



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGreste
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

RAÍSA PIRES VIEIRA DE LORENA E SÁ

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS SOLOS EXPANSIVOS DOS
MUNICÍPIOS DE AGRESTINA E PAULISTA – PE, APLICANDO CINZA DA
CASCA DE ARROZ COMO ADITIVO ESTABILIZANTE.**

Caruaru
2019

RAÍSA PIRES VIEIRA DE LORENA E SÁ

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS SOLOS EXPANSIVOS DOS
MUNICÍPIOS DE AGRESTINA E PAULISTA – PE, APLICANDO CINZA DA
CASCA DE ARROZ COMO ADITIVO ESTABILIZANTE.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do
Agreste - CAA, da Universidade Federal de
Pernambuco - UFPE, como requisito para a
disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

Caruaru
2019

Catalogação na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

S111c Sá, Raísa Pires Vieira de Lorena e.
Comportamento geotécnico dos solos expansivos dos municípios de Agrestina e Paulista – PE, aplicando cinza da casca de arroz como aditivo estabilizante. / Raísa Pires Vieira de Lorena e Sá. – 2019.
60 f. : 30 cm.

Orientadora: Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.

1. Solos - Compactação. 2. Argila - Mineralogia. 3. Estabilização. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugo, etc.). I. Bello, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira (Orientadora). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2019-030)

RAÍSA PIRES VIEIRA DE LORENA E SÁ

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS SOLOS EXPANSIVOS DOS
MUNICÍPIOS DE AGRESTINA E PAULISTA – PE, APLICANDO CINZA DA
CASCA DE ARROZ COMO ADITIVO ESTABILIZANTE.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do
Agreste - CAA, da Universidade Federal de
Pernambuco - UFPE, como requisito para a
disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II.

Área de concentração: Geotecnica

A banca composta pelos professores abaixo, considera a aluna RAÍSA PIRES VIEIRA DE LORENA E SÁ, APROVADA COM NOTA _____.

Caruaru, 19 de Janeiro de 2019.

Banca examinadora:

Prof^a. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientadora)

Prof^a. Dra. Ana Cecília Vieira _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliadora)

Engenheiro Civil Me. Yago Ryan Pinheiro dos Santos _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

“ Dedico esse trabalho a minha mãe Edna Suely, a minha filha Isadora e ao meu namorado e pai da minha filha Anderson Isac, por todo apoio e incentivo no meu crescimento acadêmico e profissional. ”

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a minha mãe Edna Pires por ser a minha base e estar sempre ao meu lado, principalmente nos momentos em que mais precisei, por ter acreditado em mim e por ser um exemplo de mulher forte. Sou grata também a todos da minha família, meu pai, Albério Luís, e principalmente àqueles que conviveram comigo diariamente, minha avó Zulmira Feitosa, meu irmão Victor Pires e minha prima Thaynara Sales. Agradeço ao meu namorado Anderson Isac, por todo o seu companheirismo e apoio, principalmente após o nascimento da nossa filha, Isadora, que é o maior presente que ele e Deus poderiam ter me dado.

Sou grata às amigas que fiz ao longo dessa jornada, são pessoas especiais e que carregarei para o resto da vida, em especial à Gisele Bezerra companheira desde o início dessa jornada e à Rafaella Moura pelo seu apoio em momentos delicados.

Obrigada a Maria Isabela Bello, excelente professora e orientadora, por todo conhecimento que foi passado e por ter tido sensibilidade quando precisei. Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco (Centro Acadêmico do Agreste) que, por meio do seu corpo docente, infraestrutura e os técnicos, possibilitaram meu desenvolvimento acadêmico. A Jayne Silva, por sempre se mostrar disponível nos momentos que precisei.

Sou grata a Deus por todas as oportunidades, principalmente por conseguir chegar até aqui e concluir mais uma etapa em minha vida.

RESUMO

Solos expansivos são solos argilosos não saturados que tem seu comportamento relacionado à instabilidade volumétrica ao sofrer variação de umidade ou succção. Esses solos aumentam de volume quando a umidade cresce e diminui quando há a perda de umidade, devido à presença de argilominerais expansivos. Pernambuco apresenta solos expansivos em diversas cidades, sendo essas do sertão ao litoral do Estado. Para a avaliação do grau de expansão atrelada a cada solo, existem alguns métodos de identificação. Através dos ensaios realizados em campo e em laboratório pode-se avaliar a tensão de expansão, grau de expansividade e tipo de argilomineral constituinte. Como são considerados solos problemáticos, faz-se necessário a redução da expansão do solo, para isso utilizam-se métodos de estabilização com o uso de algum tipo de aditivo estabilizante. O presente trabalho tem como objetivo comparar o comportamento de estabilização de dois solos expansivos nos municípios de Agrestina (SILVA 2018) e Paulista (CONSTANTINO 2018), Pernambuco, com a adição de cinza de casca de arroz (CCA) no seu estado natural deformado e misturas em diversos percentuais em peso de 2%, 4% 6% 8%, 10%, 12% e 14%. Foi apresentada a caracterização física dos solos, bem como da CCA e misturas, e resultados da caracterização química e mecânica. Em Agrestina, o solo em estado natural apresentou uma expansão livre de 6,58% (com sobrecarga de 10 kPa) e foi preciso um teor de 14% de CCA para combater a expansão do solo que conseguiu valores de expansão próximo a 1,5% e valores de tensão de expansão próximos a 10 kPa. O solo de Paulista apresentou uma expansão de 15,7% (com sobrecarga de 7 kPa) em seu estado natural e foi necessário um teor de 10% de CCA com um tempo de cura de 28 dias para que fosse obtido valores de expansão próximo a 1,5% e com este mesmo teor de cinza foi possível obter valores de tensão de expansão próximos a 10 kPa em todas as idades de cura. Tanto no estudo de Silva (2018) como no de Constantino (2018) a CCA se mostrou eficaz na estabilização dos solos expansivos.

Palavras chaves: Solo Expansivo. Cinza de Casca de Arroz. Argilomineral. Estabilização.

ABSTRACT

Expansive soils are unsaturated clay soils that have their behavior related to volumetric instability when undergoing moisture variation or suction. These soils increase in volume when the humidity grows and decreases when there is the loss of moisture due to the presence of expansive clay minerals. Pernambuco presents expansive soils in several cities, being these from the arid region to the coast of the State. For the evaluation of the degree of expansion tied to each soil, there are some methods of identification. Through field and laboratory tests, it is possible to evaluate the expansion tension, degree of expansivity and type of constituent clay. Because they are considered problematic soils, it is necessary to reduce the soil expansion, using stabilization methods with the use of some type of stabilizing additive. The objective of this work is to compare the stabilization behavior of two expansive soils in the cities of Agrestina (SILVA 2018) and Paulista (CONSTANTINO 2018), both in Pernambuco. With the addition of rice husk ash (RHA) in its deformed natural state and blends in various weight percentages of 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% and 14%. The physical characterization of the soils, as well as of the RHA and mixtures, and results of the chemical and mechanical characterization were presented. In Agrestina, the soil in the natural state presented a free expansion of 6.58% (with overload of 10 kPa) and a 14% RHA content was needed to combat soil expansion that achieved expansion values close to 1.5 % and expansion tension values close to 10 kPa. The Paulista soil presented an expansion of 15.7% (with an overload of 7 kPa) in its natural state and a 10% RHA content with a curing time of 28 days was necessary to obtain expansion values close to 1.5% and with this same RHA content it was possible to obtain expansion tension values close to 10 kPa at all curing ages. In both the Silva (2018) and Constantino (2018) studies the RHA proved to be effective in the stabilization of the expansive soils.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fissuras e microrrelevos do solo na estação seca, solo expansivo de Petrolândia.	19
Figura 2 - Inclinação de pilares devido à expansão do solo de fundação na cidade de Santo Amaro - SE	20
Figura 3 - a) Adsorção intercristalina de água num argilomineral não expansivo (ilita); b) absorção intracristalina de água num argilomineral expansivo (montmorilonita).	23
Figura 4 - Mapa de suscetibilidade à expansão dos solos no estado de Pernambuco.	24
Figura 5 - (a) Localização do estado de Pernambuco no mapa do Brasil e (b) localização das cidades de Agrestina e Paulistas no mapa de Pernambuco.	29
Figura 6 - Localização das cidades de Agrestina e Paulista no mapa de susceptibilidade à expansão dos solos em Pernambuco.....	30
Figura 7 - Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina – PE....	
Figura 8 - Dados pluviométricos e de temperatura do município de Agrestina.	
Figura 9 - Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Paulista – PE.	32
Figura 10 - Dados pluviométricos e de temperatura do município de Agrestina.	33
Figura 11 - Perfil do solo de Agrestina, demonstrando as transições das camadas analisadas.	34
Figura 12 - Modelagem de amostra indeformada tipo bloco.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos de identificação de solos expansivos	20
Tabela 2 - Composição química de várias cinzas de casca de arroz.	27
Tabela 3 - Caracterização das propriedades da CCA em seu estado bruto.	36
Tabela 4 - Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de raio-x para cinza de casca de arroz.	37
Tabela 5 - Caracterização granulométrica do solo de Agrestina e de Paulista e suas misturas com CCA.	41
Tabela 6 - Teores de umidade do solo natural e das misturas.	42
Tabela 7 - Peso específico real dos grãos do solo natural e das misturas com CCA.	42
Tabela 8 - Densidade seca máxima e umidade ótima do solo e das misturas com CCA.	43
Tabela 9 - Limites de Atteberg do solo e das misturas com CCA.....	45
Tabela 10 - Dados da caracterização química do solo e das misturas solo-cinza.	47
Tabela 11 - Classificação do solo através do pH.....	47
Tabela 12 - Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raio X para o solo e suas misturas com CCA.	48
Tabela 13 - Valores de expansões para as amostras dos solos e suas misturas dos municípios de Agrestina e Paulista.	51
Tabela 14 - Tensão de Expansão a Volume Constante das amostras do solo e suas misturas dos municípios de Agrestina e Paulista.....	52
Tabela 15 - Valores das tensões de compressão para as amostras dos solos e suas misturas com CCA dos municípios de Agrestina e Paulista.	54

LISTA DE GÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico da massa específica aparente seca do solo e das misturas com CCA.....	43
Gráfico 2 - Gráfico da umidade ótima do solo e das misturas com CCA.	44
Gráfico 3 - Limites de Atteberg para o solo natural e as misturas com CCA.	45
Gráfico 4 - Teores de silício presentes no solo natural e nas misturas solo-CCA.....	50

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
CCA	CINZA DE CASCA DE ARROZ
COMPESA	COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO
EMBRAPA	EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
IP	INDICE DE PLASTICIDADE
LL	LIMITE DE LIQUIDEZ
LP	LIMITE DE PLASTICIDADE
NBR	NORMA BRASILEIRA

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Motivação	15
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos.....	16
1.4	Estrutura do Trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Solos Expansivos	17
2.1.1	Identificação de Solos Expansivos.....	20
2.1.2	Mecanismo de expansão	22
2.1.3	Locais de Ocorrência de Solos Expansivos no Brasil.....	24
2.2	Estabilização de solos expansivos	25
2.2.1	Cinza de Casca de Arroz (CCA).....	26
2.2.2	Propriedades da Cinza de Casca de Arroz	26
3	ÁREAS DE ESTUDO	29
3.1	Solo de Agrestina.....	30
3.2	Solo de Paulista.....	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	Amostras de solo	34
4.1.1	Amostra Solo de Agrestina	34
4.1.2	Amostra Solo de Paulista	35
4.2	Cinza de casca de arroz.....	36
4.3	Métodos.....	37
4.3.1	Preparação das Amostras	37
4.3.2	Mistura Solo-CCA	37

4.3.3	Caracterização Física do Solo e Misturas	38
4.3.4	Caracterização Química	38
4.3.5	Caracterização mecânica.....	39
5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1	Solo e misturas de solo com cinza de casca de arroz.....	41
5.1.1	Granulometria	41
5.1.2	Umidade Das Misturas.....	42
5.1.3	Densidade Real Dos Grãos	42
5.1.4	Compactação.....	43
5.1.5	Limites De Atteberg.....	45
5.1.6	Caracterização Química do Solo e das misturas de solo com CCA.....	46
5.1.7	Espectrômetro de Fluorescência de raio-X para solo e misturas com cinza de CCA 49	
5.1.8	Expansão “LIVRE” do solo e das misturas com CCA	50
5.1.9	Tensão de expansão a volume constante do solo e das misturas com CCA	52
5.1.10	Compressão Simples Das Misturas Com CCA.....	54
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
6.1	Conclusão.....	56
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A Mecânica do Solo, a princípio, foi desenvolvida para ter enfoque nos casos em que os solos estão saturados. Nas últimas décadas foram realizados estudos a respeito do comportamento de solos não saturados, sendo relativamente recente no ramo da Geotecnia devido às dificuldades de aplicação da mecânica dos solos tradicional em problemas geotécnicos que surgem nele.

As pesquisas referentes a solos não saturados têm sido bastante relevantes já que sua presença é majoritariamente no meio físico, muitas vezes com perfis de grande espessura, e seu comportamento é muito mais complexo do que o dos solos saturados. Constantemente esse solo é considerado como sendo problemático, pois quando sujeito a variações de grau de saturação ele pode expandir e/ou colapsar, reduzindo sua resistência, ou seja, mudando as suas características de estado.

Essa característica de não saturação ocorre em uma grande parte do planeta, uma vez que regiões de clima árido e semiárido representam cerca de 60% dos países do mundo e em países de clima tropical, como o Brasil, ocorrem períodos suficientemente longos para provocar a dessaturação.

