puro + 2%	53,1	61,3	49,0	-
Solo Puro + 4%	46,6	38,4	32,7	-
Solo Puro + 6%	32,7	22,1	18,8	22,1
Solo Puro + 8%	19,6	24,5	18,0	18,0
Solo Puro + 10%	9,8	9,8	8,2	7,4

Fonte: A autora, 2018.

A influência do tempo de cura em relação à tensão de expansão do solo pode ser observada na Figura 35. Há a redução tanto à medida que o percentual de cinza aumentou quanto com o tempo de cura. Há redução significativa na tensão de expansão do solo natural (81,7% com 0 Dia para 43,3% com 120 Dias), porém, para as misturas ainda há redução, mas não de forma significativa. A mistura com o percentual de 10% foi a que apresentou menor redução, 88% para os ensaios com 0 dia de cura e 91% com 120 dias de cura.

Figura 35 - Tensão de expansão versus Teor de cinza de casca de arroz.



Fonte: A autora, 2018.

O solo natural do município de Paulista compactado na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, apresentou com 0 dia de cura, segundo o critério de Jimenez Salas (1980), possibilidade de ocorrência de Fissuras Importantes. Não houve variação para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias, mas com 120 dias o solo pode ser classificado com tendência a Fissuras Pequenas.

Com a adição gradativa da cinza de casca de arroz, nota-se a redução da tendência de fissuração ou danos às estruturas, passando de Fissuras Importantes (2%), Fissuras Pequenas (4% e 6%) até a possibilidade de não haver Danos as estruturas (8% e 10%). Não há variação significativa na tendência a fissuração em relação ao tempo de cura das amostras, Tabela 21.

Tabela 20 - Classificação segundo Jimenez Salas (1980).

CRITÉRIO JIMENEZ SALAS (1980)				
Amostra	0 Dias	7 Dias	28 Dias	120 Dias
Solo Puro	Fissuras Importantes	Fissuras Importantes	Fissuras Importantes	Fissuras Pequenas
Solo Puro + 2%	Fissuras Importantes	Fissuras Importantes	Fissuras Pequenas	-
Solo Puro + 4%	Fissuras Pequenas	Fissuras Pequenas	Fissuras Pequenas	-
Solo Puro + 6%	Fissuras Pequenas	Fissuras Pequenas	Fissuras Pequenas	Fissuras Pequenas
Solo Puro + 8%	Sem Danos	Fissuras Pequenas	Sem Danos	Sem Danos
Solo Puro + 10%	Sem Danos	Sem Danos	Sem Danos	Sem Danos

Fonte: A autora, 2018.

De acordo com o Critério de Cuellar (1978), Tabela 21, a tensão de expansão do solo natural é considerada média, sem haver variação de acordo com o tempo de cura. O incremento de cinza de casca de arroz reduziu a tensão de expansão, passando de Média à Baixa. O percentual de 8% já apresenta Baixa tensão de expansão.

4.3.3 Comparação da Tensão de Expansão do Solo de Paulista com misturas de Cinza de casca de arroz, Areia e Cal

O solo de Paulista vem sendo amplamente estudado nos últimos anos por diversos autores quanto suas características, comportamento e métodos de estabilização. Paiva (2016) avaliou o comportamento do solo de Paulista-PE utilizando a Cal como processo de estabilização química nos percentuais de 3%, 5%, 7% e 11% em peso. Os ensaios foram realizados com amostras compactadas na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo.

O solo natural apresentou uma expansão “livre” de 12,3%, reduzindo para 1,1%, 0,2% e 0% respectivamente com incremento da cal. Segundo o critério de Cuellar, 1978, o solo saiu da classificação de expansão “livre” Muito Alta para Baixa. O percentual de 7% chegou a zerar a expansão livre do solo, Tabela 22. Para se obter resultado semelhante de Baixa expansividade é preciso a adição de 10% de cinza de casca de arroz ao solo de Paulista.

Tabela 21 - Valores de Expansão “Livre” do solo de Paulista e misturas solo-CCA, solo-Cal e solo-Areia.

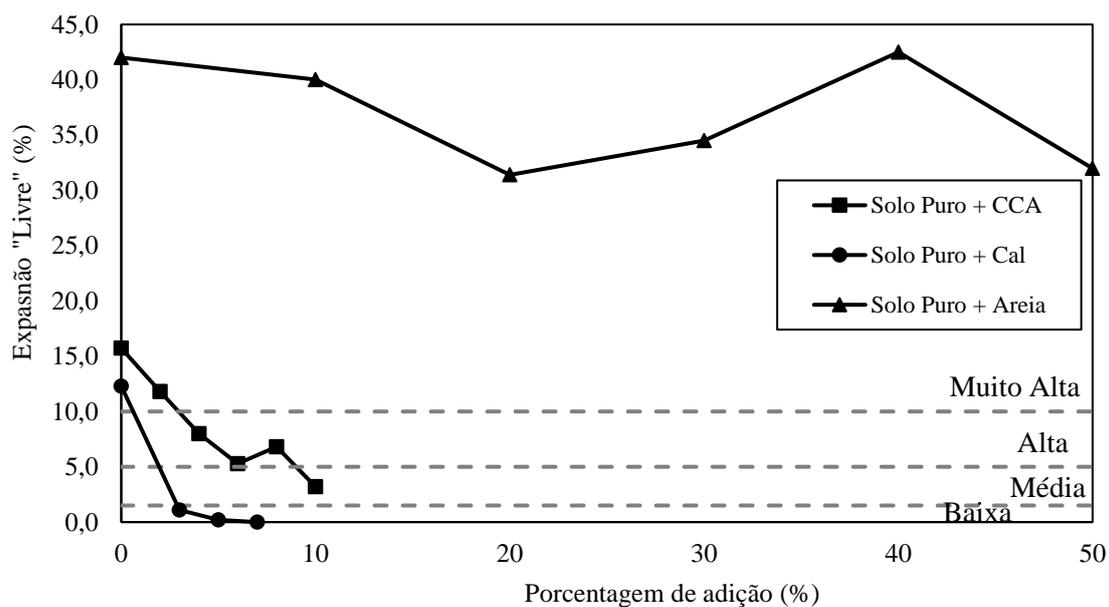
Amostra	Expansão Livre (%)	Critério Cuellar (1978)	Referência
Solo puro (SP)	12,3	Muito Alta	
SP + 3% Cal	1,1	Baixa	Paiva (2016)
SP + 5% Cal	0,2	Baixa	
SP + 7% Cal	0,0	Baixa	
Solo puro (SP)	42,0	Muito Alta	
SP +10% Areia	40,0	Muito Alta	Cavalcanti (2017)
SP +20% Areia	31,4	Muito Alta	
SP +30% Areia	34,5	Muito Alta	
SP +40% Areia	42,5	Muito Alta	
SP +50% Areia	32,0	Muito Alta	

Solo puro (SP)	15,7	Muito Alta	
SP + 2% de CCA	11,8	Muito Alta	
SP + 4% de CCA	8,0	Alta	A autora (2018)
SP + 6% de CCA	5,3	Alta	
SP + 8% de CCA	6,8	Alta	
SP + 10% de CCA	3,2	Baixa	

Fonte: A autora, 2018.

A estabilização granulométrica com areia foi avaliada por Cavalcanti, 2017, para os percentuais de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. O solo natural apresentou 42,0% de expansão “livre” e a adição de 50% de areia reduziu a expansão para 32%. Mesmo com a adição de 50% de areia não foi possível reduzir significativamente a expansão “livre”, reduzindo 23,8% da expansão do solo, Figura 36.

Figura 36 - Expansão “livre” do solo de Paulista/PE e das misturas com adição de CCA, Areia e Cal.



Fonte: A autora, 2018.

Uma comparação dos resultados de tensão de expansão definidos através do método do volume constante para adições de cinza de casca de arroz, cal e areia é apresentado na Tabela 23.

Tabela 22 - Valores de Tensão de Expansão do solo de Paulista e misturas solo-CCA, solo-Cal e solo-Areia.

