



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LETYCIA VIVIANE PORFÍRIO DA SILVA

**ESTABILIZAÇÃO DO SOLO EXPANSIVO DE PAULISTA COM CINZA DE CASCA
DE ARROZ**

Recife
2018

LETYCIA VIVIANE PORFÍRIO DA SILVA

**ESTABILIZAÇÃO DO SOLO EXPANSIVO DE PAULISTA COM CINZA DE
CASCA DE ARROZ**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

Recife
2018

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

- S586e Silva, Letycia Viviane Porfírio da.
Estabilização do solo expansivo de Paulista com cinza de casca de arroz / - 2018.
54 folhas, il., tab. e sigl.
- Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.
- TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências.
1. Engenharia Civil. 2. Solo expansivo. 3. Estabilização. 4. Cinza de casca de arroz.
I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-046

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO(S): 1 – Letycia Viviane Porfírio da Silva

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Silvio Romero de Melo Ferreira

Examinador 1: Joaquim Teodoro Romão de Oliveira

Examinador 2: Washington Moura de Amorim Junior

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estabilização do solo expansivo de Paulista com cinza de casca de arroz

LOCAL:

DATA: ____/____/____ **HORÁRIO DE INÍCIO:** ____.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: _____(deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) () aprovado(s) (nota > = 7,0), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota <3,0)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, de de 20....

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato 1:

Candidato 2:

Aos meus pais, Marileide e Antônio Filho
Ao meu irmão, Antônio Neto.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço ao professor Silvio Romero de Melo Ferreira, por todo aconselhamento, orientação, confiança, e disposição para repassar seus conhecimentos.

À minha família, em especial Marileide Silva (mãe), Antônio Porfírio Filho (pai) e Antônio Porfírio Neto (irmão), por todo apoio, aconselhamento, paciência e encorajamento durante esses cinco anos de graduação e por toda minha vida.

Aos meus amigos, por todos os momentos felizes que me proporcionaram durante esses cinco anos e por estarem comigo quando os tempos também se tornaram nebulosos.

Agradeço também aos professores do Departamento de Engenharia Civil, por sempre se esforçarem para repassar o seu conhecimento para nós, alunos, da melhor forma possível.

À equipe do Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco, Gutemberg e Antônio Brito, pela paciência e orientação durante os ensaios realizados.

E, finalmente, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Solos expansivos são aqueles nos quais se verifica uma variação de volume quando a sua umidade é modificada. Seu potencial expansivo tem como causa características intrínsecas, como a presença de argilominerais como a montmorilonita, e características extrínsecas, como ambientes quentes e úmidos, favorecendo o intemperismo que dá origem a esse tipo de solo. Com esta variação de volume característica, apresenta-se como um solo problemático para as construções, uma vez que induz a perda de estabilidade e deslocamento de estruturas não dimensionadas para tais movimentos. No Brasil, os incidentes relativos a eles já foram reportados nos estados da Bahia, Ceará, São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Pernambuco. Ferreira et al. (2008) cruzaram informações de Climatologia, Pedologia e Geologia e encontraram que cerca de 51,2% do território pernambucano apresenta alto ou médio risco de apresentarem o fenômeno. As soluções para este problema são das mais variadas, como a remoção do solo prejudicial, seu isolamento, inundação prévia e até alteração da plasticidade e composição granulométrica, bem como a modificação permanente das suas propriedades com a adição de aditivos como cal, silicatos de sódio, cimento Portland ou o aditivo usado nessa pesquisa: a cinza de casca de arroz. O objetivo deste trabalho é caracterizar física e mecanicamente o solo expansivo do município de Paulista/PE, bem como suas misturas com a cinza de casca de arroz nas porcentagens de 1%, 3%, 5%, 7% e 10%, em peso. Foram realizados ensaios para caracterização da expansividade e determinação da tensão de expansão relativo a cada percentual. A mistura reduziu significativamente a tensão de expansão do solo e sua “expansão livre”. O percentual de 7% se mostrou como aquele que mais se aproxima do percentual ideal para não causar danos nas estruturas, de acordo com o critério de Jimenez Salas (1980), mesmo ainda apresentando valores de tensão que ainda causariam alguma avaria na estrutura da edificação. Para o percentual de 10%, no entanto, tais danos se extinguiriam.

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

ABSTRACT

Expansive soils are those in which a change in volume occurs when their moisture is modified. Its expansive potential is due to intrinsic characteristics, such as the presence of clay minerals such as montmorillonite, and extrinsic characteristics, such as hot and humid environments, favoring the weathering that gives rise to this type of soil. With this characteristic volume variation, it presents as a problematic soil for the constructions, since it induces the loss of stability and displacement of structures not dimensioned for such movements. In Brazil, incidents related to them have already been reported in the states of Bahia, Ceará, São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul and Pernambuco. Ferreira et al. (2008) cross-referenced information on Climatology, Pedology and Geology and found that about 51.2% of the territory of Pernambuco has a high or medium risk of presenting the phenomenon. The solutions to this problem are of the most varied, such as the removal of harmful soil, its isolation, previous flood and even alteration of the plasticity and granulometric composition, as well as the permanent modification of its properties with the addition of additives such as lime, sodium silicates, Portland cement or the additive used in this research: rice husk ash. The objective of this work is to characterize the expansive soil of the city of Paulista / PE, as well as its mixtures with the rice husk ash in percentages of 1%, 3%, 5%, 7% and 10%. Tests were performed to characterize the expansivity and determination of the expansion tension relative to each percentage. The mixture significantly reduced the soil expansion tension and its "free expansion". The percentage of 7% was shown as the one closest to the ideal percentage to not cause damage to the structures, according to the criterion of Jimenez Salas (1980), even still presenting tension values that would still cause some breakdown in the structure of Building. For the percentage of 10%, however, such damages would be extinguished.

Keywords: Expansive soil. Stabilization. Rice husk ash.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Estrutura cristalográfica da caulinita (LAMBE E WHITMAN, 1969)	17
Figura 2 –	Representação de minerais do tipo 2:1. (LAMBE E WHITMAN, 1969)	19
Figura 3 –	Mapa de susceptibilidade à expansão com base na pedologia	21
Figura 4 –	Locais de ocorrência de solos expansivos pelo mundo	21
Figura 5 –	Municípios produtores de arroz do estado de Pernambuco, com ênfase em Cabrobó	31
Figura 6 –	Ensaio para determinação da densidade real dos grãos, conforme NBR 6508/84	34
Figura 7 –	Célula edométrica modelo “Ortigão”	37
Figura 8 –	Ensaio de expansão a volume constante em andamento	37
Figura 9 –	Curva Granulométrica da Cinza de Casca de Arroz (CCA)	38
Quadro 1 –	Caracterização Granulométrica do Solo Natural e misturas	39
Figura 10 –	Curva granulométrica do Solo natural e misturas	40
Figura 11 –	Curva de compactação do Solo natural de Paulista e suas misturas com cinza de casca de arroz	41
Figura 12 –	Gráficos da variação da umidade ótima e peso específico aparente máximo em função do teor de cinza da mistura	42
Figura 13 –	Gráfico comparativo dos valores encontrados no ensaio de expansão livre, para diferentes tempos de cura e porcentagens de mistura	44
Figura 14 –	Gráfico comparativo dos valores encontrados nos ensaios de Tensão de Expansão para o solo natural e as misturas com cinza de casca de arroz	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Métodos de identificação de solo expansivos	27
Tabela 2 –	Critério de Cuellar (1978)	28
Tabela 3 –	Critério de Jimenez Salas (1980)	28
Tabela 4 –	Parâmetros da classificação física da cinza de casca de arroz	38
Tabela 5 –	Limites de Consistência - Solo natural de Paulista e Misturas com CCA	41
Tabela 6 –	Valores da umidade ótima e peso específico aparente seco máximo do solo e solo-CCA	42
Tabela 7 –	Valores da expansão livre, em percentual, para os diferentes tempos de cura e porcentagens de mistura	43
Tabela 8 –	Resultados dos ensaios de Tensão de Expansão para o solo natural e misturas com CCA	44
Tabela 9 –	Resultados comparativos, em porcentagem, da redução na tensão com a adição do teor ao solo natural	45
Tabela 10 –	Classificação segundo Jimenez Salas (1980)	46
Tabela 11 –	Resultados da utilização de CCA na estabilização de outros solos – Dados da expansão livre	47
Tabela 12 –	Comparativo de diferentes formas de estabilização do solo expansivo de Paulista	48