Um solo expansivo é aquele que, no estado natural, ou compactado, a variação volumétrica é elevada (PRESA, 1980). A expansividade é resultante da pressão de expansão e variação volumétrica. Durante o umedecimento de solos expansivos a pressão de expansão pode causar diversas ações indesejáveis às estruturas que estejam apoiadas sobre o mesmo, assim como as variações de volumes associados podem provocar o levantamento ou deslocamento das estruturas.

Em algumas situações, a solução mais usual (que é remover e substituir o solo expansivo por outro sem essa característica) pode se tornar inviável com o transporte de grandes volumes em grandes distâncias, e, sobretudo por resultar em impactos ambientais devido à necessidade de local para o descarte do material. Nestas circunstâncias a estabilização do solo assume grande relevância por admitir a utilização de solos locais, ao invés da importação de outros. A partir de várias técnicas é possível obter a sua estabilização. Essas técnicas são divididas em dois grupos: o das técnicas para estabilização mecânica e o das técnicas para estabilização química. Fatores como característica dos materiais, propriedades a serem corrigida, finalidade da obra e financeiro influenciam na escolha do tipo de estabilização.

1.1 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento dos centros urbanos fez com que fosse necessário o uso e ocupação do solo e a tendência à verticalização dos meios habitacionais, tornando-se indispensável o conhecimento do terreno que servirá de suporte para tais estruturas. Essas informações darão, ao projetista, condições de constatar as técnicas adequadas para que possam minorar os efeitos de solos problemáticos, como os expansivos.

Por ser bastante comum em regiões tropicais e onde a evapotranspiração é superior à precipitação, características da região Nordeste do Brasil, torna-se necessária à ampliação e aplicação de estudos de mapas de suscetibilidade de solos problemáticos e aprimoramento das técnicas de sua estabilização, para que assim seja possível obter um conhecimento mais apurado e refinado, utilizando-o de forma adequada.

Dessa forma, o presente trabalho apresenta e compara os resultados dos estudos de Silva (2018) e Constantino (2018) com Cinza da Casca de Arroz (CCA) como aditivo ao solo para estabilizar o potencial de expansão. Em ambos testudos, foram utilizadas faixas de percentuais em peso, de CCA.

1.2 MOTIVAÇÃO

Os estudos relacionados a solos não saturados ainda é bastante recente, assim como os estudos sobre estabilização de solos expansivos. Este tipo de solo pode causar danos nas estruturas, desde trincas em paredes até o colapso da construção, deste modo é imprescindível ter conhecimento do comportamento e das devidas técnicas de estabilização do mesmo. Este trabalho visa encontrar uma alternativa mais econômica para a estabilização de solos expansivos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é comparar o comportamento de estabilização de dois solos expansivos dos municípios de Agrestina (SILVA 2018) e Paulista (CONSTANTINO 2018), em Pernambuco com a adição de cinza de casca de arroz (CCA) no seu estado natural deformado e misturas em diversos percentuais.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar a caracterização física, química e mecânica dos solos expansivos de Agrestina e Paulista, assim como das misturas solo-CCA;
- Apresentar os resultados de menor percentual, em peso, de CCA que estabiliza os dois solos quanto à expansão “livre” e à tensão de expansão;
- Comparar e analisar as modificações ocorridas nas misturas estabilizadas, em função dos diferentes teores do aditivo e períodos de cura analisados (resistência à compressão simples).

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1 foi apresentado um breve resumo a respeito dos solos expansivos e a relevância da sua identificação e estabilização. Também foram apresentadas as justificativas, a motivação e os objetivos gerais e específicos desse trabalho.

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

O Capítulo 3 apresenta as áreas de estudo e suas características;

No Capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos utilizados na pesquisa de Silva (2018) e Constantino (2018).

O Capítulo 5 mostra os resultados dos ensaios de caracterização física, química, mineralógica e mecânica. Os resultados serão discutidos e comparados com referências da literatura.

No Capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões desta pesquisa e sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura, a qual é dividida em três partes. A primeira parte aborda os solos expansivos e a forma de identificação dos mesmos. Na segunda são descritos os principais métodos para estabilização dos solos expansivos. A terceira etapa apresenta as características da cinza de casca de arroz, suas propriedades e influência nos solos expansivos.

2.1 SOLOS EXPANSIVOS

A partir do intemperismo físico e químico de rochas que formavam a crosta terrestre, surge o solo. Os principais agentes responsáveis por sua decomposição são: variação de temperatura, água, variação de umidade do solo, vento, e a influência de fauna e flora.

O solo não é uma estrutura maciça completamente preenchida, ele é poroso e suas partículas estão em constante interação. Sua composição é trifásica, ou seja, possui três fases, que são: sólida, líquida e gasosa. Os vazios existentes na camada do solo podem estar preenchidos por: água, o que significa que ele está saturado; ar, se tratando de um solo seco (não saturado); ambos (água e ar), estado mais comumente encontrado na natureza.

Segundo Mitchell (1993), a fase sólida é constituída por partículas contendo minerais e materiais orgânicos, e elas se apresentam com variadas geometrias, podendo ser desde grãos alongados até esféricos, angulosos e achatados. A água presente no estado líquido do solo pode ser classificada em três tipos: água adsorvida é aquela que adere à superfície da partícula; água capilar, derivada das forças de capilaridade que ocorrem devido ao contato água–partícula; e água gravitacional, quando ocorrer drenagem livre por gravidade haverá perda da mesma. Quando o solo estiver seco ou não saturado sua fase gasosa será composta por ar e vapor de água.

Um solo saturado é constituído por duas fases, sendo a fase sólida e a líquida, onde os vazios entre os grãos são completamente preenchidos por água. Já um solo não saturado é aquele em que possui três fases, que são: sólida, líquida e gasosa e onde seus vazios podem estar preenchidos por ar e água.

No Brasil, devido à predominância do clima tropical a ocorrência de solos não saturados é bastante elevada. Em especial no sertão nordestino, que possui um clima semiárido e grandes

períodos de estiagem, onde a evapotranspiração é superior à precipitação, possuindo um balanço hídrico negativo.

A não saturação é uma condição que pode ser encontrada nos mais variados tipos de solos, tais como: solos compactados, argilas expansivas de alta plasticidade, solos residuais saprolíticos e lateríticos, depósitos de solos aluviais, coluviais e eólicos. O comportamento de alguns destes solos é relacionado à instabilidade volumétrica: expansão e contração em argilas expansivas, colapso em solos coluviais e em solos com cimentos naturais com estrutura porosa (FERREIRA, 1995).

De acordo com Ferreira (1995), no Brasil, foram constatados casos de solos naturalmente expansivos nas seguintes regiões: interior do Rio Grande do Norte, Alagoas, no Recôncavo Baiano, sudeste de São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul e diversos municípios do estado de Pernambuco.

Um solo é considerado expansivo ou potencialmente expansivo quando, em seu estado natural não saturado, é submetido a mudanças no teor de umidade, fazendo com que haja variação em seu volume podendo aumentar ou diminuir (FERREIRA, 1988). Entretanto, um solo pode expandir sem ser um solo expansivo. A expansão também pode ocorrer, por exemplo, ao ser retirado uma carga de um solo qualquer e o mesmo aumentar de volume devido ao alívio de tensão. Na Figura 1 observa-se fissuras e microrrelevos do solo na estação seca, solo expansivo de Petrolândia (FERREIRA e FERREIRA 2009).

O fenômeno de expansão depende de diversos fatores, o principal deles é o tipo de argila e os minerais que a constitui, visto que a intensidade da variação volumétrica, que é derivada do grau de adsorção das moléculas de água, varia em função do tipo de mineral argílico, uma vez que nem todos os minerais argilosos apresentam alterações volumétricas (FERREIRA, 1995).

SCHREINER (1987) *apud* FERREIRA (1995) diferencia e define os conceitos de expansividade intrínseca, expansão e inchamento. A expansividade intrínseca é a habilidade do argilomineral absorver água, tal propriedade depende apenas de sua composição mineralógica e quantidade de argila, que interagem com a água. É uma propriedade intrínseca não sofrendo alterações devido à umidade ou sucção existente. Quando um solo composto por argilominerais que possui em sua essência a expansividade, define-se que expansão é a alteração de volume devido à variação no estado de tensões, podendo ser vertical, estrutura e sucção. O inchamento

é denominado como o deslocamento vertical de um ponto do solo ou de uma fundação, em virtude de um solo expansivamente intrínseco.

As condições necessárias para exibir a expansividade de um solo são as intrínsecas e as extrínsecas. Os requisitos intrínsecos, são mecanismos que em nível microescalar, produzem a instabilidade volumétrica do solo (FERREIRA, 1995), fazem parte da composição do solo e produzem instabilidade volumétrica, tais como a composição mineralógica, estrutura e textura. Os extrínsecos, que são forças capazes de transferir a umidade de um ponto do solo a outro (FERREIRA, 1995), consistem em fatores externos, por exemplo, a climatologia, vegetação, agente antrópicos e hidrologia (AYALA *et al.*, 1986).

Os solos em que ocorre a expansão normalmente possuem uma composição com um alto teor de finos, tendo uma natureza argilosa ou argilo-siltosa, com um percentual de material passando da peneira 200 frequentemente acima de 80%. As montmorilonitas são o grupo argilomineral mais frequentemente encontrado em solos expansivos (CHEN 1988, Day 1999, MURTHY 2003 e CAVALCANTE *et al.*, 2006). Este tipo de solo pode ser proveniente de rochas ígneas básicas ou de rochas sedimentares que contenham argilominerais expansivos (CAVALCANTE *et al.*, 2006).

Figura 1 - Fissuras e microrrelevos do solo na estação seca, solo expansivo de Petrolândia.



FONTE: (FERREIRA e FERREIRA, 2009).

2.1.1 IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS

A identificação de solos expansivos é imprescindível para evitar danos nas estruturas. Tais danos podem ser desde pequenas fissuras até a instabilidade geral da edificação (Figura 2).

Schreiner (1987) *apud* Ferreira (1995) classifica a identificação de solos expansivos com dois métodos os indiretos e diretos. A metodologia indireta consiste na identificação mineralógica, índices físicos, limites de consistência ou parâmetros ligados à textura, composição e comportamento do solo; já os métodos diretos se baseiam na medida da expansão induzida ao solo ou da tensão que é preciso para evitar esta expansão, realizando-se ensaios do tipo edométrico.

Diante da complexidade para identificar e quantificar a expansividade dos solos, a Tabela 1 reúne o conjunto de métodos (diretos e indiretos) utilizados para determinar essa expansão.

Figura 2 - Inclinação de pilares devido à expansão do solo de fundação na cidade de Santo Amaro - SE.



FONTE: (Cavalcante *et. al.*, 2006).

Tabela 1 – Métodos de identificação de solos expansivos.

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

2.1.2 MECANISMO DE EXPANSÃO

O tipo de argila presente no solo é primordial para caracterizar sua expansividade, pois só alguns argilominerais tem a possibilidade de ter alterações volumétricas (SILVA, 1995). A expansividade de uma argila pode ser por meios mecânicos ou por meios físico-químicos. Taylor e Smith (1986) afirmam que a expansão mecânica se deve por fatores antrópicos, como escavações, ou devido à movimentação tectônica e à erosão. Já os mecanismos físico-químicos acontecem de acordo com Neves (1993), das seguintes maneiras: intercristalinos ou intracristalinos e osmóticos.

Quando as superfícies externas ou os vazios entre os cristais dos minerais argilosos absorvem água esse processo faz com que ocorra a expansibilidade intercristalina. O afastamento das unidades estruturais ou das próprias partículas se deve as camadas monomoleculares que se formam sobre os minerais argilosos devido a água absorvida, (NEVES, 1993).

São admitidas duas fases no processo de expansibilidade osmótica de um solo. Este tipo de expansibilidade é o que origina as maiores variações de volume.

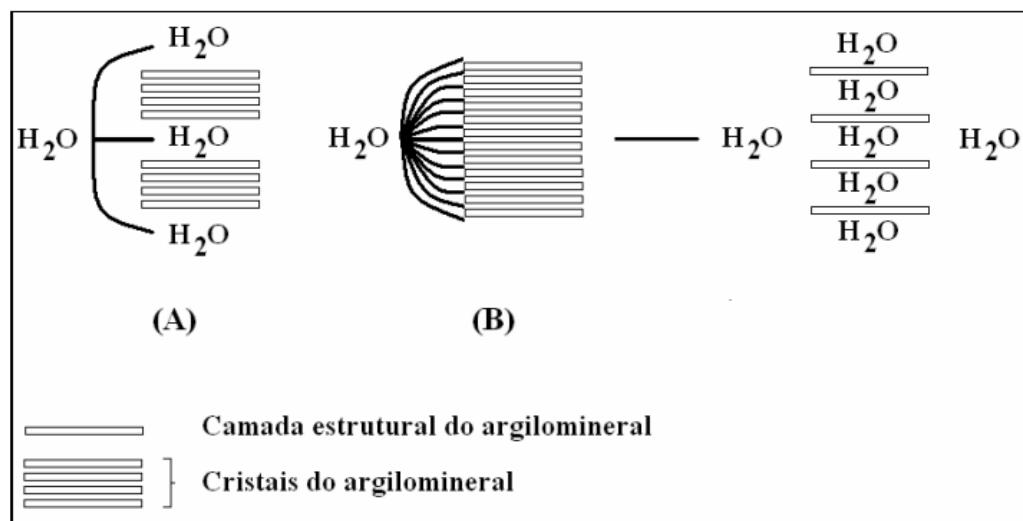
Em condições de umidade e concentração iônica a expansibilidade osmótica é a que acarreta nas maiores alterações de volume. Conforme Olphen, 1963 *apud* Barbosa, 2013, esta expansibilidade possui duas fases em seu processo segundo:

- A primeira fase: A medida em que as moléculas de água se infiltram entre as camadas estruturais das argilas ou entre as superfícies planas das partículas adjacentes, a tendência é que elas se separem, isto ocorre pela diferença de concentração iônica. A concentração de água é maior próximo a superfície estruturante da argila e vai decrescendo a medida em que se afasta dessas camadas.
- Já na segunda fase: A energia de adsorção é relativamente reduzida, pois as superfícies das partículas estão separadas por distâncias superiores a quatro camadas monomoleculares de água, o que possibilita que a energia de repulsão da dupla camada¹ elétrica se sobreponha. A medida que as moléculas de água continuam a ser adsorvidas pelas partículas a distância entre suas superfícies tende a aumentar, e consequentemente o volume e as forças de repulsão.