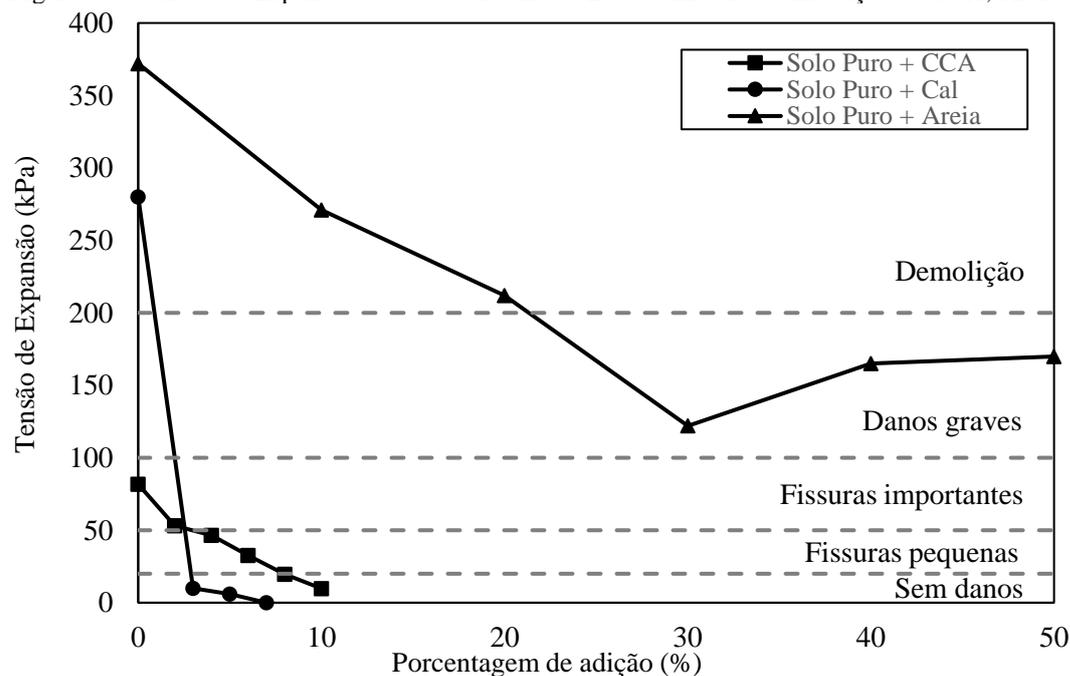
Amostra	Tensão de Expansão (kPa) - Método Volume Constante	Critério Jimenez Salas (1980)	Referência
Solo puro (SP)	280,0	Demolição	
SP + 3% Cal	10,0	Sem danos	Paiva (2016)
SP + 5% Cal	6,0	Sem danos	
SP + 7% Cal	0,0	Sem danos	
Solo puro (SP)	372,0	Demolição	
SP +10% Areia	271,0	Demolição	Cavalcanti (2017)
SP +20% Areia	212,0	Demolição	
SP +30% Areia	122,0	Danos graves	
SP +40% Areia	165,0	Danos graves	
SP +50% Areia	170,0	Danos graves	
Solo puro (SP) compactado	81,7	Fissuras importantes	
SP + 2% de CCA	53,1	Fissuras importantes	Autora
SP + 4% de CCA	46,6	Fissuras pequenas	
SP + 6% de CCA	32,7	Fissuras pequenas	
SP + 8% de CCA	19,6	Sem danos	
SP + 10% de CCA	9,8	Sem danos	

Fonte: A autora, 2018.

Observa-se uma variação nos valores do solo puro quando estudado em momentos diferentes e por autores diferentes, isto se dá pela heterogeneidade do solo em sua formação. O solo natural estudado por Paiva (2016) e Cavalcanti (2017) apresenta pelo critério de Jimenez Salas (1980), risco de demolição, e quando estudado nesta pesquisa apresenta fissuras importantes.

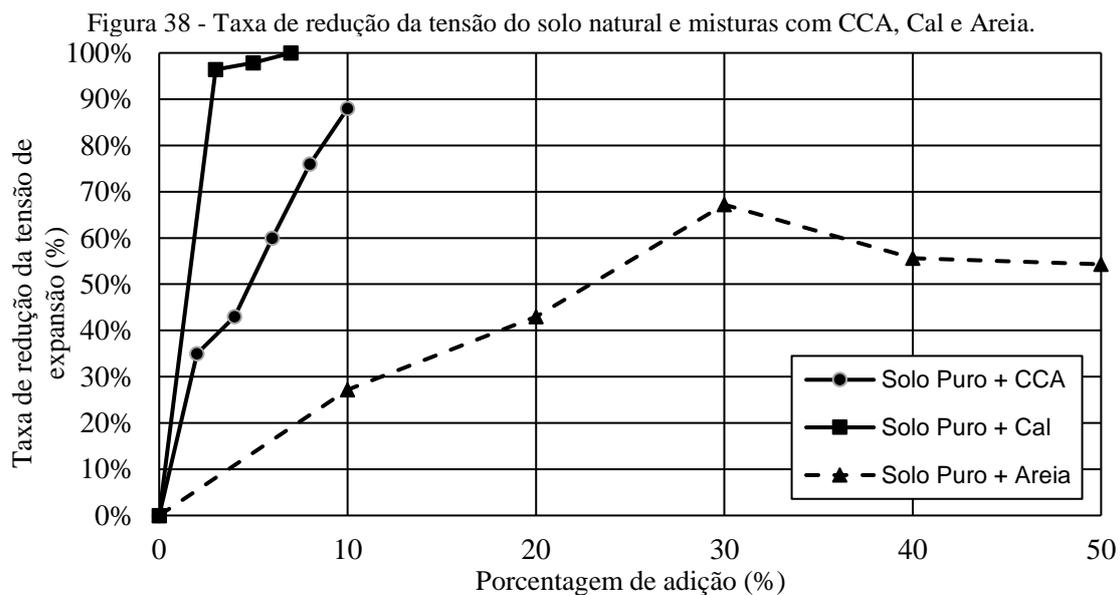
Os teores da mistura solo-cal não apresentam risco a danos. Com o incremento de areia nas misturas de solo-areia há a redução do risco de demolição à danos graves e com o acréscimo de CCA, as misturas solo-CCA reduzem o risco de fissuras importantes até zerar o risco às estruturas. Houve a diminuição na tensão de expansão nas três misturas estudadas, sendo a mistura solo-cal a que apresenta maior variação, chegando a zerar o valor da tensão de expansão, Figura 37.

Figura 37 - Tensão de Expansão do solo de Paulista/PE e das misturas com adição de CCA, Areia e Cal.



Fonte: A autora, 2018.

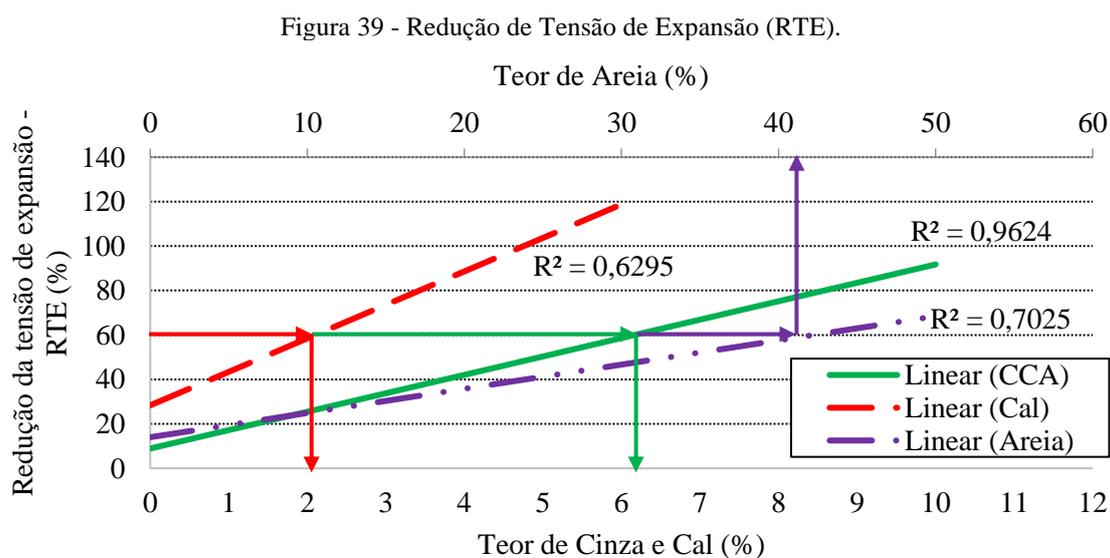
A Figura 38 apresenta o percentual de redução na tensão de expansão do solo e suas misturas. Na mistura solo-cal a redução na tensão de expansão foi de 100% para o percentual de 7% de cal, na mistura solo-CCA houve a redução de 88% na mistura com 10% de CCA e na mistura solo-areia reduziu 67% para o percentual de 30% de areia.



Fonte: A autora, 2018.

A adição de areia às misturas não foi suficiente para reduzir a tensão de expansão à valores inferiores a 20 kPa (sem danos as edificações – pelo critério de Jimenez Sales (1980). Situação semelhante foi encontrada por Ataíde (2016), em que o acréscimo de 30% de areia ao solo de Ipojuca/PE reduziu a tensão de expansão de 250 kPa a 99 kPa, indicando ainda o aparecimento de fissuras importantes e muito próximo da indicação de danos graves pelo critério de Jimenez Salas (1980). Ou seja, ambas as situações, Cavalcanti (2017) e Ataíde (2016), não alcançaram valores de tensão de expansão inferior a 20 kPa, de modo a evitar danos as edificações, critério de Jimenez Salas (1980).

A Figura 39 relaciona a Redução da Tensão de Expansão (RTE) com os percentuais adicionados gradativamente de cinza de casca de arroz, cal e areia ao solo de Paulista. A Equação 4.1 está relacionada a adição de cal; a Equação 4.2 à adição de cinza de casca de arroz; e a equação 4.3 correlaciona a redução da tensão de expansão com a adição de areia ao solo natural.



Equação 4.1 - RTE Cal	$RTE \% = 15,071 * (\%Cal) + 28,334$
Equação 4.2 - RTE CCA	$RTE \% = 8,2857 * (\%CCA) + 8,905$
Equação 4.3 - RTE Areia	$RTE \% = 1,0891 * (\%Areia) + 13,991$

Fonte: A autora, 2018.