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	Associação Americana de Funcionários de Rodovias e Transportes do Estado
CCA	Cinza de casca de arroz
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma técnica
OCR	Razão de pré-adensamento
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa e motivação.....	14
1.2	Objetivo geral e específicos.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Mineralogia	16
2.1.1	Argilominerais.....	17
2.1.1.1	<i>Caulinita</i>	<i>17</i>
2.1.1.2	<i>Ilita</i>	<i>18</i>
2.1.1.3	<i>Esmectita.....</i>	<i>18</i>
2.2	Solos Expansivos	19
2.2.1	Definição	19
2.2.2	Ocorrência	20
2.2.3	Fatores influentes na expansividade dos solos	22
2.2.4	Métodos de Identificação.....	24
2.2.4.1	<i>Método indireto de Skempton (1953)</i>	<i>28</i>
2.2.4.2	<i>Método direto de Cuellar (1978)</i>	<i>28</i>
2.2.4.3	<i>Método direto de Jimenez Salas (1980)</i>	<i>28</i>
2.3	Soluções para solos expansivos.....	29
2.3.1	O emprego da CCA na estabilização de solos expansivos	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1	Caracterização física da amostra	33
3.1.1	Preparação das misturas	33
3.1.2	Determinação da massa específica	33
3.1.3	Determinação do Limite de Liquidez	34
3.1.4	Determinação do Limite de Plasticidade	35
3.1.5	Análise Granulométrica	35
3.1.5.1	<i>Peneiramento Graúdo</i>	<i>35</i>
3.1.5.2	<i>Peneiramento Miúdo</i>	<i>35</i>

3.1.5.3	<i>Ensaio de Sedimentação.....</i>	35
3.1.6	Ensaio Proctor Normal	36
3.2	Caracterização da expansividade.....	36
3.2.1	Ensaio de Expansão Livre.....	36
3.2.2	Ensaio de expansão a volume constante	37
4	RESULTADOS	38
4.1	Caracterização Física da cinza de casca de arroz.....	38
4.2	Caracterização Física do solo natural e misturas.....	39
4.2.1	Caracterização Granulométrica.....	39
4.2.2	Limites de Consistência.....	40
4.2.3	Ensaio Proctor Normal	41
4.2	Caracterização da expansividade.....	43
4.2.3	Ensaio de Expansão Livre	43
4.2.3	Ensaio de Tensão de Expansão – Volume Constante	44
4.2.3	Comparação do uso da cinza de casca de arroz na estabilização de solos de outros locais.....	46
4.2.3	Comparação da estabilização do solo de Paulista utilizando outros materiais.....	47
5	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Encontrados em praticamente todos os continentes do mundo, os solos expansivos, de acordo com Presa (1980) *apud* Oliveira et al. (2006), apresentam uma variação de volume muito elevada quando inundados, seja em seu estado natural ou compactado. São solos oriundos de rochas ígneas como o gabro, basalto e diábasio, onde os feldspatos e piroxênios formam a montmorilonita e outros minerais secundários, e de rochas sedimentares que possuem o argilo-mineral montmorilonita como constituinte, como é o caso do xisto argiloso, calcários e margas.

Cuba, México, Marrocos, Estados Unidos, Argentina, Turquia, China e África do Sul. Esses são apenas alguns países que já registraram ocorrências de solos expansivos ao redor do mundo. No Brasil, incidentes relativos a eles foram reportados com o solo massapê no Recôncavo Baiano, estendendo-se para Pernambuco e Ceará, nas Formação Passa Dois e Grupo Tubarão em São Paulo, Paraná e Santa Catarina e na Formação Santa Maria no Rio Grande do Sul (BARBOSA, 2013; FERREIRA, 2008). Trazendo o foco para o estado de Pernambuco, Ferreira *et al.* (2008), utilizaram geoprocessamento para o zoneamento de áreas de risco de solos colapsíveis e expansivos no estado. Três condicionantes foram analisadas separadamente (Climatologia, Pedologia e Geologia) e depois as informações foram cruzadas, resultando em cartas de zoneamento que sintetizam esses 3 condicionantes para os dois fenômenos. Como resultado, encontraram que 12,5% do estado apresenta alto risco, 38,7% apresenta um risco médio e 42,5% do território se mostra com baixo potencial de expansão.

Como o solo é o suporte para qualquer obra de engenharia que se resolva fazer, a presença de solos expansivos pode ocasionar danos preocupantes causados pela variação de volume característica, que induz a uma perda de estabilidade (PAIVA, 2016) e consequente deslocamento e levantamento das estruturas.

A estabilização de um solo nada mais é do que a utilização de um processo de natureza mecânica, física ou físico-química, com o objetivo de torná-lo estável para os limites estabelecidos por norma, mesmo sob ação de cargas externas e

ações climáticas variáveis (BAPTISTA, 1976). O processo pode se dar de duas formas: de forma mecânica, onde ocorre a tentativa de melhora das características indesejáveis através da alteração da plasticidade e composição granulométrica, ao retirar ou inserir quantidades pré-determinadas de frações de solo até que as condições da norma sejam atendidas; e de forma química, onde há a modificação permanente das propriedades do solo com a utilização de aditivos como cal, silicatos de sódio, cimento Portland, resinas, cinza de casca de arroz e compostos de fósforo em quantidades suficientes para exercer uma influência positiva no solo (BARBOSA, 2013).

A estabilização do solo com aditivos objetiva a diminuição da variação volumétrica e a diminuição dos esforços sobre as estruturas a serem construídas acima. Ela normalmente ocorre por difusão ou injeção, uma vez que o método da mistura é muito dispendioso e trabalhoso, já que necessita que haja uma posterior compactação (AMORIM, 2004). O aditivo a ser abordado no presente trabalho é a CCA, a cinza de casca de arroz.

1.1 Justificativa e motivação

Apesar de raramente se apresentarem como a causa de perdas humanas, os prejuízos financeiros quando não há a identificação e consideração da existência de solos expansivos no projeto podem ser enormes. Jones e Holtz (1973) relatam que nos Estados Unidos o quantitativo de pessoas afetadas por essa ocorrência é praticamente o dobro das perdas causadas pelas enchentes. O custo mínimo desse fenômeno é de 1 bilhão de pesetas por ano na Espanha (Ayala, 1975) e Driscoll (1984) relata que a Inglaterra gastou mais de 250 milhões de libras durante a década de setenta para sanar o problema e suas consequências.

No Brasil, não há uma estimativa dos custos relacionados a esse fenômeno, mas sabe-se que é um problema recorrente em habitações populares e conjuntos residenciais de 3 a 4 pavimentos. Fissuras e fendas diagonais características podem ser visualizadas acima das portas e ao redor das janelas, além de produzir longas fissuras longitudinais, ondulações e rupturas em pavimentos (FERREIRA, 2008). Tais obras são um bom exemplo do que pode acontecer ao se negligenciar os efeitos de um solo expansivo, já que as

construções populares prezam pela economia de custos e muito raramente realizam ensaios para verificação do potencial expansivo do solo a ser utilizado.

1.2 Objetivo geral e específicos

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a utilização da cinza de casca de arroz na estabilização do solo expansivo de Paulista/PE, promovendo uma orientação no planejamento do uso e ocupação dos solos quanto ao risco à expansividade dos solos e redução do passivo ambiental.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- Verificar as modificações ocorridas nas misturas de solo + CCA, em função dos diferentes teores utilizados;
- Obter o menor teor de cinza de casca de arroz (CCA) que, quando adicionado ao solo expansivo de Paulista-PE, causa a maior redução da variação de volume quando houver mudança de umidade;
- Promover o avanço do conhecimento no processo de melhoramento de solo expansivo com cinza de casca de arroz (CCA);

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico do presente trabalho se divide em três partes. A primeira discorre sobre a mineralogia dos solos e como ela pode influenciar no seu comportamento. Na segunda, é apresentada uma revisão de bibliografia focada nos solos expansivos, com a definição, locais de ocorrência, fatores influentes na observância do fenômeno e métodos de identificação. A terceira parte foca-se nas soluções encontradas para contornar o comportamento desses solos, com enfoque na influência da cinza de casca de arroz na redução da expansividade.

2.1 Mineralogia

A forma e as propriedades físicas e químicas dos solos apresentam como principal fator regente a mineralogia. Alguns minerais conseguem influenciar o comportamento hidromecânico mesmo não sendo seus minerais predominantes na composição. Esses constituintes podem ser divididos em dois grupos: os minerais primários e secundários.

No grupo dos minerais primários, encontra-se o quartzo e feldspato em maior abundância e as micas e os minerais ferromagnesianos (como piroxênios, anfibólios e olivina) de maneira não tão abundante. São bons indicativos para análise do grau de evolução do perfil de solo, já que os feldspatos e os minerais ferromagnesianos, ao passarem pelo intemperismo causado pelas altas temperaturas e umidades das regiões tropicais, sofrem a remoção de sílica e bases e resultam em um solo rico em óxidos de alumínio e ferro. Como se sabe, o Brasil é um país de clima tropical; assim a abundância desses óxidos nos perfis é notável, conseguindo influenciar consideravelmente o comportamento desses solos.