¹ Várias capas de molécula de água fortemente adsorvidas.

A característica mais fundamental dos minerais argilosos expansivos é a sua capacidade de alterar seu volume com a sorção de moléculas de água em sua estrutura, (PEREIRA, 2004). Se haverá expansão intercamadas fundamentalmente osmótica ou estrutural em nível cristalino vai depender do nível de interação entre a superfície do argilomineral e das moléculas de água. Como as forças atrativas que ligam as camadas estruturais são menores que as forças responsáveis pela absorção de água, ocorre a expansão é intracristalina. Deste modo, são formadas diversas monocamadas sobre as superfícies dos minerais argilosos devido a água absorvida, que separam suas partículas ou suas unidades estruturais, conforme a Figura 3, (GILLOTT, 1987 apud PEREIRA, 2004).

Figura 3 - a) Adsorção intercristalina de água num argilomineral não expansivo (ilita); b) absorção intracristalina de água num argilomineral expansivo (montmorilonita).



(FONTE: GILLOTT, 1987 apud PEREIRA, 2004).

Pereira (2004) afirma que, com a penetração das moléculas de água entre as camadas dos argilominerais 2:1 acontece a expansão osmótica, especialmente nas montmorilonitas. O tamanho dos poros influencia neste fenômeno, pois os poros com diâmetros menores que 1,5 nm geram efeitos maiores na expansão, já que há uma superposição de duplas camadas elétricas distintas, que provocam forças repulsivas (TAYLOR e SMITH, 1986).

De acordo com estes mesmos autores, a expansão da ilita vai depender do tipo de cátion, da caulinita o fenômeno se dá por meios mecânicos, já as montmorilonitas sódicas sofrem expansão físico-química e nas montmorilonitas cálcicas a expansão se dá pelos dois tipos, tanto físico-química quanto mecânica.

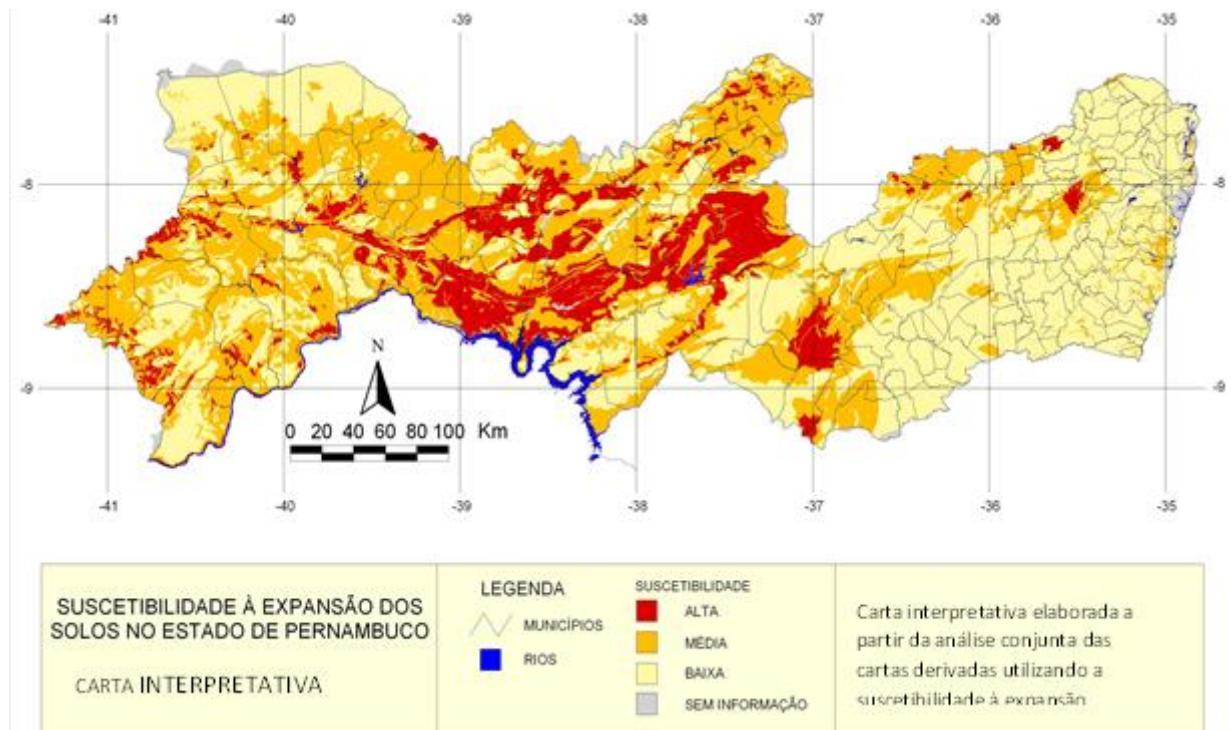
2.1.3 LOCAIS DE OCORRÊNCIA DE SOLOS EXPANSIVOS NO BRASIL

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

Pernambuco apresenta solos expansivos em várias cidades, tendo uma predominância no sertão do Estado. Uma vez que é inviável realizar estudos de expansividade em inúmeros pontos de todas as cidades de Pernambuco. Assim, Amorim (2004) desenvolveu o mapa de suscetibilidade de solos expansivos com seu grau de expansibilidade, utilizando informações geológicas, pedológicas, climatológicas e o conhecimento geotécnico do estado de Pernambuco, classificando como alto, médio e baixo.

A partir do mapeamento apresentado por Amorim (2004), é possível identificar os locais que requerem maior atenção durante a investigação geotécnica preliminar às construções (Figura 4).

Figura 4 - Mapa de suscetibilidade à expansão dos solos no estado de Pernambuco.



FONTE: (AMORIM, 2004).

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS

Caso não haja um melhoramento do solo problemático antes da execução de uma obra de engenharia civil pode acarretar em sérios danos à construção, tais danos podem ser a manifestação de trincas diagonais nas edificações em função dos movimentos diferenciais do solo até a instabilidade geral da construção. (CAVALCANTE *et. al.*, 2006).

Diversas técnicas de estabilização podem ser adotadas e sua escolha depende de alguns fatores, os principais que serão analisados para a definição do método de estabilização são os econômicos, as características do solo e a natureza da construção a ser realizada. Para Pessoa (2004) ter um amplo conhecimento das técnicas de estabilização dos solos é imprescindível para a redução de patologias na construção, diminuindo o tempo e gerando uma economia para a obra.

Conforme Morais (2017) existem três tipos de classificação de estabilização dos solos e essas são: estabilização física, estabilização química e estabilização mecânica.

- **Estabilização Física**

Este tipo de estabilização consiste em alterar a textura do solo com a adição de materiais, tais como: fibras metálicas, minerais, sintéticas ou vegetais. (PINTO, 2008). A correção que este tipo de estabilização faz consiste na remoção de parte do solo problemático com a adição de um ou mais tipos de aditivos, tornando o solo problemático com as propriedades desejadas. Pereira (2012), afirma que a estabilização física é realizada quando se pretende alterar as propriedades do solo a fim de obter um objetivo específico, modificando sua granulometria.

- **Estabilização Química**

Este tipo de estabilização consiste na adição de materiais que reajam quimicamente com o solo, fazendo com que haja o aumento da resistência e da estabilidade. Os aditivos mais comumente utilizados são: cimento e cal. A utilização do cimento aumenta as propriedades mecânicas e menor susceptibilidade à água, após a hidratação do cimento (INGLES e METCALF, 1972).

Estudos estão sendo feitos com novos aditivos, tais como cinza de casca de arroz e cinza de bagaço de cana de açúcar, podendo se tornar uma alternativa menos custosa ao tratamento de solos problemáticos.

- **Estabilização Mecânica**

Pinto (2008) descreve a estabilização mecânica como sendo um meio utilizado para aumentar a densidade do solo, utilizando equipamentos e fazendo com que haja um melhoramento da sua durabilidade e resistência. A compactação do solo aumenta sua densidade à medida que reduz o número de vazios, resultando no aumento de sua resistência mecânica. Esse método aumenta sua resistência e durabilidade sem adição de nenhum material, apenas rearranjando a disposição das partículas do solo (PAIVA, 2016).

2.2.1 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA)

Visando a redução da geração de resíduos sólidos e o maior aproveitamento dos materiais, a casca de arroz vindo sendo estudada ultimamente para diversas finalidades, tais como a geração de energia e aditivo para melhoramento de solo problemático, pois segundo Houston (1972), cerca de 20% do peso do grão corresponde a casca de arroz.

Em consequência da lenta degradação, o descarte de forma inadequada dos resíduos da casca de arroz acaba gerando sérios problemas ao meio ambiente, uma solução encontrada foi a utilização da casca de arroz para obtenção de energia, através da combustão (ISLABÃO, 2013).

Entretanto, a queima da casca acaba gerando resíduos, a cinza da casca de arroz (CCA) e representa cerca de 20% do peso da casca, assim a quantidade de resíduos finais gerados são menores. Hodiernamente, a CCA tem sido bastante utilizada em diversos ramos, tais como: indústria química, eletrônica, cerâmica, construção civil, entre outros, por possuir um alto teor de sílica. Contudo, para ser utilizada a cinza precisa ter uma alta qualidade, levando em consideração a superfície, tamanho e pureza de partícula. (HOFFMANN *et al*, 2014).

2.2.2 PROPRIEDADES DA CINZA DE CASCA DE ARROZ

Diversos estudos comprovaram que a cinza resultante da queima da casca do arroz possui um alto teor de sílica em sua composição química, a tabela abaixo demonstra os resultados obtidos nos estudos de Juliano (1985). Basha *et al.* (2003), Lazaro e Moh (1970), Korisa (1958) e Rodriguez (2002), determinaram a composição química das cinzas de casca de arroz, como mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química de várias cinzas de casca de arroz.

Composição química (%)	Korisa (1958)		Lazaro e Moh (1970)	Rodríguez (2002)	Basha <i>et al.</i> (2003)
	Amostra 1	Amostra 2			
Sílica (SiO_2)	94,5	93,5	88,6	87,2	93,15
Óxido de Cálcio (CaO)	0,25	2,28	0,75	0,55	0,41
Óxido de Magnésio (MgO)	0,23	---	3,53	0,35	0,45
Óxido de Sódio (Na_2O)	0,78	---	---	1,12	---
Potássio (K_2O)	1,1	3,15	---	3,6	2,31
Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	---	1,01	0,36	0,16	0,21
Óxido Fosfórico (P_2O_5)	0,53	---	---	---	---
Alumina (Al_2O_3)	---	---	1,48	0,15	0,21
Óxido de Manganês (MnO_2)	---	---	---	---	---
Dióxido de Carbono (CO_2)	---	---	0,51	---	---

FONTE: (ADAPTADO BEHAK, 2007).

O sílico ou silício-aluminio são constituintes que fazem parte dos materiais pozolânicos que são capazes de reagir na presença de água com o hidróxido de cálcio e à temperatura ambiente, tornando-o um composto com propriedades cimentantes, isso faz com que a CCA tenha um potencial pozolânico, ideal na estabilização de solos problemáticos, produção de cimento pozolânico e entre outras finalidades na engenharia. (HADAS *et al.*, 2017)

A temperatura da incineração da casca do arroz influencia na determinação de que tipo de estrutura mineralógica a sílica da cinza irá possuir. Para que a CCA possua reações pozolânicas é necessário que ela seja amorfa, e não cristalina, valores entre 550 a 700°C produzem sílica amorfa na cinza, já valores de temperatura superiores a 900°C produzem sílica cristalinas. (BOTENG & SKEETE, 1990 *apud* FREITAS, 2018).

Tiboni (2007) afirma que o grau de atividade pozolânica é influenciado pela finura da cinza. Quanto maior a superfície específica da CCA maior será o índice de atividade pozolânica, tal

comportamento se deve pela influência da rugosidade, distribuição e forma das partículas e também pela distribuição dos poros existentes (TIBONI, 2007, *apud* BEZERRA, IZABELLE M. T. *et al.*, 2011).

3 ÁREAS DE ESTUDO

O presente trabalho visa fazer uma comparação entre os estudos da estabilização de solos problemáticos com cinza de casca de arroz, realizados pelas autoras Silva (2018) e Constantino (2018) nas cidades de Agrestina e Paulista, respectivamente, em Pernambuco, Figura 5.

Figura 5 - (a) Localização do estado de Pernambuco no mapa do Brasil e (b) localização das cidades de Agrestina e Paulistas no mapa de Pernambuco.