Assim, a partir dessas informações é possível prever a equivalência na adição de cal, cinza de casca de arroz e areia à uma determinada tensão de expansão, colaborando para a melhor definição do método de melhoramento a ser aplicado ao solo levando em consideração os quantitativos de cada aditivo e custo de cada um.

$$(\% \text{ CCA}) = 1,8189 * (\% \text{ CAL}) + 2,3448$$

$$\text{Equação 4.4 - RTE(CCA) = RTE(CAL)}$$

$$(\% \text{ CCA}) = 0,1223 * (\% \text{ Areia}) + 0,5711$$

$$\text{Equação 4.5 - RTE(CCA) = RTE(AREIA)}$$

$$(\% \text{ Areia}) = 13,838 * (\% \text{ CAL}) + 13,1695$$

$$\text{Equação 4.6 - RTE(AREIA) = RTE(CAL)}$$

Ou seja, para uma redução da tensão de expansão em 60%, deve-se utilizar uma porcentagem de 2,1% de CAL, 6,2% de CCA ou 42,2% de Areia.

4.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

No Quadro 03, são apresentados os resultados do ensaio de compressão simples para dois corpos de prova e suas médias de solo natural e misturas solo-CCA. São apresentados os resultados dos dois corpos de provas para o mesmo solo e das respectivas médias. Observa-se que há a tendência no aumento da tensão máxima de ruptura quando adicionado cinza até o teor de 4% e posteriormente o decréscimo na resistência. Assim, concluiu-se que há o incremento de resistência à mistura apenas até o teor de 4%, teores de cinza de casca de arroz acima de 4% há uma diminuição.

Materiais com características pozolânicas geram compostos com propriedades ligantes, gerando um ganho de resistência na mistura. No percentual de 4% de CCA, nota-se um ganho na resistência, o que pode ser explicado pela maior eficácia nas reações pozolânicas e da cimentação entre os grãos. Para teores maiores há um excesso de CCA no solo que forma ligações mais fracas e compósitos cimentícios. Resultados semelhantes foram encontrados por Adhikary e Jana (2016), onde o decréscimo mais visível na resistência ocorre para o percentual de 8%, que pode ter ocorrido devido as fracas ligações entre o solo e a cinza. Com o incremento de 10% de cinza observa-se um crescimento na resistência à compressão, o que pode ser justificado pelas reações entre o material pozolânico e o hidróxido de cálcio, que levam um tempo maior para estabilizar.

A redução na resistência ocasionado pela adição gradativa de cinza de casca de arroz, pode ser justificada pelo menor contato grão a grão das misturas com maiores percentuais de CCA, o que segundo Adhikary e Jana (2016) e Alhassan (2008), pode ser devido ao excesso de CCA introduzido no solo e que geram ligações fracas entre o solo e os compostos formados.

Quadro 3 - Resistência à Compressão Simples.

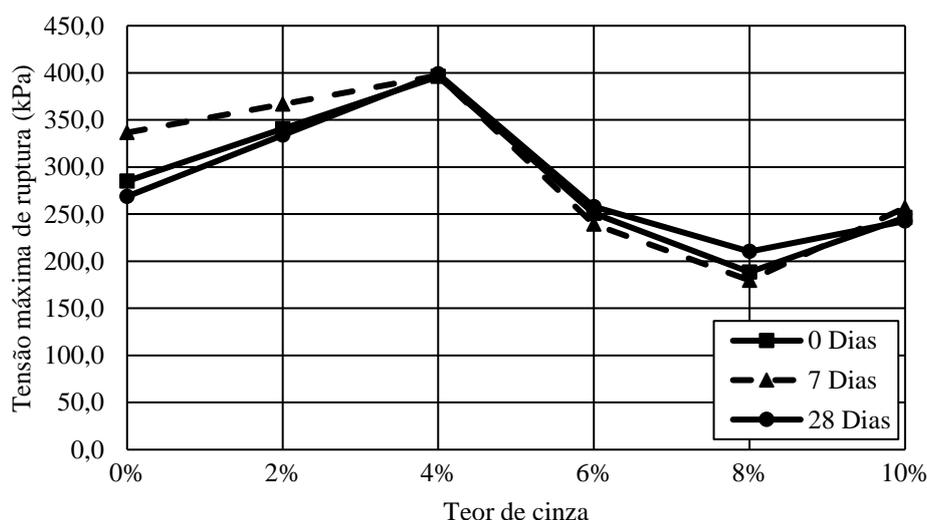
%	σ Max - kPa						σ Médias		
	0 Dias		7 Dias		28 Dias		0 Dias	7 Dias	28 Dias
	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2			
0%	294,99	275,33	336,51	336,51	273,14	264,40	285,16	336,51	268,77
2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4%	398,79	393,33	409,71	384,59	423,92	373,66	396,06	397,15	398,79
6%	239,27	262,22	238,18	240,37	251,29	264,40	250,75	239,27	257,85
8%	185,74	191,20	179,18	180,27	207,59	213,05	188,47	179,73	210,32
10%	242,55	250,20	251,29	262,22	253,48	231,63	246,38	256,75	242,55

Fonte: A autora, 2018.

Quando analisamos a variação na tensão máxima de ruptura x o tempo de cura, Figura 40, temos que a variação entre as datas dos ensaios pouco influência no resultado da tensão do solo e misturas. Conclui-se, então, que o tempo de cura das amostras não influencia de forma significativa a resistência à compressão simples. Comportamento semelhante foi encontrado por Alhassan (2008).

Há evidências que ocorrer um teor ótimo de CCA que misturado ao solo apresenta uma maior resistência à compressão simples. Alhassan (2008) encontrou o teor ótimo para 6% e 8% de CCA para o solo de Minna, Silva (2018) encontrou o teor de 8% e 10% de CCA para o solo de Agrestina e no presente trabalho foi encontrado o teor de 4% para o solo de Paulista.

Figura 40 - Tensão máxima de ruptura x Teor de Cinza.



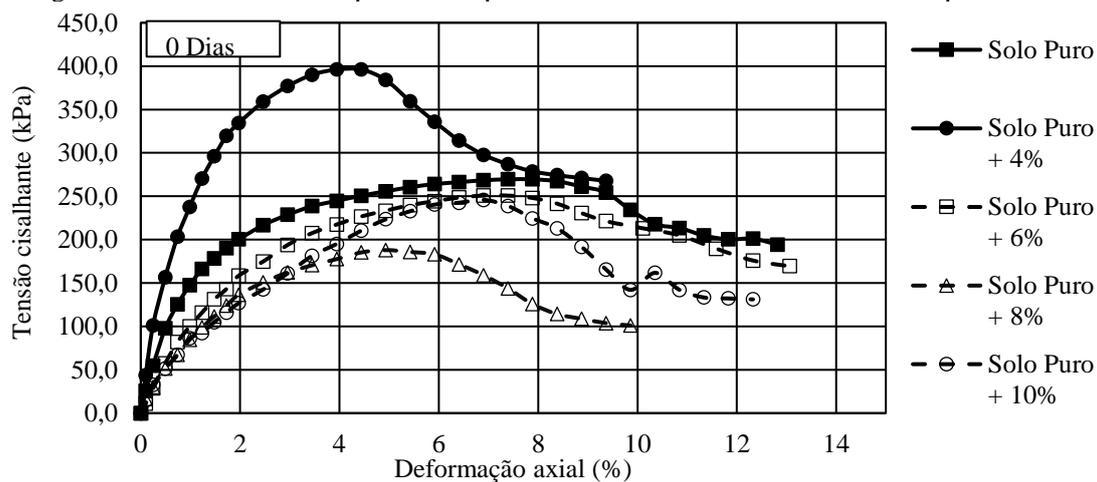
Fonte: A autora, 2018.

As Figuras 41, 42 e 43 apresentam o comportamento do gráfico de resistência à compressão simples em relação a deformação axial das amostras de solo natural e

misturas solo-CCA nos percentuais de 4%, 6%, 8% e 10% para os tempos de cura de 0 dias, 7 dias e 28 dias.

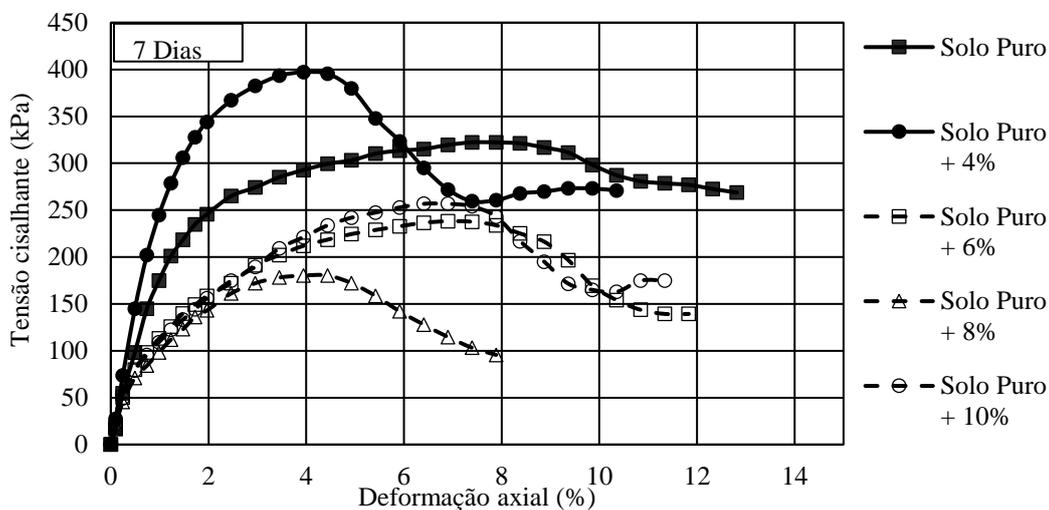
O comportamento das curvas tensão x deformação é de pico, indicando tratar-se de um material friável. A deformação axial correspondente à resistência cisalhante máxima varia de 4% a 8% de deformação.

