



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

LUIZ SANTIAGO SOUZA DO NASCIMENTO DE LACERDA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE SOLOS DE CABROBÓ,
POTENCIALMENTE EXPANSIVOS, ESTABILIZADOS COM CINZA DE CASCA
DE ARROZ**

Recife

2019

LUIZ SANTIAGO SOUZA DO NASCIMENTO DE LACERDA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE SOLOS DE CABROBÓ,
POTENCIALMENTE EXPANSIVOS, ESTABILIZADOS COM CINZA DE CASCA
DE ARROZ**

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

Área de concentração: Geotecnia.

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

Recife

2019

Catalogação na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

L131a Lacerda, Luiz Santiago Souza do Nascimento de.
Análise do comportamento geotécnico de solos de Cabrobó,
potencialmente expansivos, estabilizados com cinza de casca de arroz / Luiz
Santiago Souza do Nascimento de Lacerda - 2019.
82 folhas, Il.; Tabs.; Abrev.

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

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Solos não-saturados. 3. Solos expansivos. 4.
Estabilização de solos. 5. Cinza de casca de arroz I. Ferreira, Silvio Romero de Melo
(Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019 - 86

LUIZ SANTIAGO SOUZA DO NASCIMENTO DE LACERDA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE SOLOS DE CABROBÓ,
POTENCIALMENTE EXPANSIVOS, ESTABILIZADOS COM CINZA DE CASCA
DE ARROZ**

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

Aprovada em: 26/02/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Sérgio Carvalho de Paiva (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus avós
Arister Alves de Souza e Maria Leandro Lacerda (*in memorian*),
com todo meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo apoio na minha jornada acadêmica e por todo suporte durante as coletas de materiais para uso nesse trabalho;

Ao professor D.Sc. Silvio Romero de Melo Ferreira pela orientação, dedicação, suporte, disponibilidade, paciência e confiança no meu potencial para executar esse trabalho;

Aos professores de Geotecnia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, que muito contribuíram para o meu crescimento profissional;

Ao IF Sertão-PE pelo incentivo a capacitação de seus servidores.

À equipe técnica do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal do Vale do São Francisco para a realização de parte dos ensaios, em especial ao professor Dr. Gerson Marques dos Santos e aos laboratoristas José Cicero Barboza de Oliveira e Johniê dos Anjos Alves;

À equipe técnica do Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade Federal do Vale do São Francisco para a realização dos ensaios de compressão simples e diametral, em especial ao professor Dr. Nelson Cárdenas Olivier;

Ao professor Dr. Sérgio Carvalho de Paiva da Universidade Católica de Pernambuco pelo tempo disponibilizado para realização dos ensaios químicos;

À Emanuel Ivo de Mendonça por todo suporte, atenção e compreensão.

Aos colegas do programa de mestrado da UFPE, pela união e cooperação durante todo o curso;

Ao senhor Valmir Antonio da Silva por fornecer a cinza de casca de arroz;

A todos que contribuíram direta e indiretamente para o desenvolvimento dessa pesquisa.

RESUMO

O município de Cabrobó em Pernambuco, concentra a maior parte do arroz produzido no estado e a Construção Civil na cidade está em crescimento devido as obras de Integração do Rio São Francisco. A casca de arroz é utilizada no processo de geração de energia térmica para a parboilização do arroz e a cinza gerada nesse processo é um material leve utilizado para redução da acidez na agricultura local. Os solos expansivos podem acarretar problema para as edificações pela variação de volume que ocorre quando há mudança de umidade, devido a presença de argilominerais do tipo 2:1 que facilitam a absorção de moléculas de água. O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento geotécnico de dois solos (C1 e C2) potencialmente expansivos de Cabrobó em estado natural e suas misturas com proporções, em peso de solo seco, de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de cinza de casca de arroz (CCA) para reduzir a expansividade do solo. Neste trabalho foram realizados ensaios de caracterização Física, Química e Mecânica para estudo do comportamento do solo na presença da CCA. O solo C1 apresentou baixa expansividade e o solo C2 exibiu média expansividade. A proporção de 8% de CCA com solo C2 reduziu a tensão de expansão para baixa aos 28 dias de tempo de cura. A adição de 10% de CCA ao solo C2 reduz a expansão “livre” e a tensão de expansão à valores que não causam danos às construções sem que seja necessário tempo de espera, porém aos 28 dias nessa proporção a expansividade é anulada. O incremento de CCA no solo C1 reduz a resistência à compressão simples, enquanto no solo C2 ocorre uma redução dessa resistência nas amostras sem tempo de cura, no entanto há um aumento dessa resistência nas amostras que com tempo de cura de 28 dias. A resistência à tração reduz em todas as combinações de CCA com os dois solos. Ao comparar os resultados da ação da CCA no solo C2 com um solo com adição de cal da pesquisa de Barbosa (2013), ambos materiais são eficazes na redução da expansividade.

Palavras-chave: Solos não-saturados. Solos expansivos. Estabilização de solos. Cinza de casca de arroz.

ABSTRACT

Cabrobó is a city in the Brazilian state of Pernambuco, that concentrates most of the rice produced in the state and the Civil Construction in the city is growing because of São Francisco's River Integration. The rice husk is used in the process of thermal energy generation for the parboiling process of the rice and the ash generated in this process is a light material used to reduce acidity in local agriculture. Expansive soils may cause problems to the buildings due to the volume variation that occurs when there is a change in humidity caused by the presence of 2:1 clay minerals that facilitate the absorption of water molecules. The objective of this work was to analyze the geotechnical behavior of two potentially expansive soils (C1 and C2) of Cabrobó in the natural state and their mixtures with dry soil weight ratios of 2%, 4%, 6%, 8% and 10% of rice husk ash (RHA) to reduce soil swelling. In this research, Physical, Chemical and Mechanical characterization tests were performed to study soil behavior in the presence of RHA. The soil C1 presented low expansivity and soil C2 showed average expansivity. The ratio of 8% CCA with soil C2 reduced the swelling pressure to low at 28 days. The addition of 10% CCA to the C2 soil reduces the free swelling and the swelling pressure to values that don't damage the constructions without curing time, but at 28 days at this rate, the expansivity is null. The increase of CCA in soil C1 reduces the simple compression strength, while in soil C2 a reduction of this resistance occurs in the samples without curing time, however there is a resistance increase in the samples 28 days of curing. The tensile strength reduces in all combinations of CCA with the two soils. When comparing the results of RHA action on soil C2 with a soil with lime addition from the research of Barbosa (2013), both materials are effective in reducing expansivity.

Keywords: Unsaturated soils. Expansive soils. Soils stabilization. Rice husk ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de arroz em Pernambuco	20
Figura 2 - Suscetibilidade à expansão dos solos em Pernambuco.....	23
Figura 3 - Comparativo de densidade real do solo natural e solo com CCA	25
Figura 4 - Limite de liquidez do solo e misturas	26
Figura 5 - Limite de plasticidade do solo e misturas	26
Figura 6 - Índice de plasticidade do solo e misturas	27
Figura 7- Peso específico seco máximo do solo e misturas	27
Figura 8 - Umidade ótima do solo e misturas.....	27
Figura 9 - Resistência à compressão simples do solo e misturas	27
Figura 10 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA	28
Figura 11 - Resistência à tração em função da umidade para o solo puro e misturas solo – CCA	28
Figura 12 - Curvas de compactação de um solo estabilizado.....	29
Figura 13 - Resistência à compressão simples das amostras de solo e misturas compactadas com energias intermediária e modificada	30
Figura 14 - Resistência à tração do solo e misturas com CCA.....	30
Figura 15 - Curva granulométrica de um solo do Paulista e suas respectivas misturas com CCA	31
Figura 16 - Curva granulométrica de um solo de Brejo da Madre de Deus e suas respectivas misturas com CCA.....	31
Figura 17 - Curva granulométrica de um solo de Agrestina e suas respectivas misturas com CCA	32
Figura 18 - Organograma do programa de investigação	34
Figura 19 - Coleta de bloco de solo indeformado	36
Figura 20 - Assentamento São José, local de coleta do solo C1	36
Figura 21 - Solo C2 coletado no Loteamento Maria Luiz.....	37
Figura 22 - Forno para queima da casca de arroz.....	38
Figura 23 - Curvas granulométricas das camadas do poço do solo C1	43

Figura 24 - Curvas de compactação das camadas do poço de escavação do solo C1	43
Figura 25 - Características básicas do perfil do poço escavado	44
Figura 26 - Curva granulométrica da CCA	46
Figura 27 - Curva de compactação da CCA	46
Figura 28 - Ensaio de sedimentação	47
Figura 29 - Curva granulométrica do solo C1 e suas misturas	48
Figura 30 - Curva granulométrica do solo C2 e suas misturas	48
Figura 31 - Composição das amostras para um mesmo volume	49
Figura 32 - Comparativo de peso específico real dos grãos	50
Figura 33 - Limite de liquidez e índice de plasticidade	52
Figura 34 - Determinação do potencial de expansão pelos critérios de a) Skempton (1953) e Williams (1957); b) Daksanamurthy e Raman (1973) e c) Seed et al. (1962)	53
Figura 35 - Curvas de compactação dos solos a) C1, b) C2 e suas misturas com CCA	54
Figura 36 - Variação de $\gamma_d \text{ máx}$ e w_{ot} nos solos em relação à proporção de CCA na amostra	55
Figura 37 - Variação de expansão "livre" em relação ao tempo de cura	60
Figura 38 - Variação da resistência compressão simples em relação ao período de cura das amostras a) solo C1 e misturas, b) C2 natural e misturas	62
Figura 39 - Curvas de RCS para amostras de solo C1 e suas misturas com 0 dias de cura	63
Figura 40 - Curvas de RCS para amostras de solo C1 e suas misturas com 7 dias de cura	63
Figura 41 - Curvas de RCS para amostras de solo C1 e suas misturas com 28 dias de cura	64
Figura 42 - Curvas de RCS para amostras de solo C2 e suas misturas com 0 dias de cura	64
Figura 43 - Curvas de RCS para amostras de solo C2 e suas misturas com 7 dias de cura	64
Figura 44 - Curvas de RCS para amostras de solo C2 misturada com CCA com 28 dias de cura	65
Figura 45 - Variação da resistência à tração por compressão diametral em relação ao período de cura das amostras a) solo C1 e misturas, b) C2 natural e misturas	66
Figura 46 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C1 e suas misturas com 0 dias de cura	67

Figura 47 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C1 e suas misturas com 7 dias de cura	67
Figura 48 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C1 e suas misturas com 28 dias de cura	67
Figura 49 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C2 e suas misturas com 0 dias de cura	68
Figura 50 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C2 e suas misturas com 7 dias de cura	68
Figura 51 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C2 e suas misturas com 28 dias de cura	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da CCA	21
Tabela 2 - Propriedades da CCA	22
Tabela 3 - Plasticidade no solo natural e com adição de CCA.....	26
Tabela 4 - Índice de plasticidade e resistência à compressão.....	28
Tabela 5 - Resultados de pH e limites de Atterberg.....	29
Tabela 6 - Normas utilizadas nos ensaios de caracterização	39
Tabela 7 - Resultados das análises químicas nas camadas do poço	44
Tabela 8 - Composição de óxidos nas camadas de solo por espectrometria de fluorescência de raios-X.....	45
Tabela 9 - Resultados de peso específico real dos grãos	50
Tabela 10 - Resultados de limites de Atterberg.....	51
Tabela 11 - Classificação das amostras	54
Tabela 12 - Resultados das análises químicas nos solos C1, C2 e suas misturas com CCA....	56
Tabela 13 - Porcentagem de óxidos e perda ao fogo nas amostras de CCA, solo C1 e suas misturas.....	58
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de expansão “livre” dos solos e misturas	59
Tabela 15 - Tensão de expansão pelo método do volume constante.....	61
Tabela 16 - Resultados do ensaio de compressão simples	62
Tabela 17- Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	65
Tabela 18 - Resumo das características apresentadas nos estudos de Barbosa (2013) e solo C2.....	69
Tabela 19 - Dados da análise granulométrica do Solo C1 e suas misturas com CCA	81
Tabela 20 - Dados da análise granulométrica do Solo C2 e suas misturas com CCA	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

100Na ⁺ /T	Saturação por sódio
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A-RHA	Amorphous rice husk ash
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSh	Clima semiárido segundo (classificação de Köppen-Geiger)
C-RHA	Carbon rice husk ash
Cr-RHA	Crystal rice husk ash
Cc	Coeficiente de curvatura
CCA	Cinza de casca de arroz
CE	Condutividade elétrica no extrato saturado
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CTC	Capacidade de troca catiônica
Cu	Coeficiente de uniformidade
EUA	Estados Unidos da América
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios-X
HRB	Highway Research Board
IC	Índice de consistência
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
m	Saturação por alumínio
MPC	Material perdido na combustão ou outros constituintes não identificados
NBR	Norma Brasileira
NP	Não plástico
P.F.	Perda ao fogo
RCS	Resistência à compressão simples
S	Soma de bases
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
V	Grau de saturação por bases
w_{nat}	Umidade natural
w_{ot}	Umidade ótima
δ	Densidade real do solo
$\gamma_{d\ máx}$	Peso específico aparente seco máximo
γ_g	Peso específico real dos grãos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	CINZA DE CASCA DE ARROZ	19
2.2	SOLOS EXPANSIVOS.....	22
2.3	APLICAÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ COMO ESTABILIZANTE	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	34
3.2	MATERIAIS.....	35
3.2.1	Solos	35
3.2.2	Cinza de casca de arroz	37
3.3	MÉTODOS.....	38
3.3.1	Preparação das amostras	38
3.3.2	Caracterização Física	39
3.3.3	Caracterização Química.....	39
3.3.4	Caracterização Mecânica	40
4	RESULTADOS E ANÁLISES	42
4.1	SOLOS.....	42
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	45
4.2.1	Cinza de casca de arroz	45
4.2.2	Solos e misturas.....	47
4.2.2.1	Granulometria	47

4.2.2.2	Peso específico real dos grãos	49
4.2.2.3	Limites de consistência.....	51
4.2.2.4	Classificação dos solos	53
4.2.2.5	Compactação.....	54
4.3	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	55
4.4	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	58
4.4.1	Expansão “livre”	58
4.4.2	Tensão de expansão	60
4.4.3	Resistência à compressão simples (RCS)	61
4.4.4	Resistência à tração por compressão diametral.....	65
4.5	COMPARAÇÃO COM UM SOLO DE CABROBÓ ESTABILIZADO COM CAL	69
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	72
5.1	CONCLUSÕES	72
5.2	SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS	75
	REFERÊNCIAS.....	76
	APÊNDICE A – Resultados dos ensaios de granulometria	81

1 INTRODUÇÃO

Os solos são produtos do intemperismo das rochas e carregam consigo as características mineralógicas da composição delas. Um dos elementos principais do intemperismo nas rochas é a água, que causa intemperismo físico com o impacto das gotas de chuva e intemperismo químico por ser um solvente universal. O volume de água nos solos ao longo do ano é um dos fatores de aceleração da ação intempérica e determinação da saturação do solo, dividindo-os em saturados e não saturados (FERREIRA, 1995).

Os solos não saturados podem apresentar variação de volume com a mudança de umidade, esses solos são chamados de colapsíveis ou expansivos. Colapsíveis quando apresentam uma estrutura metaestável que ao entrar em contato com líquidos, principalmente água, sofrem uma redução abrupta de volume. Expansivos manifestam aumento de volume com o incremento de água e contração ao ter sua umidade reduzida.

Solos expansivos estão associados à presença de minerais de natureza expansiva na sua composição, como os argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1, por exemplo vermiculita e montmorilonita (VILAR e FERREIRA, 2015). A instabilidade volumétrica causada por esses argilominerais, pode causar fissuras, fendas ou rupturas nas demais construções.

Segundo Nelson e Miller (1992), os danos causados pelos solos expansivos em edificações e obras de infraestrutura nos EUA, excedem 15 milhões de dólares anualmente. No Brasil não há dados que mensurem os danos causados pelos solos expansivos, entretanto já foram encontrados solos expansivos em todas as regiões do país, em especial na região nordeste, devido clima semiárido que favorece a presença desse tipo de solo.

A solução para os impactos causados pela expansividade dos solos às edificações é objeto de estudo ao redor do mundo. Soluções como impermeabilização do pavimento, substituição do solo, adição de cal ou areia são bem difundidas, entretanto há um outro método em discussão na comunidade acadêmica, a adição de cinza de casca de arroz (CCA).

1.1 JUSTIFICATIVA

A presença de solos expansivos em locais de construções civis e obras de infraestrutura é indesejada, devido à variação de volume de acordo com a mudança de sua umidade que pode causar danos desde fissuras pequenas à demolição da obra (SALAS, 1980). Uma das soluções aplicadas é a substituição do solo expansivo por um solo sem essa característica, no entanto é necessária a remoção do solo expansivo e descarte em local adequado. Outras soluções são a impermeabilização da área para a que não ocorra a variação de umidade do solo ou a adição de materiais que impeçam o solo de exercer a expansividade. As variadas possibilidades de adições de materiais fazem com que as alternativas de estabilização de solos expansivos são objetos de pesquisas para determinação de teores de ideais do material.

No estado de Pernambuco, são desenvolvidas pesquisas para melhoramento de solos expansivos a partir da adição de materiais como a cal, areia e, mais recentemente, cinza de casca de arroz (CCA), aplicadas à solos de mesorregiões (Zona da Mata, Agreste e Sertão) que apresentam diferentes formações e condições climáticas. Autores como Bezerra (2019), Constantino (2018) e Silva (2018) tratam do comportamento geotécnico de solos expansivos tratados com cinza de casca de arroz nas cidades de Brejo da Madre de Deus, Paulista e Agrestina, respectivamente.

O município de Cabrobó/PE é uma das poucas cidades pernambucanas que produz arroz, entretanto é a maior produtora desse cereal no estado (CONAB, 2015). Em diversos locais dessa cidade são encontrados solos expansivos, como observado por Ferreira et al. (2012). Barbosa (2013) também observou a presença de solos expansivos na cidade e propôs, em sua pesquisa, o melhoramento com uso da cal. Mas levando em consideração a produção orizícola, o uso da CCA pode se tornar uma possibilidade de direcionamento do resíduo gerado para uso em obras civis a serem construídas sobre esse tipo de solo na cidade.

1.2 OBJETIVOS

A pesquisa tem por objetivo geral analisar o comportamento geotécnico de dois solos potencialmente expansivos de Cabrobó/PE e de suas misturas com cinza de casca de arroz. Para atingir o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- caracterizar Física e Quimicamente a cinza da casca de arroz produzido em Cabrobó/PE;
- caracterizar Física e Quimicamente os solos do Assentamento São José e do Loteamento Maria Luiz na cidade de Cabrobó/PE, e das misturas desses solos com cinza de casca de arroz nas proporções em peso de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%;
- avaliar a expansão “livre” e tensão de expansão dos solos naturais e das misturas desses solos com adição de cinza de casca de arroz, com diferentes tempos de cura;
- avaliar a resistência à compressão simples (RCS) e compressão diametral dos solos naturais e das misturas desses solos com adição de cinza de casca de arroz, com diferentes tempos de cura;
- comparar os resultados de expansibilidade e compressão simples com um solo da mesma região estabilizado com cal presente na pesquisa de Barbosa (2013).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em 5 capítulos, apresentados da seguinte forma:

- No Capítulo 1 são apresentadas a introdução expondo a justificativa, objetivo e estrutura da pesquisa realizada.
- No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica com destaque nos estudos realizados sobre a composição da CCA, índices geotécnicos e propriedades de solos expansivos estabilizados com CCA.
- No Capítulo 3 apresenta sumariamente os materiais e métodos utilizados para realização dos ensaios laboratoriais para obtenção dos resultados.

- O Capítulo 4 apresenta os resultados e as análises realizadas na pesquisa com a cinza de casca de arroz e os solos do Assentamento São José e do Loteamento Maria Luiza de Cabrobó/PE;
- O Capítulo 5 expõe as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são apresentados os estudos realizados sobre a composição da cinza de casca de arroz (CCA) e suas características, índices geotécnicos e propriedades de solos expansivos estabilizados com CCA.

2.1 CINZA DE CASCA DE ARROZ

O arroz é um cereal utilizado para alimentação de seres humanos e determinadas raças de animais, ele é um dos principais alimentos de mais da metade da população mundial (CONAB, 2015). A produção mundial de cereais em 2017 foi de 2.650,798 milhões de toneladas, o cultivo do arroz é de 504,575 milhões de toneladas, que o torna o terceiro cereal mais produzido no mundo, atrás apenas das lavouras de milho e trigo (FAO, 2018).

O Brasil tem sua economia alicerçada na produção agrícola e o arroz é dos cereais produzidos no país, sendo o maior produtor de arroz fora do continente asiático e o nono maior produtor mundial em 2016 (FAO, 2018). Além de fazer parte dos pratos típicos brasileiros, ele é produto de exportação e ocupa o terceiro lugar como cereal mais exportado (CONAB, 2018). A produção de arroz no país data da época do seu descobrimento acontecia em pequenas fazendas do Nordeste e tratava-se de lavouras para subsistência. As lavouras empresariais de arroz surgiram no Rio Grande do Sul e, atualmente, concentram-se nessa região (CONAB, 2015). Entretanto, alguns estados fora da região Sul, como Pernambuco e Sergipe, possuem lavouras comerciais para consumo regional desse produto.

O arroz para consumo produzido no país é comercializado com casca ou beneficiado, subdividindo-se em classes (determinadas pelo tamanho dos grãos) e em tipos (característica dependente da qualidade do produto). O arroz com casca ao ser beneficiado pode passar pelos tratamentos de polimento e/ou parboilização. A parboilização é um tratamento hidrotérmico que antecede o descascamento e o polimento do arroz, no qual o cereal é imerso em água à uma temperatura maior que 58°, para que ocorra a gelatinização parcial ou total do amido e logo após a secagem do grão (CONAB, 2015).

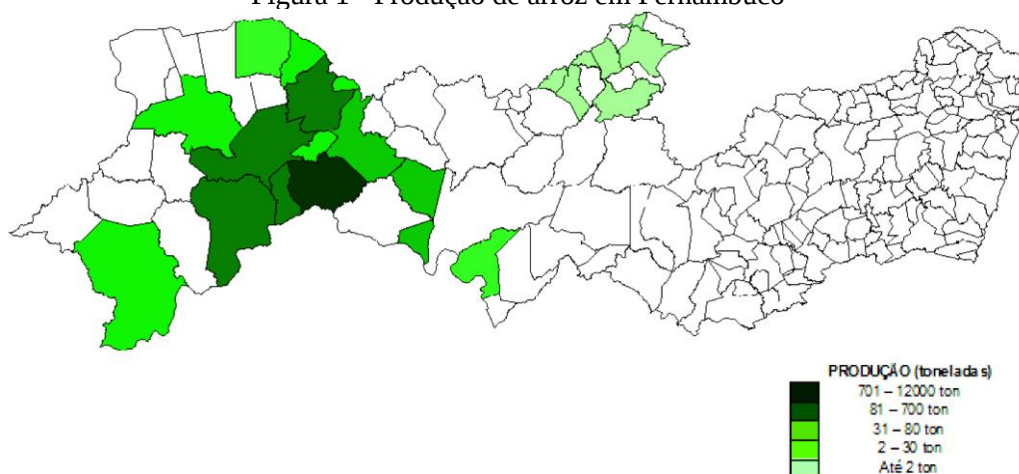
A casca de arroz é um subproduto do beneficiamento que causa problemas ambientais quando realizado em grandes volumes. Para reduzir o impacto e o volume descartado os produtores de arroz utilizam a casca como combustível nas caldeiras do processo de parboilização. Além de ser utilizada na geração de energia e produção de vapor, a casca de arroz é utilizada na confecção de tijolos.

O produto gerado da combustão da casca de arroz é chamado de CCA, essa massa obtida na queima é regularmente descartada ou utilizada para fins agrícolas, adição no cimento Portland, confecção de pneus, materiais cerâmicos e até em áreas como a eletrônica, devido à presença de sílica.

Segundo Vinh (2012), aproximadamente, 20% da massa de arroz é casca e quando ela passa pelo processo de queima, fica com apenas 20% do peso original da casca, ou seja, 4% da massa do arroz com casca pode ser transformado em CCA. Em 2015, no estado de Pernambuco foram produzidos em torno de 490,44 toneladas de CCA, pois a produção comercial do estado é exclusiva de arroz parboilizado e, segundo IBGE (2015), a safra desse ano foi de 12.261 toneladas.

Situado no Sertão do São Francisco, o município de Cabrobó é o maior produtor de arroz do estado de Pernambuco, Figura 1. Em 2017, a maior empresa de beneficiamento de arroz parboilizado de Cabrobó produziu 7.500 toneladas, gerando uma massa de CCA de, aproximadamente, 300 toneladas.

Figura 1 - Produção de arroz em Pernambuco



Fonte: CONAB (2015).

A CCA é altamente pozolânica, pois contém sílica e possui grande superfície específica (ADHIKARY e JANA, 2016). Sendo classificada como uma pozolana de classe E, é nesta classe que estão enquadrados os materiais não tradicionais com atividade pozolânica, como: escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais e rejeito de carvão mineral (ABNT NBR 12.653/2014).