O quartzo é formado de óxidos de sílica, que se ligam com ligações iônicas e covalentes, não apresentando pontos fracos. Apresenta uma baixa substituição isomórfica e capacidade de troca catiônica, assim a retenção de umidade de solos formados por esse mineral apresenta uma natureza mais física do que eletroquímica, dependendo da distribuição dos poros e da distribuição granulométrica. Assim, é um mineral que influencia pouco na retenção de umidade do solo, devido à sua baixa atividade físico-química.

Os feldspatos, por outro lado, apresentam uma maior atividade físico-química, já que são silicatados onde se houve a substituição da sílica por alumínio em alguns pontos e a inserção de metais alcalinos e alcalino-terrosos para balanceamento das cargas resultantes. Tendem a participar da retenção da umidade fisicamente, sob a ótica da capilaridade, e quimicamente, sob a ótica da sucção.

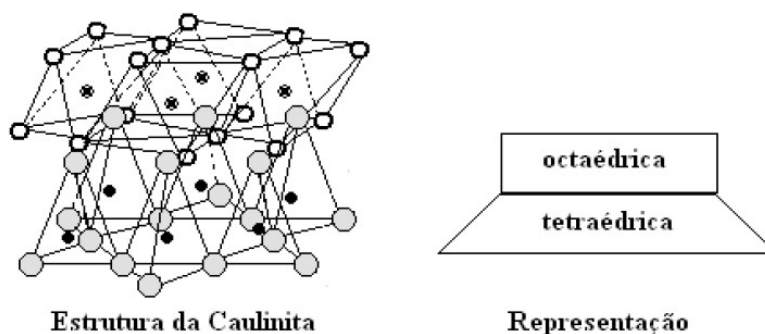
2.1.1 Argilominerais

São silicatos de alumínio hidratados, podendo conter elementos alcalinos e alcalino terrosos, já que o alumínio pode ser substituído por ferro ou magnésio. Sua estrutura cristalina é formada por folhas de octaedros de alumínio ou magnésio e tetraedros de sílica, ambas em arranjo hexagonal. Dependendo da forma que essas folhas se arranjam, as ligações entre elas se tornam mais fortes ou mais fracas, possibilitando a substituição de seus componentes e a entrada de partículas entre as folhas.

2.1.1.1 *Caulinita*

O grupo caulinita é originado da decomposição de feldspatos em climas quentes e úmidos, pela remoção de cátions básicos e silício. Sua estrutura cristalográfica, como pode-se ver na Figura 1 é composta por uma folha de tetraedros de sílica e uma folha de octaedros de alumínio, resultando uma estrutura 1:1, ligada por pontes de hidrogênio. Essa ligação é considerada tão forte que confere características de não expansibilidade e inexistência de troca catiônica nas superfícies.

Figura 1. Estrutura cristalográfica da caulinita (LAMBE E WHITMAN, 1969).



Fonte: PAIVA (2015).

2.1.1.2 *Ilita*

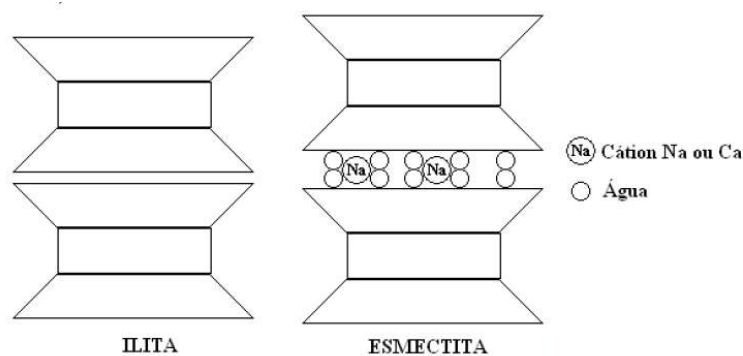
A ilita nada mais é do que um mineral secundário, com uma estrutura do tipo 2:1, com duas folhas tetraédricas e uma folha octaédrica, resultante do estágio intermediário do intemperismo de rochas ígneas e metamórficas com abundância de muscovita. Possui uma maior substituição de silício tetravalente por alumínio, conferindo maior carga à estrutura, porém apresenta o potássio como cátion neutralizante e por isso não apresenta característica expansiva. Apresenta uma capacidade de troca catiônica superior ao grupo das caulinitas, constituindo-se num mineral onde a retenção de água é dada mais pela sucção (fenômeno químico) do que pela capilaridade (fenômeno físico).

2.1.1.3 *Esmectita*

O grupo das esmectitas também possui uma estrutura do tipo 2:1, porém possuem distâncias interbasais maiores do que as ilitas, como mostra a Figura 2. Englobam as montmorilonitas e outros argilominerais, sendo o primeiro o mais abundante. Apresentam uma grande superfície específica, contribuindo para a baixa permeabilidade do solo.

A sua formação ocorre em locais com más condições de drenagem, abundância de sílica, um meio alcalino com alta disponibilidade de cátions trocáveis, com presença dominante de cátions divalentes como cálcio e magnésio em detrimento de cátion monovalentes como sódio e potássio, e evapotranspiração maior do que a precipitação. Possuem alta capacidade de troca catiônica e por isso aumentam a atividade físico-química dos solos, ampliando sua capacidade de expansão e contração. Apresentam alta afinidade com a água, influenciando positivamente na retenção de água pelo solo e dificultando sua saída.

Figura 2. Representação de minerais do tipo 2:1. (LAMBE E WHITMAN, 1969)



Fonte: PAIVA (2015)

2.2 Solos Expansivos

2.2.1 Definição

Vale a pena ressaltar que nem toda expansão do solo pode ser considerada como indicativo de expansividade. É preciso saber diferenciar o fenômeno da expansão intrínseca dos fenômenos de expansão e inchamento. De acordo com Schreiner (1987) *apud* Amorim (2004), a expansividade intrínseca é uma propriedade resultante da composição mineralógica e da superfície específica do mineral que interage com a água, que independe da umidade ou sucção existente, já que é a capacidade característica do argilo-mineral de adsorver moléculas polares. Por outro lado, a variação de volume devido a variação do estado de tensões do solo é chamada de expansão enquanto que inchamento é um parâmetro usualmente medido *in loco*, resultante de um deslocamento vertical de um ponto do terreno devido a uma expansão (AMORIM, 2004). Em suma, um argilo mineral com expansividade intrínseca poderá apresentar expansão ou inchamento, mas nem todo inchamento ou expansão é devido a expansividade intrínseca do solo.

Por mais que a referência a esses solos se dê como expansivo, o termo correto é solo potencialmente expansivo. A expansão depende tanto das condições ambientais quanto das propriedades intrínsecas, já que nem todo mineral possui um potencial expansivo. Essa dependência das condições ambientais e intrínsecas se observa quando, por exemplo, solos colapsíveis são inundados sob baixas tensões e apresentam comportamento tipicamente expansivo ou quando solos compactados no ramo seco são umedecidos até

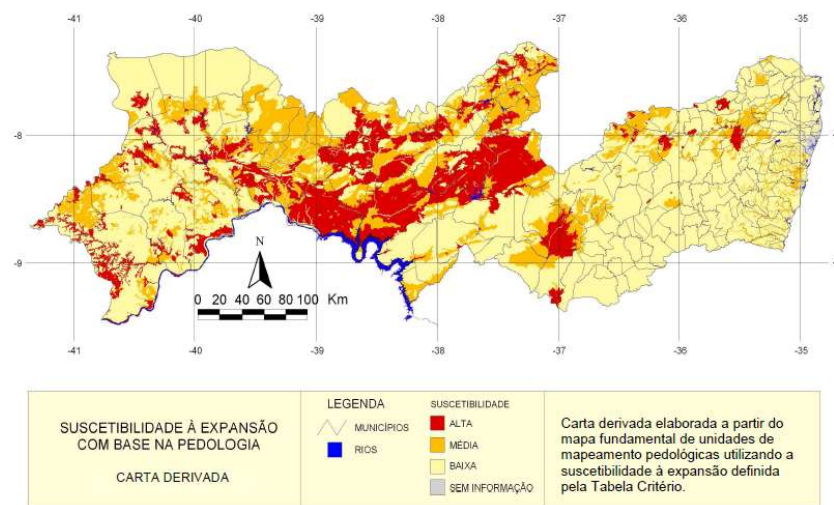
atingirem a sucção zero e expandem ao serem submetidos a baixas tensões. Do mesmo modo, até solos intrinsecamente expansivos podem apresentar expansão nula se estiverem saturados ou forem submetidos à tensão de expansão (FERREIRA, 2008). Assim, para que a expansividade seja verificada é necessário que haja uma ocorrência simultânea de certos fatores.