Figura 41 - Resistência a Compressão Simples do solo e misturas com 0 Dias de Tempo de Cura.



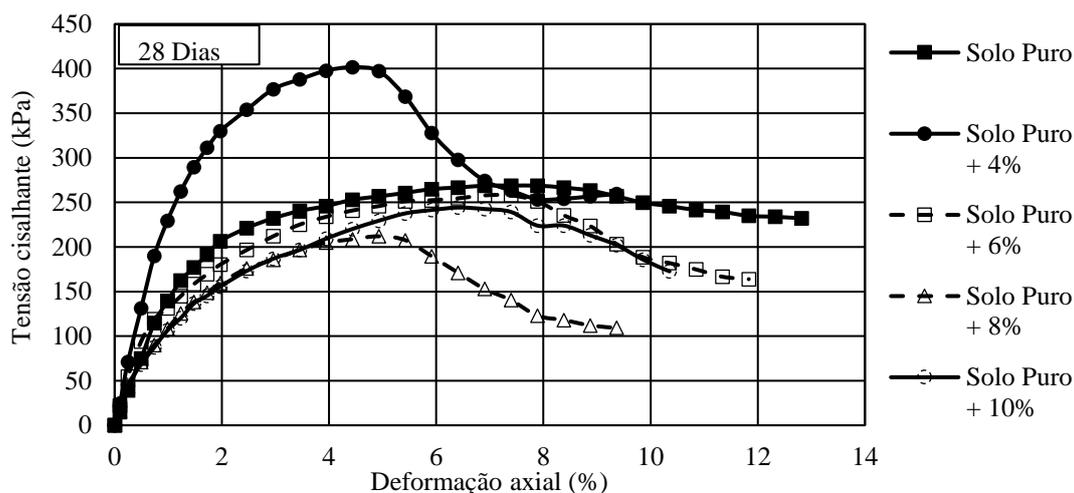
Fonte: A autora, 2018.

Figura 42 - Resistência a Compressão Simples do solo e misturas com 7 Dias de Tempo de Cura.



Fonte: A autora, 2018.

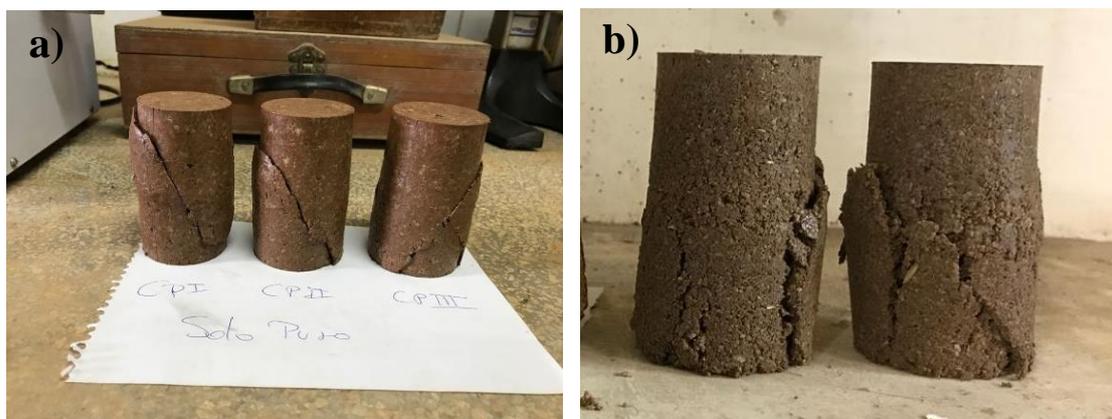
Figura 43 - Resistência a Compressão Simples do solo e misturas com 28 Dias de Tempo de Cura.

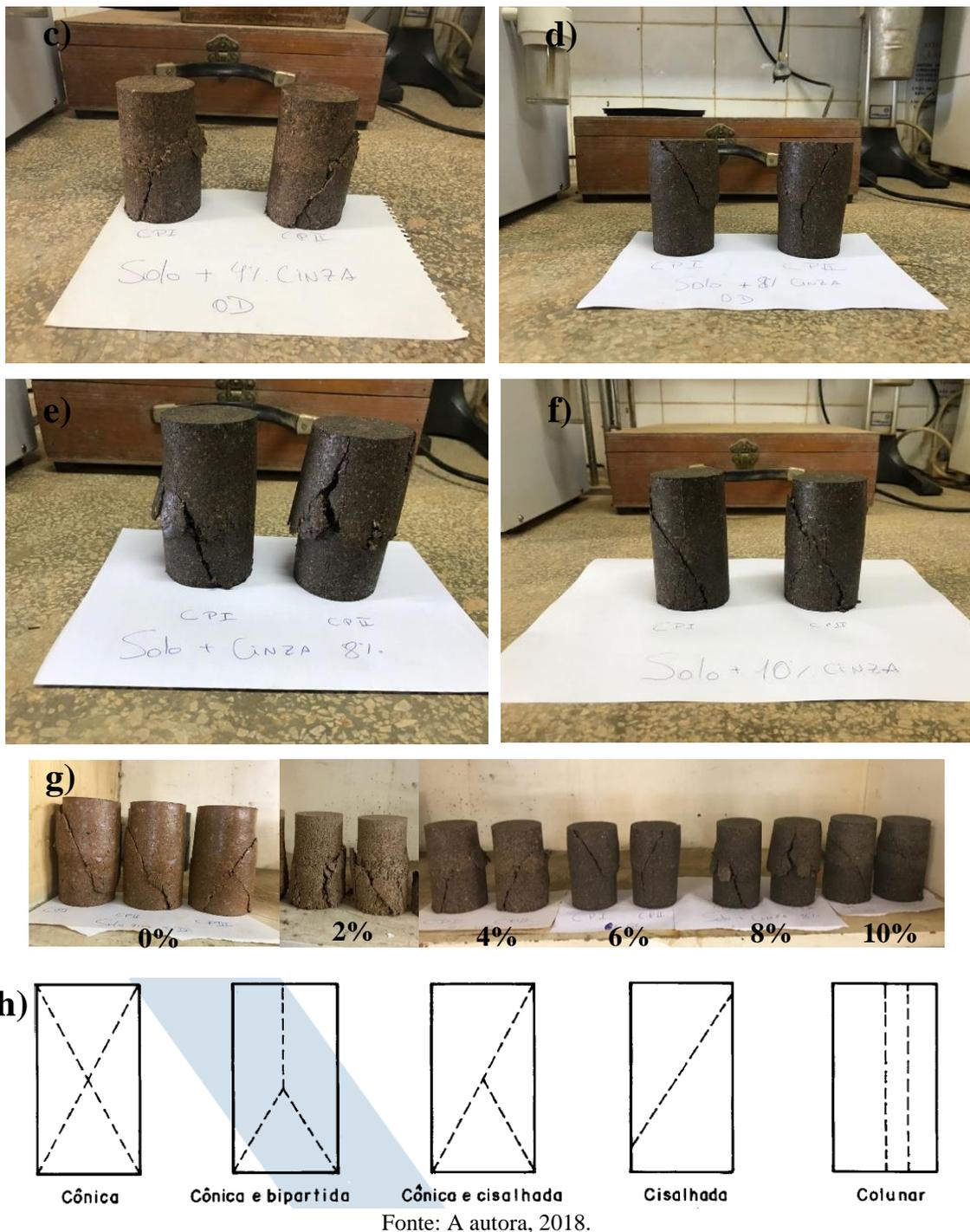


Fonte: A autora, 2018.

A Figura 44, apresenta o comportamento de ruptura do solo natural e das misturas solo-CCA. Utilizando como base a norma para ensaios de compressão de corpos cilíndricos de concreto, ABNT NBR 5739, para os corpos de prova ensaiados com 0 dia de cura, todos, tanto solo natural quanto as misturas solo-CCA, apresentaram ruptura dos corpos de prova tipo cisalhada. Mesmo comportamento foi observado para os corpos de prova ensaiados com 7 dias de tempo de cura e com 28 dias de tempo de cura, Apêndice A.

Figura 44 - Comportamento na ruptura das amostras com 0 dia de cura: a) Solo Puro; b) Solo + 2%; c) Solo + 4%; d) Solo + 6%; e) Solo + 8%; f) Solo + 10%; g) Misturas, h) Tipos de ruptura segundo a ABNT NBR 5739.





4.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

O Quadro 04 apresenta os resultados da resistência à compressão diametral das amostras de solo natural e suas misturas solo-CCA nos tempos de cura de 0 dias, 7 dias e 28 dias.