O efeito pozolânico da CCA está relacionado com a sua capacidade de reagir com hidróxido de cálcio, quantidade de sílica e sua influência na solubilidade, sendo a solubilidade dependente de fatores como tamanho das partículas e da cristalografia do da cinza (VINH, 2012). A CCA é composta por uma grande quantidade de dióxido de silício (SiO_2), com teores significativos, entretanto variáveis, de óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO). A Tabela 1 apresenta a composição química da CCA utilizados nas pesquisas realizadas por (a) Akinyele et al. (2015), (b) Brooks (2009), (c) Dahale e Rajurkar (2014), (d) Fattah, Rahil e Al-Soudany (2013), (e) Jha e Tiwari (2016), (f) Patel e Mahiyar (2014), (g) Raj, Banupriya e Dharani (2016) e (h) Shrivastava, Singhai e Yadav (2014).

Tabela 1 - Composição química da CCA

Constituinte	Composição (%)							
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
SiO_2	58,75	90,23	91,48	86,00	88,32	90,23	67,3	85,14
Al_2O_3	11,58	2,54	1,87	2,60	0,46	2,54	4,90	2,07
Fe_2O_3	3,35	0,21	0,98	1,80	0,67	0,21	0,95	1,43
CaO	2,57	1,58	1,29	3,60	0,67	1,58	1,36	3,08
MgO	1,75	0,53	0,39	0,27	0,44	0,53	1,81	4,03
Na_2O	-	0,39	0,58	-	0,12	-	-	-
K_2O	-	-	2,33	-	2,91	0,39	-	-
SO_3	-	-	0,22	-	-	-	-	-
MPC ¹	12,55	2,23	0,86	4,20	5,81	2,23	17,78	5,08

Fonte: O Autor (2019).

A composição e propriedades da CCA dependem da espécie do arroz e do processo de combustão da casca de arroz, pois esse último pode se dar de forma controlada ou não. Vinh (2012) realizou a caracterização da CCA de uma mesma espécie sob três diferentes tipos,

¹ MPC: Material perdido na combustão ou outros constituintes não identificados.

tempos e temperaturas: de combustão, determinando como ideal a queima onde o forno é pré-aquecido à 250°C e a casca de arroz queimada por duas horas à 500°C

Ao realizar os estudos de estabilização de solos com CCA, Fattah, Rahil e Al-Soudany (2013) analisaram as propriedades do material estabilizante coletado nas fazendas de arroz do oeste de Bagdá no Iraque, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades da CCA	
Propriedade	Resultado
Limite de liquidez (%)	NP ²
Limite de plasticidade (%)	NP ²
Índice de plasticidade (%)	NP ²
Densidade	2,04
Peso específico seco máximo (kN/m ³)	6,97
Umidade ótima (%)	45,5
Fonte: Fattah, Rahil e Al-Soudany (2013).	

2.2 SOLOS EXPANSIVOS

Alguns solos não saturados podem apresentar características indesejáveis ao ramo da Construção Civil. Os dois comportamentos mais comuns são colapsibilidade e expansividade. Na geotecnia o colapso nos solos ocorre quando há uma redução repentina de seus vazios ao acrescentar algum líquido que interfira na estrutura das partículas. O comportamento expansivo é a variação de volume de solo decorrente de sua variação de umidade, essa característica é exibida em solos com minerais argílicos do tipo 2:1, como montmorilonita e vermiculita. Fatores intrínsecos ao solo, como mineralogia, textura e estrutura, são responsáveis por conferir característica expansiva ao solo e fatores extrínsecos, como tempo, clima, vegetação e ação antrópica, servem como gatilho para a exibição da expansibilidade (FERREIRA, 1995).

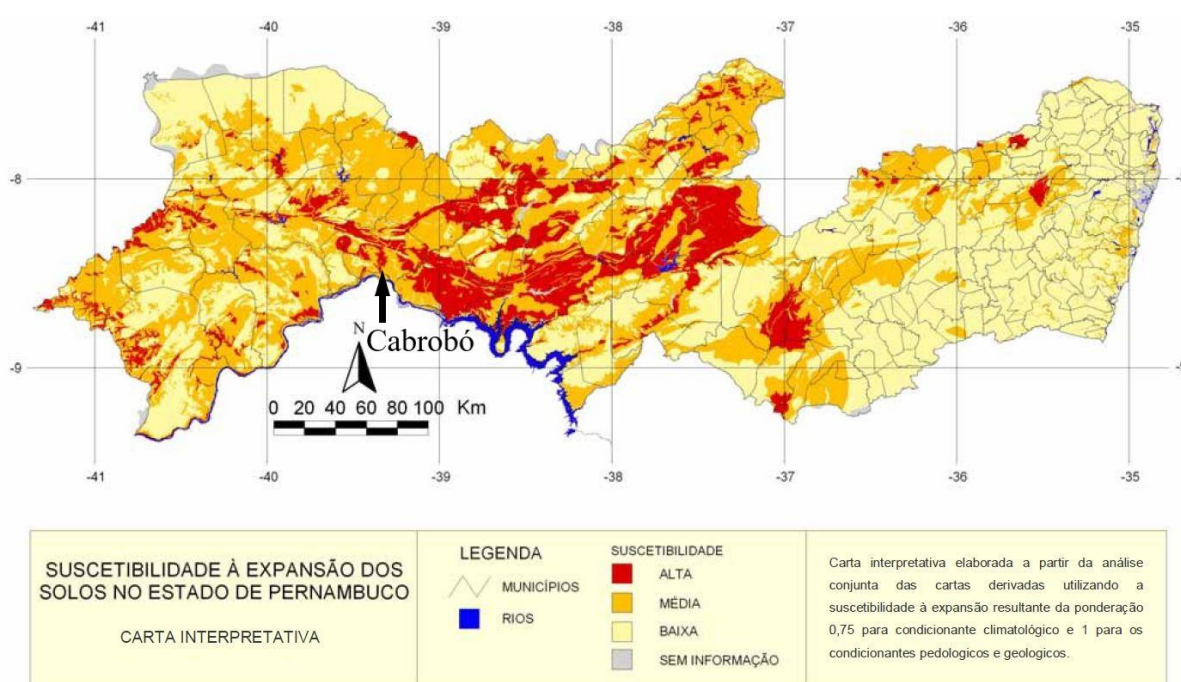
A ocorrência dos solos expansivos está ligada diretamente às regiões de climas tropicais e temperados, que compreendem países como EUA, México, Índia, África do Sul, Brasil e outros. No Brasil, todas as regiões estão passíveis da presença de solos expansivos, sendo a região Nordeste uma das mais propícias devido a presença de áreas com rochas sedimentares

² NP: não plástico

com minerais argílicos e ao clima semiárido quente (BSh)³, responsável por longos períodos de seca e curtos períodos de chuvas intensas.

Ferreira (2012) apresentou a localização de ocorrência de solos expansivos em vários municípios no estado de Pernambuco, um dos pontos está localizado em Cabrobó, cidade que tem sua zona urbana construída em uma região de média à alta suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos, segundo a Carta Interpretativa de Suscetibilidade à Expansão dos Solos no Estado de Pernambuco elaborada por Amorim (2004), Figura 2.

Figura 2 - Suscetibilidade à expansão dos solos em Pernambuco



Fonte: Amorim (2004).

Para que não ocorra os processos de expansão e contração do solo, é necessária que não ocorra variação de umidade, que por consequência irá causar a variação de volume. Em outras palavras, deve-se impedir que a água penetre no solo. Nesses casos é necessário realizar a estabilização ou substituição da camada de solo expansivo por solo um solo sem essa característica.

A estabilização dos solos é empregada quando se deseja modificar propriedades geotécnicas como permeabilidade, resistência, compressibilidade, dentre outras, para ele atenda às necessidades ao qual será destinado, seja fundação, barragem de terra, canais de irrigação,

³ Classificação de Köppen-Geiger.

muros de gravidade e demais obras geotécnicas. Os processos de estabilização podem ser químicos, mecânicos ou pela combinação deles.

A estabilização química de solos expansivos se dá pela adição de compostos orgânicos ou inorgânicos que alteram suas propriedades físico-mecânicas, conferindo novas características ao solo estabilizado. É realizada a partir da adição de cal, cimentos, resinas, etc, em proporções determinadas por estudos prévios.

A estabilização mecânica em solos expansivos busca o melhoramento, a partir da alteração das características granulométricas e de sua plasticidade, pela adição de material granular que altere o arranjo das partículas.

Nos Estados Unidos os prejuízos causados na construção civil chegam a atingir o dobro dos custos com danos oriundos de desastres naturais, como enchentes, furacões e terremotos (NELSON e MILLER, 1992). Portanto, ao longo dos anos, propostas variadas foram utilizadas para evitar os problemas com este tipo de solo, por exemplo, a remoção do solo expansivo e substituição por outro sem essa característica, adições de cal, cinza volante, cinza da casca de arroz (CCA), cinza de resíduo sólido, pó de brita, resíduo cerâmico, materiais fibrosos, cloretos (cálcio, potássio, ferro e sódio), dentre outros. Algumas das propostas citadas encontram-se em desenvolvimento e outras já são aplicadas plenamente na construção civil.

Os métodos de determinação do potencial expansivo do solo e dos problemas que estes podem causar às edificações variam de acordo com o referencial e com os ensaios realizados. De acordo com Cuellar (1978), ao utilizar resultados de expansão “livre” na determinação do potencial expansivo, pode-se determinar o grau de expansividade do solo, classificando em muito alta (maior que 10%), alta (de 5% a 10%), média (de 1,5% a 5%) ou baixa (menor que 1,5%). Salas (1980) determina de acordo com a tensão de expansão que o solo pode causar a demolição da edificação (maior que 200 kPa), danos graves à edificação (entre 100 kPa e 200 kPa), fissuras importantes (entre 50 kPa e 100 kPa), fissuras pequenas (entre 20 kPa e 50 kPa) e não apresentar danos à edificação (menor que 20 kPa).

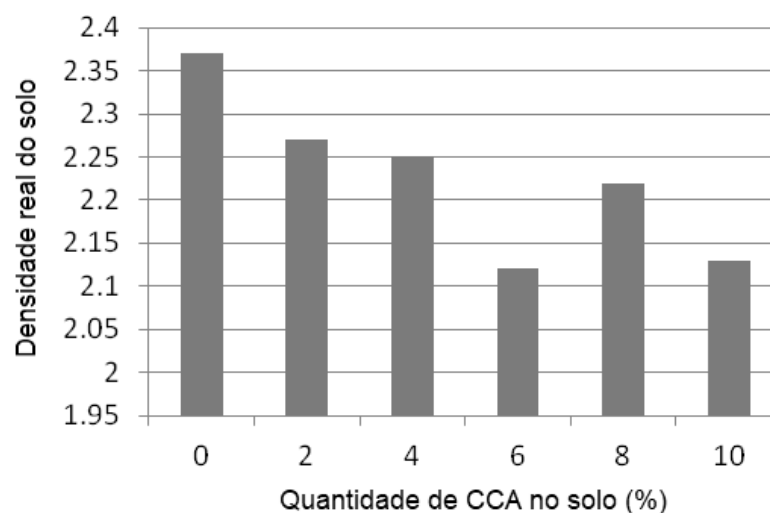
2.3 APLICAÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ COMO ESTABILIZANTE

Os estudos sobre o uso de cinza de casca de arroz para redução da variação de volume devido à alteração da umidade em solos expansivos ainda são escassos, boa parte da literatura acadêmica disponível associa o uso da cinza de casca de arroz combinada com outros materiais, como cimento ou cal.

Vihn (2012) afirma que o teor de sílica na casca de arroz varia de acordo com a espécie plantada, as condições do solo, clima, temperatura e método de cultivo. A qualidade da CCA produzida pela queima da casca variam de acordo com as condições do processo de incineração, tempo sob fogo e tempo de resfriamento.

Akinyele et al. (2015) utilizou a CCA como agente estabilizante de um solo laterítico, areia siltosa bem graduada, num depósito em Buruku na Nigéria, com amostra coletada em 1m de profundidade. Foram realizados ensaios de densidade real do solo (δ) e limites de Atterberg. A densidade real do solo é de 2,65 e da CCA de 2,37. A substituição de parte da massa seca do solo em 2%, 4%, 6%, 8% e 10% ocasionou a redução da densidade real dos grãos devido à leveza das partículas de CCA da mistura (Figura 3). O incremento de CCA no solo apresentou aumento nos valores de limites de plasticidade (LP) e liquidez (LL), entretanto demonstra uma redução no índice de plasticidade (IP), pois os incrementos no limite de plasticidade eram superiores aos do limite de liquidez (Tabela 3).

Figura 3 - Comparativo de densidade real do solo natural e solo com CCA



Fonte: Akinyele et al. (2015).

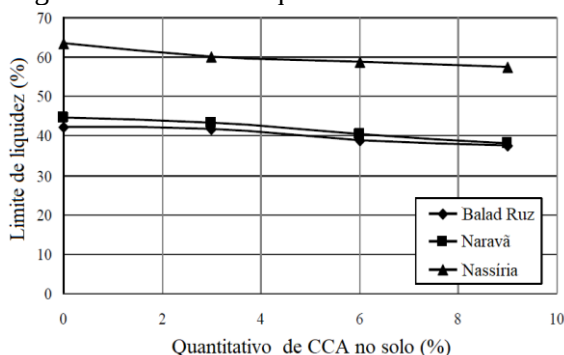
Tabela 3 - Plasticidade no solo natural e com adição de CCA

Propriedade	Quantidade de CCA no solo (%)					
	0	2	4	6	8	10
Limite de liquidez (%)	34,4	36,0	37,6	39,4	40,8	41,5
Limite de plasticidade (%)	13,4	17,2	20,9	25,0	28,4	30,7
Índice de plasticidade (%)	21,0	18,8	16,7	14,4	12,4	10,7

Fonte: Akinyele et al. (2015).

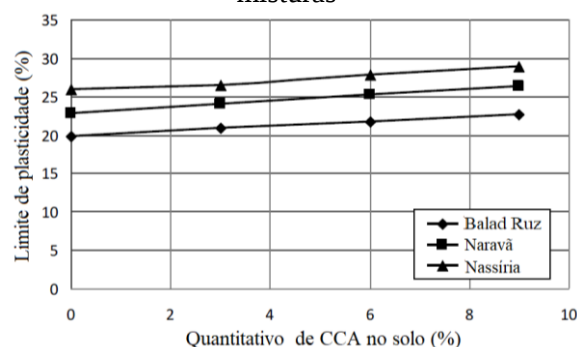
Fattah, Rahil e Al-Soudany (2013) realizaram ensaios em três solos argilosos com a CCA como agente estabilizante. Os solos foram coletados em Balad Ruz, Naravã e Nassíria cidades localizadas no Iraque Foram utilizadas as normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para classificação dos solos e determinação das propriedades geotécnicas dos solos e misturas. Foram realizados ensaios de limites de liquidez e plasticidade, compactação e compressão simples para o solo natural e substituição de parte da massa seca do solo em 3%, 6% e 9%. Os três solos apresentaram uma queda no LL (Figura 4), aumento do LP (Figura 5) e, conseqüentemente, redução do IP (Figura 6), a redução no limite de liquidez é atribuída ao fato de que a reação entre solo e CCA forma compostos que possuem propriedades cimentícias de cimento de silicato de cálcio com partículas de solo. O peso específico seco máximo ($\gamma_{d\text{ máx}}$) exibe redução (Figura 7) causada pela leveza das partículas de CCA, enquanto a umidade ótima (w_{ot}) aumenta (Figura 8) provocada pela diminuição da quantidade de silte “livre”, fração argílica. Os resultados dos ensaios resistência à compressão simples (RCS) apontam valores maiores para a combinação de solo com 6 a 8% de CCA com queda nos valores para as misturas com 9% de CCA (Figura 9). O aumento RCS é atribuído à formação de compostos cimentícios entre o Ca(OH)_2 presente no solo e na CCA e as pozolanas presentes na CCA.

Figura 4 - Limite de liquidez do solo e misturas



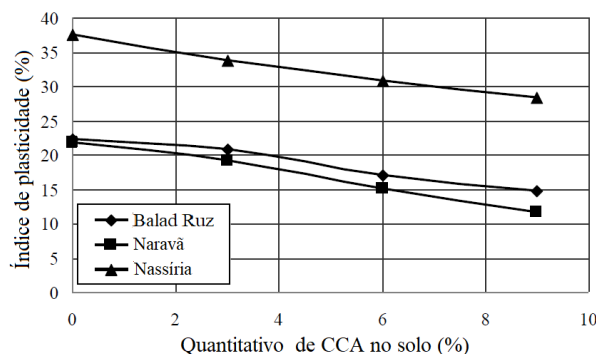
Fonte: Fattah, Rahil e Al-Soudany (2013).

Figura 5 - Limite de plasticidade do solo e misturas



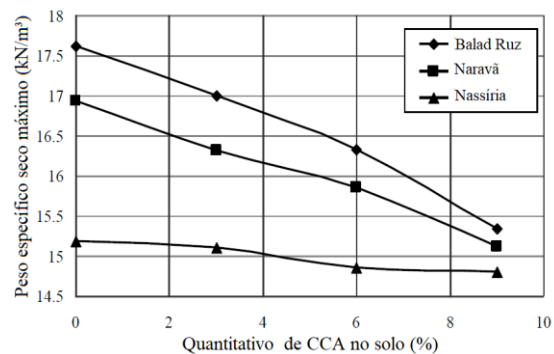
Fonte: Fattah, Rahil e Al-Soudany (2013).

Figura 6 - Índice de plasticidade do solo e misturas



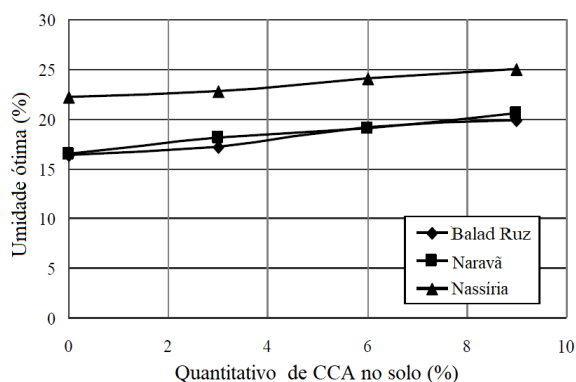
Fonte: Fattah, Rahil e Al-Soudany (2013).

Figura 7- Peso específico seco máximo do solo e misturas



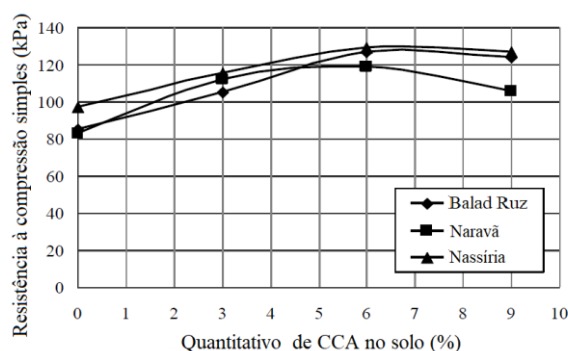
Fonte: Fattah, Rahil e Al-Soudany (2013).

Figura 8 - Umidade ótima do solo e misturas



Fonte: Fattah, Rahil e Al-Soudany (2013).

Figura 9 - Resistência à compressão simples do solo e misturas



Fonte: Fattah, Rahil e Al-Soudany (2013).

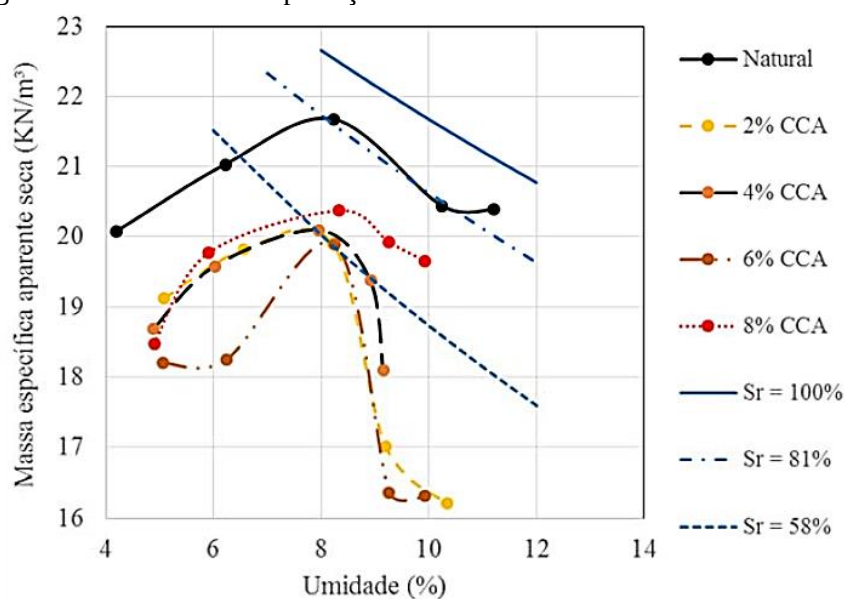
Freitas (2018) estudou a utilização da CCA num solo laterítico encontrado em Boa Vista/RR para emprego em aterros de pavimentos e notou em sua pesquisa que o incremento de CCA reduz o índice de plasticidade (Tabela 4). Os ensaios de compactação demonstraram (Figura 10) a redução do peso específico seco máximo, enquanto a umidade ótima se manteve na linha de tendência de saturação de 58%. Foram realizados testes de RCS em dois períodos de cura, 7 e 28 dias, onde observa-se que o período de cura exerce influência nos resultados encontrados. No entanto não se apresenta um padrão em relação às proporções de CCA (Tabela 4). Apresenta-se ainda um crescimento da resistência à tração (Figura 11), valores obtidos por ensaios de compressão diametral, em função do da umidade.

Tabela 4 - Índice de plasticidade e resistência à compressão

Propriedade	Quantidade de CCA no solo (%)				
	0	2	4	6	8
Limite de liquidez (%)	22	20	21	20	18
Limite de plasticidade (%)	16	16	17	18	16
Índice de plasticidade (%)	6	4	4	2	2
Resistência à compressão simples em 7 dias (kPa)	147,70	224,09	193,53	313,22	277,57
Resistência à compressão simples em 28 dias (kPa)	313,17	364,15	361,60	685,00	401,07

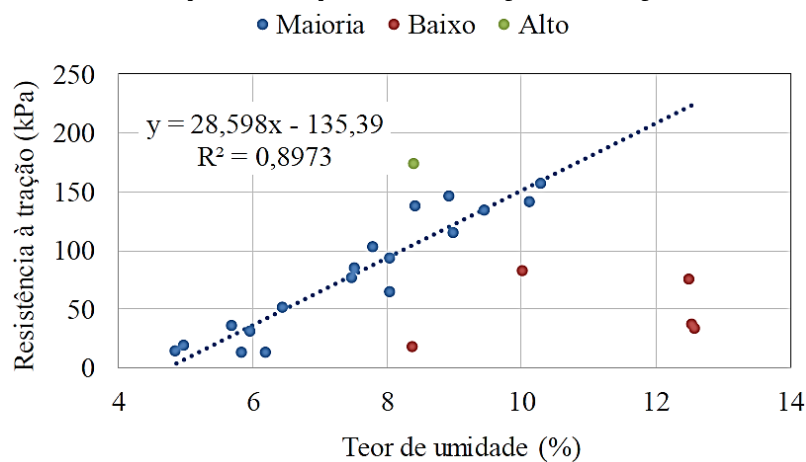
Fonte: Freitas (2018).

Figura 10 - Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo – CCA



Fonte: Freitas (2018).

Figura 11 - Resistência à tração em função da umidade para o solo puro e misturas solo – CCA



Fonte: Freitas (2018).

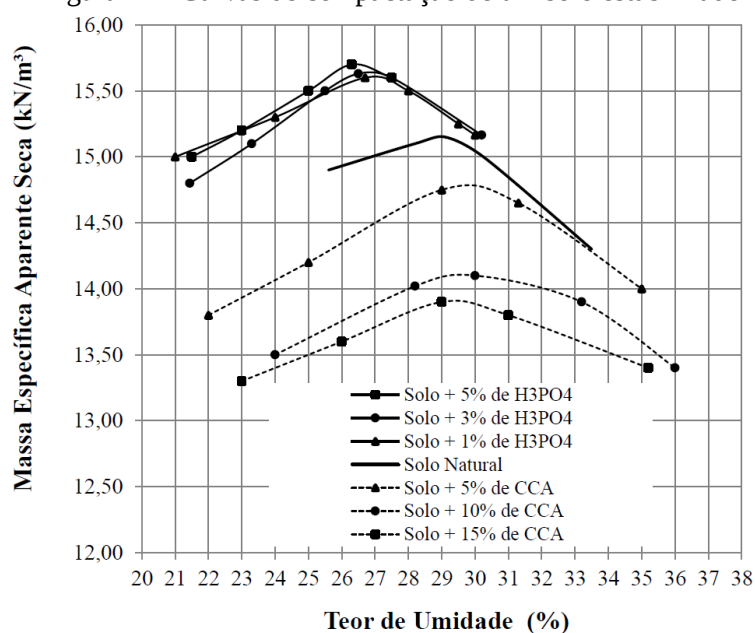
Budny (2018) em sua pesquisa de estabilização de um solo laterítico, coletado em jazida na entrada de Cândido Godói/RS, com proporções de 5, 10 e 15% de CCA, mostrou que há queda nos limites de liquidez e plasticidade, e também no índice de plasticidade (Tabela 5). O pH do solo e das combinações com CCA manteve-se neutro sem mudança significativa de valores. Houve redução do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\text{ máx}}$) no solo com proporções de cinza em relação ao solo natural, a umidade ótima nas misturas se manteve entre 29,2 e 30%, mas aumentou em relação ao solo puro (Figura 12). Nos ensaios de RCS, nota-se que há queda de resistência quando se aumenta o teor de CCA, enquanto é evidenciado um aumento nessa resistência em relação a um mesmo teor ao longo de maiores períodos de cura (Figura 13). A resistência à tração nas amostras de solo misturadas com CCA apresenta queda em relação ao solo em condição natural, entretanto o tempo de cura não exerce influência para o solo puro e as misturas de solo com CCA (Figura 14), conclui-se que a CCA tem uma ação mais Física do que Química no conjunto.