2.2.2 Ocorrência

Encontrados em praticamente todos os continentes do mundo os solos ditos expansivos são solos que, de acordo com Presa (1980) *apud* Oliveira et al. (2006), apresentam uma variação de volume muito elevada quando inundados, seja em seu estado natural ou compactado. São solos oriundos de rochas ígneas como o gabro, basalto e diábasio, onde os feldspatos e piroxênios formam a montmorilonita e outros minerais secundários, e de rochas sedimentares que possuem o argilo mineral montmorilonita como constituinte, como é o caso do xisto argiloso, calcários e margas.

Cuba, México, Marrocos, Estados Unidos, Argentina, Turquia, China e África do Sul. Esses são apenas alguns países que já registraram ocorrências de solos expansivos ao redor do mundo. No Brasil, incidentes relativos a eles foram reportados com o solo massapê no Recôncavo Baiano, estendendo-se para Pernambuco e Ceará, nas Formação Passa Dois e Grupo Tubarão em São Paulo, Paraná e Santa Catarina e na Formação Santa Maria no Rio Grande do Sul (BARBOSA, 2013; FERREIRA, 2008). Trazendo o foco para o estado de Pernambuco, Ferreira *et al.* (2008), utilizaram geoprocessamento para o zoneamento de áreas de risco de solos colapsíveis e expansivos no estado. Três condicionantes foram analisadas separadamente (Climatologia, Pedologia e Geologia) e depois as informações foram cruzadas, resultando em cartas de zoneamento que sintetizam esses 3 condicionantes para os dois fenômenos. Como resultado, como mostra o mapa da Figura 3 encontraram que 12,5% do estado apresenta alto risco, 38,7% apresenta um risco médio e 42,5% do território se mostra com baixo potencial de expansão.

Figura 3. Mapa de susceptibilidade à expansão com base na pedologia.



Fonte: AMORIM (2004)

Em sua maioria, os solos expansivos são observados em localidades com altas temperaturas e altos teores de umidade, como se nota na Figura 4 condições que favorecem o intemperismo de feldspatos e a formação dos argilominerais que conferem a característica intrínseca de expansividade aos solos.

Figura 4. Locais de ocorrência de solos expansivos pelo mundo.



Fonte: SANTOS (2015)

2.2.3 Fatores influentes na expansividade dos solos

A peculiaridade expansiva do solo se deve, primeiramente, ao mineral predominante da fração argilosa do solo. Estruturas 2:1 como no caso da vermiculita, mica, esmectita e a montmorilonita, que possuem uma camada octaédrica entre duas camadas tetraédricas, possuem ligações mais fracas e distância entre as placas maior que 10 Å, o que facilita a entrada da água entre as camadas, levando à expansão. A natureza dos cátions presentes também é determinante para o seu comportamento, já que atua como um floculador, diminuindo a força de repulsão entre as placas. Se esse cátion for o sódio a argila absorve água e expande, se o cátion for cálcio ou magnésio a capacidade de absorção da água é limitada e não se verifica o processo de expansão (PAIVA, 2016). Assim, o potencial expansivo intrínseco do solo está intimamente ligado ao arranjo estrutural de seus argilo-minerais e à capacidade de troca catiônica deles (OLIVEIRA et al., 2006).

Ferreira (1988) *apud* Amorim (2004) afirma que a potencialidade de expansão de um solo também depende do seu teor de umidade. Ferreira (2008) corrobora a afirmação, ao pontuar que quanto maior o valor de umidade inicial, maior a expansibilidade e menor a colapsibilidade de uma amostra quando se mantém a tensão vertical de consolidação. Quando se verifica a condição de solo não-saturado - onde seu teor de umidade encontra-se equilibrado com a transpiração da vegetação presente, a ascensão capilar da água e a evaporação da superfície do terreno - há a maior potencialidade para a ocorrência do fenômeno, que se manifesta quando há a perturbação desse equilíbrio, por fatores naturais ou antrópicos.

Ayala *et al.* (1986) e Ferreira (1999) apontam como fatores naturais as variações sazonais na umidade da franja mais superficial do terreno (conhecida como capa ativa) devido a relação entre os processos de precipitação, evapotranspiração e infiltração. Em períodos de estiagem, esses solos apresentam rachaduras e em períodos chuvosos, onde a precipitação excede a evapotranspiração, apresentam um comportamento expansivo. Como fator antrópico, Ferreira (1999) diz que uma obra dificulta a troca natural de umidade com a atmosfera, criando um desequilíbrio em relação às áreas circunvizinhas.

Tal desequilíbrio pode provocar fluxos hídricos horizontais até que o equilíbrio seja reestabelecido.

Um terceiro fator para a ocorrência do fenômeno é a tensão de consolidação ao qual está submetido na condição natural. O comportamento expansivo ou colapsível do solo devido a tal fator pode ser facilmente explicado utilizando-se os conceitos de estrutura floculada e dispersa propostos por Lambe (1958). Quando no estado natural, o solo está sob sucção e as suas partículas se dispõem aleatoriamente. Quando inundado, as forças de adsorção e tensão osmótica alteram esta estrutura para uma mais dispersa, à medida que a água entra em contato com as partículas de solo. Nesse momento, se a tensão de consolidação do solo é elevada, há uma tendência à orientação das partículas, fazendo com que haja uma compressibilidade progressiva do solo e uma situação no qual o solo comprime-colapsa.

Se, por outro lado, a tensão sobre o solo for menor que a sua tensão de expansão, ele expande. Isso pode ser explicado quando se observa que antes da inundação há uma grande tensão interna entre os grãos causada pela tensão vertical imposta. Quando ocorre a inundação, a uma tensão bem menor do que àquela a qual o solo estava submetido, há um alívio na tensão interna entre as partículas devido à redução da sucção e verifica-se uma expansão do solo. Porém, pode acontecer de o solo nem expandir nem colapsar, situação observada em ensaios onde para cada tensão vertical de inundação há um OCR (*over consolidation ratio*, a razão entre o maior valor de tensão efetiva a que o solo foi submetido e o valor da tensão efetiva presente) e um índice de vazios crítico associado, para o qual o solo nem apresenta comportamento expansivo, nem colapsível (FERREIRA, 2008).

Outro fator influente para a situação é a velocidade de percolação do permeante no solo (se é maior, menor ou igual à velocidade com a qual ocorre a destruição das ligações das partículas), bem como sua natureza. Ferreira (1995) constatou que a potencialidade para expansão e colapso se mostra maior quando a velocidade de inundação é baixa. O tipo de permeante também controla o desenvolvimento do fenômeno, uma vez que as propriedades físico-químicas como tensão superficial, viscosidade e momento dipolar regulam a velocidade de penetração, como Moll e Reginatto (1972) e Reginatto e Ferrero

(1973) encontraram em seus ensaios edométricos duplos com águas de origens e pH's diferentes.

2.2.4 Métodos de Identificação

Quando se trata da identificação de um solo expansivo, o objetivo é graduar e quantificar o seu potencial expansivo. A ciência ainda carece de uma definição padrão para esse potencial e cada autor o define da sua maneira. Holtz (1959) caracteriza o potencial expansivo como a mudança de volume de uma amostra indeformada seca ao ar enquanto Seed *et al.* (1962) apresenta a definição de que se trata de uma mudança de volume de uma amostra remodelada.

A mesma carência se mostra na determinação de um método universal para a classificação da expansão. Cada teste tem seus índices base e é muito comum, ao serem aplicados, que ocorra disparidades na classificação, necessitando de um segundo ou terceiro método para a confirmação da característica. McCormack e Wilding (1975) *apud* Kariuki e Meer (2004) afirmaram em seu trabalho que a quantificação da fração argilosa era um índice confiável para a previsão do potencial expansivo do mesmo jeito que os limites de Atterberg previam solos com predominância de ilita. Porém, isso não se verificou nos trabalhos de Yule e Ritchie (1980) e Gray e Allbrook (2002), onde reportaram que não havia relação alguma entre a porcentagem de argila e a expansividade intrínseca do solo.

A identificação correta desse solo apenas com a percepção visual é difícil, necessitando de exames complementares para a sua confirmação. Índices normalmente utilizados para a caracterização dos solos como granulometria, SPT e limites de consistência, plasticidade muitas vezes não são suficientes para a alegação da existência de uma expansividade intrínseca do solo.

Ayala et al. (1986) *apud* Amorim (2004) aponta características que, sem a necessidade de ensaios mais elaborados, podem ser indícios da existência de tais solos. Entre elas, temos:

- Ausência de vegetação caducifólia;
- Solos de tonalidade cinzenta, esverdeada ou azulada;
- Fendas poligonais profundas durante a estação de seca;

- Fácil moldagem quando umedecido e muito pegajoso;
- Grande resistência quando seco, sendo difícil o seu rompimento com instrumentos manuais;
- Em obras podem dar origem à fissuras e rachaduras provenientes dos esforços diferenciados transmitidos à estrutura;
- Ondulações e rupturas em pavimentos e etc.