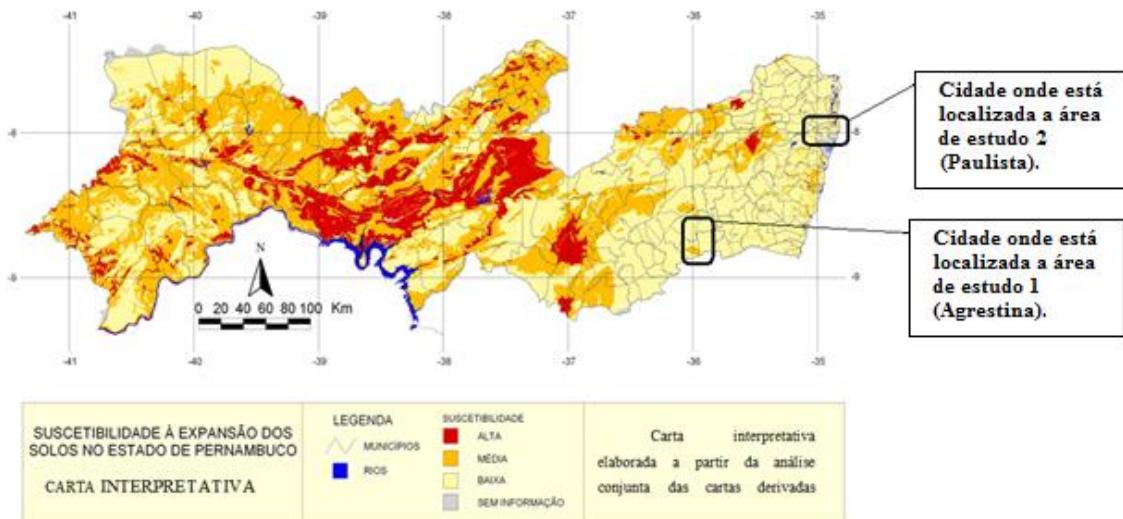


FONTE: (ADAPTADA WIKIPÉDIA, 2018).

De acordo com o mapa de susceptibilidade à expansão dos solos de Pernambuco, de Amorim (2004), a cidade de Agrestina está destacada como área de estudo 1, como mostra a Figura 6, e

possui um potencial de expansão considerado baixo, assim como a cidade de Paulista (área de estudo 2).

Figura 6 - Localização das cidades de Agrestina e Paulista no mapa de susceptibilidade à expansão dos solos em Pernambuco.



FONTE: (ADAPTADO DE AMORIM, 2004).

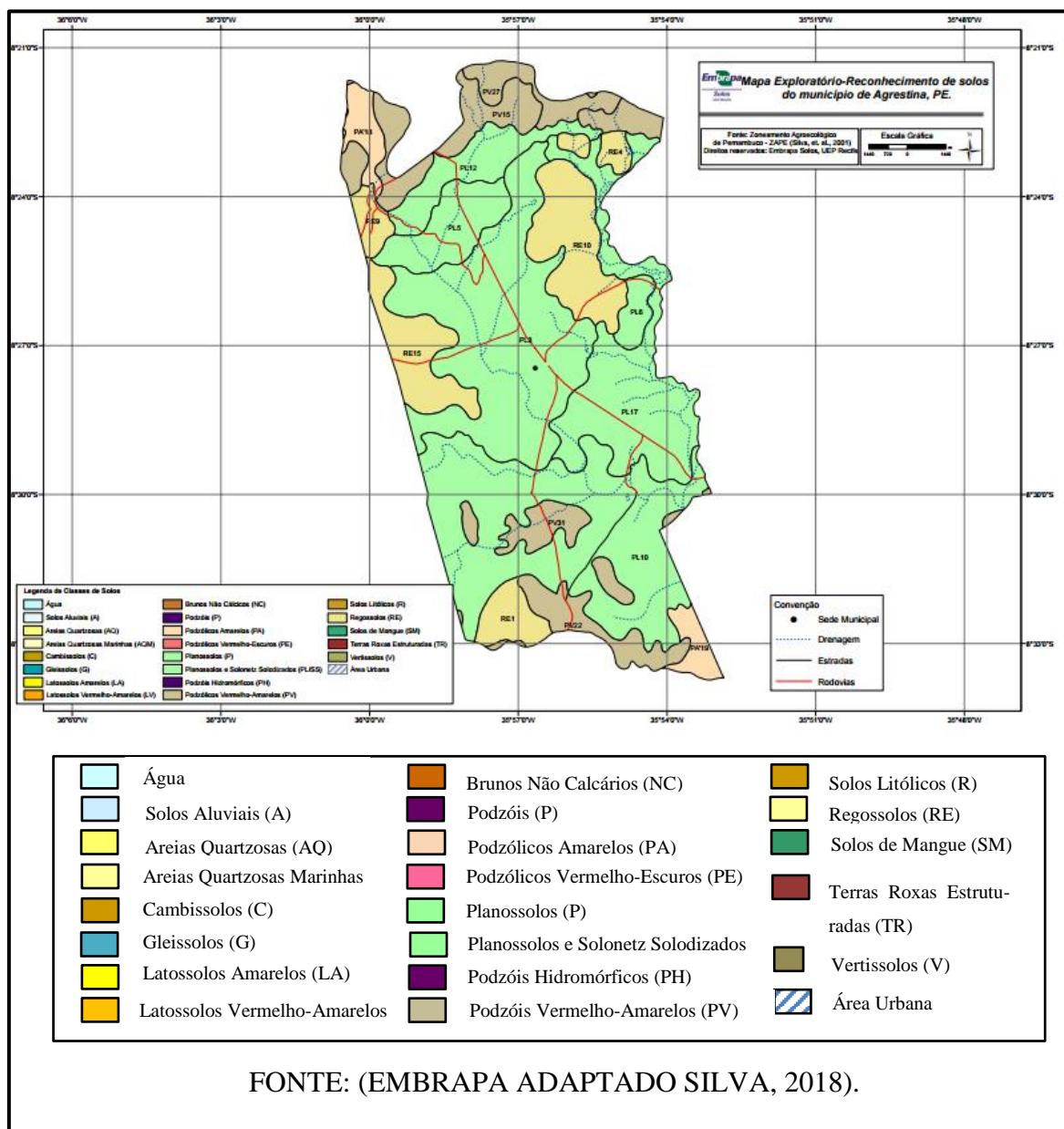
3.1 SOLO DE AGRESTINA

A cidade de Agrestina está localizada a 157 km de Recife e 24,1 Km de Caruaru-PE e segundo o censo de 2016 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), possui 22.679 habitantes e uma área de 200,581 Km².

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) disponibiliza as características pedológicas dos municípios, tais informações podem ser encontradas no Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos. A Figura 7 apresenta as classes de solos que são encontrados no município de Agrestina e é possível notar a predominância dos Planossolos e Solonetz Solodizados (PL/SS).

Além disto, pode-se perceber também a ocorrência de Podzólicos Amarelos (PA), Podzólicos Vermelho-Amarelos (PV) e Regossolos (RE). Segundo Silva (2018), o local onde a amostra de seu estudo foi retirada se encontra sobre um solo Planossolo (PL).

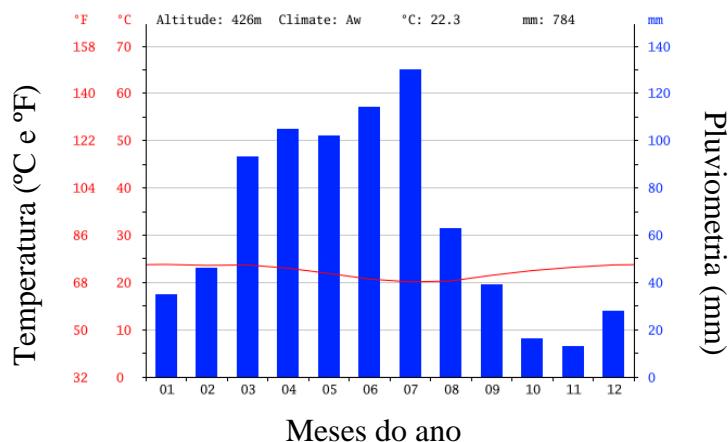
Figura 7 - Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina – PE.



Os índices pluviométricos mensais da cidade de Agrestina variam de maneira significativa, entre os meses de Março e Agosto foram registrados os maiores índices pluviométricos, já entre Setembro e Fevereiro foram os meses com os maiores índices de estiagem. Havendo registrado a maior precipitação média de 130 mm no mês de Julho e a menor precipitação média de 13 mm no mês de Novembro (CLIMATE-DATA, 2017).

Na Figura 8 mostra os dados de cada mês com relação à temperatura e pluviometria, expressos numericamente.

Figura 8 - Dados pluviométricos e de temperatura do município de Agrestina.



FONTE: (SITE CLIMATE-DATA.ORG, ADAPTADO SILVA, 2018).

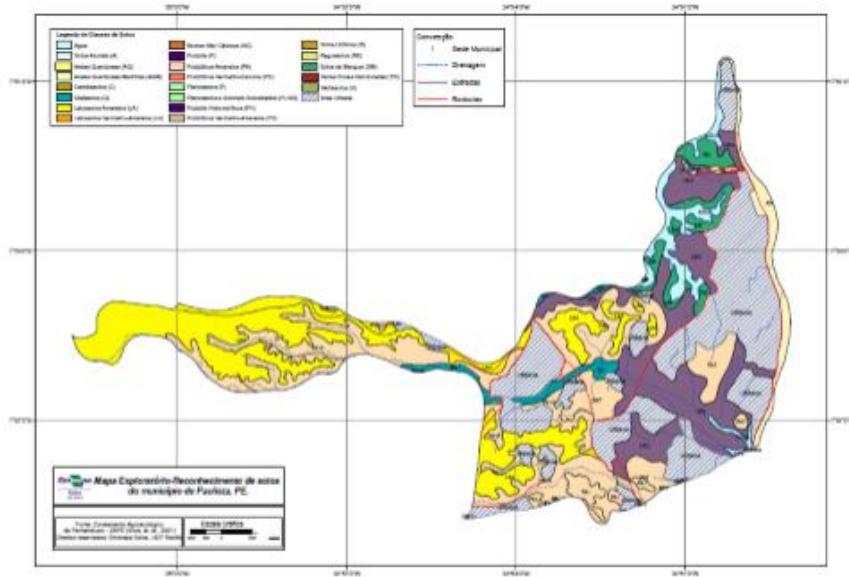
3.2 SOLO DE PAULISTA

O município de Paulista localiza-se no litoral norte do estado de Pernambuco a uma distância de 18 km da capital do estado e a 153 km de Caruaru. De acordo com o censo 2016 realizado pelo IBGE tem uma população de 300.466 habitantes e 97,312 km² de área territorial.

As informações pedológicas do município de Paulista estão disponíveis através do Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco (ZAPE), que foi elaborado pela EMBRAPA, tais informações estão contidas no Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos, onde é possível observar a predominância dos Latossolos Amarelos (LA) no município.

Ademais, é possível notar na figura 9 a presença dos Podzólicos Amarelos (PA), Gleissolos (G), Podzóis (P) e Solos de Mangue (SM). De acordo com Constantino (2018), a amostra de seu estudo foi retirada do bairro do Janga, onde é predominantemente uma área urbana.

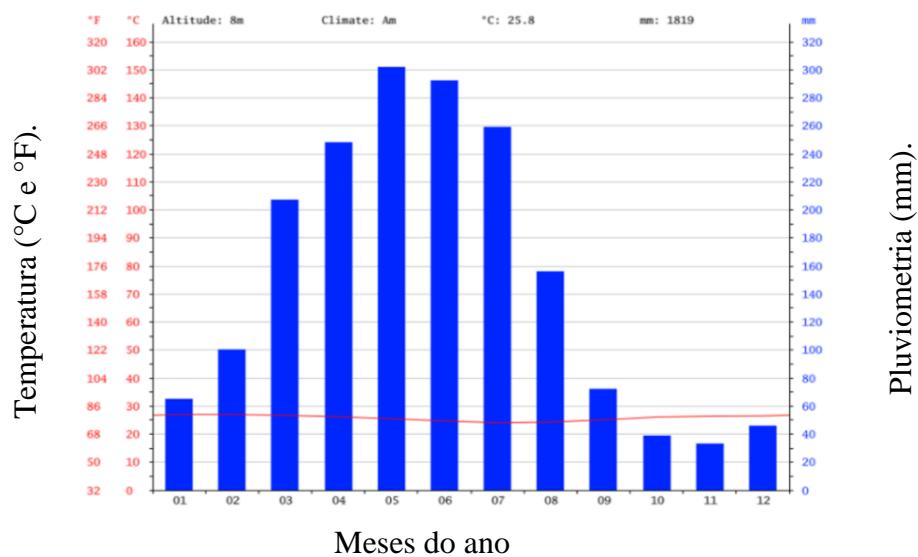
Figura 9 - Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Paulista – PE.



FONTE: (EMBRAPA, ADAPTADO CONSTANTINO, 2018).

De acordo com dados obtidos através da Climate-Data (2017) (Figura 10), o município de Paulista possui poucos meses com baixa precipitação, que seriam dos meses de Outubro a Dezembro, no restante dos meses há uma precipitação significativa. O mês de Maio registrou o maior índice médio de precipitação com 302 mm, já o mês de Novembro houve o menor índice médio de precipitação com 33 mm.

Figura 10 - Dados pluviométricos e de temperatura do município de Agrestina.