Tabela 5 - Resultados de pH e limites de Atterberg

Propriedade	Quantidade de CCA no solo (%)			
	0	5	10	15
Limite de liquidez (%)	55,0	38,3	27,1	14,8
Limite de plasticidade (%)	45,5	31,5	22,2	NP
Índice de plasticidade (%)	9,5	6,8	4,9	NP
pH	4,82	4,98	4,95	4,96

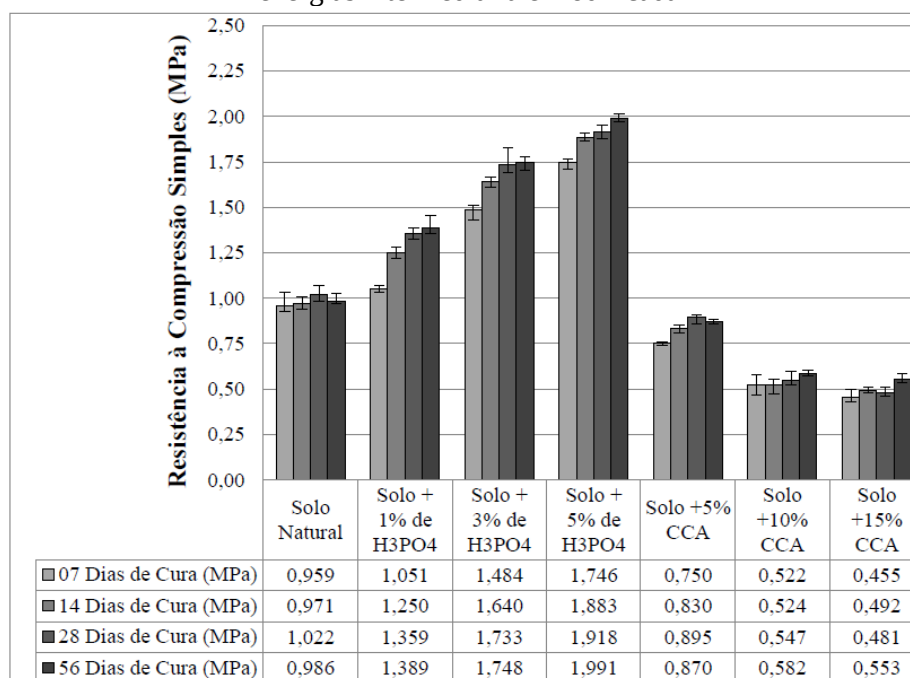
Fonte: Budny (2018).

Figura 12 - Curvas de compactação de um solo estabilizado



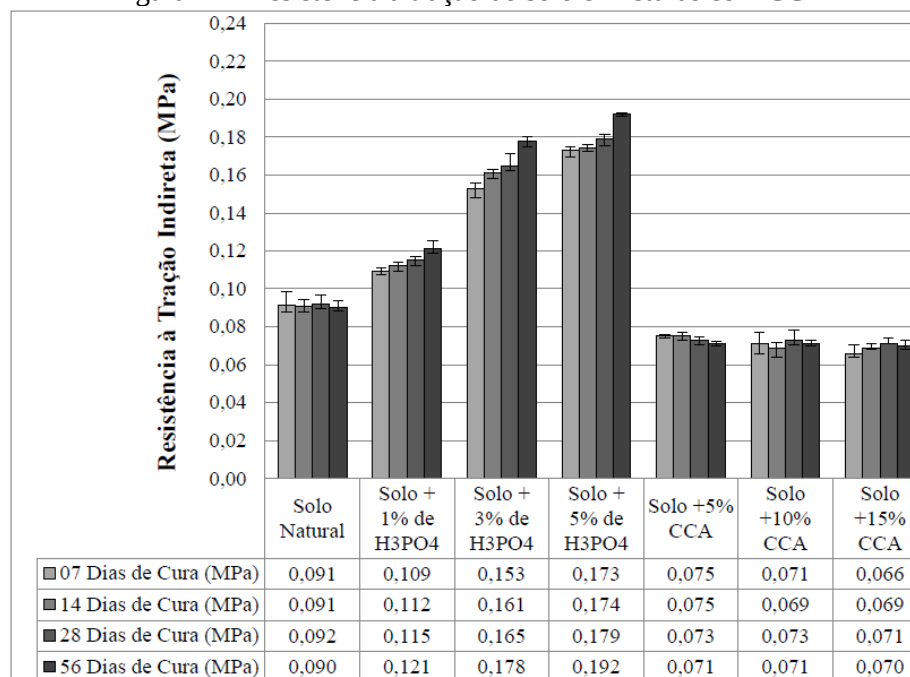
Fonte: Budny (2018).

Figura 13 - Resistência à compressão simples das amostras de solo e misturas compactadas com energias intermediária e modificada



Fonte: Budny (2018).

Figura 14 - Resistência à tração do solo e misturas com CCA

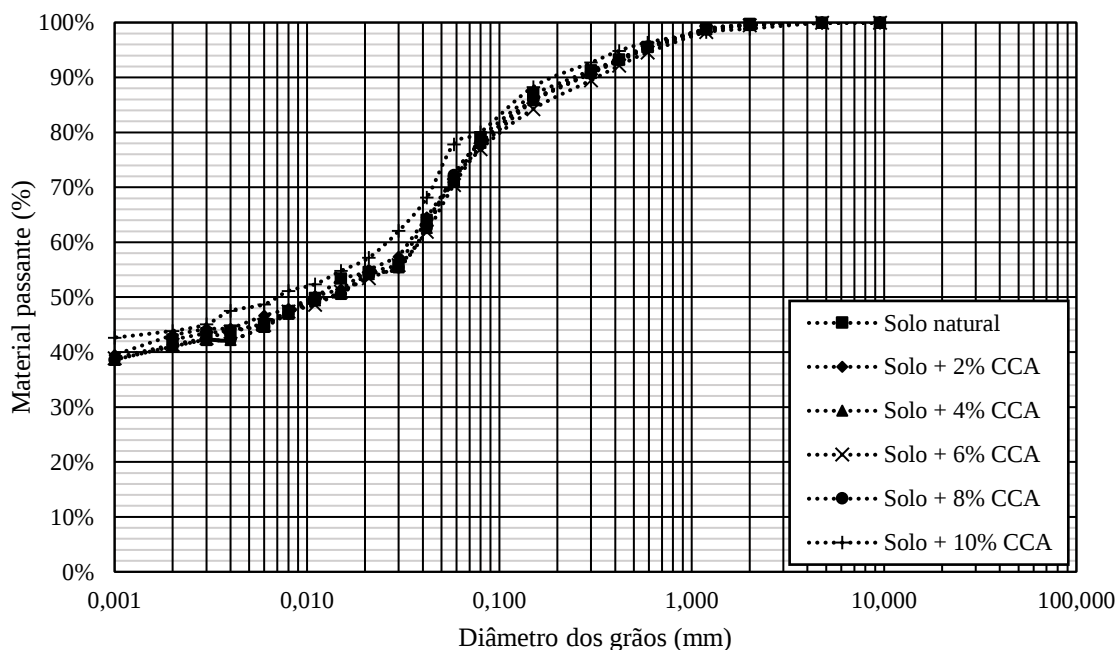


Fonte: Budny (2018).

No estado de Pernambuco, recentes pesquisas nas cidades de Brejo da Madre de Deus (BEZERRA, 2019), Paulista (CONSTANTINO, 2018) e Agrestina (SILVA, 2018) apresentaram resultados positivos quanto ao uso da CCA no melhoramento de solos expansivos. A substituição de CCA por parte da massa de solo apresentou pequena variação na

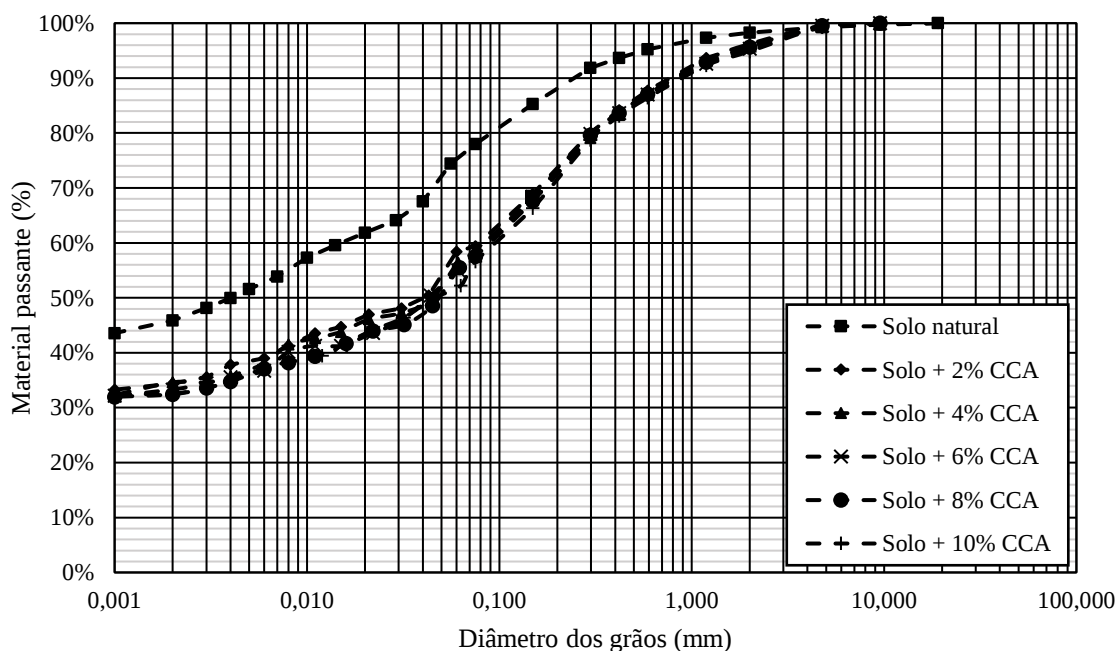
granulometria dos solos de Paulista e Agrestina, respectivamente Figuras 15 e 17. Entretanto, no solo do Brejo da Madre de Deus a redução na quantidade da fração de finos é da ordem de 10%, conforme a Figura 16.

Figura 15 - Curva granulométrica de um solo do Paulista e suas respectivas misturas com CCA



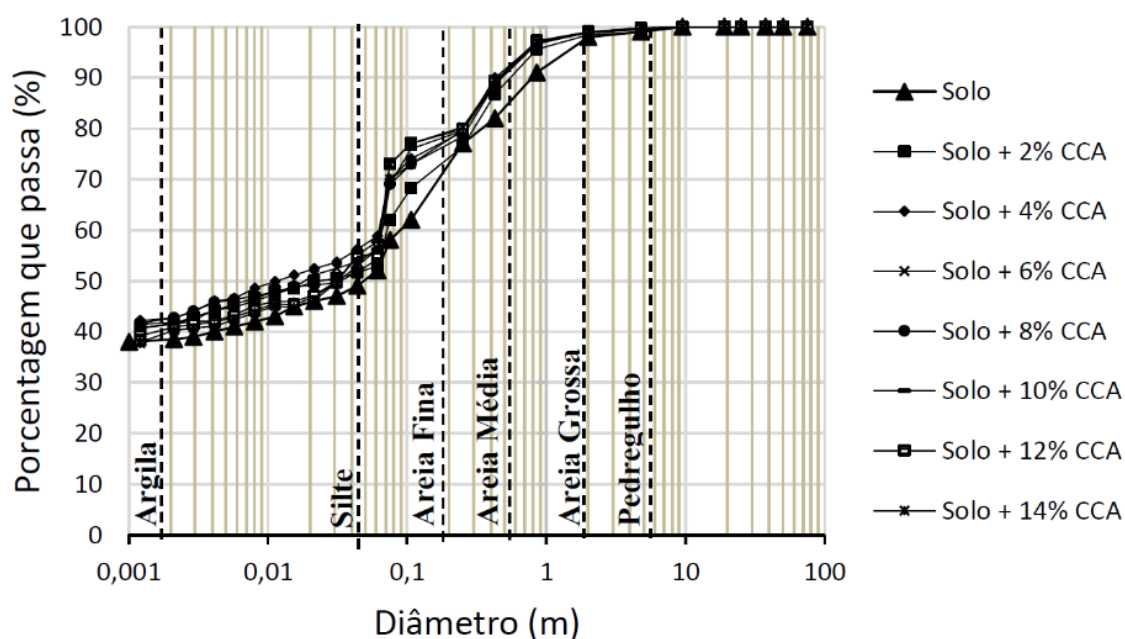
Fonte: Constantino (2018).

Figura 16 - Curva granulométrica de um solo de Brejo da Madre de Deus e suas respectivas misturas com CCA



Fonte: Bezerra (2019).

Figura 17 - Curva granulométrica de um solo de Agrestina e suas respectivas misturas com CCA



Fonte: Silva (2018).

Bezerra (2019) ao investigar a influência do acréscimo da CCA ao solo expansivo de Brejo da Madre de Deus-PE, verificou que o aumento da umidade ótima, diminuição do peso específico aparente seco e diminuição do índice de plasticidade. O percentual de 20% de CCA reduziu a expansão “livre” de 24,15% ao valor de 1,83% e a tensão de expansão de 163,33 kPa para 0,55 kPa que segundo Salas (1980) não causa danos as edificações.

Constantino (2018) ao analisar o melhoramento de um solo expansivo de Paulista-PE com CCA, notou que houve uma redução do índice plasticidade, do peso específico seco máximo e do aumento da umidade ótima com o incremento da CCA. O incremento gradativo da CCA ao solo reduziu de forma significativa a expansão “livre”. A adição de CCA de 10% reduziu expansão livre do solo de “Muito Alta” a “Baixa” e a tensão de expansão de 81,7 kPa para 9,8 kPa. O solo natural que poderia causar “Fissuras Importantes” às estruturas passou a ser classificado como um solo que não apresenta danos às construções pelo critério de Salas (1980). Em relação a compressão axial a adição da cinza de casca de arroz reduziu a resistência do solo natural. O percentual de 4% de CCA apresentou um ganho de resistência, enquanto os demais percentuais levaram a redução da resistência e o tempo de cura teve pouca influência da variação da resistência.

Silva (2018) constatou que o acréscimo da CCA ao solo expansivo de Agrestina-PE aumentou a umidade ótima, diminuiu o peso específico aparente seco e diminuiu a plasticidade. O percentual de 14% de CCA reduziu a expansão livre de 6,58% a valores próximos de 1,5% e a tensão de expansão de 215 kPa a 10 kPa, que segundo Salas (1980) não causa danos as edificações. A adição de CCA influenciou na resistência a compressão axial simples das amostras, diminuindo estes valores em relação ao solo natural e mostrando que há um limite ótimo entre as misturas quando se trata de compressão axial simples, que neste estudo foi de 132 kPa, referente ao teor de 10% de CCA.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

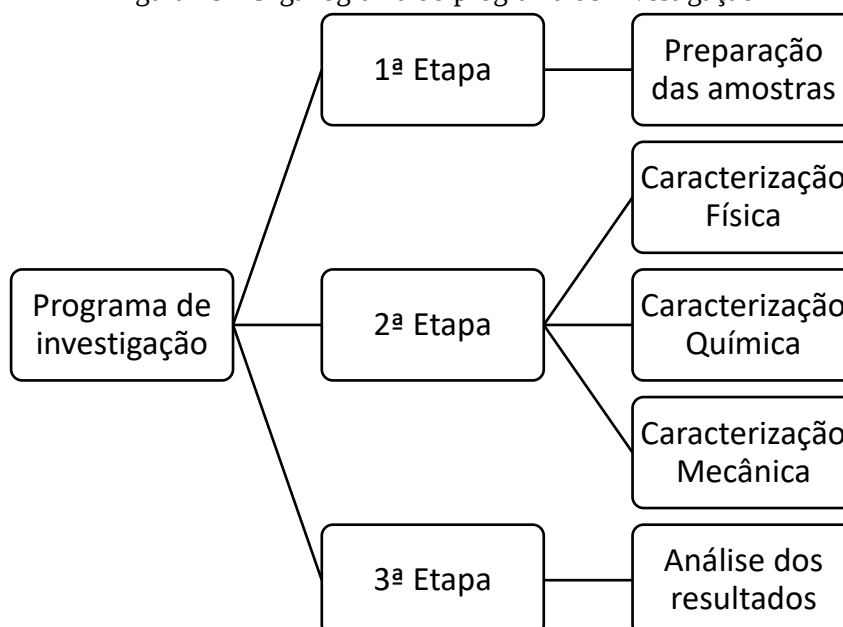
Nesse capítulo estão descritos os procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa, os materiais utilizados e os resultados de caracterização dos materiais e combinações realizadas.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa de investigação geotécnica foi desenvolvido em dois solos do município de Cabrobó-PE com coletas de amostras deformadas e indeformadas, para realização de ensaios de caracterização Física e Química do solo natural e misturas, com proporções, em peso, de 2%, 4 %, 6%, 8% e 10% com cinza de casca de arroz (CCA), e avaliar a expansividade do solo. A escolha do local foi baseada na presença de solos expansivos já confirmada pela literatura, pela cidade ser a maior produtora de arroz parboilizado de Pernambuco e pela possibilidade de resolução dos problemas causados pela expansividade com o material de descarte atividade orizícola da região.

A investigação consistiu na realização de três etapas, como ilustrado no organograma da Figura 18.

Figura 18 - Organograma do programa de investigação



Fonte: O Autor (2019).

- 1ª etapa: Coleta dos solos e da CCA para realização dos ensaios de caracterização Física, Química e Mecânica.
- 2ª etapa: Caracterização das amostras de solo e das misturas com CCA, apontando seus atributos físicos e mecânicos. Foram realizados ensaios físicos de caracterização granulométrica por peneiramento, sedimentação, densidade real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade, compactação realizado na energia de Próctor normal com reaproveitamento do material, para obtenção do peso específico seco máximo ($\gamma_{d\text{ máx}}$) e umidade ótima (w_{ot}). Foram realizados os ensaios químicos e quantificação de óxidos pela técnica analítica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) das amostras da CCA, dos solos C1 e C2 e suas respectivas misturas com proporções, em peso, de 2%, 4 %, 6%, 8% e 10%. Na caracterização mecânica foram realizados ensaios de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral, índice de expansão “livre” e tensão de expansão pelo método do volume constante.
- 3ª etapa: Análise e interpretação dos resultados comparados com a literatura encontrada e com um solo de Cabrobó estabilizado com a cal.

3.2 MATERIAIS

Os solos e a cinza de casca de arroz utilizados na pesquisa foram coletados na cidade de Cabrobó/PE.

3.2.1 Solos

Foram realizadas visitas à diversos locais com suscetibilidade alta de solos expansivos baseando-se pela carta elaborada por Amorim (2004) (Figura 2) e pelas características visuais apresentadas pelos Luvissolos, anteriormente classificados como Bruno Não Cálculos.

Na primeira parada foi realizada a coleta de dois blocos de solos indeformados (Figura 19), com medidas de 0,35 m x 0,35 m x 0,35 m em um poço escavado manualmente com picareta, alavanca e pá na entrada do Assentamento São José próximo à BR 428, apresentando

três horizontes distintos com profundidades de 0 a 15 cm, 15 a 50 cm e 50 a 110 cm, para realização de ensaios de caracterização e expansão “livre”. Também foram coletadas amostras deformadas de cada camada do poço. O bloco de solo coletado na camada de 15 cm a 50 cm foi designado pelo nome de solo C1, encontra-se na longitude $39^{\circ}20'8,44''\text{O}$ e latitude $8^{\circ}30'7,34''\text{S}$ pelo aplicativo Google Earth PRO a uma profundidade de 1,00 m, no Assentamento São José próximo à BR 428 (Figura 20).

Figura 19 - Coleta de bloco de solo indeformado



Fonte: O Autor (2019).

Figura 20 - Assentamento São José, local de coleta do solo C1



Fonte: O Autor (2019).

Ao serem realizados os primeiros ensaios para análise da expansão do solo C1 foi observada sua baixa expansividade. No intuito de melhor analisar a ação da CCA no solo foi realizada a coleta de uma outra amostra de solo, este denominado por solo C2, para a realização dos mesmos ensaios. O solo C2 foi encontrado na longitude $39^{\circ}18'28,61''\text{O}$ e latitude $8^{\circ}30'12,89''\text{S}$ pelo aplicativo Google Earth PRO a uma profundidade de 0,75 m, no Loteamento Maria Luiz, Figura 21.

Figura 21 - Solo C2 coletado no Loteamento Maria Luiz



Fonte: O Autor (2019).

3.2.2 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz (CCA) utilizada nesse estudo foi coletada na indústria de beneficiamento de arroz Valdivino, localizada na Fazenda Pedrinhas, nº 100 em Cabrobó/PE. A cinza coletada é proveniente queima, sem temperatura controlada, da casca de arroz dos fornos (Figura 22) que em conjunto com madeira geram a energia térmica para realizar o processo de parboilização do arroz. Após o processo de incineração da casca do arroz nos fornos, a cinza é umedecida para evitar a dispersão no ar por ser um material fino e leve, logo após é enviada para uma área de descarte.

A cinza foi coletada em sacos de rafia no estado úmido e conduzida aos laboratórios de Geotecnia da Universidade Federal de Pernambuco e da Universidade Federal do Vale do São Francisco para posterior tratamento.

Antes da utilização da CCA, esta foi espalhada para secagem prévia por um período mínimo de 24 horas e antes do uso era passada na peneira nº 4 (4,75 mm) afim de verificar a presença de pedaços de carvão.

Figura 22 - Forno para queima da casca de arroz



Fonte: O Autor (2019).

3.3 MÉTODOS

Os ensaios foram desenvolvidos em cinco laboratórios distintos. Os ensaios químicos foram realizados no Laboratório de Análises Químicas da Universidade Católica de Pernambuco, os ensaios de FRX foram realizados no Laboratório de Núcleo de Estudos Geoquímicos da UFPE e a caracterização da CCA e do solo C1, assim como o ensaio de expansão “livre” desse último foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação, ambos na UFPE. Os ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais e os ensaios de caracterização Física e Mecânica das misturas de solo C1, solo C2 natural e suas misturas foram realizados no Laboratório de Geotecnia, que se encontram conjuntamente na Universidade Federal do Vale do São Francisco.

3.3.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras de solo natural e misturas com CCA, em proporções de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% em relação ao peso seco do solo, para os ensaios de caracterização (peneiramento, sedimentação, densidade real dos grãos e limites de consistência) e compactação foi realizada de acordo com as especificações das NBR 6457/2016 e 7182/2016 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Nos ensaios de expansão “livre”, tensão de expansão pelo método do volume constante, RCS e resistência à tração por compressão diametral que envolviam misturas entre solo e CCA, tomou-se o peso seco das amostras de solo e foi adicionada CCA em teores de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, em peso. As misturas foram homogeneizadas e os corpos de prova foram compactados estaticamente na umidade ótima e peso específico seco máximo, para analisar o estado de tensão na deformação do solo causada pela inundação do solo no estado natural e combinado com a CCA. Foram moldados corpos de prova para análise com 0, 7 e 28 dias de cura.

Para os ensaios de caracterização química foram separadas porções dos solos coletados, da CCA e das misturas nas mesmas proporções dos ensaios de caracterização física e tempo de cura mínimo de 7 dias.

3.3.2 Caracterização Física

Os ensaios de caracterização Física da cinza, dos solos e misturas com CCA foram realizados de acordo com as metodologias apresentadas pelas normas apresentadas na (Tabela 6).

Tabela 6 - Normas utilizadas nos ensaios de caracterização

Ensaio	NBR
Análise granulométrica	7181/2016
Limite de plasticidade	7180/2016
Limite de liquidez	6459/2016
Densidade real dos grãos	6458/2016
Compactação na energia Próctor normal	7182/2016

Fonte: O Autor (2019).

3.3.3 Caracterização Química

As amostras foram analisadas de acordo com a metodologia proposta no Manual de Análise de Solos da Embrapa (DONAGEMA et al., 2011) e Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013). Para determinar a qualidade e suscetibilidade à expansão dos solos e misturas foram executados os ensaios de: capacidade de troca catiônica (CTC),

porcentagem de saturação de base (V), percentual de saturação de sódio ($100\text{Na}^+/\text{T}$), saturação por alumínio (m), potencial hidrogeniônico em água ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$), condutividade elétrica no extrato de saturação (CE), soma de bases (B) e saturação por sódio e óxidos.

Os ensaios de FRX foram realizados para avaliar quantitativamente a composição dos óxidos presentes nas amostras, sendo os de maior profusão: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MnO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 e P_2O_5 .