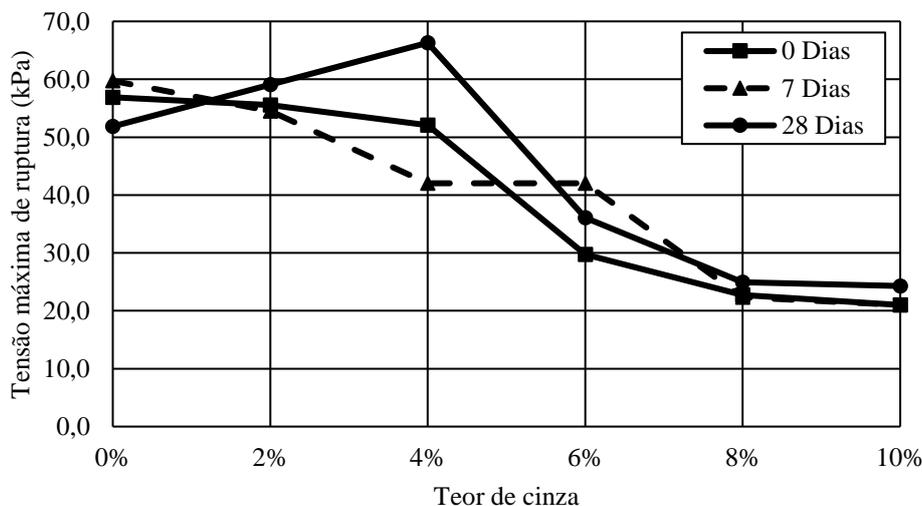
Quadro 4 - Resistência a Compressão Diametral.

%	σ Max - kPa							σ Médias		
	0 Dias			7 Dias		28 Dias		0 Dias	7 Dias	28 Dias
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2			
0%	45,94	53,82	70,89	66,95	52,51	55,13	48,57	56,88	59,73	51,85
2%	57,76	63,01	45,94	55,134	53,821	55,134	63,010	55,57	54,48	59,07
4%	47,26	59,07	49,88	48,57	35,44	76,14	56,45	52,07	42,01	66,29
6%	32,82	28,88	27,57	45,94	38,07	39,38	32,82	29,75	42,01	36,10
8%	23,63	23,63	21,00	22,32	22,32	26,25	23,63	22,75	22,32	24,94
10%	23,63	19,69	19,69	23,63	18,38	23,63	24,94	21,00	21,00	24,29

Fonte: A autora, 2018.

Observa-se que para os três tempos de cura há a redução da resistência à compressão diametral com o incremento de cinza de casca de arroz. As amostras com percentual de 10% de CCA apresentaram a menor resistência à compressão diametral, cerca de 37% da resistência do solo natural. O tempo de cura pouco interfere na resistência à compressão diametral das amostras, Figura 45.

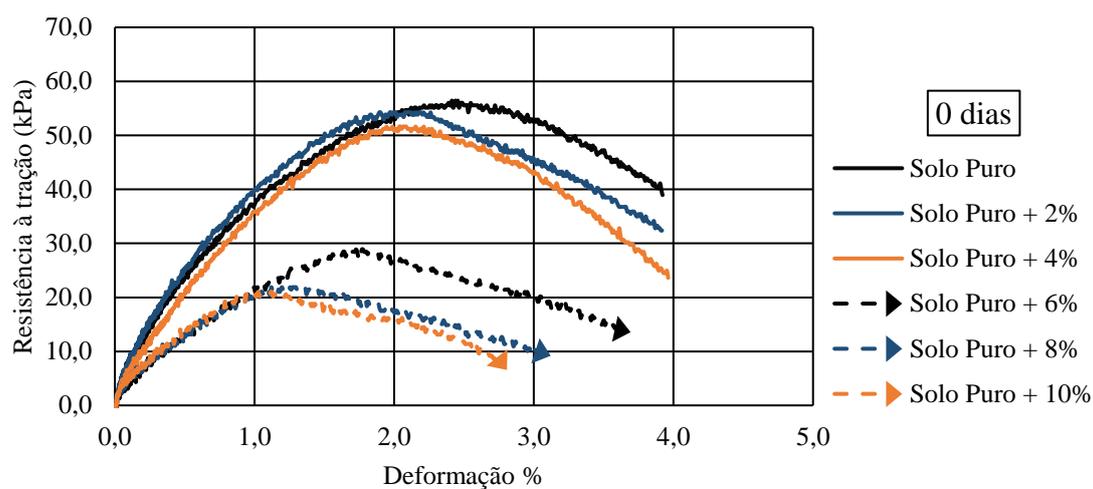
Figura 45 - Compressão diametral em relação ao tempo de cura das amostras.



Fonte: A autora, 2018.

A deformação dos corpos de prova analisados com 0 dia de tempo de cura variou entre 1% a 2,5%, com pico máximo de ruptura para a amostra de solo puro, reduzindo conforme o acréscimo de cinza. A adição de cinza de casca de arroz, além de reduzir a resistência à compressão diametral também reduziu a capacidade de deformação das amostras, havendo uma significativa redução a partir do percentual de 6%, Figura 46.

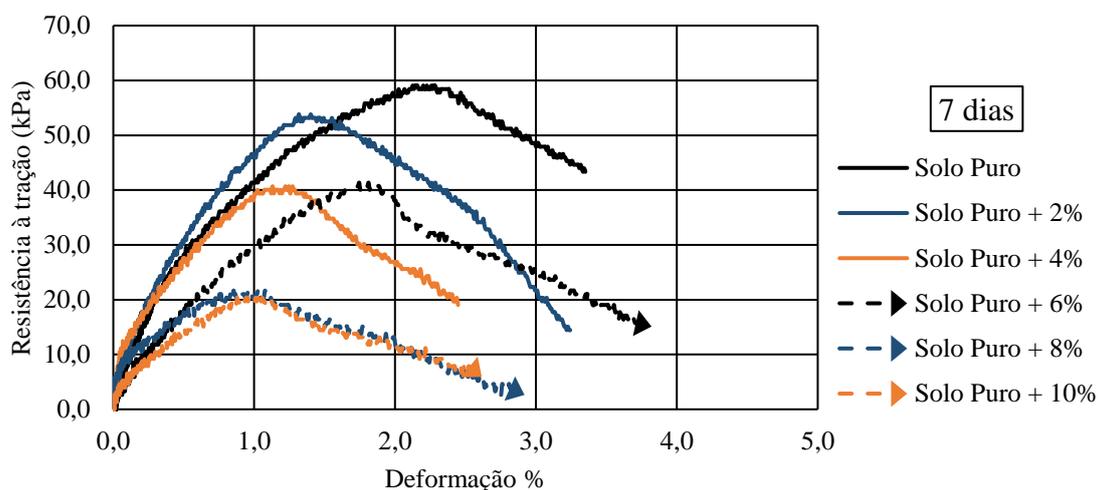
Figura 46 - Resultados da compressão diametral para o tempo de cura de 0 dias.



Fonte: A autora, 2018.

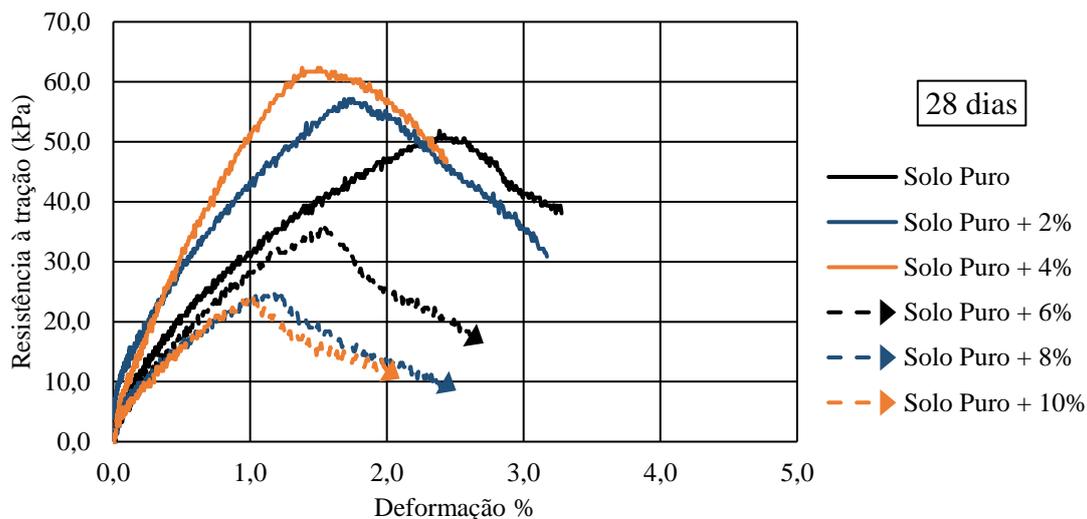
Para 7 dias de cura, a deformação máxima na resistência de ruptura reduziu para o intervalo de 0,8% a 2,2% e para 28 dias a deformação variou de 1,0% a 2,5%. Em ambos os tempos de cura, a resistência de ruptura apresentou tendência de redução. A redução mais significativa nos tempos de cura de 7 e 28 dias foi a partir do percentual de 8%, Figuras 47 e 48.

Figura 47 - Resultados da compressão diametral para o tempo de cura de 7 dias.



Fonte: A autora, 2018.

Figura 48 - Resultados da compressão diametral para o tempo de cura de 28 dias.



Fonte: A autora, 2018.

As Figuras 49 a 54, apresentam o comportamento de ruptura dos corpos de prova do solo puro e das misturas solo-CCA com 2%, 4%, 6%, 8% e 10% com 0 dia de cura. Todos os corpos de prova, incluindo os executados com 7 dias e 18 dias de cura, apresentaram ruptura do tipo colunar, segundo a norma para ensaios de compressão de corpos cilíndricos de concreto, ABNT NBR 5739. As fotos dos corpos de prova com 7 e 28 dias de cura encontram-se no Apêndice B.