FONTE: (ADAPTADO SITE CLIMATE-DATA.ORG, 2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados no estudo da investigação geotécnica realizado por Silva (2018) no solo da Cidade de Agrestina (PE) e Constantino (2018) no solo de Paulista (PE). As autoras estudaram o comportamento do solo e sua expansividade e realizaram a estabilização do solo expansivo através da adição da cinza da casca de arroz - CCA.

4.1 AMOSTRAS DE SOLO

Silva (2018) e Constantino (2018) realizaram as coletas dos solos de Agrestina e Paulista, respectivamente, como descrito abaixo.

4.1.1 AMOSTRA SOLO DE AGRESTINA

Silva (2018) em sua pesquisa realizou a coleta do solo de Agrestina, as amostras foram indeformadas e deformadas. As amostras deformadas foram recolhidas para moldagem dos corpos de prova a serem ensaiados nas umidades ótimas, tanto do solo in natura, quanto das misturas em diferentes proporções de CCA. Foram também retiradas amostras por profundidade para análise química. No local de estudo havia horizonte com 3 transições (Figura 11), o primeiro horizonte tinha 40 cm de profundidade, constituído de um solo mais solto; o segundo horizonte, também com 40 cm de profundidade, situada abaixo da anterior, continha um solo mais resistente; o terceiro horizonte, com 1 m de profundidade, era constituída de rocha alterada, sendo, claramente, mais resistente que as demais. A amostra indeformada extraída teve um formato cúbico, de 30 cm x 30 cm x 30 cm, sendo moldado a 40 cm de profundidade.

Figura 11 - Perfil do solo de Agrestina, demonstrando as transições das camadas analisadas.



FONTE: (SILVA, 2018).

4.1.2 AMOSTRA SOLO DE PAULISTA

Constantino (2018) utilizou amostras deformadas do solo argiloso do município de Paulista-PE que foram coletadas por Morais (2017). O solo estudado é localizado na estação de tratamento de esgoto da Companhia de Saneamento do Estado de Pernambuco (COMPESA) localizada no bairro do Janga, a 17 km de Recife. Morais (2017) coletou amostras indeformadas e deformadas. Para as amostras indeformadas foram retirados quatro blocos, figura 12, a uma profundidade de 0,8 metros. Foram escavados poços para a retirada dos blocos com seção de 1,40 metros por 2,20 metros, cada bloco possuía 0,32 metros de aresta. As amostras deformadas foram retiradas de cada horizonte e ao lado dos blocos totalizando 150 kg de solo.

Figura 12 - Modelagem de amostra indeformada tipo bloco.



FONTE: (MORAIS, 2017).

4.2 CINZA DE CASCA DE ARROZ

A cinza da casca de arroz utilizada na pesquisa de ambas as autoras estudadas, foi caracterizada por Lacerda *et. al* (2018) que apresentou algumas propriedades da CCA pura. A Tabela 3 apresenta alguns dos resultados obtidos. A mesma é também caracterizada por possuir tonalidade acinzentada, granulometria fina com a presença de algumas cascas de arroz que não foram totalmente queimadas.

Tabela 3 - Caracterização das propriedades da CCA em seu estado bruto.

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

* NL: Não Líquido. ** NP: Não Plástico. Nota: Adaptado de Lacerda *et al.* (2018).

FONTE: (SILVA, 2018 e LACERDA *et al.*, 2018).

A tabela 4 apresenta os dados com o ensaio de FRX da cinza de casca de arroz. Importante ressaltar o alto teor de sílica existente na cinza que foi utilizada nos estudos.

Tabela 4 - Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de raio-x para cinza de casca de arroz.

Constituinte químico	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O _{3t}	P.F
Teor (%)	0,08	0,37	0,8	95,37	0,48	1,39	0,75	0,04	0,09	0,36	-

(FONTE: Adaptado Silva, 2018)

Silva (2018) e Constantino (2018) utilizaram a CCA proveniente de uma queima não controlada e foi coletada em uma fábrica de arroz do município de Cabrobó-PE. Ambas realizaram peneiramento com a peneira #16 (1,18 mm) para que na estabilização fosse utilizada apenas a cinza livre de impurezas.

4.3 MÉTODOS

4.3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a realização dos ensaios houve a preparação das amostras tanto por parte de Silva (2018) como por Constantino (2018). As autoras realizaram ensaios de caracterização física (granulometria, limites de Atterberg, densidade real dos grãos e compactação), caracterização química (pH em água, condutividade elétrica de saturação, capacidade de troca catiônica (CTC-T), saturação de base (V), saturação de sódio (100Na⁺/T), saturação por alumínio (m), soma das bases (S), Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Al⁺⁺⁺, H⁺ e espectrômetro de fluorescência de raio-X) e caracterização mecânica (expansão livre, ensaio de tensão a volume constante e resistência a compressão simples).

4.3.2 MISTURA SOLO-CCA

As misturas realizadas por Silva (2018) foram realizadas com o solo seco e cinza da casca de arroz nas porcentagens de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14% de cinza em relação ao peso da amostra seca para avaliar a evolução da estabilização. Após a homogeneização e preparação dos corpos de prova na umidade ótima de cada mistura, estes foram ensaiados com idades de 7, 14 e 21 dias, no edométrico e feito os ensaios químicos.

Já Constantino (2018) utilizou as porcentagens de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. Foram realizados ensaios com 0 dias da moldagem, 7 dias, 28 dias e 120 dias.

4.3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO E MISTURAS

4.3.3.1 GRANULOMETRIA

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

4.3.3.2 LIMITES DE ATTERBERG

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

4.3.3.3 DENSIDADE REAL

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

4.3.3.4 COMPACTAÇÃO

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

4.3.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Silva (2018) realizou os ensaios de pH no solo natural, nas misturas de solo com cinza (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14%) e por horizontes, sendo estas análises feitas 1 hora após realizadas as misturas. Já Constantino (2018) realizou os ensaios de pH em água no solo natural e nas misturas de solo com cinza nas porcentagens de 2%, 6%, 8% e 10%. Dentre as análises químicas foram realizadas nas amostras de solo natural e nas amostras de solo-CCA, ensaios de Al⁺⁺⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, H⁺, condutividade elétrica de saturação, capacidade de troca catiônica, saturação de base, saturação de sódio, saturação por alumínio e soma das bases.

4.3.4.1 ESPECTROMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIO-X

Silva (2018) e Constantino (2018) realizaram o ensaio de espectrômetro de fluorescência de raios-X, para a determinação dos teores de óxidos do solo natural, da cinza pura e das misturas com cinza de casca de arroz nas porcentagens de 2, 4, 6, 8 e 10%.

4.3.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Para a realização da caracterização mecânica as amostras foram compactadas na umidade ótima e moldadas em anéis, Silva (2018) realizou os ensaios para as misturas com as idades de 7, 14 e 21 dias de cura e Constantino (2018) para as idades de 0, 7, 28 e 120 dias.

Foram aplicadas as seguintes metodologias para caracterização mecânica da expansividade e das tensões de expansão dos solos e das misturas no estudo de Silva (2018): (a) Expansão “Livre”, (b) Carregamento após expansão com diferentes tensões de consolidação, (c) Expansão e Colapso sob Tensão, (d) Tensão de Expansão a Volume Constante, (e) Edométrio duplo e (f) Resistência a compressão simples. Já no estudo de Constantino (2018) foram: (a) Expansão “Livre”, (b) Tensão de Expansão, (c) Compressão Simples e (d) Compressão diametral.

No presente trabalho serão analisados e comparados os resultados dos seguintes ensaios: (a) Expansão “Livre”, (b) Tensão de expansão a volume constante e (c) Resistência a compressão simples.

4.3.5.1 EXPANSÃO “LIVRE”

A realização dos ensaios de Expansão “Livre” ocorreu em células edométricas convencionais, seguindo os procedimentos da Norma ASTM D4829/95 e da ABNT, NBR 12007/90. Este ensaio avalia a deformação do solo, medindo as variações ao longo do tempo até sua estabilização, onde é submetido uma amostra a uma variação de umidade e com uma pequena carga aplicada. Silva (2018) aplicou uma carga de 10 kPa e Constantino (2018) uma carga de 7 kPa.

4.3.5.2 TENSÃO DE EXPANSÃO A VOLUME CONSTANTE

Existem diversos métodos para avaliar a tensão de expansão de um solo, dentre eles tem-se o edométrico duplo, expansão e colapso sob carregamento e o método a volume constante.

De acordo com Ferreira (1995, p. 73):

“O método de tensão de expansão a volume constante consiste em medir diretamente no edômetro a tensão necessária para impedir a mudança de volume do solo depois de inundá-lo.”

4.3.5.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

As autoras moldaram dois corpos de prova para o solo e para cada mistura de solo com aditivo, em seguida foi obtido a resistência à compressão de cada amostra a partir da média aritmética de cada amostra.

Silva (2018) realizou os ensaios seguindo os procedimentos da NBR 12025/2012, para as misturas de 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 14% de aditivo e com uma cura úmida de 0 dia. Constantino (2018) seguiu os procedimentos da ASTM D5102/96, para as misturas de 2, 4, 6, 8 e 10% de aditivo e com uma cura úmida de 0, 7 e 28 dias.

5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 SOLO E MISTURAS DE SOLO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios realizados com os solos de Agrestina e Paulista e suas misturas com diversos percentuais com cinza de casca de arroz.

5.1.1 GRANULOMETRIA

Silva (2018) e Constantino (2018) realizaram a análise granulométrica (Tabela 5) com os solos de Agrestina e Paulista, respectivamente, por meio do ensaio por peneiramento, para grão acima da peneira Nº 200, e sedimentação com defloculante para a fração de finos dos solos.

Tabela 5 - Caracterização granulométrica do solo de Agrestina e de Paulista e suas misturas com CCA.

Caracterização Física (%)		Pedregulho	Areia	Silte	Argila	Relação Silte/Argila
SILVA (2018)	Solo	1	47	11	41	27
	Solo + 2%CCA	1	46	11	42	26
	Solo + 4%CCA	0	42	15	43	35
	Solo + 6%CCA	1	43	14	42	33
	Solo + 8%CCA	0	45	13	42	31
	Solo + 10%CCA	0	44	15	41	37
CONSTANTINO (2018)	Solo	0,28	28,57	17,75	53,4	33
	Solo + 2%CCA	0,48	27,83	20,27	51,43	39
	Solo + 4%CCA	0,43	27,31	21,63	50,62	43
	Solo + 6%CCA	0,52	29,07	19,38	51,03	38
	Solo + 8%CCA	0,43	27,31	21,63	50,62	43
	Solo + 10%CCA	1,12	21,03	23,06	54,78	42

FONTE: (ADAPTADO, SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

Na Tabela 5 é possível observar os percentuais da caracterização granulométrica das amostras do solo natural e das misturas com CCA. Os percentuais de grãos finos do solo de Agrestina e das suas misturas solo-cinza é mais de 50%, tendo o solo natural 41% de argila e 11% de silte. O solo de Paulista e suas misturas possuem mais de 70% dos grãos passantes na peneira Nº 200,

o que indica um alto percentual de finos neste solo. As porcentagens de argila e silte no solo natural é, respectivamente de, 53,4% e 17,75%. Por se tratar de um solo argiloso ou argilosiltoso, os solos expansivos possuem um alto teor de finos. A relação silte/argila obteve um aumento em relação ao percentual do solo natural, isto se deve a granulometria da cinza que está atuando como um silte.

5.1.2 UMIDADE DAS MISTURAS

Antes de realizar os ensaios, o solo e a cinza da casca de arroz foram secos ao ar. Os teores de umidade do solo de Silva (2018) variaram entre 7 a 7,8%, a autora afirma que por não ter realizado todos os ensaios no mesmo dia, os resultados podem ter sofridos acréscimos. Já Constantino (2018) obteve teores de umidade entre 3,5 a 6%, a medida que a porcentagem de cinza aumentava os teores de umidade média também cresciam, pois quanto maior o número de finos maior a necessidade de hidratação. (Tabela 6).

Tabela 6 - Teores de umidade do solo natural e das misturas.

Umidade média %	Solo Puro	Solo Puro + 2%	Solo Puro + 4%	Solo Puro + 6%	Solo Puro + 8%	Solo Puro + 10%
SILVA (2018)	7,23	7,39	7,66	7,73	7,52	7,29
CONSTANTINO (2018)	3,72	3,98	3,81	4,39	4,96	5,77

FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

5.1.3 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

A tabela 7 demonstra o peso específico real dos grãos que foi obtido através do ensaio de densidade real. Os valores encontrados pelas autoras sofreram uma redução gradativa, exceto para a mistura com 10% de cinza de Constantino (2018) o peso específico aumentou em relação aos demais percentuais, entretanto, o valor ainda foi menor que do peso específico do solo natural. Esta redução se deve à substituição de cinza por uma fração do solo natural feito nas misturas, como a cinza é menos densa que o solo natural acaba tornando o volume da mistura maior que o volume do solo, considerando que eles tenham o mesmo peso.

Tabela 7 - Peso específico real dos grãos do solo natural e das misturas com CCA.

Peso específico real (kn/m³)	Solo Puro	Solo Puro + 2%	Solo Puro + 4%	Solo Puro + 6%	Solo Puro + 8%	Solo Puro + 10%
SILVA (2018)	26,8	24,2	23,8	23,77	23,41	22,93
CONSTANTINO (2018)	26,6	26,28	25,91	25,77	25,35	25,97

FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

Silva (2018) obteve na mistura com 10% uma redução em sua densidade de 14,44% em relação ao solo natural, já Constantino (2018), a maior redução em sua densidade foi na mistura com 8% onde diminuiu 4,7% em relação à densidade do solo natural.