Segundo Paiva (2016), solos expansivos são normalmente de natureza argilosa ou argilo-siltosa com um percentual retido na peneira 200 geralmente abaixo de 20%. São solos com grande quantidade de finos, com argilo-minerais pertencentes ao grupo das montmorilonitas em predominância. Porém, as argilas expansivas podem controlar o comportamento de qualquer tipo de solo, se sua participação na composição, em peso, é maior que 50%. Gill e Reaves (1957) apud Kariuki e Meer (2004), por outro lado, mostram em seu trabalho que a capacidade de troca catiônica, a saturação e o índice de plasticidade são as propriedades mais representativas na estimativa do potencial expansivo, demonstrando a sua ligação íntima à superfície específica.

Em laboratório, tais solos podem ser reconhecidos com os ensaios de Limites de Atterberg, já que solos com limite de liquidez (teor de água acima do qual a amostra se comporta como um líquido) maior que 50% e limite de plasticidade (teor de umidade abaixo do qual o solo se mostra quebradiço e sem capacidade de ser moldado) maior que 30% usualmente apresentam grande possibilidade de serem classificados como expansivos (PAIVA, 2016). Esses são exemplos de métodos classificados como indiretos, que utilizam limites de consistência, índices físicos ou outros parâmetros de simples obtenção no campo ou no laboratório e possuem caráter orientativo, qualitativo e identificativo, já que não medem diretamente a expansão que o solo pode apresentar e não consideram as tensões aplicadas às amostras in situ (FERREIRA, 2008). Os métodos diretos por outro lado, como ensaios edométricos e de expansão livre, focam na medida da expansão induzida ao solo por inundação ou da tensão necessária para que essa expansão não ocorra, possuindo um caráter mais quantitativo (FERREIRA, 1995).

Chandler (1992) introduz em seu trabalho a técnica do filtro de papel, uma solução barata para medir a sucção do solo, para obras com pouco orçamento.

O método quantifica a sucção na amostra de solo e a relaciona eficientemente com a sucção in situ por meio de uma equação. Tal método é bastante interessante já que a sucção foi eleita como uma das propriedades mais representativas para o potencial expansivo por Gill e Reaves (1957).

Dentre as amostras analisadas por Kariuki e Meer (2004) as que apresentavam coloração laranja, marrom ou avermelhada (indicativo de alto teor de óxidos de ferro e indícios de intenso processo de intemperismo e boa drenagem) possuíam caulinita como argilo mineral dominante e apresentavam baixa expansividade. Por outro lado, solos de coloração cinza, cinza escuro ou pretos apresentavam indícios de drenagem precária e grande porcentagem de esmectita, possuindo alto potencial de expansão. Todas as amostras possuíam predominância de argila então os valores dos limites de Atterberg e saturação se mostraram altos.

Analizando também a capacidade de troca catiônica da amostra, encontrou-se que as bases dominantes para CTC foram Ca^{2+} e Mg^{2+} . Os valores para Na^{+} e K^{+} se mostraram baixos, demonstrando que apresentam baixa correlação com o fenômeno da expansividade. Assim, os autores concluíram que há uma alta correlação entre capacidade de troca catiônica, índice de plasticidade, limite de liquidez, saturação, porcentagem de Ca^{2+} e Mg^{2+} e o potencial expansivo, podendo ser usados para identificar a expansividade do solo. Porém, a porcentagem de argila na amostra, pH e porcentagens de Na^{+} e K^{+} se mostraram falhos na correlação com o fenômeno.

Contudo, para Anderson et al. (1973), o Na^{+} se mostrou um bom índice para a estimativa da expansividade e de acordo com Carter e Bentley (1991) a porcentagem de argila da amostra atua como um divisor de águas fundamental entre os solos que podem apresentar o comportamento expansivo e aqueles que não podem. Como se trata de um campo com muitas disparidades entre as classificações, tais afirmações não devem ser descartadas, já que se tratam de amostras diferentes que reagiram diferentemente aos ensaios.

A Tabela 1 resume os principais métodos diretos e indiretos para a identificação da possível expansividade do solo. Para a utilização dos métodos diretos, há a realização de ensaios de laboratório de granulometria, limites de Atterberg, mineralógicos e químicos. Para os métodos diretos, são usados os

parâmetros de ensaios como o de Expansão Livre e Tensão de expansão, ensaios onde a manifestação da expansividade pode ser induzida ou impedida.

Tabela 1. Métodos de identificação de solo expansivos

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

Fonte: Ferreira (1995).

2.2.4.1 Método indireto de Skempton (1953)

Relaciona a atividade coloidal da argila com o índice de atividade (I_a). Quanto maior a quantidade de argila, maior é o potencial de expansão do solo.

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

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

2.2.4.2 Método direto de Cuellar (1978)

Método baseado em análises de solos expansivos, onde a tensão de expansão e a expansão livre de uma amostra compactada numa umidade ótima são relacionadas com o seu grau de expansividade, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Critério de Cuellar (1978)

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

2.2.4.3 Método direto de Jimenez Salas (1980)

Método onde a tensão de expansão obtida no ensaio a volume constante é relacionada com a gravidade do dano causado à obra, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Critério de Jimenez Salas (1980)

Tensão de Expansão (kPa)	Dano associado
< 20	Sem danos
20 – 50	Pequenas fissuras
50 – 100	Fissuras importantes
100 – 200	Danos graves
> 200	Requerem demolição

2.3 Soluções para solos expansivos

A estabilização de um solo nada mais é do que a utilização de um processo de natureza mecânica, física ou físico-química, com o objetivo de torná-lo estável para os limites estabelecidos por norma, mesmo sob ação de cargas externas e ações climáticas variáveis (BAPTISTA, 1976). O processo pode se dar de duas formas: de forma mecânica, onde ocorre a tentativa de melhora das características indesejáveis através da alteração da plasticidade e composição granulométrica, ao retirar ou inserir quantidades pré-determinadas de frações de solo até que as condições da norma sejam atendidas; e de forma química, onde há a modificação permanente das propriedades do solo com a utilização de aditivos como cal, silicatos de sódio, cimento Portland, resinas, cinza de casca de arroz e compostos de fósforo em quantidades suficientes para exercer uma influência positiva no solo (BARBOSA, 2013).

Um processo de melhoramento que se apresenta viável para várias estruturas é a utilização de palafitas que se apoiam abaixo da camada ativa e suspendem a estrutura, isolando-a do solo problemático abaixo e deixando espaço para que ele expanda sem causar danos à estrutura (AMORIM, 2004). Outra solução está na substituição do material potencialmente expansivo por um material inerte; contudo, se as camadas abaixo também apresentarem comportamento expansivo, podem forçar o material inerte para cima, ocasionando o mesmo problema que deveria ser evitado. Assim, para a substituição é necessário atentar para a profundidade a ser retirada da camada de solo expansivo e analisar a sua viabilidade de remoção, bem como a existência de jazidas que possam ceder um material inerte de boa qualidade e o correto descarte desse solo potencialmente expansivo a ser retirado.

Outra solução muito utilizada consiste na inundação prévia do terreno para que o solo aumente de volume antes que a estrutura seja posicionada. O método pode ser feito de duas formas: na primeira, realiza-se a escavação do material e a sua recompactação, com injeção de água pressurizada para fraturar o solo mecanicamente e facilitar a entrada de água por entre as suas partículas. Na segunda, realiza-se também a escavação manual do material a ser melhorado, seguida de uma compactação com camadas de até 20 cm e umidade além da ótima (REED, 2006).

O trabalho de Reed (2006) trata de uma solução alternativa, sendo o objeto do estudo um solo do Texas, constituído de uma argila calcária com moderada e alta plasticidade, resultado do intemperismo do calcário e xistos que originam argilas muito plásticas. Tal solo apresentava movimentos verticais da ordem de 10 a 25 cm, sendo o maior registro de 40 cm. A obra a ser realizada se constituía de um galpão industrial para o qual a solução de palafitas se mostrava inviável.

A solução adotada foi a seguinte: houve o tratamento de uma tira de solo ao longo do perímetro do edifício com a sua pré-inundação, originando uma barreira que reduziu o movimento da frente de umedecimento, efetivamente isolando a argila no interior do ganho de umidade e posterior expansividade. A esse método, o autor se refere como “Picture frame”.

Porém, é importante salientar que o método não se mostra eficiente abaixo do nível d’água, já que a água presente pode influenciar na hidratação da argila isolada. Além disso, o solo a ser tratado deve possuir a camada expansiva apoiada em rocha sã ou depósitos aluvionares apoiados em camadas pouco intemperizadas e rochas sãs.