Figura 49 - Ensaio de compressão diametral – amostra 0% - 0 dia de cura.



Fonte: A autora, 2018.

Figura 50 - Ensaio de compressão diametral – amostra 2% - 0 dia de cura.



Fonte: A autora, 2018.

Figura 51 - Ensaio de compressão diametral – amostra 4% - 0 dia de cura.



Fonte: A autora, 2018.

Figura 52 - Ensaio de compressão diametral – amostra 6% - 0 dia de cura.



Fonte: A autora, 2018.

Figura 53 - Ensaio de compressão diametral – amostra 8% - 0 dia de cura.



Fonte: A autora, 2018.

Figura 54 - Ensaio de compressão diametral – amostra 10% - 0 dia de cura.



Fonte: A autora, 2018.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS

São apresentadas as principais conclusões que resultaram da análise da adição de cinza de casca de arroz a um solo expansivo do município de Paulista-PE com o intuito de estabilizá-lo.

5.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

- A caracterização física realizada na cinza de casca de arroz identifica que o tamanho dos grãos varia entre 0,03 e 5 mm, evidenciando o elevado teor de finos no material. A CCA apresenta umidade ótima de 109%, peso específico aparente seco máximo de 5,15 kN/m³ e peso específico dos grãos de 19,1 kN/m³. A cinza estudada apresenta índice de plasticidade NP.
- O solo natural de Paulista apresenta textura fina e alto teor de finos, onde mais de 70% dos grãos passam da peneira N° 200. O percentual de argila no solo é de 53,4% e de silte, 17,75%. A relação silte/argila é de 0,33, o que é característico de argilas expansivas.
- As misturas solo-CCA apresentam as mesmas características granulométricas do solo natural, onde a relação silte/argila nos percentuais de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% é de 0,39; 0,43; 0,38; 0,43 e 0,42, respectivamente, assim a CCA praticamente não modifica a granulometria.
- Através dos ensaios de limites de Atterberg, o solo natural apresenta limite de liquidez de 57,53, limite de plasticidade de 24,82 e índice de plasticidade de 0,61, sendo considerado altamente plástico. Com a adição de cinza de casca de arroz houve o aumento no limite de liquidez e limite de plasticidade, conseqüentemente a redução no índice de plasticidade. A maior redução no IP foi com o percentual de 10% de CCA no solo, atingindo o percentual de 31,64. Mesmo com a redução do IP, as misturas em todos os percentuais analisados são de alta plasticidade.
- Houve a redução no índice de atividade do solo natural para as misturas solo-CCA, saindo de 0,61 para 0,58, com o percentual de 10% de CCA.
- A umidade média das amostras aumentou conforme o incremento da cinza de casca de arroz, saindo de 3,72%, solo natural, para 5,77% com a mistura de 10% de CCA.
- Houve pouca variação no peso específico real dos grãos, com leve redução conforme o teor de cinza aumentava.

- Segundo o sistema unificado de classificação dos solos, o solo natural é classificado como CH, argila muito plástica e altamente compressível. As misturas em todos os percentuais também são classificadas como CH.
- Segundo a classificação AASHTO, o solo natural é classificado como um solo argiloso fraco (A-7-6). Nas misturas solo-CCA, apenas o percentual de 8% não teve a mesma classificação do solo natural, variando para um solo argiloso com moderada plasticidade (A-7-5).
- As curvas de compactação do solo natural e misturas apresentam apenas um pico, sendo para o solo natural e os percentuais de 6% e 8% classificadas como tipo D, segundo a classificação de Lee e Suedkamp (1972) e para os percentuais de 2%, 4% e 6%, tipo B.
- Com o incremento da CCA há o aumento da umidade ótima, ocasionado pelo aumento na superfície específica da cinza, assim, absorvendo mais água pela cinza. Houve a redução no peso específico aparente seco máximo, devido à baixa densidade da cinza de casca de arroz.
- A adição de CCA no solo eleva o pH de ácido, para as misturas, classificadas entre fortemente ácido e ácido. A CCA possui um pH alcalino, 7,6. O solo natural e as misturas apresentam elevada condutividade elétrica devido ao excesso de finos (caráter sálico); Alta capacidade de troca catiônica; e Solo natural e misturas com valores elevados de saturação por base (solo eutrófico de alta fertilidade).
- A cinza de casca de arroz apresenta excelente potencial pozolânico, pois possui um alto valor de Óxido de Sílica em sua composição, 95,37%.
- O solo natural apresenta um percentual de expansão de 15,7%. Aumentando-se o tempo de repouso para a realização dos ensaios, é observada uma leve redução na expansão “livre” de 14,1% (7 dias), 13,1% (28 dias) e 14,7% (120 dias), devido a própria variação dos ensaios.
- O incremento gradativo da cinza de casca de arroz ao solo de Paulista reduziu de forma significativa a expansão “livre”, chegando a reduzir cerca de 80% com o percentual de 10% de CCA. Para o tempo de 120 dias de cura, houve a redução de 92% da expansão “livre” do solo natural. Assim, a CCA se mostra eficaz na estabilização da expansão do solo, obtendo os melhores resultados para o teor de 10%, saindo de uma classificação de expansão Muito Alta para uma classificação de baixa expansão.
- A CCA também teve impacto positivo na redução da tensão de expansão do solo natural, variando de 81,7 kPa para 9,8 kPa. Analisando em relação ao tempo de cura, o

solo natural a 120 dias reduziu a tensão de expansão para 43,3 kPa e o percentual de 10%, percentual que apresenta o melhor desempenho, reduziu para 7,4 kPa. Assim, o solo natural que poderia causar Fissuras Importantes a estrutura passou a ser classificado como um solo que não apresenta danos as construções.

- Em relação a compressão axial das amostras estudadas, a influência da adição da cinza de casca de arroz também foi observada, reduzindo, assim, a resistência do solo natural conforme foi acrescido o percentual de CCA. O percentual de 4% de CCA nas amostras apresentou um ganho de resistência, enquanto os demais percentuais levaram a redução da resistência axial das amostras. Apresentou pouca variação em relação ao tempo de cura.
- O mesmo ocorreu com os resultados da compressão diametral, onde a mesma foi reduzindo conforme foi elevada a adição de cinza de casca de arroz. Houve, também, pouca variação nos resultados em relação ao tempo de cura, o que pode nos indicar que o tempo entre a moldagem e a execução do ensaio pouco interfere no resultado.
- Conclui-se que a CCA utilizada na pesquisa tem propriedade de pozolânicos, reduz a expansão “livre” e a tensão de expansão. Para o solo de Paulista é indicado um teor mínimo de 8% para que não haja danos nas edificações apoiadas neste solo. O percentual ótimo para ganho de resistência a compressão é 4% entretanto, este potencial ainda não estabiliza totalmente o solo, sendo recomendado para edificações maiores que 4 pavimentos.

5.2 PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, ficam como sugestões para trabalhos futuros as seguintes análises:

- A caracterização micro estrutural das amostras com cinza de casca de arroz para avaliar as ligações entre os grãos do solo e a CCA;
- A caracterização mineralógica por termogravimetria;
- A caracterização da cinza de casca de arroz após queima controlada;
- A análise da expansão “livre” e tensão de expansão do solo utilizando misturas com CCA oriunda da queima controlada;
- Análise da resistência do solo natural e misturas através de ensaios de resistência ao cisalhamento.

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.

AKINYELE, J. O.; SALIM, R. W.; OIKELOME, K. O.; OLATEJU, O. T. **The use of rice husk ash as a stabilizing agente in lateritic clay soil**. International Science Index, Civil and Environmental Engineering, v. 9, n. 11, p. 1373-1377, 2015.

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

AMORIM, SAMUEL FRANÇA (2004). **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC – PE)**. Recife: O Autor,. xviii, 244 folhas : il., fig., fotos, tab.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

_____**NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 9 p., 2007.

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

_____**NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade**, Rio de Janeiro, 3 p., 1984.

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

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

_____**NBR 12007: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro, 13 p., 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM):

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

_____**ASTM D5102 – Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures**. 1996.

BAPTISTA, C. F. N. (1976) **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, RS.

BARBOSA, V. (2013). **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. Dissertação de MSc, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 115p.

BEZERRA, IZABELLE M. T.; SOUZA, JOZILENE; CARVALHO, JOÃO B. Q. DE; NEVES, GELMIRE S. A. (2011). **Aplicação da Cinza da Casca do Arroz em Argamassas de Assentamento**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, PB.

BEZERRA, A.L. (2018) – **Variação de volume de um solo expansivo do Brejo da Madre de Deus em seu estado natural e misturado com cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco – Recife. 2018. (No Prelo).

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

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.

CAVALCANTI, LUÍZA CARDOSO (2017). **Estabilização granulométrica de uma argila expansiva de Paulista-PE**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP – Recife. 2017.

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

CLIMATE-DATA. **CLIMA: PAULISTA**. < <https://pt.climate-data.org/location/4450/>> Acessado em 03 de Agosto de 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (2015). **A Cultura do Arroz**. Brasília: CONAB, 2015.