5.1.4 COMPACTAÇÃO

Os dados de densidade seca máxima e umidade ótima resultantes do ensaio de compactação realizados por Silva (2018) e Constantino (2018) estão na tabela 8. É possível notar um decréscimo nos valores de densidade seca máxima e um acréscimo nos teores de umidade ótima, os gráficos 1 e 2 demonstram de forma mais simplificada esses comportamentos.

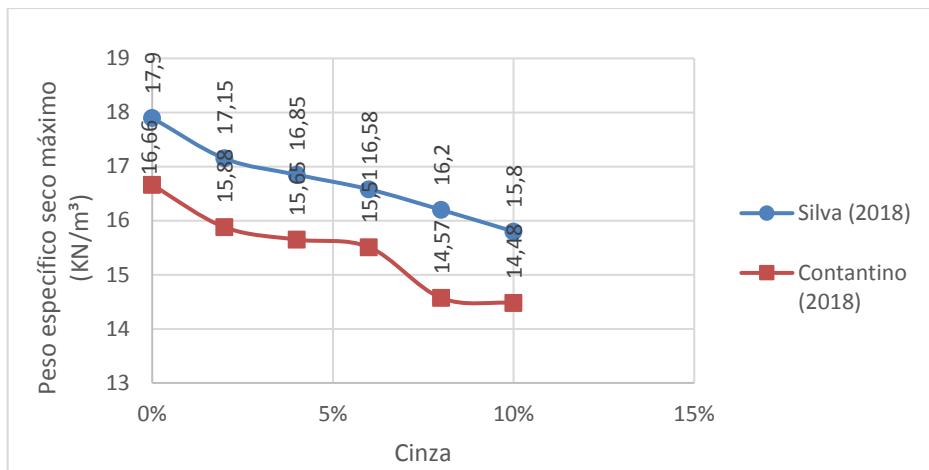
Tabela 8 - Densidade seca máxima e umidade ótima do solo e das misturas com CCA.

Peso específico seco máximo (γ_d) e umidade ótima (hótima)	Solo + 0% CCA	Solo + 2% CCA	Solo + 4% CCA	Solo + 6% CCA	Solo + 8% CCA	Solo + 10% CCA
SILVA (2018)	(KN/m ³)	17,9	17,15	16,85	16,58	16,2
	(%)	16	18,3	18,9	19,3	20
CONSTANTINO (2018)	(KN/m ³)	16,66	15,88	15,65	15,51	14,57
	(%)	20,7	19,6	21,2	24,4	25,8

FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

No gráfico 1 apresenta as curvas com os valores de densidade seca máxima dos solos de Agrestina (SILVA, 2018) e Paulista (CONSTANTINO, 2018) e suas respectivas misturas. É possível observar que ambas as curvas sofrem um decréscimo com o aumento proporcional de CCA. Segundo Ali *et al.* (1992 apud BEHAK, 2007), a diminuição do peso específico é consequência da baixa densidade real dos grãos de CCA.

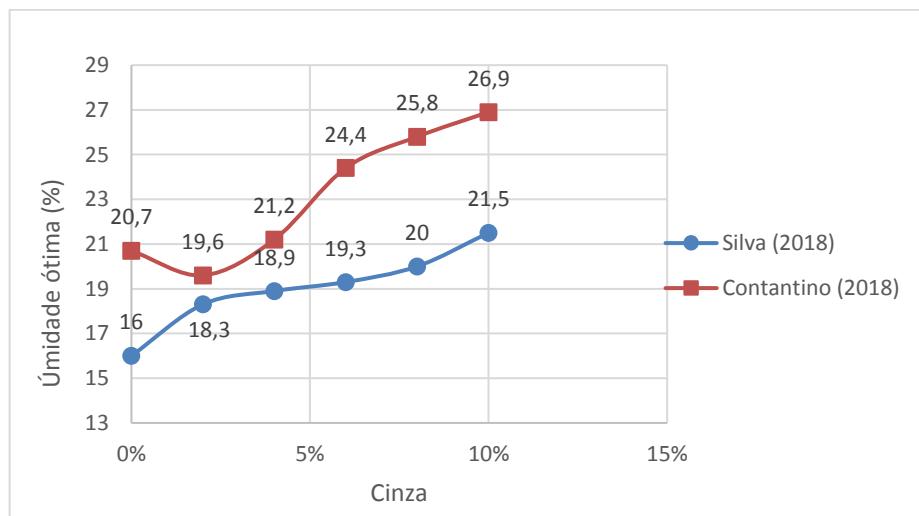
Gráfico 1 - Gráfico da massa específica aparente seca do solo e das misturas com CCA.



FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

No gráfico 2 tem-se as curvas da umidade ótima e é possível perceber que ambas as curvas têm um aumento no seu teor de umidade à medida que é incrementado porcentagens de cinza de casca de arroz no solo. Sabe-se que a CCA possui características pozolânicas pois contém sílica, que dispõe de uma elevada superfície específica, o que explica o aumento da absorção de água a medida que é adicionado CCA nas misturas, fazendo com que eleve a umidade ótima (ADHIKARY E JANA, 2016).

Gráfico 2 - Gráfico da umidade ótima do solo e das misturas com CCA.



FONTE: (ADAPTADO SILV, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

5.1.5 LIMITES DE ATTEBERG

A tabela 9 apresenta os Limites de Liquidez (LL), Limites de Plasticidade (LP) e os Índices de Plasticidade (IP) obtidos para as amostras de solo natural e para as misturas solo-cinza. É possível observar na tabela 9 e de forma mais simplificada no gráfico 3 que a CCA tende a diminuir o IP, sendo de forma discreta para Constantino (2018). Entretanto, houve um aumento no índice de plasticidade no solo de Constantino (2018) para as misturas de 8 e 10%.

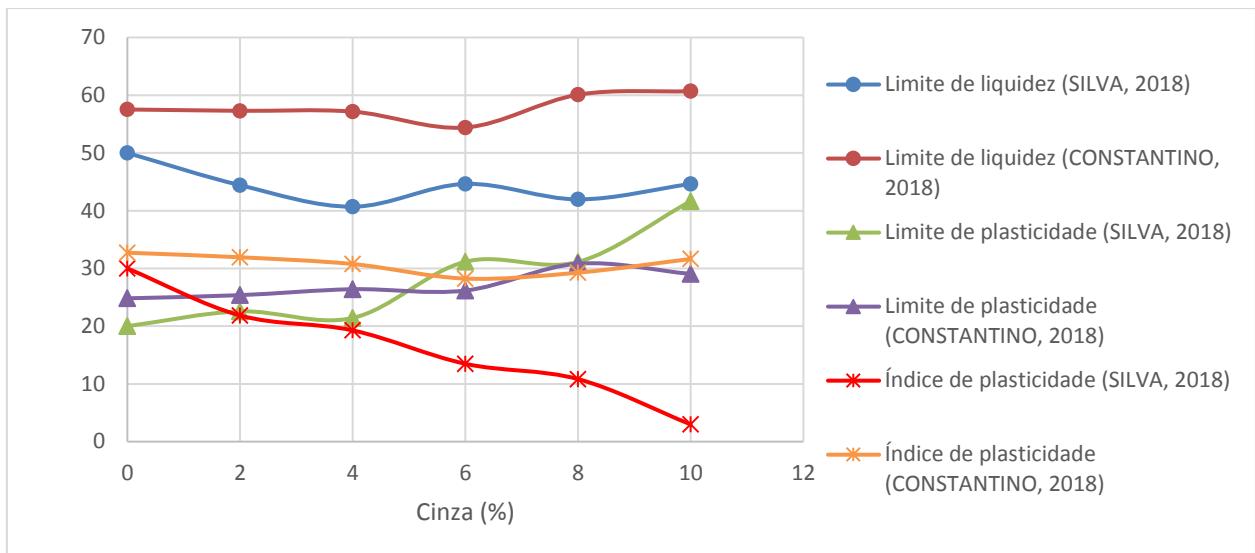
O Limite de Liquidez do solo natural de Silva (2018) e Constantino (2018) foram de 50% e 57,53%, respectivamente. É possível notar uma certa constância nos valores dos Limites de Liquidez nas misturas das duas autoras.

Tabela 9 - Limites de Atteberg do solo e das misturas com CCA.

	Limites de Atteberg	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
SILVA (2018)	Solo Puro	50	20	30
	Solo Puro + 2%	44,42	22,56	21,86
	Solo Puro + 4%	40,69	21,42	19,27
	Solo Puro + 6%	44,64	31,16	13,48
	Solo Puro + 8%	41,96	31,13	10,83
	Solo Puro + 10%	44,63	41,65	2,98
CONSTANTINO (2018)	Solo Puro	57,53	24,82	32,72
	Solo Puro + 2%	57,3	25,37	31,93
	Solo Puro + 4%	57,16	26,4	30,76
	Solo Puro + 6%	54,41	26,17	28,24
	Solo Puro + 8%	60,09	30,82	29,27
	Solo Puro + 10%	60,7	29,05	31,64

FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

Gráfico 3 - Limites de Atteberg para o solo natural e as misturas com CCA.



FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

Por causa das reações pozolânicas características das misturas solo-cinza, aumenta a necessidade de absorção de água, isto resulta no aumento dos valores de Limite de Plasticidade. Silva (2018) afirma que foi preciso um teor maior de água para que a mistura se tornasse mais plástica, que fez com que os valores de LP tendessem a se aproximar do Limite de liquidez. Visto que o índice de plasticidade é a diferença entre os índices LL e LP, explica o decréscimo deste índice, que chegou à 2,98% na mistura com 10% de cinza.

No entanto, Constantino (2018) não teve acréscimos significativos nos limites de plasticidade, o que resultou em altos índices de plasticidade, variando de 28,24% a 32,72% indicando alta plasticidade no solo e nas misturas.

Silva (2018) comparou os resultados do índice de plasticidade com o estudo de Adhikary e Jana (2016) e constatou que o IP se comportou de maneira similar, ou seja, houve decréscimo no índice de plasticidade com o incremento do teor de umidade. De forma consoante, Constantino (2018) relacionou o índice de plasticidade encontrado, com os resultados do trabalho de Fattah *et al.* (2013), que também obteve resultados similares, isto é, houve uma sutil queda nos valores de índice de plasticidade.

5.1.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO E DAS MISTURAS DE SOLO COM CCA

Os resultados da caracterização química do solo natural e das misturas solo-CCA estão apresentados na tabela 10, foram encontrados os valores de pH, condutividade elétrica (CE), as bases Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , os ácidos Al^{3+} e H^+ , a soma das bases (S), a capacidade de troca catiônica (CTC-T), o grau de saturação por bases (V), saturação por alumínio (m) e a saturação por sódio ($100\text{Na}^+/100$).

Tabela 10 - Dados da caracterização química do solo e das misturas solo-cinza.

Caracterização Química		Solo	Solo + 2%CCA	Solo + 4%CCA	Solo + 6%CCA	Solo + 8%CCA	Solo + 10%CCA	
pH	H²O	7,1	7,26	7,26	7,18	7,17	7,01	
CE	µS	1814	1877	1949	1912	1947	1758	
Na⁺	cmol/kg	156,88	171,55	174,7	164,22	191,45	179,91	SILVA (2018)
K⁺		12,74	22,19	29,53	37,93	63,12	73,61	
Ca²⁺		6,88	8,75	8,13	7,5	7,75	6,5	
Mg²⁺		15,63	16,88	17,25	15,5	14,13	14,75	
Al³⁺		0	0	0	0	0	0	
H⁺		16,2	15,5	16,7	16	16,1	15,6	
S		192,12	219,37	229,31	225,15	276,45	274,77	
CTC-T		208,32	234,87	246,31	241,15	292,55	290,37	
V		92,22	93,40	93,22	93,37	94,5	94,63	
m	%	0	0	0	0	0	0	
100Na⁺/T		75,31	73,04	70,93	68,1	65,44	61,96	
pH	H²O	5,01	4,62	4,66	4,64	4,74	5,32	CONSTANTINO (2018)
CE	µS	113,9	188,8	235,7	283,5	369,4	379,2	
Na⁺	cmol/kg	55,24	54,19	48,95	45,81	53,41	52,1	
K⁺		25,34	58,92	59,97	64,17	111,39	114,54	
Ca²⁺		1,75	2	2,13	2,88	2,63	3,5	
Mg²⁺		5,38	5,75	6,5	5	5,75	5,63	
Al³⁺		11,2	10,5	10,3	10	7,4	7,3	
H⁺		46	36,6	29,7	25,8	26,1	26,3	
S		87,71	120,86	117,55	117,86	173,18	175,77	
CTC-T		144,91	167,96	157,55	153,66	206,68	209,37	
V		60,53	71,96	74,61	76,7	83,79	83,95	
m	%	11,32	7,99	8,06	7,82	4,1	3,99	
100Na⁺/T		38,12	32,26	31,07	29,81	25,84	24,88	

FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

Conforme a classificação de Guimarães (2002), tabela 11, o solo de Agrestina tem um pH de 7,1 e é considerado neutro e o solo de Paulista tem um pH de 5,01 e é considerado ácido.

Tabela 11 - Classificação do solo através do pH.

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

FONTE: (GUIMARÃES, 2002).

A condutividade elétrica do solo natural e das misturas solo-cinza do estudo de Silva (2018) variou de 1758 a 1949 μS e do estudo de Constantino (2018) os resultados da condutividade foram de 113,90 a 379,20 μS . Como os valores encontrados pelas duas autoras foram maiores que 7 μS isto indica que o solo tem uma alta condutividade elétrica de acordo com a EMBRAPA (1999 *apud* PAIVA, 2016), ou seja, o solo e as misturas possuem uma alta salinidade e isto se deve ao alto teor de finos presente nos solos e nas misturas.