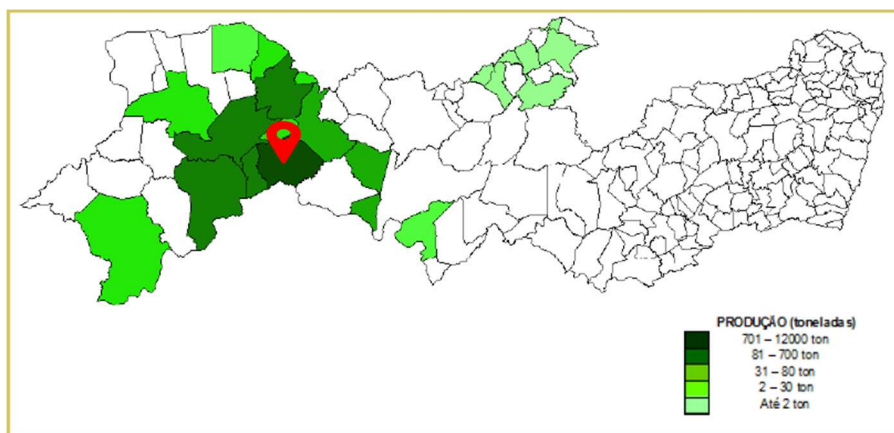
A estabilização do solo com aditivos objetiva a diminuição da variação volumétrica e a diminuição dos esforços sobre as estruturas a serem construídas acima. Ela normalmente ocorre por difusão ou injeção, já que o método da mistura é muito dispendioso e trabalhoso, já que necessita que haja uma posterior compactação (AMORIM, 2004). O aditivo a ser abordado nessa pesquisa é a CCA, a cinza de casca de arroz.

2.3.1 O emprego da CCA na estabilização de solos expansivos

O arroz é cultivado em cerca de 150 milhões de hectares pelo mundo e, para mais da metade da população mundial, se constitui como base fundamental da alimentação. Em 2018, a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), aponta que a produção mundial de arroz se encontra em torno de 773 milhões de toneladas. Só no estado de Pernambuco, se registrou em 2017 uma produção de cerca de 240,6 milhões de toneladas de arroz, com destaque para a cidade Cabrobó, situada na mesorregião do São Francisco

conforme mostra Figura 5, responsável por 90% da produção do grão (IBGE, 2017).

Figura 5. Municípios produtores de arroz do estado de Pernambuco, com ênfase em Cabrobó.



Fonte: CONSTANTINO (2018)

Seu processo de beneficiamento se dá nos engenhos, gerando como produtos o grão, o farelo e a casca de arroz. De acordo com Della *et al.* (2005), para cada tonelada de arroz produzida, 23% representa a quantidade de casca produzida e 4% corresponde às cinzas. Como a casca possui um baixo valor comercial, por ser constituída de SiO_2 e fibras que não possuem valor nutritivo, impossibilitando sua utilização para alimentação, seu uso é bastante limitado (ISLABÃO, 2013). O descarte inadequado desse resíduo gerava um grande problema de poluição em lavouras e fundo de rios, porém ele começou a ser aproveitado como matriz energética para a indústria, uma vez que apresentava um custo menor em relação à lenha e um poder calorífico comparável ao eucalipto e a acácia negra. (HOFFMAN *et al.*, 2007; ROESSLER *et al.*, 2006; QUIRINO *et al.*, 2005). Com isso, o problema da disposição da casca de arroz foi solucionado, mas outro problema surgiu: o que fazer com a cinza resultante da sua queima.

A composição de CCA pode mudar de acordo com as condições culturais, ano da colheita, preparação da amostra, fatores geográficos e métodos de análise (HOUSTON, 1972). Ela tem sido usada em compostos de borracha natural, como substituto de areia em argamassas resultando num menor custo, na fabricação e blocos e painéis para a construção civil substituindo a fibra de madeira e na estabilização de solos. As indústrias oferecem a cinza a custo zero

para agricultores e, apesar de ser comumente usada nas lavouras, não há estudos suficientes sobre o seu real potencial estabilizador (ISLABÃO, 2013).

Ribeiro *et al.* (2014) lista os principais motivos para esse material ser utilizado como principal aglomerante dentre as cinzas vegetais. O primeiro motivo é o fato de que é a cinza cuja reação de formação possui o maior rendimento, produzindo uma quantidade maior do que as outras cinzas vegetais. Além disso, a CCA possui uma estrutura alveolar com grande área específica e a há uma produção gigantesca de arroz pelo mundo, tornando esse insumo um aglomerante fácil de ser encontrado. Alcântara *et al.* (2017) corrobora a ideia de que se trata de um material de alta pozolanicidade, com comportamento semelhante às cinzas amorfas quando se analisa a micro sílica ativa no composto. Sua utilização é estudada desde a década de 70, principalmente na Índia e Estados Unidos.

O princípio do seu funcionamento é simples: a expansão do solo só se observa quando há a interação desse material com a água. Assim, levanta-se a hipótese de que se essa interação for reduzida, o fenômeno também será reduzido. A cinza de casca de arroz, por ser um material muito fino e com alta capacidade de retenção de água, envolve as partículas de solo, dificultando a interação com o meio, e consequentemente reduzindo a expansão do solo.

Em suas pesquisas, Ribeiro *et al.* (2014) observou que em uma mistura com 1% de CCA com o solo, o percentual de expansão caiu de 26% (solo natural) para 20%. Ao se aumentar a porcentagem de CCA na mistura, observou-se a continuidade da diminuição da expansão, chegando a cerca de 16% quando a mistura era de 7%. Constantino (2018) também observou a redução da expansividade com o aumento da porcentagem de cinza, passando de 16% (solo natural) para 3% , para uma mistura de 10%.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico são apresentados os materiais e métodos empregados para a investigação da influência da cinza de casca de arroz no solo expansivo de Paulista, objetivando a caracterização física e mecânica do solo natural e das misturas solo-CCA.

3.1 Caracterização física da amostra

Para a caracterização física, a amostra foi preparada de acordo com a NBR 6457/16 e para o ensaio de compactação, preparada de acordo com a NBR 7182/16. Os ensaios de caracterização física realizados foram:

- Determinação do Limite de Liquidez, de acordo com a NBR 6459/16;
- Determinação do Limite de Plasticidade, de acordo com a NBR 7180/16;
- Análise granulométrica, de acordo com a NBR 7181/16;
- Determinação da massa específica, de acordo com a NBR 6508/16;
- Determinação da umidade ótima, de acordo com a NBR 7182/16;

3.1.1 Preparação das misturas

Realizou-se as misturas para ensaios de caracterização física, expansão livre e tensão de expansão tomando-se o peso seco da amostra de solo e adicionando cinza de casca de arroz (CCA) nas porcentagens de 1%, 3%, 5%, 7% e 10%. As misturas foram homogeneizadas e os ensaios foram realizados após 1 hora, 7 dias e 28 dias.

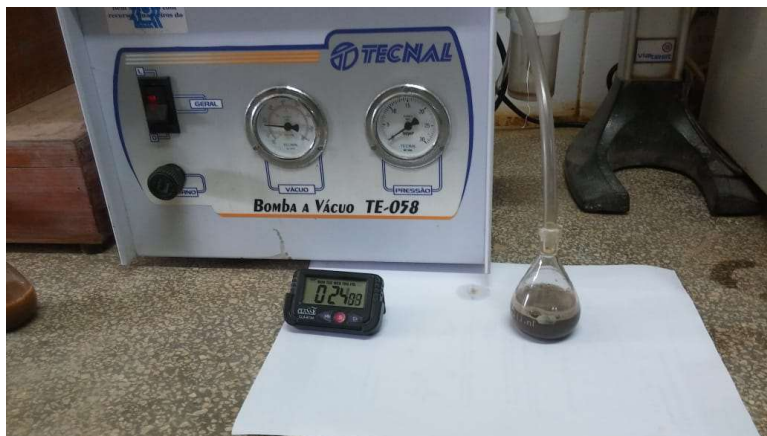
3.1.2 Determinação da massa específica

Para a determinação da densidade real dos grãos foi realizado o ensaio conforme a NBR 6508/16, utilizando uma bomba à vácuo da marca Tecnal, modelo TE-058, mostrada na Figura 6. Tomou-se 50 g da amostra seca ao ar e transferiu-se para um picnômetro de 500 cm³, adicionando-se água destilada em seguida. Submeteu-se o picnômetro a um vácuo de, no mínimo, 88 kPa para a remoção de todas as partículas de ar da amostra e em seguida deu-se a pesagem do recipiente. A densidade real dos grãos é calculada pela seguinte fórmula:

$$\delta = \frac{M_1 * 100 / (100 + h)}{(M_1 * \frac{100}{100 + h} + M_3 - M_2)}$$

Onde M_1 representa o peso do picnômetro mais o solo, M_2 representa o peso do picnômetro com a água e o solo dentro e M_3 se refere ao peso do picnômetro cheio de água.