3.3.4 Caracterização Mecânica

Para obter uma visão geral do comportamento dos solos e misturas foram realizados ensaios de expansão “livre”, tensão de expansão pelo método do volume constante, RCS e resistência à tração por compressão diametral.

Os ensaios de expansão “livre” foram realizados em células edométricas colocadas em prensas microcontroladas, seguindo os procedimentos apresentados pela ASTM D4829. Utilizando amostras indeformadas dos solos talhadas em anéis de aço com 20 mm de altura e 87 mm de diâmetro e submetidas a acréscimo de tensões, sendo o ensaio acompanhado até a estabilização da amostra.

A tensão de expansão do solo foi determinada pelo método do volume constante. Nesse método o corpo de prova era colocado na célula e ajustado na prensa sob uma tensão de 10,0 kPa para em seguida ser inundado. A partir do momento em que o solo aumentava de volume, adicionava-se uma sobrecarga para impedir que ocorresse essa variação. A tensão de expansão do solo a volume constante foi determinada a partir da soma das sobrecargas utilizadas para manter o volume do solo.

O ensaio de RCS foi realizado com base na ABNT NBR 12025/2012 e o de resistência à tração de corpos por compressão diametral de acordo com a metodologia presente na ABNT NBR 12041/2012. Os corpos de prova para os ensaios de RCS e resistência à tração por compressão diametral foram moldados por compactação estática, dividida em três camadas, com dimensões de 10 cm de altura por 5 cm de diâmetro. Após a compactação, as amostras eram embaladas com papel filme e papel alumínio, devidamente identificadas e armazenadas

em câmara com umidade controlada. Foram moldados corpos de prova para realização de ensaios com os solos C1 e C2 em sua forma natural e misturas com CCA, em proporções de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% em relação ao peso seco do solo, nos períodos de 0, 7 e 28 dias de cura. A ruptura dos corpos de prova foi realizada em uma máquina universal de ensaios mecânicos, modelo EMIC – DL 10.000, com célula de carga de capacidade máxima de 20 kN, na velocidade 0,5 mm/min em ambos ensaios.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

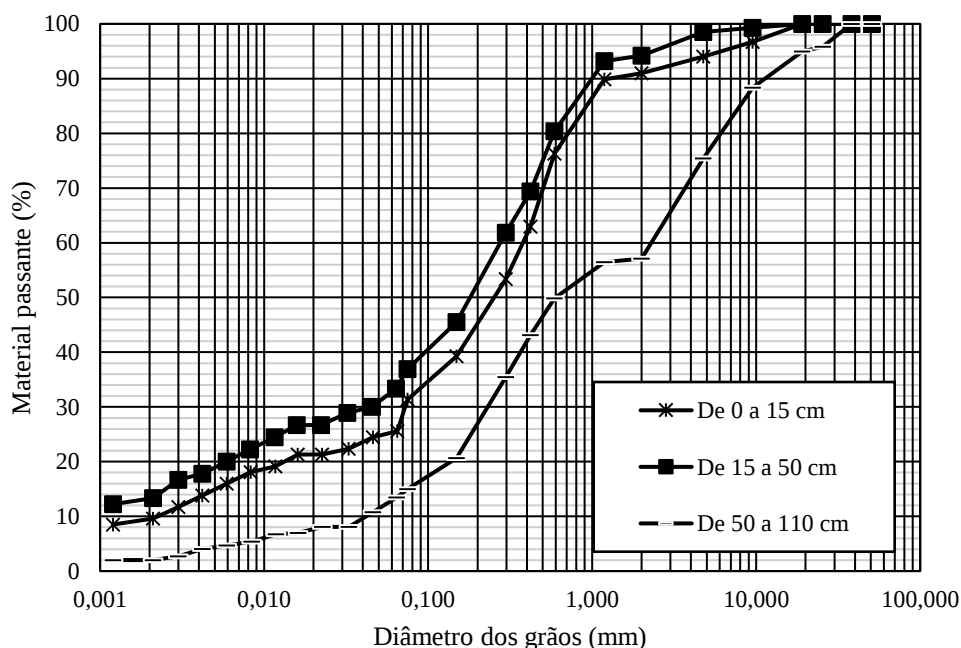
Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados para a presente pesquisa, são eles:

- Resultados de caracterização e compactação da cinza de casca de arroz (CCA), solos C1 e C2 sem misturas e suas misturas com CCA em teores de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, em peso de solo seco.
- Resultados de resistência à compressão simples (RCS) e de resistência à tração por compressão diametral, além dos ensaios de expansão “livre” e tensão de expansão pelo método do volume constante. Para os ensaios mecânicos foram observados os tempos de cura de 0, 7 e 28 dias.
- Resultados de caracterização química pelo método proposto pelo Manual de Análise de Solos da Embrapa (DONAGEMA et al., 2011) e Sistema brasileiro de classificação de solos (SANTOS et al., 2013), e também pela quantificação dos óxidos a partir espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX).
- De forma que seja permitido um comparativo com o estado da arte, ao longo da apresentação e análise dos resultados, serão apresentados valores das pesquisas realizadas por Barbosa (2013), Bezerra (2019), Constantino (2018) e Silva (2018) para correlação com o estudo realizado.

4.1 SOLOS

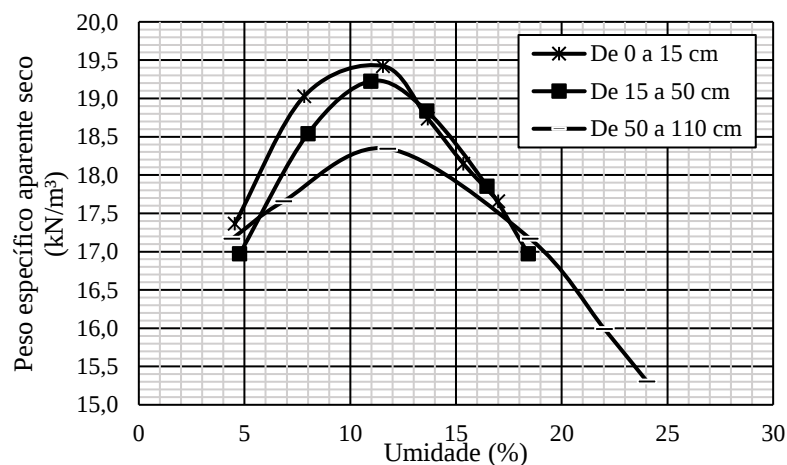
A escavação do poço na primeira etapa da pesquisa onde foi encontrado o solo C1 foi interrompida devido aos fragmentos de rocha encontrados na sua última camada, característica típica do Horizonte C. Após ensaios de umidade, peneiramento, sedimentação e densidade real dos grãos, foram obtidas as curvas granulométricas que representam cada camada. Pela Figura 23 constata-se que a camada de 15 a 50 cm apresentar maior teor de finos em relação às demais.

Figura 23 - Curvas granulométricas das camadas do poço do solo C1



Fonte: O Autor (2019).

Figura 24 - Curvas de compactação das camadas do poço de escavação do solo C1

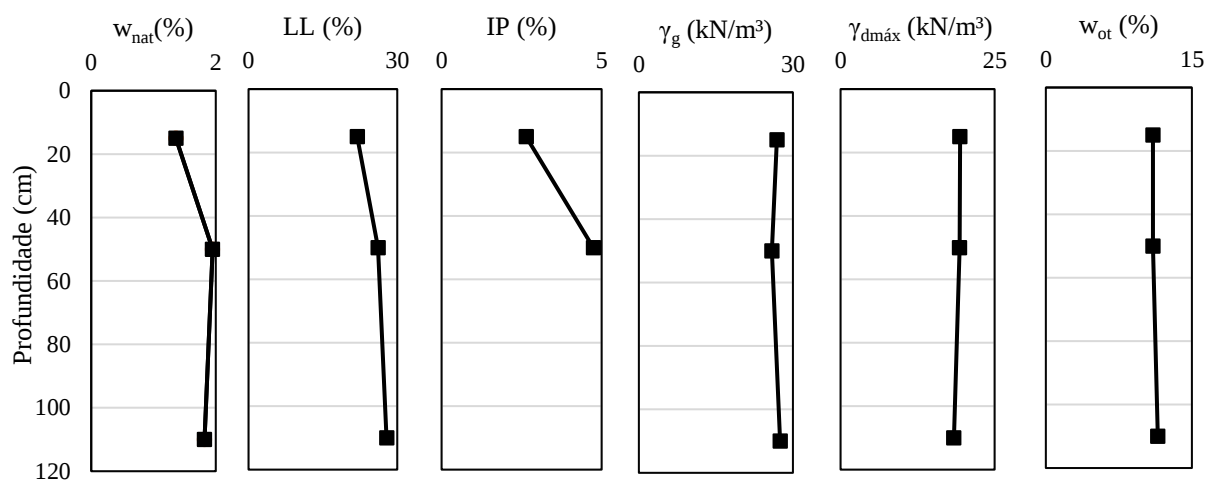


Fonte: O Autor (2019).

O ensaio de compactação dinâmica na energia Próctor normal revela que a umidade ótima das amostras varia de 11,0% a 11,5%, enquanto o peso específico aparente seco máximo varia de 18,40 kN/m³ a 19,50 kN/m³ havendo uma redução de 1,1 kN/m³ da camada mais superficial para a camada mais profunda (Figura 24).

A Figura 25 apresenta variação de umidade natural (w_{nat}) no dia da escavação do poço, limite de liquidez (LL), índice de plasticidade (IP), peso específico real dos grãos (γ_g), peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\ max}$) e umidade ótima (w_{ot}) em relação à profundidade, na coleta realizada no dia 05/12/2016.

Figura 25 - Características básicas do perfil do poço escavado



Fonte: O Autor (2019).

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade apresentaram aumento entre as camadas de 0 a 15 cm e de 15 a 50 cm. A camada de 50 a 110 cm, apesar de apresentar limite de liquidez, não apresentou plasticidade, sendo assim classificado como um solo não plástico.

A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios químicos para o poço estudado. A camada de 15 a 50 cm apresenta condutividade elétrica (CE) no extrato saturado três vezes maior que nas demais camadas, maior quantidade de íons de alumínio e saturação por alumínio (m). O pH em água nos três horizontes é ácido e a camada de profundidade de 50 a 110 cm apresenta maior teor nos demais cátions e soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (CTC), grau de saturação por bases (V) e saturação por sódio ($100Na^+/T$). Até 15 cm de profundidade o solo apresenta CTC baixa ($< 27 \text{ cmol}_c/\text{Kg}$, argila de baixa atividade – Tb) e de 15 cm a 110 cm a CTC é alta ($> 27 \text{ cmol}_c/\text{kg}$, argila de alta atividade – Ta). A Capacidade de Troca Catiônica pode explicar algumas propriedades do solo, tais como: intemperismo, tipos de minerais argílicos e expansividade, Buol et al. (1997) indica que os minerais com CTC maiores que $20 \text{ cmol}_c/\text{kg}$ podem apresentar teores de montmorilonita.

Tabela 7 - Resultados das análises químicas nas camadas do poço

Profundidade	pH H ₂ O	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	S	CTC	V	m	100Na ⁺ /T
		mS/cm/25°C	cmol _c /kg							%			
0 a 15 cm	5,44	38,20	0,00	0,01	5,60	5,10	0,30	14,30	10,71	25,31	42,32	2,72	0,00
15 a 50 cm	5,39	136,70	0,14	0,00	5,90	6,80	1,40	14,20	12,84	28,44	45,15	9,83	0,49
50 a 110 cm	5,96	42,20	0,90	0,01	7,80	9,30	0,70	13,60	18,01	32,31	55,74	3,74	2,79

Fonte: O Autor (2019).

Os teores de óxidos foram obtidos por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) e apresentam resultados próximos para a composição do solo nas três camadas, este é um indicativo de que o solo é residual com altos teores de óxido de silício, alumínio e ferro. A soma dos percentuais dos três óxidos varia de 84% a 86%.

Tabela 8 - Composição de óxidos nas camadas de solo por espectrometria de fluorescência de raios-X

Constituinte	Amostra		
	0 a 15 cm	15 a 50 cm	50 a 110 cm
	Composição (%)		
SiO ₂	53,91	51,99	53,93
Al ₂ O ₃	23,77	24,15	21,51
Fe ₂ O ₃	8,34	8,54	9,18
CaO	0,77	0,77	1,35
MgO	2,15	2,33	2,66
Na ₂ O	0,57	0,59	1,23
K ₂ O	3,87	3,86	3,83
SO ₃	0,02	0,03	0,01
MnO	0,15	0,15	0,20
TiO ₂	1,26	1,34	1,23
P ₂ O ₅	0,08	0,08	0,08
Outros	0,22	0,22	0,27
P.F.	4,88	5,97	4,52

Fonte: O Autor (2019).

A camada de 15 cm a 50 cm (solo C1) foi escolhida para estudo do comportamento geotécnico na presença de CCA em proporções de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% por massa de solo seco, pois apresenta maior teor de finos, consequentemente maior índice de plasticidade e maior condutividade elétrica.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

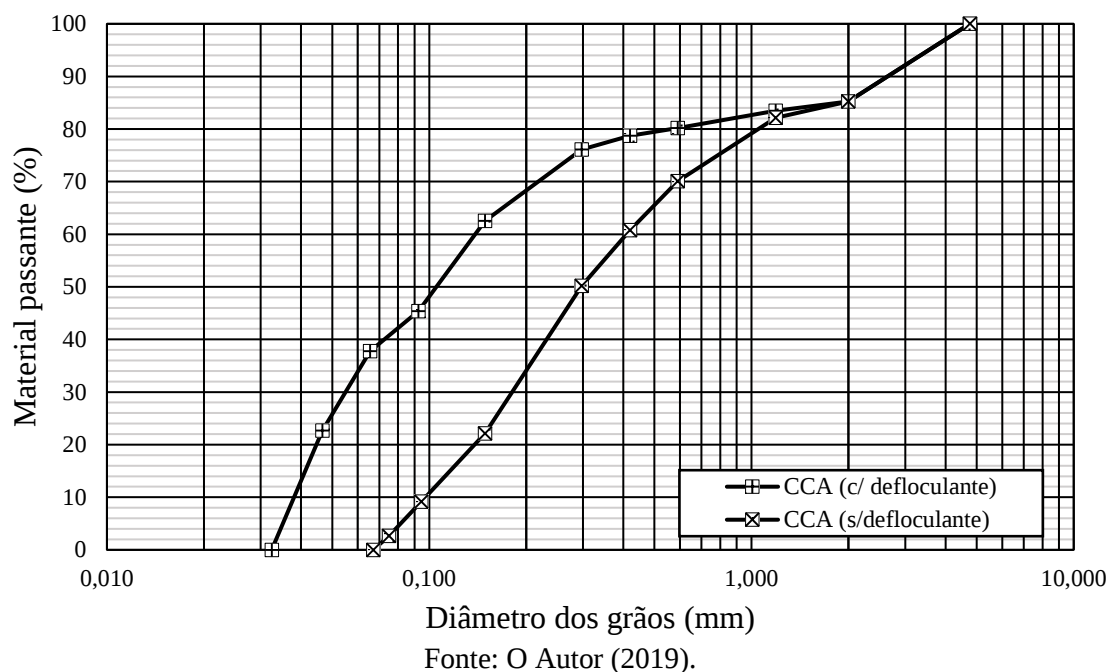
Inicialmente são analisadas as características da cinza de casca de arroz (CCA) e à posteriori os solos C1 e C2 em condições naturais e suas misturas com 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de CCA em relação à massa de solo seco.

4.2.1 Cinza de casca de arroz

Na amostra de CCA coletada foram realizados os mesmos ensaios de caracterização dos solos aplicando os procedimentos das normas apresentadas no item 3.3.2. A Figura 26 apresenta as curvas granulométricas da CCA com uso de defloculante e sem o uso do defloculante no

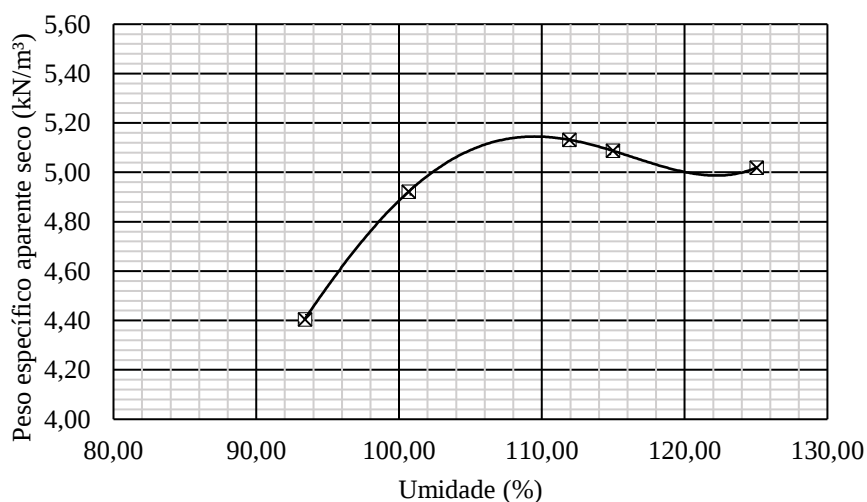
ensaio de sedimentação. No ensaio com uso de defloculante a gradação dos grãos varia entre 0,03 e 5,00 mm, enquanto sem o uso de defloculante varia de 0,06 a 5,00 mm.

Figura 26 - Curva granulométrica da CCA



A CCA apresentou-se como material de comportamento não plástico ao realizar os ensaios de limites de liquidez e plasticidade. O peso específico dos grãos da CCA dessa pesquisa é de 19,1 kN/m³. O resultado do ensaio de compactação (Figura 27) apresentou um peso específico seco máximo de 5,15 kN/m³ e umidade ótima de 10,9%.

Figura 27 - Curva de compactação da CCA



Fonte: O Autor (2019).

4.2.2 Solos e misturas

Os resultados de caracterização Física dos solos C1, C2 e suas misturas com CCA para classificação dos solos foi realizada a partir dos ensaios de peneiramento, sedimentação, peso específico real dos grãos, limites de consistência e compactação.

4.2.2.1 Granulometria

A caracterização granulométrica dos solos C1, C2 e suas respectivas misturas foram realizadas por peneiramento até a fração com dimensões de 0,075 mm, a fração dos finos das amostras passaram por ensaio de sedimentação com defloculante (Figura 28).

De acordo com os dados obtidos pela análise granulométrica, nota-se que os solos, em suas condições naturais e com misturas, apresentaram como suas duas maiores frações areia e argila. No solo C1 a fração de areia é de 3 a 4 vezes maior que a de argila, enquanto no solo C2 a fração de areia é inferior a 1,5 vez maior que a de argila. A adição de CCA ocasionou incremento na relação silte/argila nas misturas dos solos em comparação com seu estado natural (Apêndice A).

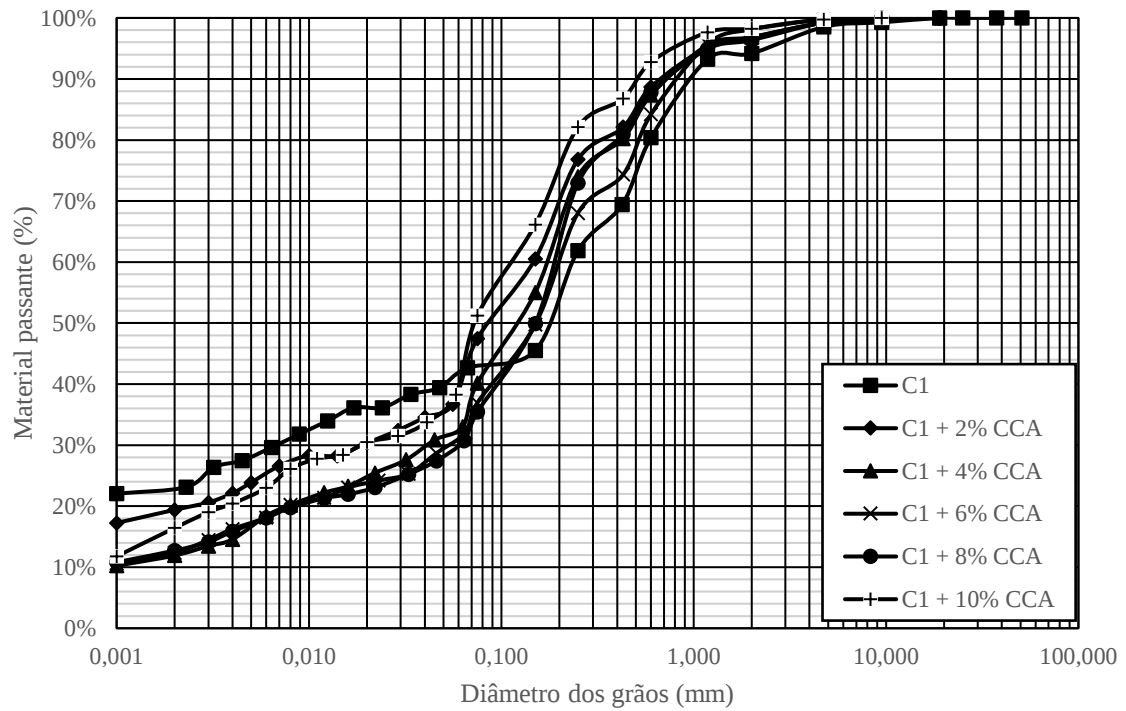
Figura 28 - Ensaio de sedimentação



Fonte: O Autor (2019).

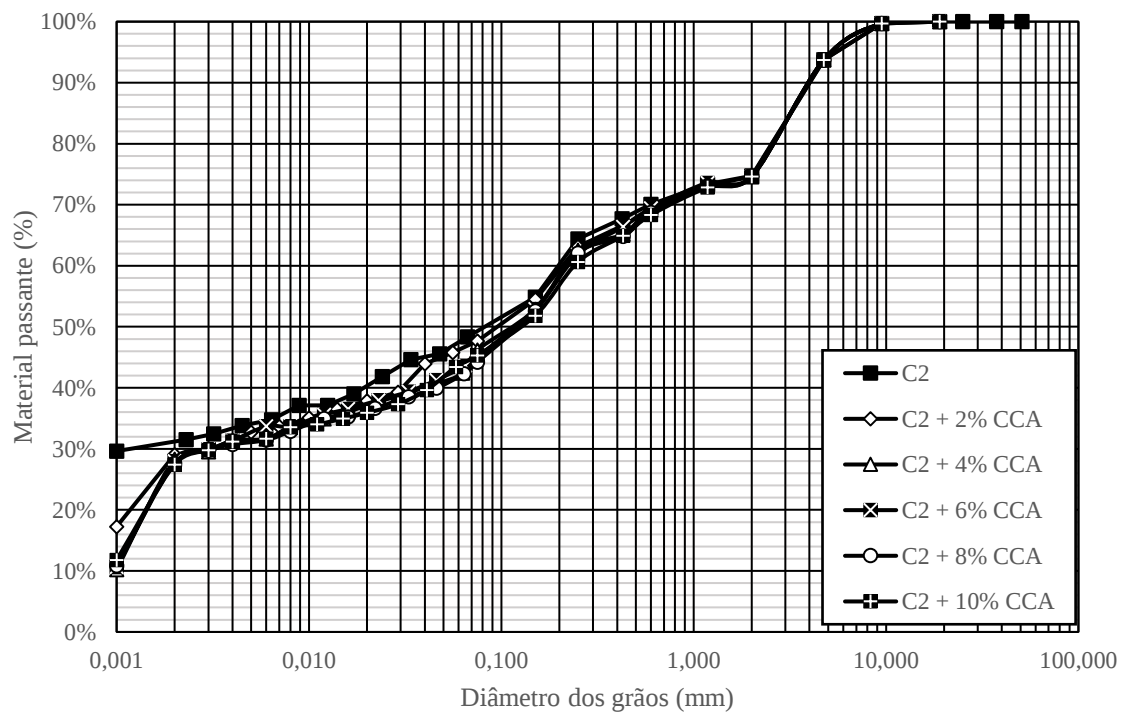
As Figuras 29 e 30 apresentam as curvas granulométricas dos solos C1 e C2 em seus estados naturais e misturas realizadas com CCA em proporções de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. Ao analisar os resultados obtidos por Bezerra (2019), Constantino (2018) e Silva (2018), respectivamente Figuras 15, 16 e 17, que as misturas com CCA do solo C1 e do Brejo da Madre de Deus apresentam redução da fração argilosa de, aproximadamente, 10%, enquanto as misturas com solo C2 apresentam comportamento similar ao do solo de Paulista, oscilação de 3%.

Figura 29 - Curva granulométrica do solo C1 e suas misturas



Fonte: O Autor (2019).