A soma da acidez extraível e da soma das bases resulta na capacidade de troca catiônica da amostra. Conforme o manual da EMBRAPA (2001, *apud* SILVA, 2018), tanto as amostras do solo de Agrestina e suas misturas quanto as de Paulista e suas misturas possuem uma alta capacidade de troca catiônica, tendo um valor de referência para CTC alta valores acima de 27 cmolc/Kg.

Segundo a Ageitec (2018b), solos que possuem uma saturação por base superior à 50% são considerados eutróficos, ou seja, férteis. Os valores de V ficaram entre 92,22% a 94,63% e 60,53% a 87,53%, para Silva (2018) e Constantino (2018), respectivamente. Desta maneira, ambos solos e suas misturas são considerados eutróficos.

Osaki (1991 *apud* SILVA, 2018) utiliza como valor de referência para a saturação com alumínio muito baixa resultados menores que 5%. Silva (2018) encontrou valores nulos (0%) para a saturação com alumínio e Constantino (2018) encontrou valores variando de 11,32% a 0%.

Com base nos valores de referência da Ageitec (2018d), valores de saturação de sódio acima de 15% classificam as amostras com um caráter sódico. Silva (2018) e Constantino (2018) encontraram valores acima de 15% de saturação de sódio classificando o solo natural e suas misturas com um caráter sódico.

5.1.7 ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIO-X PARA SOLO E MISTURAS COM CINZA DE CCA

Por meio do ensaio de fluorescência de raio-x é possível quantificar os teores dos óxidos presentes no solo, na cinza da casca de arroz e nas misturas solo-cinza. Os óxidos Al₂O₃, SiO₂ e Fe₂O₃ foram os que, somados, representaram mais de 80%, tanto para o estudo de Silva (2018) quanto para Constantino (2018), Tabela 12.

Tabela 12 - Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raio X para o solo e suas misturas com CCA.

Constituinte químico		Solo	Solo + 2%CCA	Solo + 4%CCA	Solo + 6%CCA	Solo + 8%CCA	Solo + 10%CCA	CCA
Teor (%)	Na₂O	0,8	1,04	0,91	0,82	0,79	0,67	0,08
	MgO	0,91	1,19	1,05	0,94	0,89	0,85	0,37
	Al₂O₃	12,15	17,6	14,83	12,31	11,92	11,23	0,8
	SiO₂	68,42	60,45	65,01	67,37	67,11	67,13	95,37
	P₂O₅	0,35	0,13	0,22	0,33	0,34	0,39	0,48
	K₂O	1,33	1,41	1,35	1,29	1,31	1,3	1,39
	CaO	1,13	1,25	1,15	1,06	1,11	1,06	0,75
	TiO₂	1,09	1,2	1,05	0,98	1,07	0,98	0,04
	MnO	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,09
	Fe₂O_{3t}	6,64	7,14	6,83	6,19	6,51	6,28	0,36
		P.F	6,81	8,28	7,24	8,35	8,59	9,68
Teor (%)	Na₂O	0,22	0,12	0,14	0,16	0,08	0,08	0,08
	MgO	0,71	0,71	0,69	0,66	0,62	0,59	0,37
	Al₂O₃	23,23	22,75	21,02	20,37	19,3	18,27	0,8
	SiO₂	58,67	60,23	63,12	64,03	64,82	65,14	95,37
	P₂O₅	0,04	0,06	0,11	0,14	0,16	0,21	0,48
	K₂O	2,1	2,16	2,11	2,11	2,04	1,99	1,39
	CaO	0,14	0,12	0,16	0,2	0,21	0,26	0,75
	TiO₂	0,91	0,94	0,86	0,84	0,8	0,74	0,04
	MnO	0,01	0,02	nd	nd	nd	0,04	0,09
	Fe₂O_{3t}	4,87	4,95	4,71	4,61	4,45	4,26	0,36
		P.F	8,78	7,62	6,78	6,59	7,23	8,14

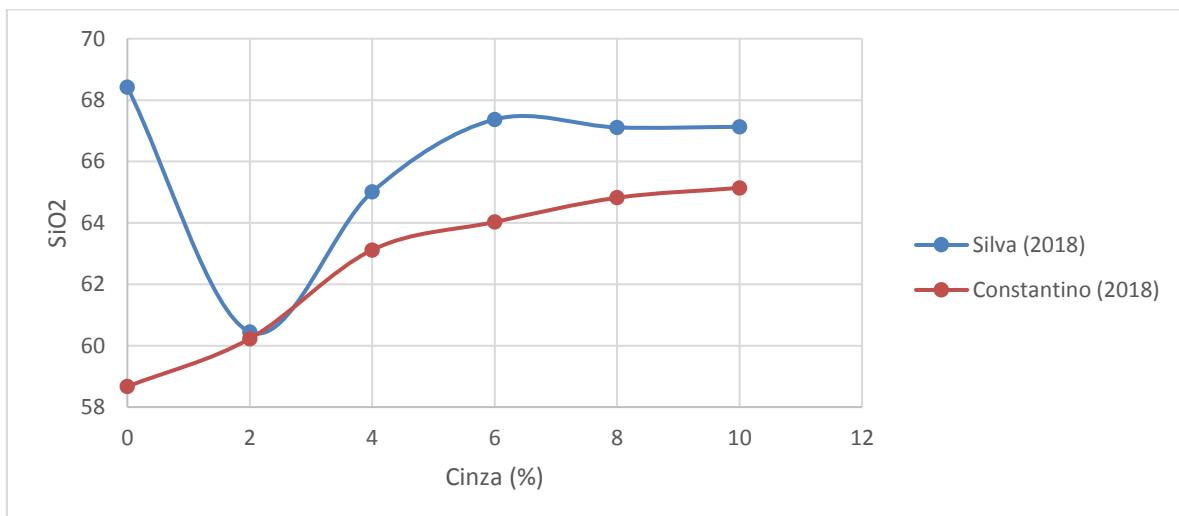
FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018)

SILVA (2018)

CONSTANTINO (2018)

O SiO₂ foi o que teve maior porcentagem para as duas autoras. O percentual de silício nos solos de Agrestina e Paulista foi de 68,42% e 58,67%, respectivamente. A partir do gráfico 4 é possível observar de forma mais simplificada os teores de SiO₂. Na mistura com 2% teve uma redução de cerca de 8% em relação ao solo natural de Silva (2018) e foi aumentando de forma gradativa no restante das misturas, entretanto se manteve com teores menores que o do solo natural. Já Constantino (2018) obteve nas misturas valores crescentes em relação ao solo natural.

Gráfico 4 - Teores de silício presentes no solo natural e nas misturas solo-CCA.



FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

Os teores de Al₂O₃ encontrados por Silva (2018) foram crescentes em relação ao solo natural até a porcentagem de 6%, nas misturas com porcentagens de 8% e 10% foram abaixo do teor do solo natural. Já Constantino (2018) obteve valores decrescentes nos teores de Al₂O₃ em relação ao solo a medida que é incrementado cinza.

5.1.8 EXPANSÃO “LIVRE” DO SOLO E DAS MISTURAS COM CCA

Na tabela 13 apresenta-se os valores encontrados por Silva (2018) para as expansões do solo natural e das misturas com 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14% de cinza da casca de arroz, nas idades 7, 14 e 21 dias. Também contém os resultados do ensaio com amostras inundadas por 96 horas a fim de descobrir a máxima expansão. Do mesmo modo, a tabela 12 contém os resultados das expansões das amostras do solo de Paulista e suas misturas com 2%, 4%, 6%,

8% e 10% de CCA encontrados por Constantino (2018) para os dias de 0, 7, 28 e 120 dias de cura.

Tabela 13 - Valores de expansões para as amostras dos solos e suas misturas dos municípios de Agrestina e Paulista.

% de CCA	ao 0 dia (%)	aos 7 dias (%)		aos 14 dias (%)		aos 21 dias (%)	aos 28 dias (%)	aos 120 dias (%)	Média das expansões (%)
	CONSTANTINO (2018)	SILVA (2018)	CONSTANTINO (2018)	SILVA (2018)	CONSTANTINO (2018)	SILVA (2018)	CONSTANTINO (2018)	CONSTANTINO (2018)	SILVA (2018)
0 (Campo)	-	6,58	-	6,58	-	6,58	-	-	6,58
0 (Compactado)	15,7	20	14,1	20	14,1	20	13,1	14,7	17,925
2	11,8	14,4	8,7	12,2	8,7	13,5	9,6	-	9,7
4	8	10,4	6,1	9,23	6,1	13,65	6,4	-	6,65
6	5,3	12,2	3,8	11,5	3,8	9,07	3,2	2,7	4,7
8	6,8	9,7	5,5	7,18	5,5	8,35	4,6	4,2	6,65
10	3,2	6,87	2	4,5	2	2,65	1,2	1,3	2,425
12	-	5,77	-	3,65	-	3,5	-	-	4,31
14	-	1,27	-	1,6	-	1,55	-	-	1,47

FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

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

Avaliando todas as amostras de Silva (2018) dentro da mesma idade na tabela 13 percebe-se que houve uma diminuição da expansão em relação ao corpo de prova que foi compactado em laboratório. Para a idade de 7 dias a redução da expansão foi de 93,65%, para 14 dias foi de 93% e para 21 dias foi reduzido 92,25%, em relação ao solo compactado em laboratório e a amostra com 14% de CCA. Entretanto, as amostras de 2%, 4%, 6% e 8% dos três tempos de cura e a amostra com 10% de CCA no tempo de cura de 7 dias, obtiveram um valor de expansão maior que a da amostra do solo indeformado.

De forma análoga, fazendo uma análise das amostras de solo natural e suas misturas de Constantino (2018) constata-se que houve uma redução gradativa da expansão com o aumento do teor de cinza. Exceto a amostra com 8% de cinza que obteve valores maiores que a amostra anterior. Comparando os resultados das amostras de solo puro e da mistura com 10% de CCA foi possível notar que houve uma redução dos valores das expansões. Para 0 dias de cura o decréscimo foi de cerca de 80%, para 7 dias foi de 86%, para 28 dias 91% e para 120 dias a redução foi de 92%.

Analisando os resultados de Silva (2018) com a mesma porcentagem, mas em idades distintas é possível notar que houve um pequeno decréscimo nos valores da expansão. Contudo, apenas algumas amostras mantiveram o decréscimo ao longo dos períodos de cura, enquanto outras os valores observados foram maiores que o valor da amostra de mesma porcentagem, mas na idade anterior, como por exemplo na porcentagem de 2% de CCA na cura de 21 dias. Fazendo a mesma análise para as amostras de Constantino (2018) percebe-se que também houve uma sutil redução ao longo do tempo de cura. Dando destaque as amostras com 2% e 4% de CCA para o tempo de 28 dias de cura a expansão foi maior que a de 7 dias e a amostra de solo puro teve uma expansão maior em 120 dias de cura que no de 28 dias.

Merece destaque o resultado da amostra com 14% de CCA de Silva (2018), onde obteve um valor de expansão menor na idade de cura com 7 dias que em relação as de 14 e 21 dias.

Deste modo, nota-se que as amostras ao longo do tempo têm uma sutil redução pois os tempos de cura que foram ensaiados foram insuficientes para que as reações pozolânicas ocorressem, tanto nas amostras de Silva (2018) como de Constantino (2018).

5.1.9 TENSÃO DE EXPANSÃO A VOLUME CONSTANTE DO SOLO E DAS MISTURAS COM CCA

Os resultados obtidos por Silva (2018) e Constantino (2018) para a tensão de expansão a volume constante do solo natural e suas misturas com CCA, respectivamente para os tempos de cura de 7, 14 e 21 dias e 0, 7, 28 e 120 dias estão demonstrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Tensão de Expansão a Volume Constante das amostras do solo e suas misturas dos municípios de Agrestina e Paulista.

Amostra / Tempo de Cura	0 Dias	7 Dias		14 Dias	21 Dias	28 Dias	120 Dias	MÉDIA	
	CONSTANTINO (2018)	SILVA (2018)	CONSTANTINO (2018)	SILVA (2018)	SILVA (2018)	CONSTANTINO (2018)	CONSTANTINO (2018)	CONSTANTINO (2018)	SILVA (2018)
Solo Puro	81,7	215	64,6	215	215	80,1	43,3	67,425	215
Solo Puro + 2%	53,1	54,17	61,3	63,5	26,66	49	-	40,85	48,11
Solo Puro + 4%	46,6	28,33	38,4	59,17	43,33	32,7	-	29,425	43,61
Solo Puro + 6%	32,7	45,83	22,1	27,5	38,33	18,8	22,1	23,925	37,22
Solo Puro + 8%	19,6	36,67	24,5	44,17	30,83	18	18	20,025	37,22
Solo Puro + 10%	9,8	31,67	9,8	20	15	8,2	7,4	8,8	22,22
Solo Puro + 12%	-	20,83	-	20	15,83	-	-	-	18,88
Solo Puro + 14%	-	11,67	-	10,83	8,33	-	-	-	10,27

FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

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

É possível notar que os resultados obtidos por Silva (2018) da tensão de expansão a volume constante se comportam de forma irregular. Comparando os valores da mesma amostra com 7 e com 21 dias de tempo de cura, todas as amostras sofreram um decréscimo, exceto na amostra de 4% de CCA, onde houve um acréscimo. De modo geral, com o aumento do teor de cinza houve uma redução das tensões de expansão.