Figura 6. Ensaio para determinação da densidade real dos grãos, conforme NBR 6508/16



Fonte: Autora.

3.1.3 Determinação do Limite de Liquidez

A determinação do limite de liquidez se deu de acordo com a norma NBR 6459/17. Em uma cápsula de porcelana se adicionou água destilada em pequenos incrementos até que se atingisse uma consistência de, inicialmente, 35 golpes. A mistura foi posta no equipamento de Casagrande, onde os golpes contra a base aconteciam em queda livre, numa velocidade de duas voltas por segundo. Assim que as bordas se fecham em um comprimento de no mínimo 13 mm, o número de golpes é anotado e uma amostra representativa daquela umidade é recolhida e levada para a estufa. Adiciona-se mais água e repete-se o processo por pelo menos mais três amostras que se mostrem representativas dos valores entre 35 e 15 golpes. Com esses valores, um gráfico mostrando o número de golpes e a sua respectiva umidade é criado, de onde se passa uma reta e descobre-se o teor de umidade para que necessite de exatamente 25 golpes para que haja o fechamento das bordas abertas pelo cinzel na mistura posicionada no aparelho. Tal teor é o limite de liquidez.

3.1.4 Determinação do Limite de Plasticidade

Para a determinação do Limite de Contração, adiciona-se água até a obtenção de uma pasta homogênea, de consistência plástica. Reserva-se 10 g e forma-se uma bola, rolando-a com a pressão da palma da mão sobre uma superfície de vidro, objetivando a aquisição da forma de um cilindro de 3 mm de diâmetro. Se a fragmentação da amostra ocorrer antes do diâmetro de 3 mm, deve-se adicionar mais água. Quando o cilindro estiver moldado, deve-se reservar pedaços de 10 cm, aproximadamente, e determinar sua umidade por meio de uma estufa. Três umidades devem ser medidas.

3.1.5 Análise Granulométrica

Com a amostra preparada de acordo com a NBR 6457/16, passar o material na peneira de 2,0 mm (peneira 10) para a separação entre o material utilizado no peneiramento graúdo e miúdo.

3.1.5.1 *Peneiramento Graúdo*

Do que ficou retido na peneira de 2,0 mm, passar pelas peneiras de abertura de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,7 mm e 2,0 mm, especificadas de acordo com a NBR 5734/16. Após o peneiramento, lavar o que ficou retido na peneira de 2,0 mm com água corrente com baixa vazão, a fim de eliminar o material fino aderente e secar em estufa a 105°C /110°C, até constância de massa.

3.1.5.2 *Peneiramento Miúdo*

Do que passar na peneira de 2,0 mm, separar 70 g para o ensaio de sedimentação, lavar todo restante que ficou retido na peneira de abertura de 0,075 mm e secar em estufa a 105°C /110°C, até constância de massa. Após essa etapa, realizar o peneiramento utilizando as peneiras de abertura de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,4 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, todas de acordo com a NBR 5734/16.

3.1.5.3 *Ensaio de Sedimentação*

Com os 70 g da amostra que passou na peneira de 2,0 mm, adicionar 125 ml de uma solução de hexametáfosfato de sódio em concentração de 0,0475 g/cm³ e deixar em repouso por 12 horas. Após esse período, mover a mistura para o copo de dispersão e completar com água destilada até a demarcação estabelecida pela norma. Utilizar o dispersor por aproximadamente 15 minutos e completar a solução com água destilada até completar 1000 cm³, transferindo para uma proveta de vidro. Agitar a proveta por aproximadamente 1 minutos para manter as partículas em dispersão e imediatamente após colocá-la delicadamente sobre uma mesa, anotando a hora exata do início da sedimentação. Mergulhar o densímetro na dispersão e efetuar leituras em tempos de 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 25 horas.

3.1.6 Ensaio Proctor Normal

Com a amostra preparada de acordo com a NBR 6457/16, numa bandeja metálica, adicionar água gradativamente, revolvendo o material até a umidade se distribua homogeneamente por toda amostra.

De acordo com o tipo de energia desejada, consultar a Tabela 1 da NBR 7182/16 para a determinação do número de camadas a se compactar no corpo de prova e o número de golpes por camada. Para um ensaio Proctor Normal, com um cilindro pequeno, o número de camadas é 3 e o número de golpes por camada é 26.

Molda-se assim o corpo de prova, pesa-se e o destorroa, adicionando mais água e repetindo todo o processo. Proceder dessa maneira até que se tenham informações sobre cinco pontos da curva de compactação, dois no ramo seco, um próximo da umidade ótima e dois no ramo úmido.

3.2 **Caracterização da expansividade**

3.2.1 Ensaio de expansão livre

Utiliza-se células edométricas convencionais padronizadas, como mostra a Figura 7. A moldagem se dá com anéis de aço inoxidável com 20 mm de altura e 60 cm² de área e é aplicada uma tensão pequena, de 7 kPa, acompanhando-

se a expansão do solo até a sua estabilização, que normalmente acontece 48 horas depois do início do ensaio.

Figura 7. Célula edométrica modelo “Ortigão”.



Fonte: CONSTANTINO (2018)

3.2.2 Ensaio de expansão a volume constante

Molda-se a amostra de maneira análoga àquela feita para o ensaio de expansão livre. Porém, após a inundação qualquer aumento de volume é impedido com a adição de uma sobrecarga, que pode ser observada na Figura 8, objetivando a constância do volume por todo o ensaio. Admite-se uma expansão de 0,02 mm para a colocação da sobrecarga e o somatório de todas as sobrecargas colocadas até sua estabilização resulta na tensão de expansão do solo a volume constante.

Figura 8. Ensaio de expansão a volume constante em andamento.



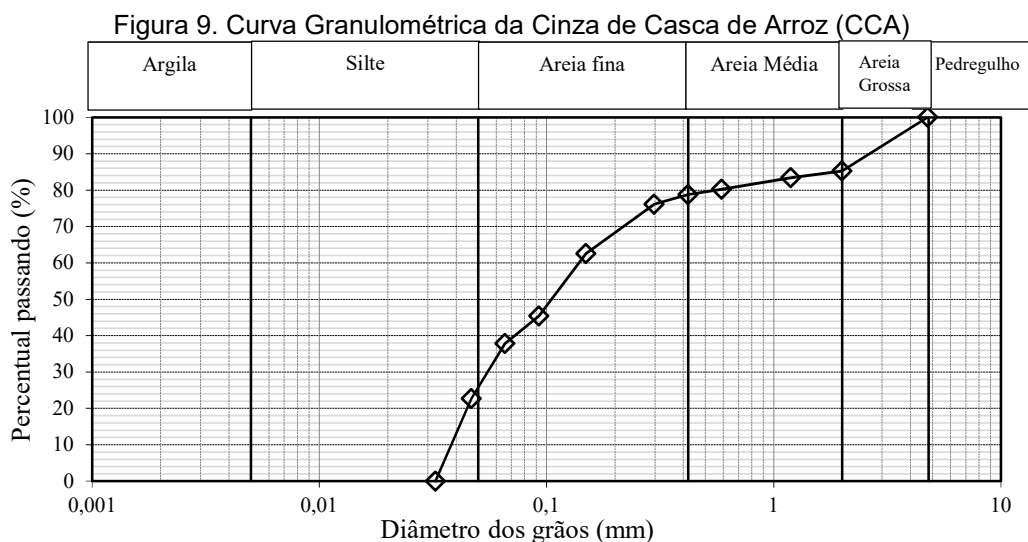
Fonte: Autora.

4 RESULTADOS

Apresentam-se os resultados dos ensaios feitos no solo de Paulista e suas misturas com o CCA. As análises serão feitas comparando os resultados das misturas de 1%, 3%, 5%, 7% e 10% com os resultados do solo natural e da literatura. São apresentados os resultados para a caracterização física, limites de consistência, ensaio Proctor Normal e caracterização da expansividade.

4.1 Caracterização física da cinza de casca de arroz

Os mesmos ensaios de caracterização feitos para o solo natural, foram repetidos para a cinza de casca de arroz. Sua curva granulométrica, como mostra a Figura 9, apresenta grãos com diâmetros que variam entre 0,03 e 5 mm, tendo em média, diâmetros entre 0,2 mm e 1mm, correspondendo ao tamanho do silte ou areia fina.



Como a Tabela 4 mostra, a CCA apresenta um peso específico dos grãos de 19,1 kN/m³, um peso específico aparente seco máximo de 5,15 kN/m³ e uma umidade ótima de 109%. Não possui limite de liquidez, o que leva a ser classificado, com base no seu índice de plasticidade, como um material de comportamento não plástico e não líquido.