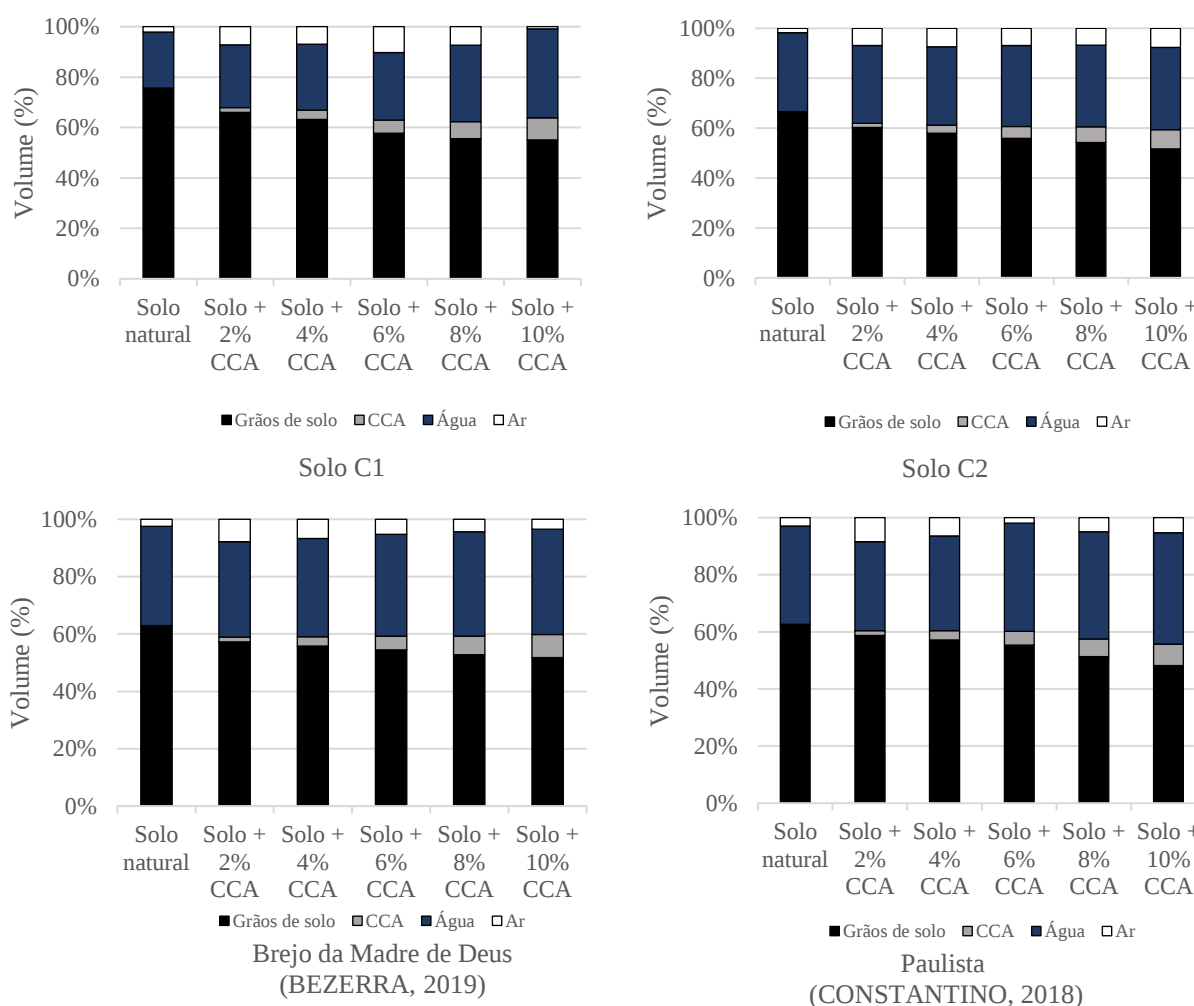
Figura 30 - Curva granulométrica do solo C2 e suas misturas



Fonte: O Autor (2019).

Os valores percentuais de grãos de solo, CCA, água e ar para um mesmo volume nas amostras são apresentados na Figura 31, assim como resultados dos estudos realizados por Bezerra (2019) e Constantino (2018). É perceptível que a adição de CCA nas amostras promoveu o aumento da fase gasosa em relação à condição do solo natural. Há uma redução do volume de sólidos e aumento do volume de vazios.

Figura 31 - Composição das amostras para um mesmo volume



Fonte: O Autor (2019).

4.2.2.2 Peso específico real dos grãos

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de peso específico real dos grãos, onde nota-se uma oscilação nos resultados de misturas do solo C1, enquanto nas amostras feitas com solo C2 o comportamento segue a tendência de redução com o aumento das proporções de CCA.

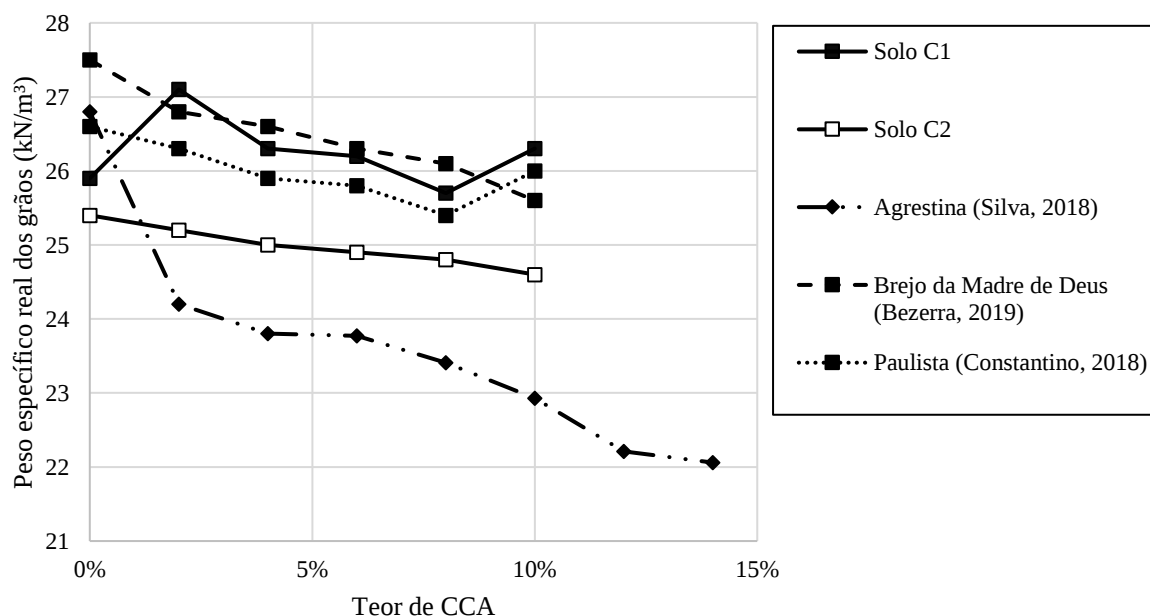
Tabela 9 - Resultados de peso específico real dos grãos

Amostra	Solo C1						Solo C2					
% CCA	0	2	4	6	8	10	0	2	4	6	8	10
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	25,9	27,1	26,3	26,2	25,7	26,3	25,4	25,2	25,0	24,9	24,8	24,6

Fonte: O Autor (2019).

A Figura 32 ilustra o comportamento do peso específico real dos grãos dos solos C1 e C2 com o aumento nas proporções de CCA em comparação com os trabalhos realizados por Constantino (2018), Silva (2018) e Bezerra (2019). O solo C1 apresentou um leve aumento no peso específico real dos grãos ao deixar de ser um solo natural para se tornar mistura de solo com 2% de CCA e com o incremento de CCA apresentou comportamento similar ao solo de Paulista, aumento do peso específico real dos grãos entre as proporções de 8% e 10% de CCA. O solo C2 exibiu redução do peso específico real dos grãos com o aumento da CCA, comportamento parecido com os de Agrestina e Brejo da Madre de Deus. A redução do peso específico com o aumento das proporções de CCA é o comportamento esperado, uma vez que a cinza é menos densa que o solo e parte da massa seca desse está sendo substituída.

Figura 32 - Comparativo de peso específico real dos grãos



Fonte: O Autor (2019).

4.2.2.3 Limites de consistência

Os resultados encontrados nos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) realizados nos solos C1 e C2 e suas respectivas misturas estão expostos na Tabela 10, como também o índice de plasticidade (IP) calculado. Comparando os resultados obtidos entre as misturas e seu solo natural, nota-se que nas misturas do solo C1 há um acréscimo no LL, enquanto nas misturas do solo C2 apresenta queda nesse mesmo índice. No entanto o LP apresenta tendência de aumento em ambos casos, apesar da pequena oscilação apresentada no solo C1. No solo C1 natural e sua mistura com 2% de CCA ocorreu uma leve queda no IP, entretanto com o aumento no incremento de cinza esse índice apresentou crescimento até a mistura com 8% de CCA, enquanto as misturas com C2 exibem queda em relação ao aumento da proporção de cinza. Com os dados apresentados afirma-se que os solos C1, C1 + 2% CCA, C1 + 4% CCA, C1 + 6% CCA e C1 + 10% CCA são fracamente plásticos ($1 < IP < 7$); C1 + 8% CCA, C2 + 6% CCA, C2 + 8% CCA e C2 + 10% CCA tem plasticidade média ($7 < IP < 15$); e C2, C2 + 2% CCA e C2 + 4% CCA são muito plásticos ($IP > 15$). No que tange ao Índice de Atividade (Ia) das argilas, pelo critério de Skempton (1953), as amostras estudadas classificam-se como inativas ($Ia < 0,75$).

Tabela 10 - Resultados de limites de Atterberg

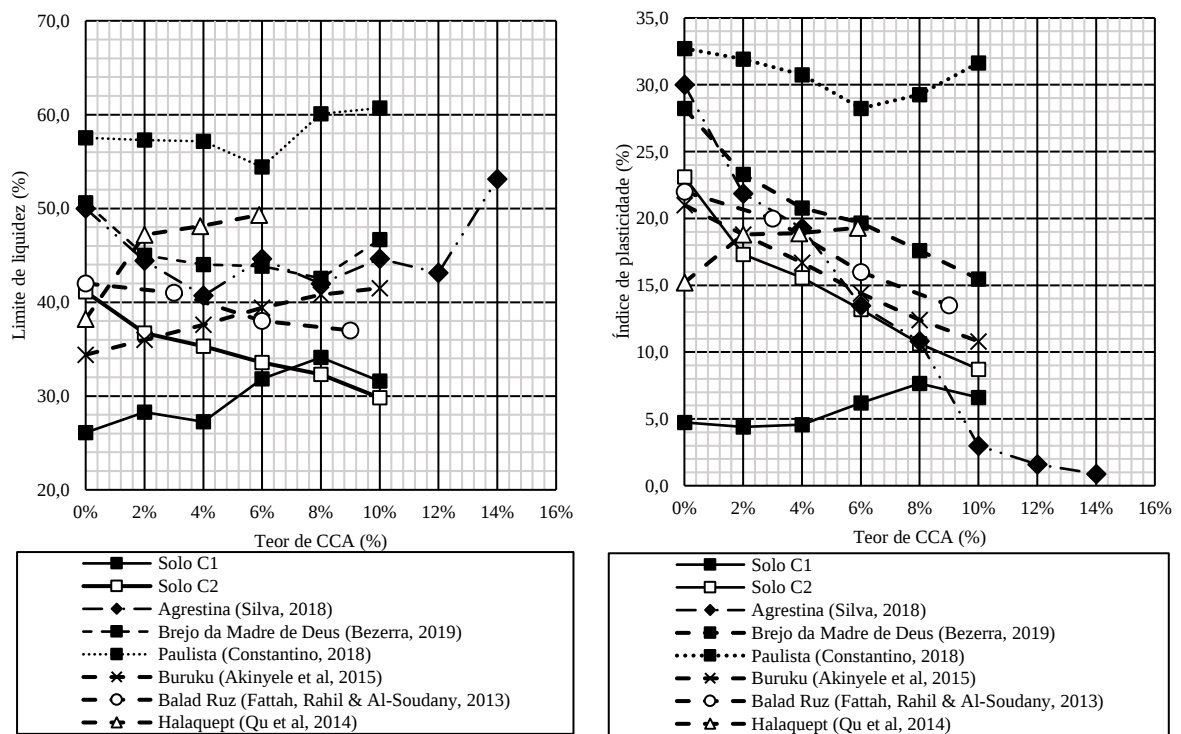
Amostra	Solo C1						Solo C2					
% CCA	0	2	4	6	8	10	0	2	4	6	8	10
LL (%)	26,10	28,29	27,26	31,82	34,11	31,60	41,12	36,70	35,30	33,57	32,31	29,81
LP (%)	21,36	23,89	22,70	25,61	26,46	24,99	18,00	19,38	19,74	20,38	21,67	21,09
IP (%)	4,74	4,40	4,56	6,21	7,65	6,61	23,12	17,32	15,56	13,19	10,64	8,72
Ia	0,22	0,21	0,22	0,32	0,39	0,34	0,73	0,58	0,53	0,44	0,36	0,29

Fonte: O Autor (2019).

A Figura 33 apresenta o gráfico comparativo dos resultados de LL e IP nos solos C1 e C2 e suas misturas com os estudos realizados por Silva (2018), Bezerra (2019), Constantino (2018), Akinyele et al. (2015) e Fattah, Rahil & Al-Soudany (2013) e Qu et al (2014). Os solos C1, Buruku e Halaquept apresentaram redução do limite de liquidez em relação ao aumento das proporções de CCA, todavia os solos C2, Balad Ruz e Brejo da Madre de Deus reduziram e os de Agrestina e Paulista apontaram redução e posterior elevação. Em relação ao comportamento do IP nas amostras, nota-se que nas misturas de solo C2, Agrestina, Balad Ruz, Brejo da Madre

de Deus, Buruku o índice sofreu redução com a adição de CCA, enquanto nas misturas com C1 e Halaquept o IP aumentou, contudo no solo de Paulista o IP apresentou comportamento similar ao seu resultado de LL.

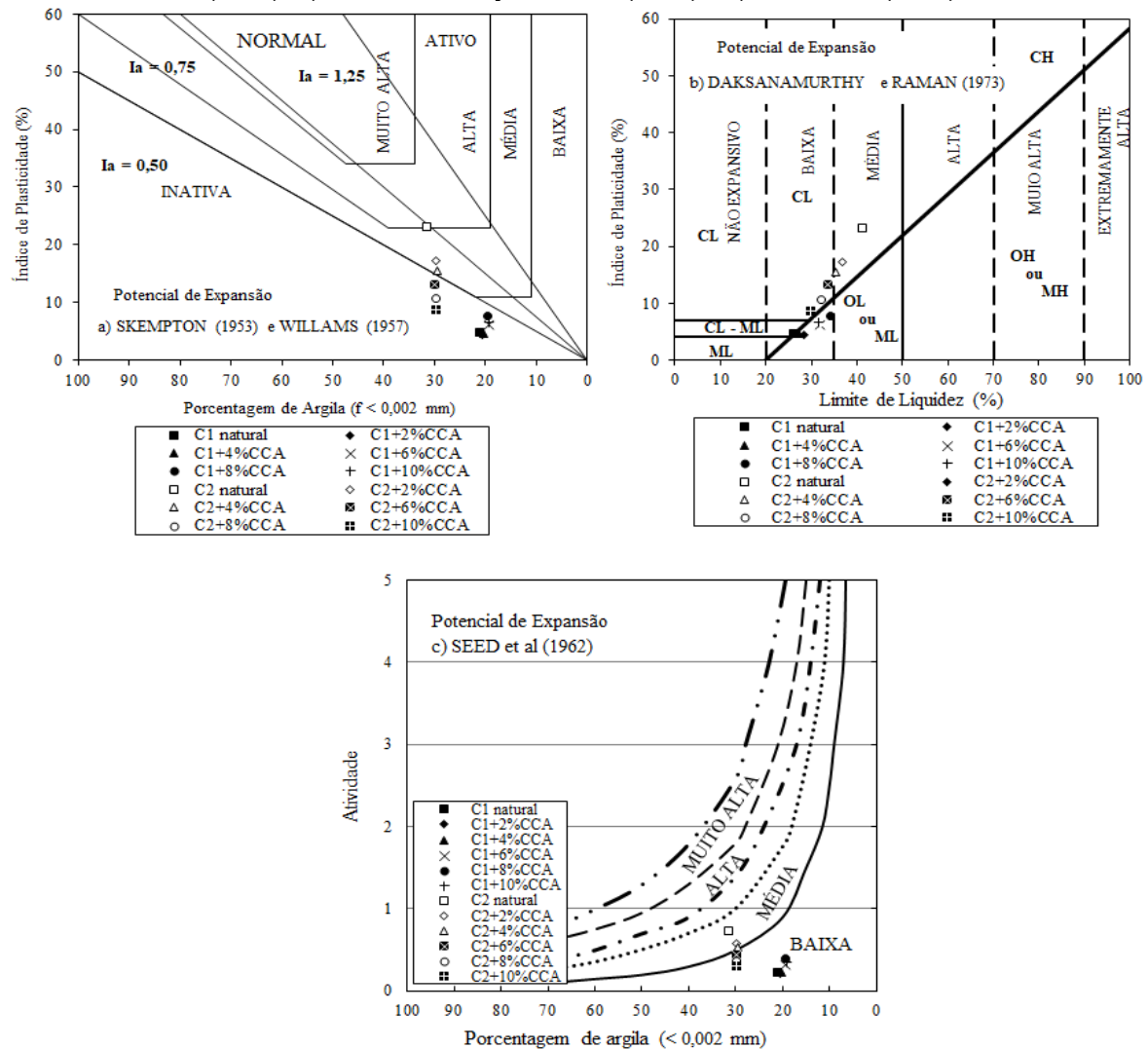
Figura 33 - Limite de liquidez e índice de plasticidade



Fonte: O Autor (2019).

Utilizando os critérios de Skempton (1953) e Williams (1957), Seed et al (1962) e Daksanamurty e Ramam (1973), observa-se o comportamento ilustrado na Figura 34. A partir de uma análise comparativa entre os gráficos, afirma-se que as amostras de C2 natural, C2 + 2% CCA e C2 + 4% CCA possuem potencial de expansão médio, enquanto as demais amostras se apresentam inativas ou de baixo potencial.

Figura 34 - Determinação do potencial de expansão pelos critérios de a) Skempton (1953) e Williams (1957); b) Daksanamurthy e Raman (1973) e c) Seed et al. (1962)



Fonte: O Autor (2019).

4.2.2.4 Classificação dos solos

Com os dados obtidos até o momento na caracterização Física das amostras, pôde-se classificar os solos naturais e misturas com base no Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e na Highway Research Board (HRB) da AASHTO (ASTM D3282, 2009), conforme a Tabela 11. Pela classificação do SUCS as amostras que envolvem o uso do solo C1 são areno siltosas (SM), em tempo que as que envolvem o solo C2 são areno argilosas (SC). Utilizando o sistema de classificação HRB, afirma-se que todas as amostras são predominantemente arenosas, portanto podem se comportar bem como subleito.

Tabela 11 - Classificação das amostras

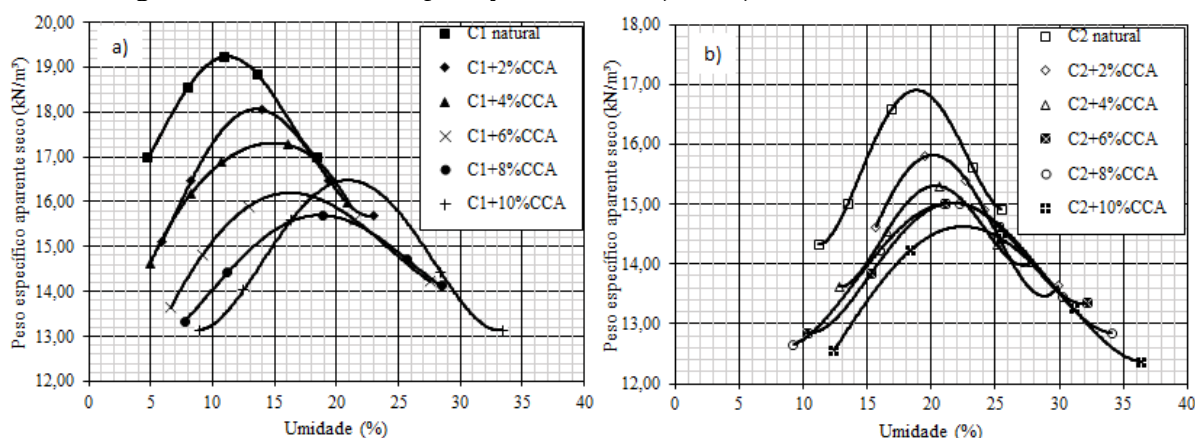
Amostra	C1 natural	C1 + 2% CCA	C1 + 4% CCA	C1 + 6% CCA	C1 + 8% CCA	C1 + 10% CCA	C2 natural	C2 + 2% CCA	C2 + 4% CCA	C2 + 6% CCA	C2 + 8% CCA	C2 + 10% CCA
HRB	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-7	A-2-6	A-2-6	A-2-6	A-2-6	A-2-4
SUCS	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SC	SC	SC	SC	SC	SC

Fonte: O Autor (2019).

4.2.2.5 Compactação

As curvas de compactação dos solos e suas misturas estão representadas pela Figura 35. Analisando o formato das curvas, pelo critério de Lee e Suedkamp (1972), as amostras que contém solo C1, C2+6%CCA, C2+8%CCA e C2+10%CCA são do tipo A, enquanto as amostras C2, C2+2%CCA e C2+4%CCA apresentam comportamento do tipo B. As curvas do tipo A apresentam um formato típico de predominância de solos granulares em sua composição, em oposição as curvas do tipo B apresentam maior influência do teor de finos.

Figura 35 - Curvas de compactação dos solos a) C1, b) C2 e suas misturas com CCA



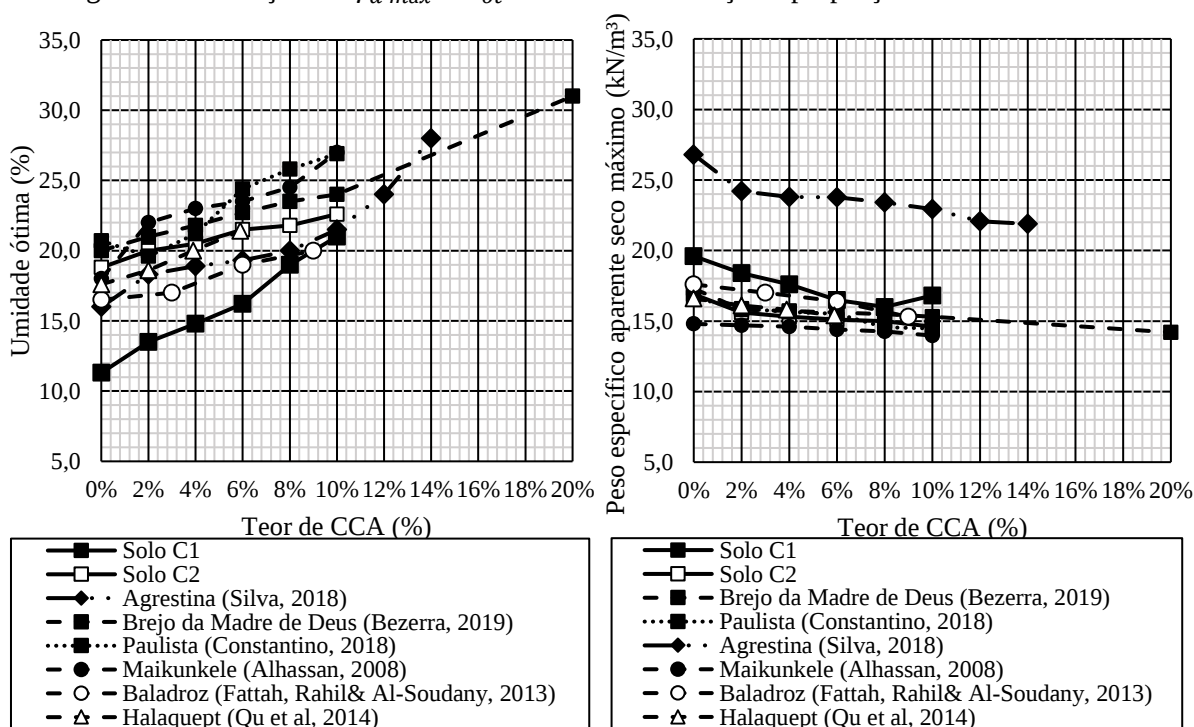
Fonte: O Autor (2019).

O aumento no teor de CCA dos solos ocasionou o aumento da umidade ótima (w_{ot}) e a redução do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\ max}$), exceto no caso de C1+10%CCA que apresentou um leve acréscimo, comportamento atípico em relação aos demais resultados. A redução do $\gamma_{d\ max}$ é o resultado esperado para esse ensaio, uma vez que a substituição de parte do solo por um material com grãos de densidade menor deve reduzir a massa ocupada num mesmo volume. O desempenho das amostras de solos C1, C2 e misturas indica um comportamento semelhante ao da pesquisa de Budny (2018) em relação à redução do $\gamma_{d\ max}$, o que não ocorre para a umidade ótima que se mantém para este autor, Figura 12. O solo estudado

por Freitas (2018) mostra um comportamento completamente diferente de todos os estudos apresentados, Figura 10.

A Figura 36 apresenta a variação de $\gamma_{d\text{ máx}}$ e w_{ot} das amostras em relação ao percentual de CCA com alguns resultados encontrados na literatura. Nota-se que o comportamento típico é a diminuição do $\gamma_{d\text{ máx}}$ e o aumento da w_{ot} , os únicos que apresentaram comportamento diferenciado foram o solo C1 com 10% CCA que exibiu aumento do seu $\gamma_{d\text{ máx}}$ em relação à proporção anterior e o solo de Paulista ao apresentar redução entre a umidade ótima na amostra com solo natural e com 2% de CCA, logo após denota comportamento típico em relação ao incremento de cinza.

Figura 36 - Variação de $\gamma_{d\text{ máx}}$ e w_{ot} nos solos em relação à proporção de CCA na amostra



Fonte: O Autor (2019).