CONSTANTINO, C. S.; LACERDA, L. S. N.; BEZERRA, A. L.; FERREIRA, S. R. M. (2018). **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**. Artigo Científico – 16º CNG – Ponta Delgada – Portugal, 2018.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto**. Ambiente Construído, v.9, p.99- 107, 2009b.xA

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

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.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo** (1997). < https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf> Acessado em 03 de Agosto de 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do município de Paulista – PE.** < <http://http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/pe/paulista.pdf>> Acessado em 03 de Agosto de 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo** (2001).

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, 1999.

FATTAH, M. Y.; RAHIL, F. H.; AL-SOUDANY, K. Y. H. **Improvement of clayey soil characteristics using rice husk ash.** *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, v. 3, n. 1, p. 12-19, 2013.

FERREIRA, S. R. M. (1988). “**Solos Especiais – Colapsíveis, Dispersivos e Expansivos**”, Relatório Anual do CNPq.

FERREIRA, S. R. M. (1995). **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação.** Tese (Doutorado) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 401 p.

FERREIRA, S. R. M. (2010). **Volume change behaviour due to moisture variation in vertisoil from a semiarid region in Pernambuco – Brazil.**

FERREIRA, S. R. M. et al (2012). **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.

FRASCÁ, M. H. B. O.; SARTORI, P. L. P. Minerais e rochas. In: OLIVEIRA, A. S.; BRITO, S. N. A. (Eds). **Geologia de engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998, p. 15-38.

GONDIM, L. M. (2008). **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará.** Dissertação 171 de Mestrado, Programa de Mest

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

HOUSTON, D.F. **Rice, chemistry and technology**. American Association of Cereal Chemical. St. Paul. Minnesota, USA, 1972, p. 301-351

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Senso de 2015.

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

JUSTINO DA SILVA, JOSÉ MARIA. (2001) **Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva não Saturada Submetida a Diferentes Condições Climáticas**. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

LACERDA, L.S.S.N. (2018) - **Análise do comportamento geotécnico de um solo de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco – Recife. 2018 (No Prelo).

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

MAHLER, CLAUDIO FERNANDO (1994). **Análise de Obras Assentes em Solos Colapsíveis e Expansivos**. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). UFRJ - Rio de Janeiro, RJ – Brasil, julho de 1994.

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

MORAIS, JOANDERSON JAMES DE OLIVEIRA (2017). **Caracterização geotécnica da expansividade de um solo argiloso do município de Paulista-PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UFPE – Recife. 2017.

PAIVA, SERGIO CARVALHO DE. 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.

PAIVA, WILLIAM DE (2009). **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco - Recife: O Autor, 2009.

PATEL, P.; MAHIYAR, H. K. (2014). **A experimental Study of black cotton soil, stabilized with rice husk ash, fly ash and lime**. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).

PEREIRA, E. M., (2004). **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada.** Dissertação (Mestrado) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 227pp.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/3ª Edição** São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 365p. ISBN 978-85-86238-51-2

QUISPE, T. R.; NAVARRO, T. R.; CUADROS, G. J. L. **Mecánica de Suelos II – Suelos Expansivos, Suelos Dispersivos y Colapsables** publicado em maio 2014 em <http://es.slideshare.net/yordidipasganboa/copia-de-exposicin-suelos-ii-grupo> acessado em 03 de agosto de 2018.

RODRIGUEZ ORTIZ, J. M. (1975); **Las arcillas Expansivas: su estudio y tratamiento.** Bol . de inf. del Laboratorio del transporte y Mecánica del Suelo, nº108, pp.3-30.

ROGERS, J. D; OLSHANSKY, R.; ROGERS, R. B.; **Damage to Foudations From Expansive Sols.** Acesso em 05 de agosto de 2018, disponível em https://web.mst.edu/~rogersda/expansive_soils/DAMAGE%20TO%20FOUNDATION%20FROM%20EXPANSIVE%20SOILS.pdf

SANTOS, L.C. (2015). **Estudo da estabilização de um solo expansivo através da incorporação de areia verde de fundição residual.** Trabalho de conclusão de curso. Joinville, 2015, volume único, 80p.

SEED, H. B.; WOODWARD, D. J.; LUNDGREN, R. **Prediction for compacted clays.** Journal soil mechanics and Foundations division, asce, V.88, sm 3 pp 53-87, 1962.

SILVA, J. A. (2018) - **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 (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco – Caruaru. 2018.

SNETHEN, D. R.; JOHNSON, L. D.; PATRICK, D. M. **An evaluation of expedient methodology for identification of potentially expansive soil.** Washington: FHWARD, 1977. p. 77-94.

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

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.

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

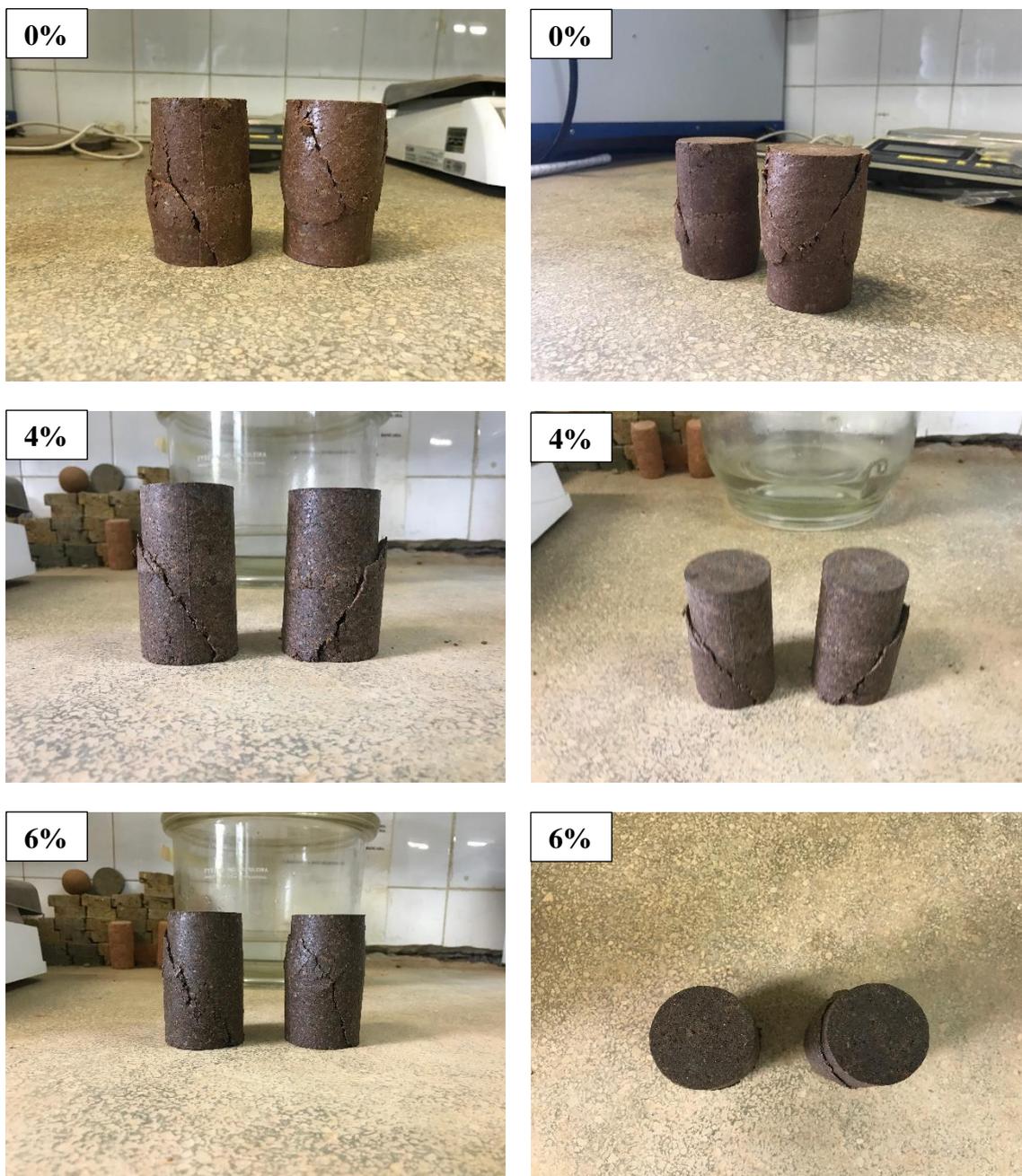
VINH, P. P. **Utilization of rice hsk ash in geotechnology: applicability and effect of the bruning conditions.** 2012. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil e Geociencias, Universidade Deft de Tecnologia, Dublin.

WANDER, A. E.; CHAVES, M. O. **Consumo aparente per capita de arroz no Brasil, 2001 a 2010.** In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado: Racionalizando Recursos e Ampliando Oportunidades, 7., Balneário Camboriú-SC. Anais. Balneário Camboriú-SC: Epagri/SOSBAI, 1, 2011.

WILLIAMS, A. A. B.(1957). **Studies of shear strength and bearing capacity of some partialllyaturated sands. Proceedings of theFourth Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering,** London, Vol. 3, pp. 453-456.

APÊNDICE A – COMPRESSÃO SIMPLES

Figura 55 - Ensaio de compressão simples – 7 dias de cura.





Fonte: A autora, 2018.