As tensões de expansão das amostras de Constantino (2018) sofreram uma diminuição com o acréscimo de cinza em todos os tempos de cura, exceto a amostra de mistura a 8% no tempo de cura de 7 dias onde houve um aumento com relação a amostra de 6%. Analisando os valores da mesma amostra ao longo dos tempos de cura observou que há uma constância, ressaltando as amostras com 8% e 10% onde diminuíram as tensões de expansão ao longo dos tempos de cura.

O menor valor de tensão que Silva (2018) obteve foi na amostra de 14% para o tempo de 21 dias de cura que sofreu um decréscimo de 96,12% em relação ao solo natural. A média das tensões demonstra com mais clareza o decréscimo sofrido pelas amostras a medida que o teor de CCA aumenta. Já para Constantino (2018), o menor valor de tensão foi na amostra de 10% com tempo de cura de 120 dias onde é cerca de 90% menor que a tensão do solo natural no mesmo tempo de cura.

De acordo com os critérios de Jimenez (1980, *apud* SILVA, 2018) tensões inferiores a 20 kPa não representam risco às estruturas, desta forma, as amostras com 14% de CCA para os três tempos de cura de Silva (2018) e para Constantino (2018) as amostras com 6% para o tempo de 28 dias, 8% com 0, 28 e 120 dias de cura e as amostras com 10% para todos os tempos de cura atendem este critério.

A redução da tensão de expansão não se deve as reações pozolânicas da cinza de casca de arroz, pois estas reações demoram cerca de 60 dias para ocorrer. A redução ocorreu com o acréscimo de cinza porque a cinza funcionou como uma barreira física.

5.1.10 COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS COM CCA

Os resultados obtidos por Silva (2018) e Constantino (2018) do ensaio de compressão simples para os solos naturais e suas misturas com CCA, com dois corpos de prova para a idade 0, estão na Tabela 15.

4%. Os valores da tensão para os dois corpos de prova foram bastante irregulares, tendo decréscimo em algumas amostras e em outras não.

Tabela 15 - Valores das tensões de compressão para as amostras dos solos e suas misturas com CCA dos municípios de Agrestina e Paulista.

Solo e Misturas	Tensão de Compressão Simples (kPa)					
	CP1		CP2		Média (CP1 e CP2)	
	SILVA (2018)	CONSTANTINO (2018)	SILVA (2018)	CONSTANTINO (2018)	SILVA (2018)	CONSTANTINO (2018)
Solo Natural	286	294,99	330	275,33	308	285,16
Solo + 2% CCA	131	-	165	-	148	-
Solo + 4% CCA	123	398,79	143	393,33	133	396,06
Solo + 6% CCA	143	239,27	105	262,22	124	250,75
Solo + 8% CCA	130	185,74	116	191,2	123	188,47
Solo + 10% CCA	132	242,55	132	250,2	132	246,375
Solo + 12% CCA	124	-	83	-	103,5	-
Solo + 14% CCA	41	-	46	-	43,5	-

FONTE: (ADAPTADO SILVA, 2018 e CONSTANTINO, 2018).

A expansão mais baixa foi obtida por Silva (2018) na amostra com 14% de CCA, com um valor médio de 43,5 kPa o que significa uma redução de 85,87% em relação ao valor da amostra de solo natural. Para os valores médios das tensões de compressão das amostras de 2% a 8%, foi observado que houve pequenas reduções. Este resultado de acordo com a autora já era esperado devido ao progressivo aumento do teor umidade nas amostras, que acaba reduzindo a quantidade de massa por volume, pois a tensão de compressão é maior quando existe um maior contato entre os grãos.

É imprescindível comentar o aumento da tensão que foi encontrado por Constantino (2018) na amostra da mistura de solo com 4% de CCA, onde superou a resistência achada na amostra de solo natural. Entretanto, para as misturas com os demais teores de cinza houve um decréscimo e nenhuma delas conseguiu ser superar à resistência do solo natural. Desta forma, é possível concluir que apenas com o incremento de 4% de CCA pode influenciar na resistência à ruptura do solo de Paulista.

A princípio, materiais com características pozolânicas geram compostos com propriedades ligantes. As misturas com cinza possuem reações pozolânicas e devem produzir um ganho de resistência e assim devem absorver uma parcela das tensões nas quais as amostras foram sujeitas. Entretanto, no estudo de Silva (2018) não foi possível obter valores de tensões nas misturas maiores que no solo natural.

Como o ensaio foi realizado apenas para a idade de cura 0, não é possível visualizar as propriedades ligantes que são derivadas das reações pozolânicas. É necessário um ensaio para uma idade de cura superior a 56 dias, para que seja possível observar um ganho de resistência nas amostras.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente capítulo foram expostas as conclusões mais relevantes resultantes das análises dos solos expansivos dos municípios de Agrestina e de Paulista, Pernambuco, com adição de cinza de casca de arroz com a finalidade de estabilizá-los.

6.1 CONCLUSÃO

De acordo com a Classificação Unificada dos Solos, o solo de Silva (2018) foi classificado como CH ou CL já o solo de Constantino (2018) obteve uma classificação como CH, ambos solos foram considerados argilas altamente plásticas. A umidade ótima das amostras de Constantino (2018) sofreu acréscimos com o aumento do teor de CCA já as amostras de Silva (2018) flutuaram de 7 a 7,8%, isto foi devido a CCA apresentar um aspecto mais seco que o solo. A expansão dos solos naturais de Silva (2018) e Constantino (2018) foram de 6,58% e 15,7%, respectivamente, foi possível constatar que há uma redução maior com o aumento do teor de CCA que com a idade de cura.

O alto teor de Óxido de Sílica presente na composição química da Cinza de Casca de Arroz (CCA) favorece a um ótimo potencial pozolânico, entretanto é preciso esperar cerca de 56 dias para que as reações pozolânicas ocorram.

Tanto para o solo de Agrestina como o de Paulista houve uma sutil queda na densidade seca máxima, devido à baixa densidade da cinza. Também ocorreu um aumento no teor de umidade a medida que foi acrescentado porcentagem de CCA, em virtude da necessidade de absorção de água por parte da cinza.

Os percentuais dos Índices de Plasticidade de Silva (2018) e Constantino (2018) sofreram um decréscimo, causados pela elevação dos Limites de Plasticidade que tem relação direta com o acréscimo de CCA nas misturas.

Silva (2018) obteve uma expansão livre de 6,58% para o solo natural, com uma sobrecarga de 10 kPa, e foi preciso um teor de 14% de CCA para combater a expansão do solo. Para esta porcentagem de cinza a expansão alcançou o valor de quase 1,5% e valores próximos a 10 kPa em todas as idades de cura na Tensão de Expansão a Volume Constante. Assim, é possível realizar a estabilização do solo de Agrestina com 14% de CCA.

Constantino (2018) obteve 15,7% de expansão livre para o solo natural na idade 0 de cura, com uma sobrecarga de 7 kPa, com um teor de 10% de CCA a expansão da mistura foi de pouco mais de 3%. Entretanto, para este mesmo teor de cinza na idade de cura de 120 dias foi obtido o melhor resultado com uma redução de 92%. O mesmo se deve para a tensão de expansão, que obteve com uma porcentagem de 10% de cinza uma redução de 81,7 kPa para 9,8 kPa, para 0 dias de cura. Desta forma, com um teor de 10% de CCA é possível combater de forma eficiente a expansão do solo.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se para futuros trabalhos:

- Análise de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas.
- Realização do ensaio de Termogravimetria.

REFERÊNCIAS

ADHIKARY, SUDIPTA E JANA, KOYEL. Potentials of rice-husk ash as a soil stabilizer. International Journal of Latest Research in Engineering na Technology (IJLRET). Vol. 2, Issue 2, 2016. p 40-48.

Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Ageitec. Caráter sódico. <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_58_2212200611552.html> Acesso em: 09 dez 2017d.

Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Ageitec. Saturação por bases. <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_21_2212200611544.html> Acesso em: 09 dez 2017b.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): _____.NBR 6502: Rochas e Solos, ABNT, Rio de Janeiro, 1995

Ayala, J.F., Gijon, M.F., Mozo, C.O. e Rodriguez J.L.S. (1986). "Mapa Previsor de Riesgos por Expansividad de Argillas En España a Escala 1:1.000.000". Série: Geología Ambiental. Instituto Geológico y Minero de España. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. España, Madrid.

BARBOSA, V. (2013). Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal. Tese (Mestrado) da Universidade Federal de Pernambuco.

BASHA, E. A.; HASHIM, R.; MUNTOHAR, A. S. Effect of Cement - Rice Husk Ash on the Plasticity and Compaction of Soil. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. <Disponível em: www.ejge.com/2003/Ppr0304/Ppr0304.htm>. Acesso em: 25 nov. 2018.

BEHAK, L. ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO SEDIMENTAR ARENOSO DO URUGUAI COM CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL. Tese (Mestrado) da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 2007.

CAVALCANTE, E. H., CAVALCANTE JÚNIOR, D. A., SANTOS, W. J. Propriedades Geotécnicas de um Solo Expansivo de Sergipe. GEOJOVEM 2006, Nova Friburgo, Rio de Janeiro. <<https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/IIGeojovem2006/2006-cavalcante-junior.pdf>> Acessado em 28 de Agosto de 2018.

CONSTANTINO, C. S. (2018) - Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco – Recife. 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. (1988). “Solos Especiais – Colapsíveis, Dispersivos e Expansivos”, Relatório Anual do CNPq.

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

FERREIRA, S. R. M. e FERREIRA, M. G. V. X. (2009) Mudanças de volume devido a variação de teor de umidade em um Vertisol no Semi-Árido de Pernambuco. Revista Brasileira de Ciência do Solo, p. 779-791. < http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v3_3n4/04.pdf> Acessado em 01 de Agosto de 2018.

FREITAS, J. E. USO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS PARA USO EM PAVIMENTO RODOVIÁRIO. Tese (Mestrado) da Universidade de Brasília, 2018.

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

HADAS, Amanda Lima; BIANCHI, Gislaine; LORENSETTI, Mariane Regina. REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS POZOLÂNICOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: revisão bibliográfica da cinza volante e resíduo cerâmico. 2017. 12 f. Artigo (Engenharia Civil) – AEMS, Tupã, 2017. Disponível em: < <https://www.amigosdanatura.org.br/eventos/data/inscricoes/2940/form558600.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2018.

HOFFMANN, R., JAHN, S. L., BAVARESCO, M., SARTORI, T. C. (2014). Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte. Santa Maria.

HOUSTON, D. F. Rice Hulls. Rice Chemistry and Technology, American Association of Cereal Chemists, p. 301-340, MN, 1972.

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

ISBALÃO, G. O. (2013). Uso da cinza de casca de arroz como corretivo e condicionador do solo. Dissertação (Doutorado) da Universidade Federal de Pelotas, Rio Grande do Sul. 84 p.

JUCÁ, J. F. T. (1993). Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada. Madrid, 1990, 346 p. Doctorado, Universidad politécnica de Madrid, España.

JULIANO, B. O. Rice: Chemistry and Technology. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minneapolis, 1985.

KORISA, J. Rice and Its By-products. Edward Arnold, 2nd Ed., 426 p., London, 1958.

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

LAZARO, R. C.; MOH, Z. C. Stabilization of Deltaic Clays with Lime -Rice Husk Ash Mixtures. In: 2nd SOUTHEAST ASIAN CONFERENCE ON SOIL ENGINEERING, pp. 215-223, 1970.

MITCHELL, J. K. (1993). Fundamentals of soil behavior. New York, NY, USA: John Wiley, Second Edition, 437 p.

MORAIS, J. J. O. (2017). Caracterização Geotécnica da Expansividade de um Solo Argiloso do Município de Paulista-PE. Dissertação (Mestrado) Da Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

PAIVA, S. C. (2016). Estudo do Comportamento Geomecânico dos Solos Expansivos dos Municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca - PE e de suas Misturas com Cal. Dissertação (Doutorado) da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco. 191p.

PEREIRA, K. L. A., (2012) Estabilização de um Solo com Cimento e Cinza de Lodo para Uso em Pavimentos. Dissertação (Mestrado) Da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 125p,

PESSOA, F. H. C. Análise de solos de Urucu para fins de uso rodoviário. 2004. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Brasília. Brasília. 2004.

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

PRESA, E. P.(1980). Parâmetros Convenientes para projetos de rodovias em Solo Expansivo. II Seminário Regional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações – NRBA/ABMS-Salvador-Ba.83-106.

RODRÍGUEZ, G. Influencia de la Incorporación de Ceniza de Cáscara de Arroz Residual en Hormigones de Alto Desempeño y Convencionales. In: XXX JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, Brasilia, 2002.

SILVA, J. A. (2018) - Estudo do Comportamento Geotécnico de um Solo Potencialmente Expansivo, Encontrado em Agrestina/PE, Aplicando Cinza de Casca de arroz e Cal como Aditivos Estabilizantes. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco – Caruaru. 2018.

SILVA, M. J. R. (2003). Comportamento Geomecânico De Solos Colapsíveis E Expansivos em Petrolina-PE: Cartas de Suscetibilidade. Tese (Mestrado) da Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, 2003, 124 p.

SILVA, O. S. (2012). Estudo de propriedades Geotécnico de um Solo Argiloso, Potencialmente Expansivo, Compactado com e sem Adição de Cal. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco. 150p.

WIKIPÉDIA. Localização de Agrestina. <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Agrestina>> Acesso em: 26 nov. 2018.

WIKIPÉDIA. Localização de Agrestina. <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Pernambuco>> Acesso em: 26 nov. 2018.