4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A Tabela 12 expõe os resultados da caracterização química da CCA, dos solos em condição natural e com proporções de cinza, estão apresentados valores de pH em água, condutividade elétrica no extrato saturado (CE), bases Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , os ácidos Al^{3+} e

H⁺ que formam bases, soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (CTC), grau de saturação por bases (V), saturação por alumínio (m) e saturação por sódio (100Na⁺/T).

Tabela 12 - Resultados das análises químicas nos solos C1, C2 e suas misturas com CCA

Amostra	pH H ₂ O	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	S	CTC	V	m	100Na ⁺ /T
		µS	cmol _c /kg										
CCA	7,60	568,80	0,01	1,82	3,20	3,30	0,00	6,77	8,33	15,10	55,17	0,00	0,07
C1 natural	5,39	136,70	0,14	0,00	5,90	6,80	1,40	14,20	12,84	28,44	45,15	9,83	0,49
C1+2%CCA	5,57	102,40	0,00	0,01	6,20	9,20	1,40	13,90	15,41	30,71	50,18	8,33	0,00
C1+4%CCA	5,63	93,60	0,00	0,00	5,80	4,90	0,00	14,90	10,70	25,60	41,80	0,00	0,00
C1+6%CCA	5,79	112,10	0,14	0,03	6,50	9,60	0,60	8,90	16,27	25,77	63,14	3,56	0,54
C1+8%CCA	5,79	130,50	0,00	0,00	5,80	5,10	0,90	8,40	10,90	20,20	53,96	7,63	0,00
C1+10%CCA	5,80	291,30	0,10	0,00	8,20	8,40	1,60	8,00	16,70	26,30	63,50	8,74	0,38
C2 natural	6,00	5530,00	3,49	0,09	18,50	6,10	0,00	24,60	28,18	52,78	53,39	0,00	6,61
C2+2%CCA	6,21	5340,00	3,26	0,12	18,80	31,57	0,00	50,37	53,75	104,12	51,62	0,00	3,13
C2+4%CCA	6,33	5120,00	3,36	0,13	16,30	33,45	0,00	49,75	53,24	102,99	51,69	0,00	3,26
C2+6%CCA	6,42	4690,00	3,04	0,16	15,70	32,30	0,00	48,00	51,20	99,20	51,61	0,00	3,06
C2+8%CCA	6,56	4950,00	3,22	0,18	15,90	31,35	0,00	47,25	50,65	97,90	51,74	0,00	3,29
C2+10%CCA	6,64	4510,00	3,13	0,19	14,40	26,35	0,00	40,75	44,07	84,82	51,96	0,00	3,69

Fonte: O Autor (2019).

De acordo com a classificação de Guimarães (2002), a CCA apresenta pH alcalino (7,4 < pH < 8,0), o solo C1 é ácido (4,5 < pH < 5,4) e suas misturas com CCA são moderadamente ácidos (5,5 < pH < 5,9), os solos C2 natural, C2+2%CCA, C2+4%CCA, C2+6%CCA, e C2+8%CCA são levemente ácidos, e C2+10%CCA têm pH neutro. Por outro lado, o Guia Prático para Interpretação de Resultados e Análises de Solo da EMBRAPA (SOBRAL et al., 2015) classifica o pH das amostras C1 natural, C1+2%CCA, C1+4%CCA, C1+6%CCA, C1+8%CCA, C1+10%CCA e C2 como médio (5,0 < pH < 6,0) e as demais amostras como alto.

A condutividade elétrica no extrato de saturação estima o total de sais solúveis presentes no solo, quanto maior a quantidade de íons presentes na amostra, mais energia elétrica poderá ser conduzida pelo extrato. As amostras que contém solo C1 apresentam valores de condutividade elétrica característica de solos sódicos (< 4,0 dS/m), apresentando queda na condição de solo natural (136,7 µS) para a proporção de 4%CCA (93,6 µS), contudo o incremento de CCA volta a aumentar os valores de condutividade entre as proporções de 6% e 10% de cinza. Nas amostras com solo C2 a condutividade elétrica classifica as amostras como salinas (≥ 4,0 dS/m e Na⁺/CTC < 15) e apresenta redução em relação ao aumento das proporções de CCA. A alta condutividade do solo C2 natural é devida à presença maior de íons devido ao seu caráter solódico, a CCA apresenta condutividade menor que C2, portanto a substituição de

parcelas do solo pela cinza reduz a condutividade das amostras. O solo C2 apresenta maior condutividade elétrica que o solo C1 devido a maior quantidade de sais Mg^{+2} , Ca^{+2} , Na^{+} , K^{+} .

Considerando o Manual de Análise de Solos da Embrapa (DONAGEMA et al., 2011), no tocante à CTC, afirma-se que nas amostras de solo C1 natural, C1+2%CCA, C2 e todas suas misturas é considerada alta ($CTC > 27 \text{ cmol}_c/\text{kg}$) e considerada pedologicamente como “Ta”, que por definição são os Luvisolos Vertissolos e Litossolos, enquanto as demais amostras de solo C1 são consideradas pedologicamente “Tb” e de baixa capacidade de troca catiônica. Utilizando a classificação apresentada por Buol et al. (1997), as amostras possuem alta CTC ($CTC > 20 \text{ cmol}_c/\text{kg}$), que pode ser um indicativo de presença de minerais argílicos 2:1 na fração de finos. Nota-se que a substituição de parte do solo por CCA aumenta a CTC.

Santos et al. (2013) classifica os solos de acordo com seu grau de saturação por bases em eutróficos ($V > 50\%$) e distróficos ($V < 50\%$), com isto pode-se afirmar que as amostras estudadas são eutróficas, exceto C1 natural e C1+4%CCA.

A única amostra que apresenta saturação por sódios classificável é o C2 natural, considerada como solo de caráter solódico ($6\% < 100Na^{+}/T < 15\%$), de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013).

A Tabela 13 apresenta os teores de óxidos presentes nas amostras e sua perda ao fogo (P.F.), obtidos pela técnica analítica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). Na CCA há predominância de óxido de silício assim como nas amostras apresentadas na Tabela 1, entretanto os quantitativos de sílica presentes na composição da CCA variam devido à espécie do arroz, método de cultivo, nutrientes presentes no solo, clima, temperatura e demais fatores extrínsecos relacionados à cultura desse cereal. Em termos de componentes óxidos, a cinza estudada nessa pesquisa se aproxima da utilizada por Dahale e Rajurkar (2014) e Jha e Tiwari (2016). Patel e Mahiyar (2014) afirmam que o alto teor de sílica presente na CCA apresenta características essenciais em sua utilização como aditivos estabilizante.

As misturas de solo C1 com a cinza apresentaram aumento no teor de óxido de silício em relação a sua amostra natural. O óxido de cálcio é o constituinte que garante o poder cimentício da mistura a partir de reação química com sílica amorfa, de acordo com Boateng e

Skeete (1990), que é responsável pela produção de silicatos hidratados de cálcio, porém sua proporção é baixa em relação aos óxidos de alumínio e potássio, em todas as amostras.

Tabela 13 - Porcentagem de óxidos e perda ao fogo nas amostras de CCA, solo C1 e suas misturas

Constituinte	Amostra						
	CCA	C1 natural	C1 + 2%CCA	C1 + 4%CCA	C1 + 6%CCA	C1 + 8%CCA	C1 + 10%CCA
Composição (%)							
SiO ₂	95,37	51,99	55,84	55,83	57,31	56,62	54,67
Al ₂ O ₃	0,80	24,15	22,18	22,37	21,32	20,79	21,44
Fe ₂ O ₃	0,36	8,54	8,19	7,89	7,54	7,68	8,27
CaO	0,75	0,77	0,72	0,70	0,69	0,69	0,81
MgO	0,37	2,33	1,95	2,01	1,84	1,87	2,16
Na ₂ O	0,08	0,59	0,48	0,49	0,45	0,45	0,44
K ₂ O	1,39	3,86	3,64	3,60	3,64	3,48	3,60
SO ₃	0,23	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
MnO	0,09	0,15	0,15	0,15	0,14	0,16	0,14
TiO ₂	0,04	1,34	1,23	1,17	1,15	1,14	1,24
P ₂ O ₅	0,48	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
Outros	0,03	0,22	0,24	0,24	0,26	0,25	0,22
P.F.	-	5,97	5,28	5,42	5,51	6,75	6,89

Fonte: O Autor (2019).

4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

O estudo do comportamento mecânico nesta pesquisa está alicerçado na determinação da expansão “livre”, tensão de expansão, resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral nos solos e suas combinações com CCA.

4.4.1 Expansão “livre”

O ensaio de expansão “livre” foi realizado em amostras indeformadas e amostras compactadas na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, submetidas à sobrecarga de 10 kPa utilizando uma prensa edométrica microcontrolada. A Tabela 14 aponta os resultados obtidos após a estabilização das amostras com períodos de cura de 0, 7 e 28 dias.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de expansão “livre” dos solos e misturas

Expansão “livre” (%)							
Amostra	Tempo de cura (dias)			Amostra	Tempo de cura (dias)		
	0	7	28		0	7	28
C1 natural indeformado	1,26	-	-	C2 natural indeformado	4,22	-	-
C1 natural compactada	0,91	0,47	0,29	C2 natural compactado	3,42	-	-
C1 + 2%CCA	3,00	0,42	0,17	C2 + 2%CCA	3,09	2,83	1,62
C1 + 4%CCA	0,32	0,07	0,00	C2 + 4%CCA	2,73	1,04	0,96
C1 + 6%CCA	0,74	0,14	0,00	C2 + 6%CCA	1,95	1,13	0,66
C1 + 8%CCA	0,29	0,17	0,11	C2 + 8%CCA	1,51	0,91	0,76
C1 + 10%CCA	0,02	0,01	0,00	C2 + 10%CCA	0,63	0,50	0,00

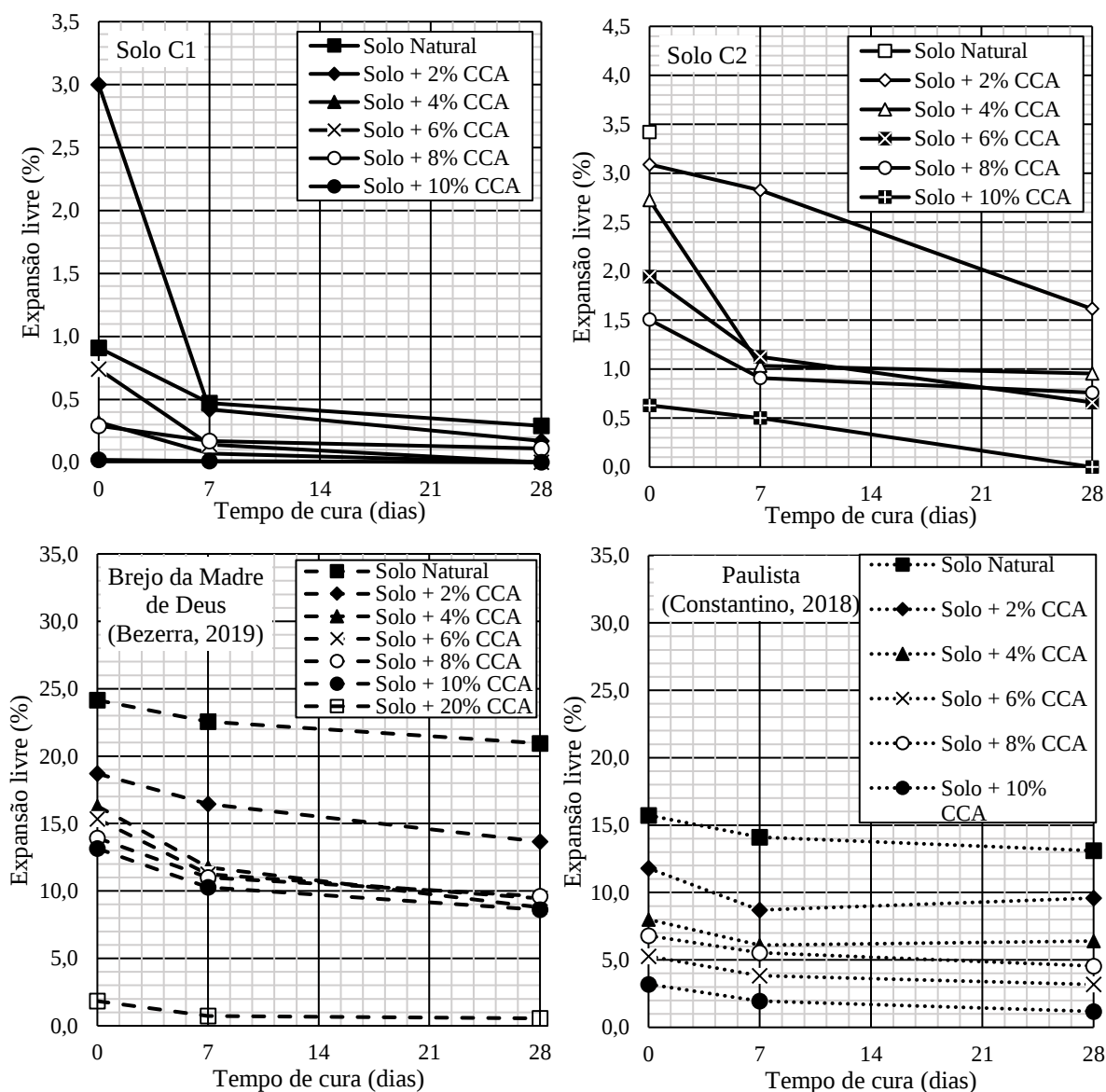
Fonte: O Autor (2019).

O solo C1 natural exibe um baixo grau expansão “livre”, pelo critério de Cuellar (1978), no entanto nota-se que esse solo com proporções de 2% de cinza apresentou um aumento de expansão “livre” para 3,0% em relação ao solo natural compactado na umidade ótima de 0,91%, essa ocorrência pode ser considerada como alívio de tensão da amostra C1 + 2%CCA, para comprovação é necessário repetir o ensaio.

O solo C2 natural indeformado apresentou expansão de 4,22%, enquanto o mesmo solo compactado na umidade ótima demonstrou uma redução de, aproximadamente, 19% da expansividade, pois o aumento na umidade para realização da compactação causou uma expansão inicial nos minerais argílicos. De acordo com o critério de Cuellar (1978), tanto o solo na condição natural quanto compactada apresentam expansividade média. Nota-se nas amostras de C2 com cinza que ocorre redução da expansão “livre” tanto em relação ao aumento da proporção de CCA em sua composição quanto ao longo dos tempos de cura, sendo que a amostra C2 + 10%CCA não apresenta aumento de volume aos 28 dias de cura.

A Figura 37 apresenta o comportamento de variação de volume devido ao potencial expansivo dos solos estudados em relação ao período de cura das amostras. Comportamento similar ao de redução da expansão “livre” com o aumento do período de cura, nota-se também que os solos de Brejo da Madre de Deus (BEZERRA, 2019) e de Paulista (CONSTANTINO, 2018) apresentaram redução na variação de volume em relação à substituição de parte da massa de solo por CCA. Quanto maior a proporção de cinza, menor a expansão “livre” apresentada pela amostra. Observa-se, também, que em todos os casos houve uma redução de mais de 50% da expansão “livre” ao comparar as misturas com 10% de CCA e o solo natural.

Figura 37 - Variação de expansão "livre" em relação ao tempo de cura



Fonte: O Autor (2019).

4.4.2 Tensão de expansão

A tensão de expansão nas amostras de solo C2 e suas misturas com CCA foi analisada pelo método do volume constante, os resultados estão apresentados na Tabela 15. Os ensaios foram realizados com corpos de prova moldados com 0, 7 e 28 dias de cura. O solo C1 não foi utilizado para esse estudo pois apresentava baixíssima variação de volume em relação à tensão de 10 kPa. O solo C2 natural apresentou 95 kPa e a adição de cinza resultou na diminuição da tensão de expansão ao passo que as proporções de CCA eram incrementadas, a substituição de 10% do solo por CCA reduziu a tensão de expansão em 86,6% em relação ao solo C2 natural.

Observa-se que o tempo de cura influenciou na redução da tensão de expansão em relação à mesma proporção de cinza usada.

A adição de 10% de CCA ao solo C2 reduziu a tensão de expansão de 91,57 kPa a 12,73 kPa imediatamente após a construção e a 28 dias a tensão de expansão foi nula. Considerando o critério de Salas (1980) a tensão de expansão de 91,57 kPa propicia o aparecimento de fissuras de importantes nas edificações e a adição de 10% CCA ao solo, a tensão de expansão não causa danos às construções. Os resultados mostram que há eficácia no uso da CCA para estabilização do solo C2 com 8% de CCA, pois em 28 dias não irá oferecer riscos às construções.

Tabela 15 - Tensão de expansão pelo método do volume constante
Tensão de expansão (kPa)

Amostra	Tempo de cura (dias)		
	0	7	28
C2 natural compactado	95	-	-
C2 + 2%CCA	91,57	68,26	46,60
C2 + 4%CCA	75,18	51,79	31,74
C2 + 6%CCA	68,26	49,95	28,30
C2 + 8%CCA	45,94	23,44	16,73
C2 + 10%CCA	12,73	7,31	0,00

Fonte: O Autor (2019).

4.4.3 Resistência à compressão simples (RCS)

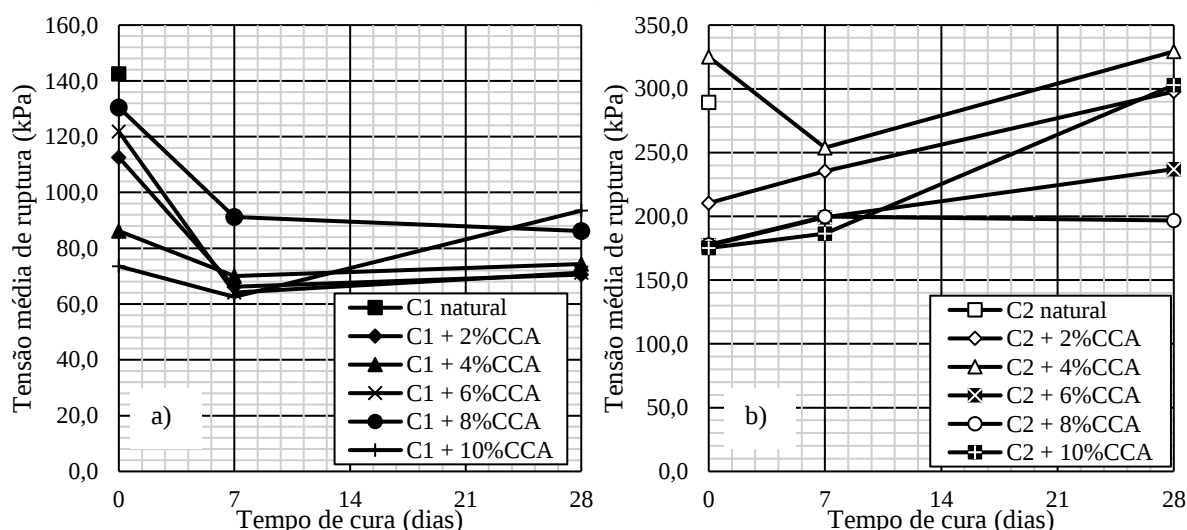
Na Tabela 16 estão apresentados os resultados de tensão máxima de ruptura encontrados pelo ensaio de compressão simples utilizando dois corpos de prova e a média das duas tensões para os solos C1, C2 e suas misturas com CCA. Observa-se na Figura 38 que o aumento das proporções de CCA nas amostras com solo C1 causa redução da tensão média de ruptura, no entanto o aumento no tempo de cura para o solo C1 natural proporcionou um aumento a tensão média de ruptura entre os 0 e 28 dias, as misturas de C1 com CCA apresentam comportamento inverso, tem sua resistência reduzida com o aumento no tempo de cura, exceto a amostra C1 + 10%CCA. Os resultados encontrados para as amostras com solo C1 vão de encontro com o estudo realizado por Budny (2018) que também apresenta redução dos valores de tensão ao substituir parte do solo pela cinza, Figura 13.

Tabela 16 - Resultados do ensaio de compressão simples

Tempo de cura (dias)	Tensão máxima de ruptura (kPa)						Tensão média de ruptura (kPa)		
	0		7		28		0	7	28
	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2			
C1 natural	121,98	162,98					142,48		
C1 + 2%CCA	112,25	112,94	70,89	61,51	70,54	70,54	112,60	66,20	70,54
C1 + 4%CCA	83,75	88,62	69,16	70,89	64,63	84,10	86,19	70,03	74,37
C1 + 6%CCA	105,64	137,96	66,38	61,86	71,59	70,89	121,80	64,12	71,24
C1 + 8%CCA	118,15	142,83	90,70	91,78	92,09	80,28	130,49	91,24	86,19
C1 + 10%CCA	86,53	60,47	59,77	65,33	107,38	79,58	73,50	62,55	93,48
C2 natural	227,62	351,33			-	-	289,48		-
C2 + 2%CCA	239,44	181,40	219,63	251,25	354,81	240,83	210,42	235,44	297,82
C2 + 4%CCA	326,32	323,54	258,55	249,17	372,53	286,00	324,93	253,86	329,27
C2 + 6%CCA	168,89	185,23	219,98	178,62	245,00	229,01	177,06	199,30	237,01
C2 + 8%CCA	176,19	179,32	207,47	192,17	216,15	177,23	177,76	199,82	196,69
C2 + 10%CCA	171,32	178,97	180,71	192,17	328,05	277,66	175,15	186,44	302,86

Fonte: O Autor (2019).

Figura 38 - Variação da resistência compressão simples em relação ao período de cura das amostras a) solo C1 e misturas, b) C2 natural e misturas

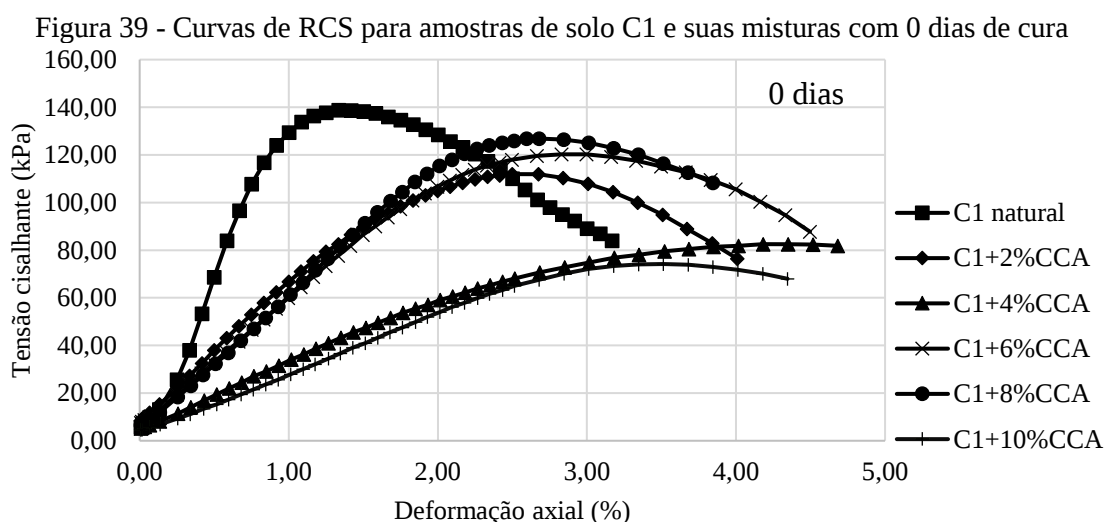


Fonte: O Autor (2019).

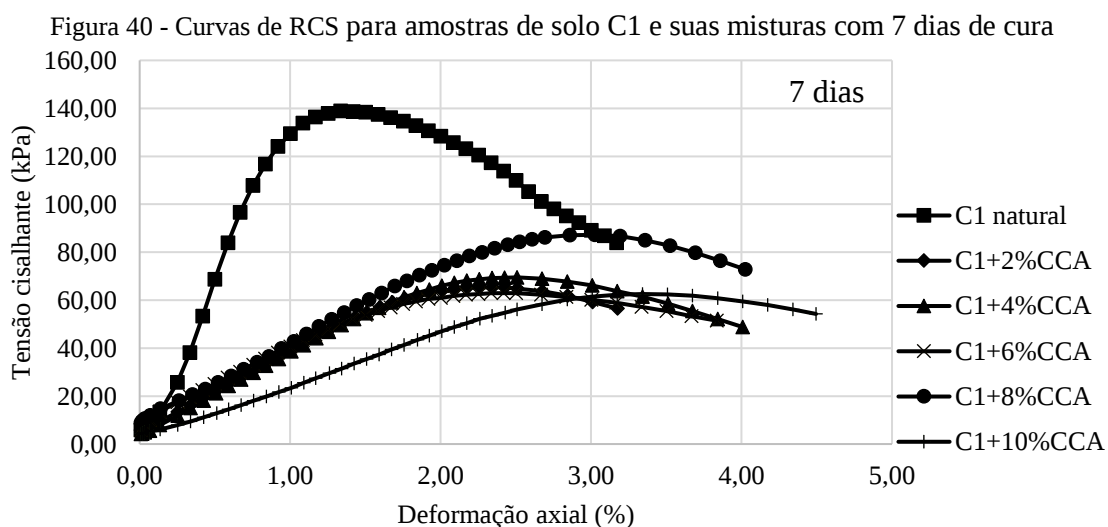
Constantino (2018) observou no solo de Paulista-PE que há tendência no aumento da tensão máxima de ruptura quando adicionado cinza até o teor de 4% e posteriormente o decréscimo na resistência. Concluiu que há o incremento de resistência à mistura apenas até o teor de 4% de CCA, acima de 4% há uma diminuição.