Figura 56 - Ensaio de compressão simples – 28 dias de cura

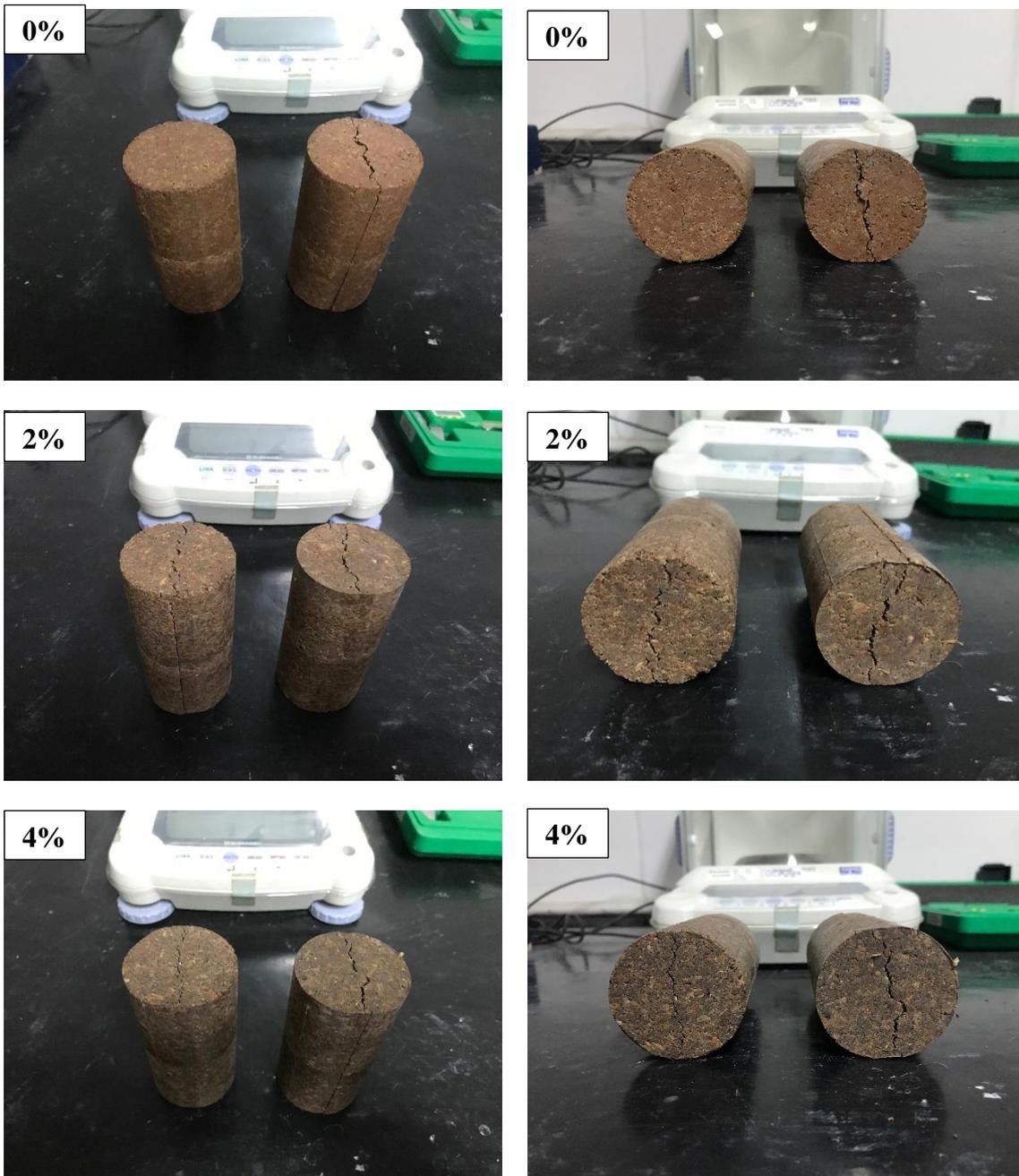




Fonte: A autora, 2018.

APÊNDICE B -COMPRESSÃO DIAMETRAL

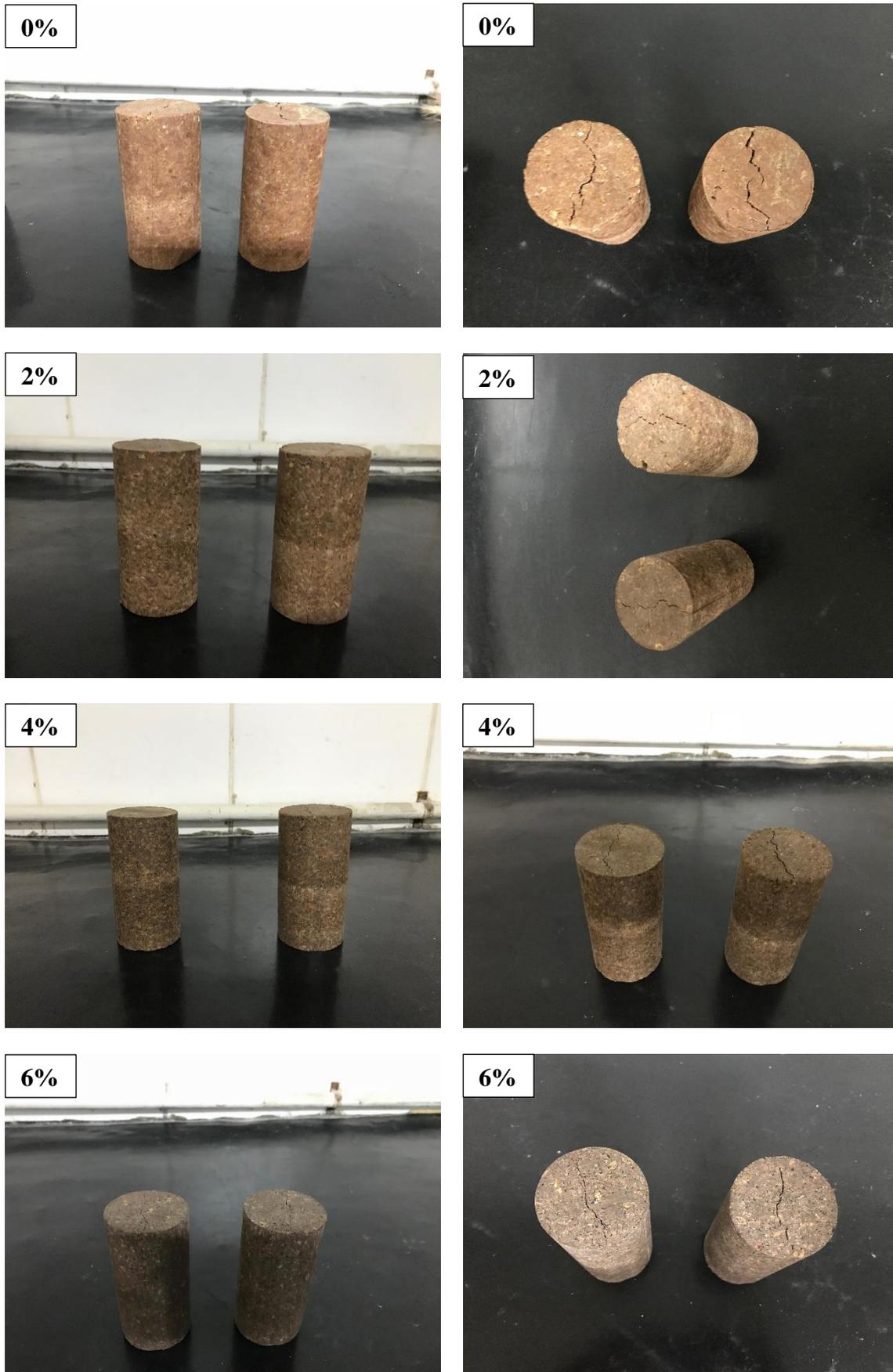
Figura 57 - Ensaio de compressão diametral – 7 dias de cura.

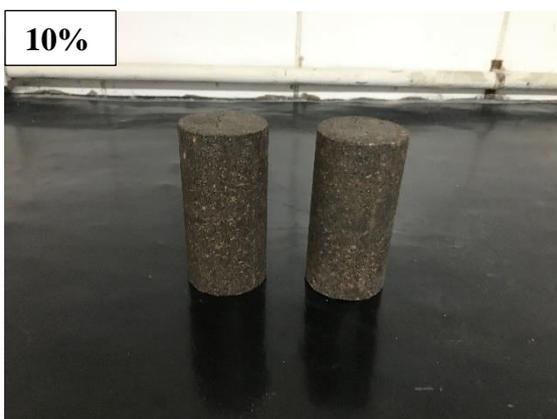
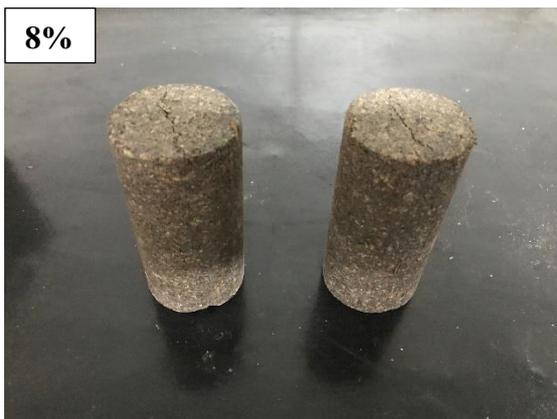




Fonte: A autora, 2018.

Figura 58 - Ensaio de compressão diametral – 28 dias de cura.





Fonte: A autora, 2018.