No solo C2 apresentam comportamento inverso ao que ocorre com as de solo C1. A tensão média de ruptura do solo C2 natural reduziu em relação ao aumento do período de cura, enquanto suas misturas com CCA apresentaram aumento seguindo o mesmo critério. O aumento da tensão média de ruptura em maiores tempos de cura em relação à mesma proporção

de cinza ocorre porque a cinza é um material pozolânico que reage positivamente na presença de água e óxidos de cálcio, causando reações cimentícias que proporcionam o aumento da tensão máxima de ruptura. O aumento de resistência observado na amostra C2+4%CCA em relação aos demais percentuais também foi observado por Constantino (2018). As curvas tensão versus deformação axial das amostras de solos C1, C2 em condição natural e misturadas com CCA para os períodos de cura de 0, 7 e 28 dias são apresentadas pelas Figuras 39, 40, 41, 42, 43e 44, respectivamente. As curvas de tensão x deformação apresentam comportamento típico de material frível, exibindo pico que corresponde a tensão cisalhante máxima. Para amostras com solo C1 em sua composição, a deformação axial para a tensão cisalhante máxima varia de 1% a 4%, no caso das amostras com solo C2 o intervalo de deformação para tensão cisalhante máxima varia de 2% a 6%. A adição da CCA ao solo torna a mistura mais dúctil.

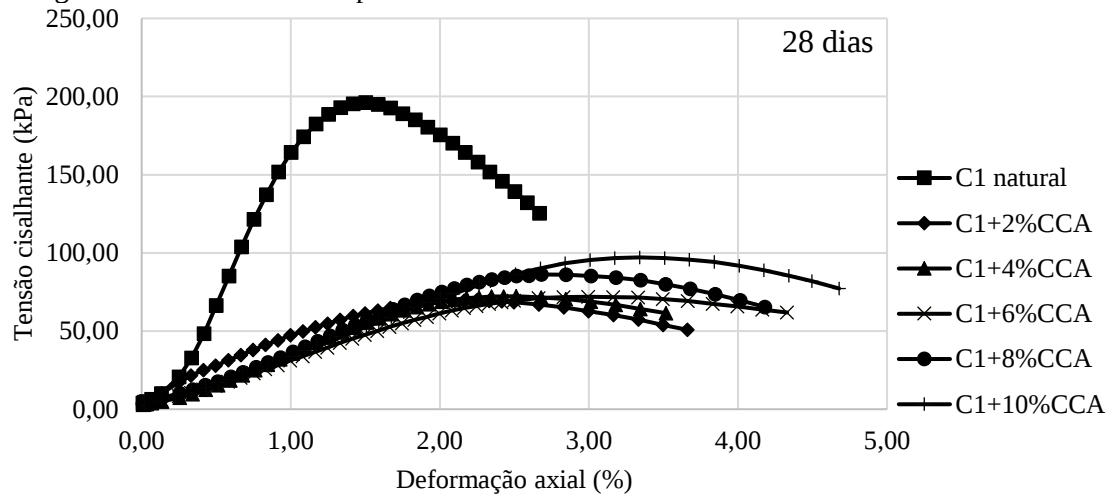


Fonte: O Autor (2019).



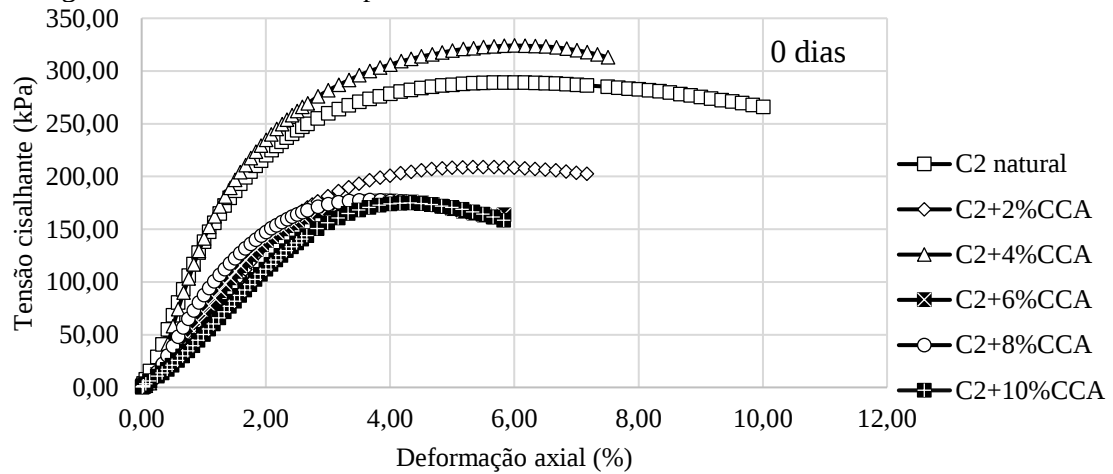
Fonte: O Autor (2019).

Figura 41 - Curvas de RCS para amostras de solo C1 e suas misturas com 28 dias de cura



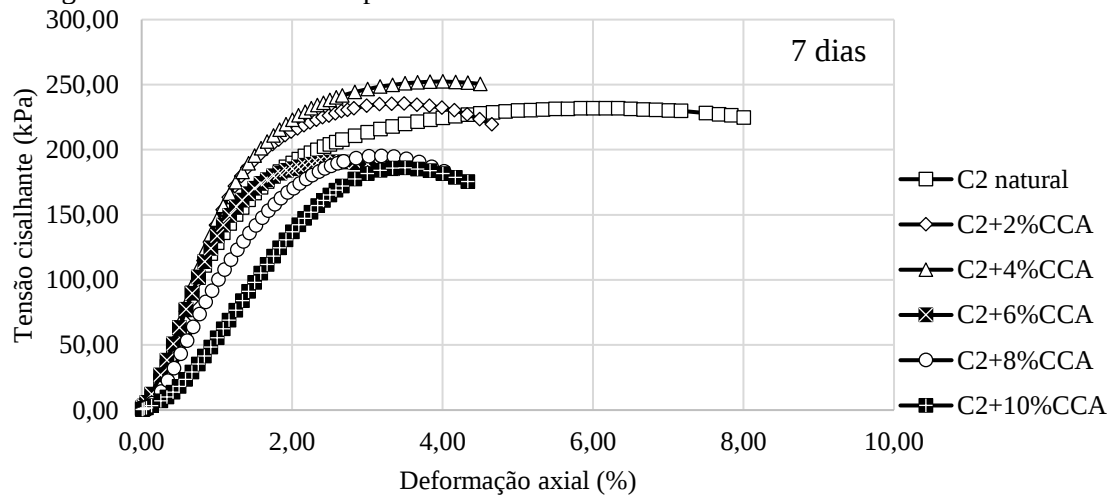
Fonte: O Autor (2019).

Figura 42 - Curvas de RCS para amostras de solo C2 e suas misturas com 0 dias de cura



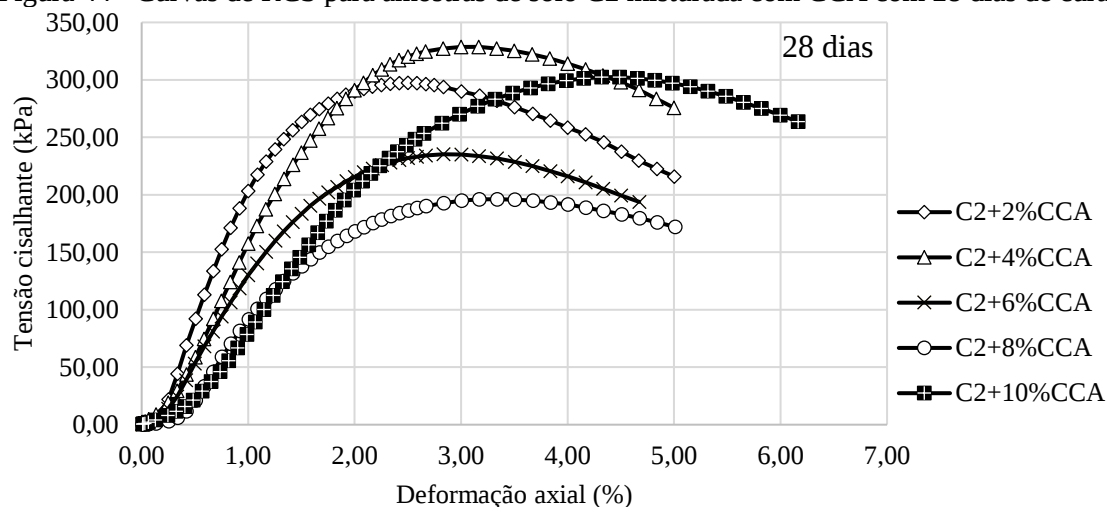
Fonte: O Autor (2019).

Figura 43 - Curvas de RCS para amostras de solo C2 e suas misturas com 7 dias de cura



Fonte: O Autor (2019).

Figura 44 - Curvas de RCS para amostras de solo C2 misturada com CCA com 28 dias de cura



Fonte: O Autor (2019).

4.4.4 Resistência à tração por compressão diametral

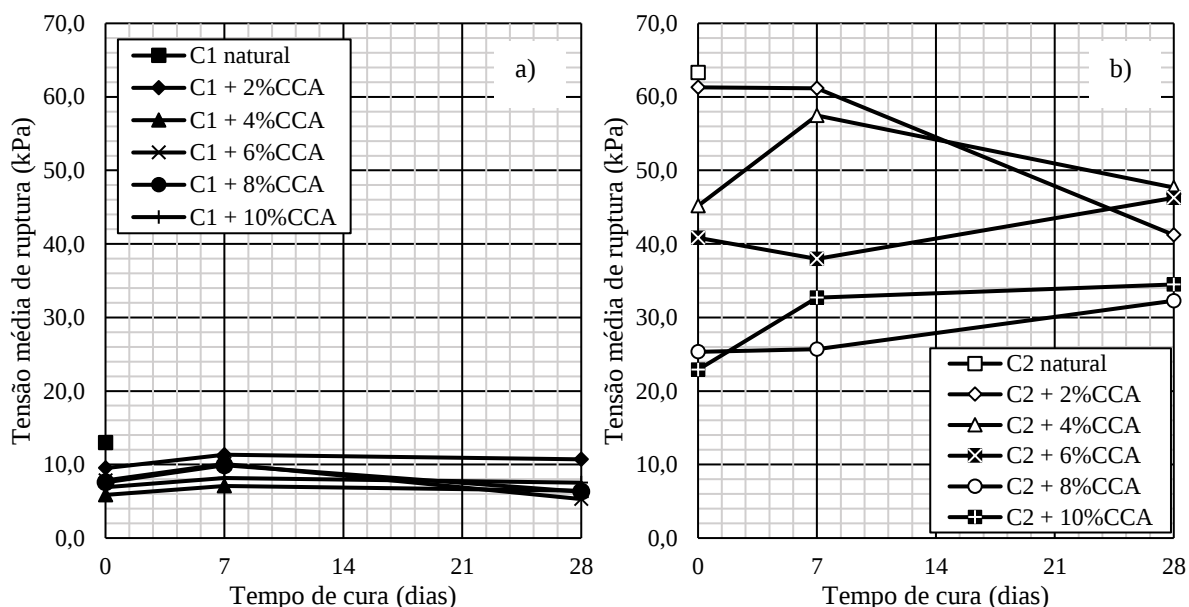
A Tabela 17 exibe os valores obtidos para a resistência à tração por compressão diametral nas amostras com solo C1, C2 e suas misturas com CCA nos períodos de cura de 0, 7 e 28 dias. Nas misturas de CCA com esse mesmo solo apresenta maior tensão nos corpos de prova com 7 dias de cura em comparação com demais períodos, ilustrado na Figura 45. A substituição de parte da massa de solo por CCA provou reduzir a resistência à tração em relação ao solo C1 natural, esse mesmo comportamento é apresentado em relação ao solo C2 e suas misturas no período de 0 dias de cura.

Tabela 17- Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Tempo de cura (dias)	Tensão máxima de ruptura (kPa)						Tensão média de ruptura (kPa)		
	0		7		28		0	7	28
Amostra	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2			
C1 natural	15,64	10,34					12,99		
C1 + 2%CCA	9,64	9,38	9,64	13,03	11,38	9,99	9,51	11,34	10,69
C1 + 4%CCA	6,34	5,39	6,95	7,21	6,08	6,78	5,87	7,08	6,43
C1 + 6%CCA	8,17	7,47	8,69	11,47	5,21	5,39	7,82	10,08	5,30
C1 + 8%CCA	7,30	7,82	8,51	11,29	7,04	5,56	7,56	9,90	6,30
C1 + 10%CCA	6,52	7,30	6,95	9,38	8,34	6,69	6,91	8,17	7,52
C2 natural	65,51	61,07			-	-	63,29		-
C2 + 2%CCA	65,51	57,08	80,01	42,31	54,73	27,71	61,30	61,16	41,22
C2 + 4%CCA	43,00	47,35	52,65	62,29	47,17	48,13	45,18	57,47	47,65
C2 + 6%CCA	41,35	40,31	36,49	39,44	46,05	46,48	40,83	37,97	46,27
C2 + 8%CCA	25,89	24,76	29,19	22,15	33,36	31,19	25,33	25,67	32,28
C2 + 10%CCA	24,07	21,72	31,28	34,14	35,27	33,71	22,90	32,71	34,49

Fonte: O Autor (2019).

Figura 45 - Variação da resistência à tração por compressão diametral em relação ao período de cura das amostras a) solo C1 e misturas, b) C2 natural e misturas

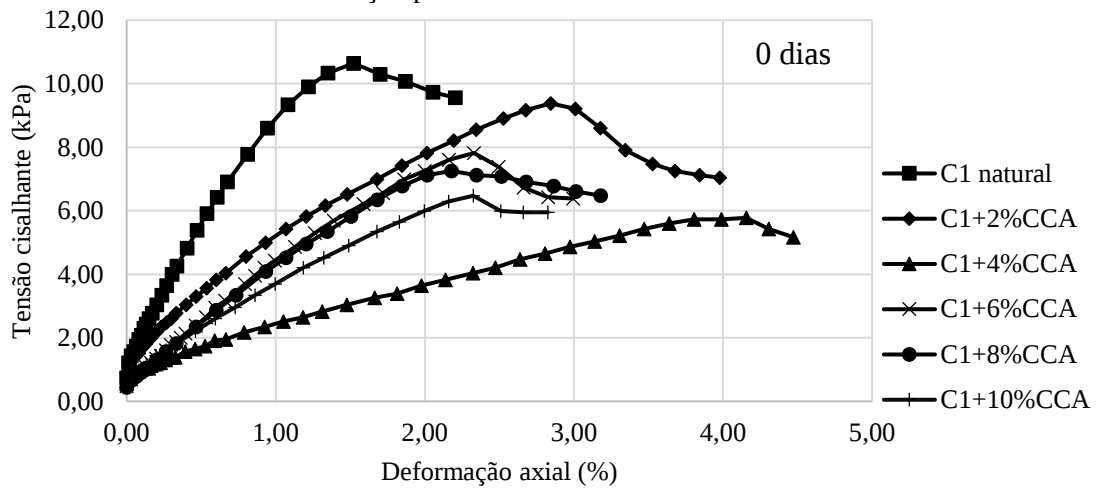


Fonte: O Autor (2019).

As curvas de tensão versus deformação axial das amostras de solos C1, C2 em condição natural e misturadas com CCA para os períodos de cura de 0, 7 e 28 dias pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral são apresentadas pelas Figuras 46, 47, 48, 49, 50 e 51, respectivamente. As curvas de tensão x deformação apresentam comportamento típico de material friável, exibindo pico que corresponde a tensão cisalhante máxima. Para amostras com solo C1 em sua composição, a deformação axial para a tensão cisalhante máxima varia de 1% a 4%, no caso das amostras com solo C2 o intervalo de deformação para tensão cisalhante máxima varia de 0,5% a 1,5%.

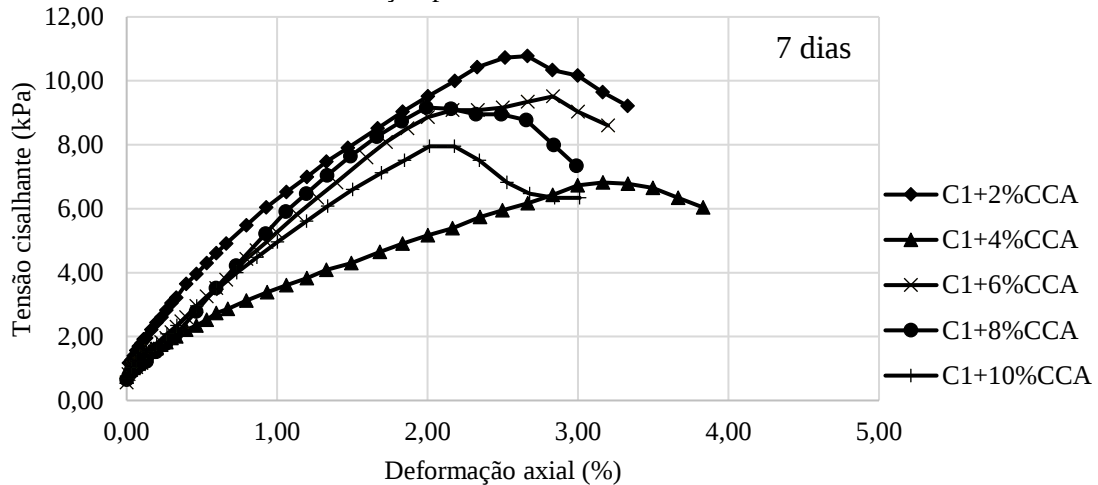
Constantino (2018) observou no solo de Paulista-PE que houve redução na tensão máxima por compressão diametral com a adição de cinza de casca de arroz. Houve, também, pouca variação nos resultados em relação ao tempo de cura, o que indica que o tempo entre a moldagem e a execução do ensaio pouco interfere no resultado.

Figura 46 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C1 e suas misturas com 0 dias de cura



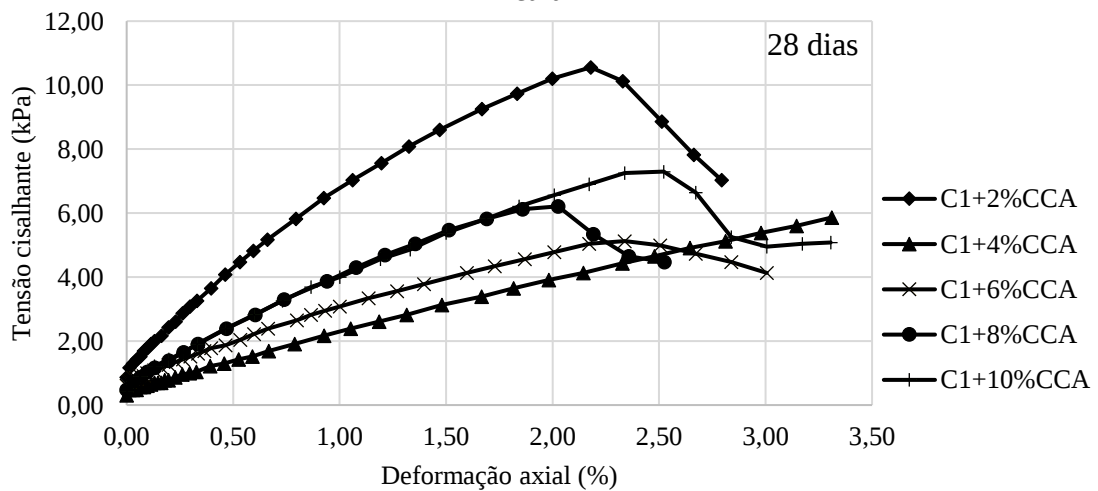
Fonte: O Autor (2019).

Figura 47 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C1 e suas misturas com 7 dias de cura



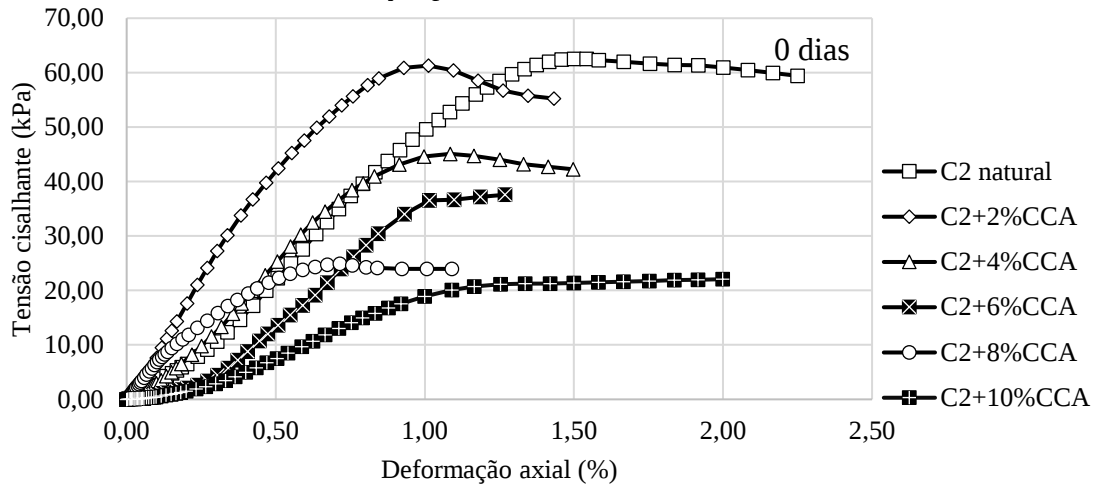
Fonte: O Autor (2019).

Figura 48 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C1 e suas misturas com 28 dias de cura



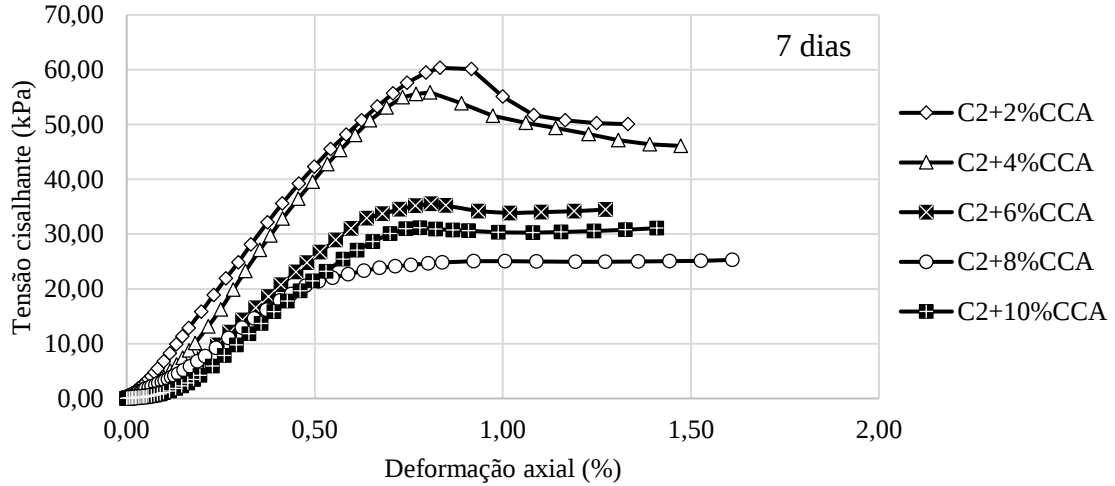
Fonte: O Autor (2019).

Figura 49 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C2 e suas misturas com 0 dias de cura



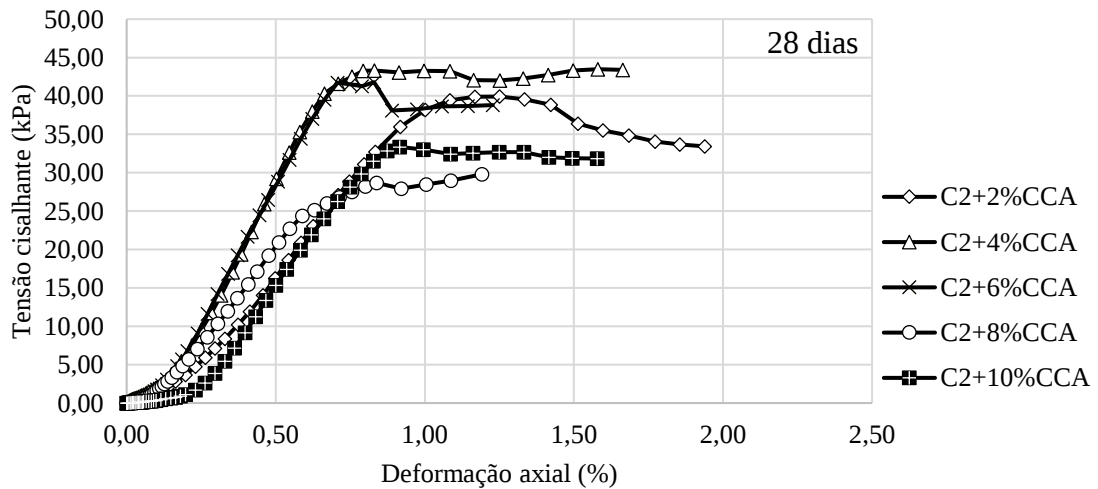
Fonte: O Autor (2019).

Figura 50 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C2 e suas misturas com 7 dias de cura



Fonte: O Autor (2019).

Figura 51 - Curvas de resistência à tração para amostras de solo C2 e suas misturas com 28 dias de cura



Fonte: O Autor (2019).

4.5 COMPARAÇÃO COM UM SOLO DE CABROBÓ ESTABILIZADO COM CAL

Barbosa (2013) realizou uma pesquisa sobre o comportamento geotécnico de um solo expansivo de Cabrobó/PE estabilizado com cal, portanto foi realizado um comparativo do comportamento geotécnico entre o solo C2 e o solo estabilizado por Barbosa (2013), que a partir desse ponto será chamado de solo B.

Na Tabela 18 estão listadas as características as características naturais dos solos B e C2 e com as proporções de estabilizantes, respectivamente a cal e a cinza de casca de arroz, utilizadas nas pesquisas.

Tabela 18 - Resumo das características apresentadas nos estudos de Barbosa (2013) e solo C2

Característica	Solo B (BARBOSA, 2013)				Solo C2					
Estabilizante (%)	0	3	5	7	0	2	4	6	8	10
Pedregulho (%)	0	0	0	0	25,28	25,45	25,43	25,36	25,34	25,39
Areia (%)	29	42	40	40	39,94	40,88	41,08	40,95	41,8	41,07
Silte (%)	34	26	36	47	3,26	3,95	3,98	3,76	3,07	3,75
Argila (%)	37	32	24	13	31,52	29,72	29,51	29,93	29,79	29,79
LL (%)	37	45	42	39	41,12	36,70	35,30	33,57	32,31	29,81
IP (%)	19	17	15	13	23,12	17,32	15,56	13,19	10,64	8,72
w_{ot} (%)	15,33	11,19	10,96	12,45	18,8	20,0	20,5	21,5	21,8	22,6
$\gamma_{d\text{ máx}}$ (kN/m ³)	17,8	17,3	17,10	17,60	16,90	15,60	15,30	15,10	15	14,60
Expansão “livre” (%)	7,45	0,40	0,06	0,00	3,42	3,09	2,73	1,95	1,51	0,63
Tensão de expansão ⁴ (kPa)	87	10	5	0	95	91,57	75,18	68,26	45,94	12,73
RCS (kPa)	33,465	211,43	177,44	230,34	289,48	210,42	324,93	177,06	177,76	175,15
pH em H ₂ O	8,60	12,43	12,52	12,55	6,00	6,21	6,33	6,42	6,56	6,64
CTC (cmol/kg)	31,13	164,76	191,86	210,26	52,78	104,12	102,99	99,20	97,90	84,82

Fonte: O Autor (2019).

As amostras com solo B apresentam maiores frações de finos que as amostras com solo C2. Observa-se que ao adicionar a cal as partículas maiores que 0,002 mm aumentam de proporção, principalmente, silte e areia. O mesmo ocorre no solo C2, porém em menores proporções. Esse fenômeno acontece devido à grande quantidade de óxido de cálcio presente na cal, que reage com a sílica do solo formando silicato de cálcio hidratado, assim passa a exibir partículas mais granulares.

⁴ Tensão de expansão determinada pelo método do volume constante.

Nos dois estudos o índice de plasticidade apresenta redução com o aumento das proporções de estabilizante passando de solos altamente plásticos a solos de característica medianamente plástica, acarretada pelo acréscimo do limite de plasticidade.

O peso específico aparente seco máximo no solo B natural aparece em dois pontos de umidade, 15,97 kN/m³ em 8,5% e 17,8 kN/m³ em 15,33%, o que acarreta numa curva de compactação com dois vértices, característicos de solos muito duros quando seco, consequentemente mais resistentes. A adição da cal ao solo B remove essa característica, tornando-o em um solo com único pico na curva de compactação devido ao aumento na dimensão das partículas e reduz a umidade ótima mantendo o peso específico aparente seco máximo em torno dos 17 kN/m³. O oposto ocorre nas amostras com solo C2, a adição de CCA aumenta a umidade ótima enquanto o peso específico aparente seco máximo reduz, porque a cinza tem peso específico menor que o solo.

No tocante à expansividade dos solos, ambos foram coletados em uma região que apresentam características climáticas e pedológicas que propiciam a formação de solos expansivos, que se confirma pelos ensaios de expansão “livre” no solo natural, onde o solo B expande 7,45% sob uma carga de 1 kPa e o solo C2 aumenta 3,42% sob uma carga de 10 kPa em relação ao seu volume inicial. Quanto à tensão de expansão, o solo B no estado natural exerce tensão de expansão de 87 kPa, enquanto o solo C2 natural atua com 95 kPa, valores obtidos a partir de ensaios de tensão de expansão pelo método do volume constante. O efeito da cal sobre o solo B é de redução de 88% da tensão de expansão com a adição de 3% de cal e redução de 100% para a proporção de 7% de cal. A CCA exerce o mesmo efeito de redução da expansão “livre” e tensão de expansão que a cal, porém em proporções de CCA mais generosas, pois para reduzir a tensão de expansão do solo C2 em, aproximadamente, 87% é necessária a substituição de 10% da massa de solo por cinza.

A cal exerceu crescimento acima dos 80% na resistência à compressão simples nas misturas com solo B em relação ao solo natural, comportamento típico, pois a cal é um aglomerante bastante difundido na indústria da construção civil. Por outro lado, a combinação do solo C2 com a CCA exerceu redução da tensão média de ruptura por compressão simples, exceto no caso da amostra C2+4%CCA que se apresentou como valor atípico, mas também

visto em outro trabalho e que necessita de pesquisa mais acurada para confirmação como valor ótimo.

Em relação ao pH das amostras, pela classificação de Guimarães (2002), o solo B em seu estado natural é fortemente alcalino e ao adicionar cal no processo de estabilização a alcalinidade torna-se maior, afinal esse é um produto já difundido na agricultura para correção de acidez do solo. A CCA exerce a mesma influência que a cal, no entanto em menores proporções

A capacidade de troca catiônica dos dois solos se apresenta menor que o de suas respectivas misturas com os estabilizantes, expressando valores acima dos 27 cmol_c/kg, condição característica de solos com as propriedades vérticas, confirmadas pelos ensaios de expansão “livre” e tensão de expansão.

A cal se apresenta como uma alternativa satisfatória na eliminação das características expansivas do solo e no acréscimo de resistência à compressão simples, quando comparada com a CCA. Na pesquisa realizada por Ataíde (2017), em comparação com a estabilização por adição de areia mostrou-se como mais viável financeiramente do que o melhoramento com a cal, isso se deve principalmente ao fato da cal hidratada ser um produto industrializado, enquanto as areias são encontradas em depósitos naturais e a CCA é material de descarte industrial. Em relação aos impactos ambientais ainda há necessidade de estudos mais detalhados sobre a aplicação da cal, mas o uso da CCA apresenta um ponto favorável por ser um meio de destinação desse resíduo.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e sugestões para novas pesquisas, que resultaram das ideias que surgiram ao término da execução do programa de investigação experimental aos solos estudados.

5.1 CONCLUSÕES

Ao término da presente pesquisa, que avaliou o comportamento geotécnico de dois solos de Cabrobó/PE estabilizados com cinza de casca de arroz (CCA), pode-se concluir que:

- A CCA utilizada nos ensaios dessa pesquisa é um material granular com dimensões dos grãos variando de 0,03 mm a 5 mm, não plástico, com peso específico real dos grãos de 19,1 kN/m³, umidade ótima de 109% e peso específico aparente seco máximo de 5,15 kN/m³.
- A composição Química da CCA apresenta 95,37% de óxido de sílica em sua composição, responsável pelo seu alto potencial pozolânico.
- O solo C1 em seu estado natural é classificado como areno-siltoso (SUCS) e A-1-b (HRB) predominantemente arenoso. É um solo fracamente plástico e de fração argílica inativa ($I_a = 0,22$), de acordo com índice de atividade de Skempton (1953). A forma da curva de compactação é do tipo A (LEE & SUEDKAMP, 1972) com umidade ótima de 11,3 % e peso específico aparente seco máximo de 19,0 kN/m³. É um solo distrófico (média à baixa fertilidade), com pH de 5,39 (ácido). A expansão “livre” sob tensão de 10 kPa na amostra indeformada é de 1,26%, enquanto na amostra compactada na umidade ótima é de 0,91%, sendo um solo de baixíssima expansividade. A tensão média de ruptura pelo ensaio de resistência à compressão simples é de 142,48, enquanto a resistência à tração por compressão diametral é 12,99 kPa.
- O solo C2 é classificado como areno-argiloso (SUCS) e A-2-7 areias siltosas ou argilosas (HRB). É um solo muito plástico e de fração argílica inativa ($I_a=0,73$), de acordo com índice de atividade de Skempton (1953). A forma da curva de compactação é do tipo B (LEE & SUEDKAMP, 1972) com umidade ótima de 18,8 % e peso

específico aparente seco máximo de 16,9 kN/m³. É um solo eutrófico (média à baixa fertilidade), com pH de 6,00 (levemente ácido). A expansão “livre” sob tensão de 10 kPa na amostra indeformada é de 4,22%, enquanto na amostra compactada na umidade ótima o valor cai para 3,42%. A tensão de expansão pelo método do volume constante é de 95 kPa, que causa fissuras importantes às edificações segundo o critério de Salas (1980). A tensão média de ruptura pelo ensaio de resistência à compressão simples é de 289,48, enquanto a resistência à tração por compressão diametral é 63,29 kPa.

- As misturas dos solos C1 com CCA apresentam características granulométricas similares às do solo natural, onde a relação silte/argila nos percentuais de 2%, 4%, 6%, 8%, 10% é de 0,27, 0,29, 0,30, 0,32, 0,32 e 0,29, respectivamente. Conclui-se que a CCA causa pequenas modificações na granulometria das combinações de solo e cinza.
- Todas as misturas de solo C1 com CCA são classificadas como SM – areno siltosas (SUCS) e as misturas com solo C2 são SC – areno-argilosas. Em todas as amostras utilizadas nessa pesquisa os solos são classificados como predominantemente arenosos com bom comportamento para subleito (HRB).
- Os resultados dos ensaios de limites de liquidez e plasticidade para misturas com solo C1 apresentaram aumento no limite de liquidez e no índice de plasticidade em relação ao solo natural, enquanto o solo C2 exibiu redução nos valores de limite de liquidez e índice de plasticidade, mudando a classificação de solo muito plástico para solo de plasticidade média nas proporções de 6%, 8% e 10% de CCA. O índice de atividade das amostras com solo C1 aumentou e o das amostras com solo C2 diminuiu, permanecendo os solos com característica as inativas, segundo Skempton (1953).
- A umidade ótima dos solos C1 e C2 aumentou conforme o incremento de CCA. Isso decorre do aumento na superfície específica, pois a cinza faz com que a mistura absorva mais água.
- O peso específico aparente seco máximo dos solos decresceu conforme o aumento das porções de CCA na mistura. O decréscimo do peso específico seco máximo, ocorre devido à baixa densidade real dos grãos da CCA.

- Pelo critério de Lee e Suedkamp (1972), as curvas de compactação das amostras com solo C1 apresentam a forma do Tipo A e as curvas das amostras com solo C2 a partir da proporção de 6% de CCA deixam de ser do Tipo B e passam a ser do Tipo A.
- O incremento de CCA aos solos eleva o pH das misturas. Para as amostras com solo C1, o pH variou de ácido, no solo natural, para moderadamente ácido em todas as misturas. Nas misturas do solo C2 o pH varia de levemente ácido, na amostra de solo natural, para neutro nas amostras C2+10%CCA.
- O solo C2 natural apresenta um percentual de expansão “livre” de 4,22% (sob 10 kPa de tensão) e na condição compactada na umidade ótima 3,22%. Os ensaios das misturas de solo C2 com CCA apresentaram redução nos valores de expansão “livre”, apresentando a proporção de 10% como ideal para inibição do potencial expansivo do solo.
- A tensão de expansão do solo C2 reduziu de 95 kPa para 12,73 kPa na amostra C2+10%CCA no mesmo dia em que foi realizada a mistura, com tempo de cura de 28 dias essa amostra não apresentava mais tensão de expansão. Pelo critério de Salas (1980) o solo C2 que causava fissuras importantes nas edificações, passou não causar danos quando estabilizado com 8% de CCA dentro de 28 dias.
- A estabilização dos solos com CCA causou redução na resistência à compressão simples do solo C1 de 142,48 kPa para 73,50 kPa na amostra com 10% de CCA, Enquanto para C2 a resistência passa de 289,48 kPa para 324,93 kPa na proporção de 4% de CCA, entretanto exibiu redução nas demais composições de solo e cinza.
- As misturas de solo e cinza apresentam redução na resistência à tração em relação ao incremento de CCA nos dois solos, reduzindo C1 de 12,99 kPa para 6,91 kPa na proporção de 10% de CCA e C2 de 63,29 kPa para 22,90 kPa na composição com 10% de CCA.

5.2 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

- Analisar o comportamento geotécnico do solo C2 com um tempo de cura de 120 dias para efeitos comparativos com os resultados apresentados nesse trabalho.
- Avaliar a influência da sucção na mistura de solo e CCA.
- Analisar o comportamento da cinza de casca de arroz queimado em temperaturas controladas, sob variados tempos de queima, para verificar as quantidades de sílica amorfa, sílica cristalizada e quantidade de carbono.
- Avaliar a temperatura de queima da cinza da casca de arroz e sua influência na estabilização de solos
- Analisar o comportamento de solos expansivos com misturas combinadas entre cal e cinza de casca de arroz em diversas proporções.
- Verificar a viabilidade econômica da aplicação da CCA na estabilização de solos em comparação com os outros usos do material e o impacto que esta pode causar ao ambiente.

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials – ASMT. **D3282**. Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. 2009.

_____. ASMT. **D4829**. Standard test method for expansion index of soils. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Versão corrigida: 2016. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

_____. ABNT. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016. 10p.

_____. ABNT. **NBR 6459**: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5p.

_____. ABNT. **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p.

_____. ABNT. **NBR 7181**: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 12p.

_____. ABNT. **NBR 7182**: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016. 9p.

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

_____. ABNT. **NBR 12041**: Argamassa de alta resistência mecânica para pisos — Determinação da resistência à compressão simples e tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012. 10p.

_____. ABNT. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 6p.

ADHIKARY, S.; JANA, K. Potentials of rice husk ash as soil stabilizer. **International Journal of Latest Research in Engineering and Technology**, v. 2, n. 21, p. 40-48, fev. 2016.

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, M.. **Potentials of rice husk ash for soil stabilization**. Technical Report, AU J. T. 11 (4), p. 246-250, 2008.

AMORIM, S. F. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC – PE)**. 2004.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

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

BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

BEZERRA, A. L. **Análise da expansão de um solo no estado natural e com adição de cinza de casca de arroz do município de Brejo da Madre de Deus – PE.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BOATENG, A.A.; SKEETE, D.A. Incineration of rice hull for uses as a cementitious material. **The Guyana Experience. Cement and Concrete Research**; v. 20, n. 5, p. 795–802, Estados Unidos, 1990.

BROOKS, R. M. Soil stabilization with flyash and rice husk ash. **International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences**, v. 1, n. 3, p. 209-217, dez. de 2009.

BUDNY, J. **Verificação do potencial de estabilização de um solo laterítico com uso de ácido fosfórico, ácido cítrico e casca de arroz.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; MCCracken, F. D.; SOUTHARD, R. J. **Soil genesis and classification.** 2. ed. Ames: Iowa State University, 527p, 1997.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Portal de informações agropecuárias.** Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 5 mai. 2018.

_____. Aspectos nutricionais e alimentícios do arroz. In: OLIVEIRA NETO, A. A. (Org.). **A cultura do arroz.** Brasília: Conab, 2015. p. 13–23.

CONSTANTINO, C. S. **Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

CUELLAR, V. Analisis crítico de los métodos existentes para el empleo de arcillas expansives en obras de carreteras y recomendaciones sobre las técnicas más idóneas para su uso habitual em España. In: **Laboratório del Transposte y Mecánica del Suelo**, 303p., 1978.

DAHALL, P.; RAJURKAR, V. J. Effect of rice husk ash on lime stabilized black cotton soil. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 9, n. 2, p. 219-222, 2014.

DAKSANAMURTHY, V.; RAMAN, V. **A simple method of identifying na expansive soil. soil and foundations**, Japanese Society of Soil Mechanic in Foundation Engineering, v. 13 (1), p. 97 – 104, 1973.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solos**, Rio de Janeiro, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Solos, 2011.

DORS, G. C.; PINTO, R. H.; BADIALE-FURLONG, E. **Influência das condições de parboilização na composição química do arroz**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.29, n.1, p.219-224, mar. 2009. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612009000100034&lng=en&nrm=iso . Acesso em: 18 mai. 2018.

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. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, S. R. M; PAIVA, S. C.; FREITAS, M. L. A. A.; V. B.; RÊGO, W. A.. Estabilização de Solos Expansivos de Cabrobó, Paulista e Suape/PE com Cal. In: **XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 2012, Porto de Galinhas - PE, 2012. p. 264-264.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Statistical databases**. Disponível em: www.fao.org. Acesso em: 3 mai. 2018.

FREITAS, J. E. **Uso de cinza da casca de arroz na estabilização de solos para uso em pavimento rodoviário**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2018.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Março de 2015. Disponível em ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola%5Bmensal%5D/Fasciculo/2015/lspa_201503.pdf. Acesso em: 10 maio 2018.

JHA, P.; TIWARI, N. Effect of lime and rice husk ash on engineering properties of black cotton soil. **International Journal of Inovative Technology and Research**. v. 4, n. 3, p. 2924-2926, mai. 2016.

LEE, P. W.; SUEDEKAMP, R. J. Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils. **Highway Research Record**, n. 381, National Academy of Sciences, Washington, D.C., p 1-9, 1972.

NELSON, J. D.; MILLER, D. J. **Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering**, New York, John Wiley & Sons, 1992.

PATEL, P.; MAHIYAR, H. K.; A experimental study of black cotton soil, stabilized with rice husk ash, fly ash and lime. **International Journal of Engineering Research & Technology**. v. 3, n. 1, p. 660-665, nov. 2014.

QU, J.; BEIBEI, L.; WEI, T.; LI, C.; LIU, B. Effects of rice-husk ash on soil consistency and compactibility. **Catena**, n. 122, p. 54-60, 2014.

RAJ, R. R.; BANUPRIYA, S.; DHARANI, R. Stabilization of soil using rice husk ash. **International Journal of Computational Engineering Research**, v. 6, n. 2, p. 43-50, fev. 2016.

SALAS, J. A. J. Cimentaciones em terrenos expansivos o cola sables. In: **Geotecnia y Cimentos**, n. 111, v. 1, ED. Rueda, Madrid, 1980, p.533-650.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 3. ed, Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa. 2013.

SEED, H. B.; WOODWARD, D. J.; LUNDGREN, R. **Prediction for compacted clays**. **Journal soil machanics and fundations division**, ASCE, v.88, sm. 3, p. 53-87, 1962.

SHRIVASTAVA, D.; SINGHAI, A. K.; YADAV, R. K. Effect of lime and rice husk ash on engineering properties of black cotton soil. **International Journal of Latest Research in Engineering and Technology**, v. 3, n. 2, p. 292-296, mai. 2014.

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

SKEMPTON, A. W. The collodial activity of clays. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundations**. 3rd., v.1, p. 57–61, Zurich, Proceeding. Zurich, 1953.

SOBRAL, L. F.; BARRETTO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solo**. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracajú, 2015.

VILAR, O. M.; FERREIRA, S. R. M. Solos colapsáveis e expansivos. In: CARVALHO, J. C. et al (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. Cap. 15. p. 415-440.

VINH, P. P. **Utilization of rice husk ash in geotechnology**: applicability and effect of the burning conditions. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculty of Civil Engineering and GeoScience, Delft University of Technology, Países Baixos. Disponível em: <<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A1400389f-c643-4d44-af41-580c7209e7bb>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

WILLIAMS, A. A. B. Studies of shear strength and bearing capacity of some partially saturated sands. **Proceedings of the Fourth Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, London, v. 3, p. 453-456, 1957.

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios de granulometria

Tabela 19 - Dados da análise granulométrica do Solo C1 e suas misturas com CCA

Análise Granulométrica (NBR 7181/2016)								
Amostra			Solo C1	Solo C1 + 2% CCA	Solo C1 + 4% CCA	Solo C1 + 6% CCA	Solo C1 + 8% CCA	Solo C1 + 10% CCA
Peneiramento (% passante)	2"	50,80	100	100	100	100	100	100
	1 1/2"	38,10	100	100	100	100	100	100
	1"	25,40	100	100	100	100	100	100
	3/4"	19,10	100	100	100	100	100	100
	3/8"	9,52	100	100	100	100	100	100
	#4	4,76	99,34	99,34	99,34	99,34	99,34	99,34
	#10	2,00	95,41	95,43	95,44	95,43	95,44	95,43
	#16	1,19	94,73	94,54	94,53	94,42	94,43	94,32
	#30	0,59	90,6	88,03	86,88	87,14	87,06	87,03
	#40	0,42	86,97	82,04	81,29	80,81	81,06	81,22
	#50	0,30	80,87	74,8	73,03	72,18	71,28	71,35
	#100	0,15	63,28	55,74	54,65	53,51	52,21	52,85
	#200	0,08	47,32	44,8	41,94	38,7	41,4	37,68
Sedimentação	% das amostras por tamanho dos grãos	0,058	45,05	41,5	39,7	36,45	35,72	35,44
		0,042	43,92	39,3	36,34	35,32	33,45	34,32
		0,021	37,1	36,54	32,98	31,95	33,45	31,52
		0,015	33,7	31,86	30,73	30,83	31,17	29,84
		0,011	31,99	30,21	29,61	30,54	28,61	28,72
		0,008	28,58	28,55	27,93	28,29	28,04	27,04
		0,006	26,86	26,62	26,53	25,48	25,77	24,8
		0,004	25,14	24,42	24,29	23,24	23,49	22,57
		0,003	22,87	21,93	21,76	21,55	21,79	20,89
		0,002	21,19	20,56	20,36	19,3	19,52	19,22
		0,001	19,21	17,23	16,67	17,02	16,91	15,53
	% Pedregulho		4,59	4,57	4,56	4,57	4,56	4,57
% Areia		68,55	68,81	68,91	69,95	69,67	70,63	
% Silte		5,67	6,06	6,17	6,18	6,25	5,58	
% Argila		21,19	20,56	20,36	19,3	19,52	19,22	
Relação silte/argila		0,27	0,29	0,30	0,32	0,32	0,29	

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 20 - Dados da análise granulométrica do Solo C2 e suas misturas com CCA

Análise Granulométrica (NBR 7181/2016)								
Amostra			Solo C2	Solo C2 + 2% CCA	Solo C2 + 4% CCA	Solo C2 + 6% CCA	Solo C2 + 8% CCA	Solo C2 + 10% CCA
Peneiramento (% passante)	2"	50,80	100	100	100,00	100	100	100
	1 1/2"	38,10	100	100	100,00	100	100	100
	1"	25,40	100	100	100,00	100	100	100
	3/4"	19,10	100	100	100,00	100	100	100
	3/8"	9,52	99,68	99,68	99,68	99,68	99,68	99,68
	#4	4,76	93,76	93,72	93,72	93,74	93,74	93,73
	#10	2,00	74,72	74,55	74,57	74,64	74,66	74,61
	#16	1,19	73,35	73,21	73,22	73,6	73,1	72,83
	#30	0,59	70,07	69,2	69,19	69,41	68,74	68,33
	#40	0,42	67,69	66,59	65,19	66,41	64,8	64,94
	#50	0,30	64,42	63,14	62,56	61,85	62,1	60,61
	#100	0,15	54,86	54,49	52,87	52,91	52,59	51,83
	#200	0,08	48,37	47,65	46,18	45,05	44,22	45,31
Sedimentação	% das amostras por tamanho dos grãos	0,058	45,56	45,79	42,42	43,63	42,33	43,42
		0,042	44,62	43,93	40,54	41,27	39,95	39,66
		0,021	41,82	39,27	39,13	39,38	38,53	37,31
		0,015	39,01	37,87	37,50	37,96	36,63	35,89
		0,011	37,13	36,47	36,09	36,54	35,21	34,95
		0,008	37,13	35,07	34,90	35,6	34,99	34,01
		0,006	34,78	33,67	33,49	33,69	32,86	33,54
		0,004	33,84	32,74	31,61	33,69	31,44	31,66
		0,003	32,45	31,12	31,39	31,34	30,74	31,19
		0,002	31,52	29,72	29,51	29,93	29,79	29,79
		0,001	29,63	29,02	28,33	28,02	27,64	27,42
% Pedregulho		25,28	25,45	25,43	25,36	25,34	25,39	
% Areia		39,94	40,88	41,08	40,95	41,8	41,07	
% Silte		3,26	3,95	3,98	3,76	3,07	3,75	
% Argila		31,52	29,72	29,51	29,93	29,79	29,79	
Relação silte/argila		0,10	0,13	0,13	0,13	0,10	0,13	

Fonte: O Autor (2019).