Tabela 4. Parâmetros da classificação física da cinza de casca de arroz

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

4.2 Caracterização física do solo natural e misturas

4.2.1 Caracterização Granulométrica

A análise granulométrica tanto para o solo quanto para as misturas, se fez de acordo com a norma NBR 7181/2016, com o ensaio de peneiramento para a parcela de grãos retida na peneira 200 e ensaio de sedimentação para a porcentagem de finos do solo. No Quadro 1 pode-se observar as porcentagens das frações do solo, tanto para o solo natural quanto para as misturas.

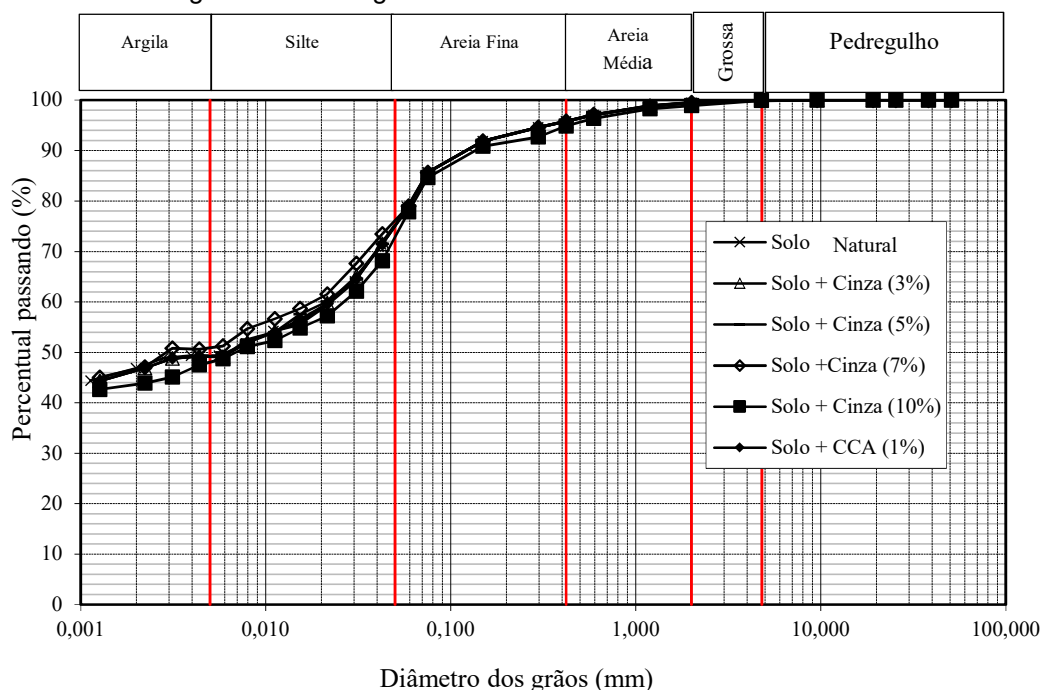
Quadro 1. Caracterização Granulométrica do Solo Natural e misturas

Caracterização Granulométrica									
Amostra				Solo natural	Solo +1%	Solo + 3%	Solo + 5%	Solo + 7%	Solo + 10%
Granulometria NBR 7181/2016	Peneiramento (% passante)	2"	50,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
		1 1/2"	38,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
		1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
		3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
		3/8"	9,52	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
		No. 4	4,76	100,0	99,9	99,9	99,9	100,0	99,9
		No. 10	2	99,7	99,5	99,5	99,5	99,5	98,9
		No. 16	1,19	98,8	98,9	98,8	98,8	98,7	98,3
		No. 30	0,59	95,5	97,1	97,1	97,1	97,1	96,4
		No. 40	0,42	93,3	95,8	95,8	95,8	95,8	94,9
		No. 50	0,3	91,3	94,6	94,6	94,6	94,6	92,7
		No. 100	0,15	87,0	91,9	91,9	91,9	91,9	90,9
	No. 200	0,08	79,1	85,6	85,7	85,7	85,7	84,7	
	Sedimentação	% das amostras por tamanho dos grãos	0,058	71,2	78,8	78,9	78,8	79,0	77,9
			0,042	64,1	71,4	71,5	71,5	73,5	68,1
			0,03	55,8	64,7	65,1	64,6	67,6	62,1
			0,021	54,6	59,6	59,8	60,1	61,5	57,2
			0,015	53,4	56,5	55,9	57,5	58,7	54,8
			0,011	49,9	54,0	54,1	54,0	56,7	52,4
			0,008	47,5	51,9	51,9	52,5	54,7	51,1
			0,006	45,1	49,2	49,1	49,1	51,3	48,7
			0,004	43,9	49,2	49,3	49,2	50,6	47,5
			0,003	43,5	48,8	48,8	48,8	50,8	45,1
			0,002	42,3	46,8	46,8	46,8	47,0	43,9
			0,001	38,0	44,3	44,3	44,3	45,0	42,6
Pedregulho %			0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	1,1	
Areia %			28,6	20,7	20,6	20,7	20,5	21,0	
Silte %			17,8	22,3	22,9	21,3	20,3	23,1	
Argila %			53,4	56,5	55,9	57,5	58,7	54,8	
Relação silte/argila			0,33	0,39	0,41	0,37	0,35	0,42	

O solo de Paulista e as misturas com CCA apresentaram um percentual passante na peneira 200 com média em torno de 80%. Isso mostra que se trata de um material formado, em sua maior parte, por finos. Solos argilosos ou argilo-

siltosos apresentam essa característica e solos expansivos, em sua maioria, são compostos por grandes porcentagens de materiais argilosos. A Figura 10 mostra a curva granulométrica do solo natural e das misturas. Observa-se que mesmo com o acréscimo da cinza de casca de arroz, para esse aspecto, não há grandes diferenças quanto ao solo natural.

Figura 10. Curva granulométrica do Solo natural e misturas



4.2.2 Limites de consistência

Os resultados dos limites de consistência encontram-se discriminados na Tabela 5. O Limite de Liquidez variou entre os valores de 58 e 61%, enquanto que o limite de plasticidade ficou entre 25 e 31, indicando um solo de alta plasticidade, já que o Índice de plasticidade foi, em todos os casos, maior que 15%. O índice de atividade, calculado de acordo com Skempton (1953), se apresentou sempre menor que 0,75 – variando entre 0,439 e 0,650, sinalizando que se trata de uma argila inativa, onde a fração argilosa só confere características a solo quando presente em grande quantidade. No estudo de Constantino (2018), para teores de mistura próximos, o índice de atividade variou de 0,61 a 0,55.

Tabela 5. Limites de Consistência - Solo natural de Paulista e Misturas com CCA

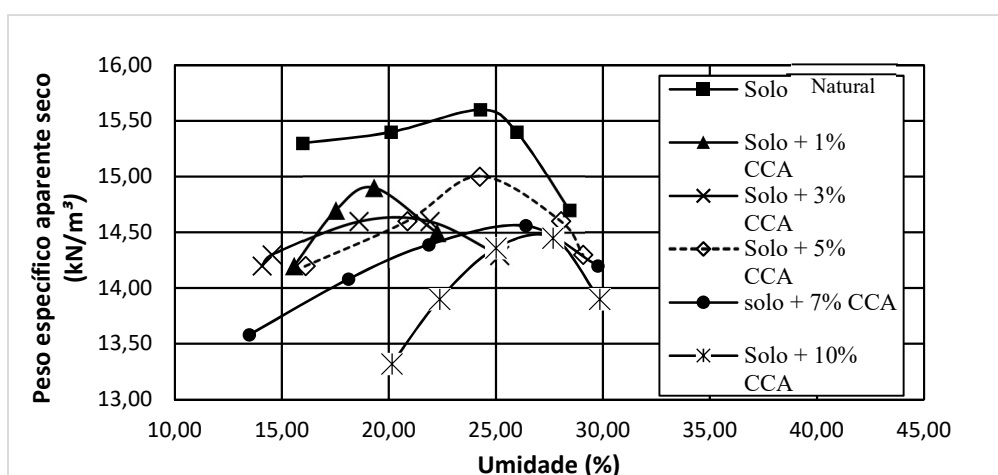
AMOSTRA	Solo natural	Solo + 1%	Solo + 3%	Solo + 5%	Solo + 7%	Solo + 10%
Limite de liquidez	58	56	57	57	57	61
Limite de plasticidade	25	22	26	26	31	29
Índice de plasticidade	33	34	31	28	29	32
Índice de atividade	0,617	0,601	0,572	0,439	0,462	0,584
Classificação SUCS	CH	CH	CH	CH	CH	CH
Classificação AASHTO/TRB/HRB	A-7-6	A-7-6	A-7-5	A-7-6	A-7-6	A-7-6

O solo e as misturas, pela classificação SUCS, se apresentaram como um solo CH, como pode-se ver na Tabela 5. Se trata de uma argila de alta compressibilidade, muito plástica. Pela classificação AASHTO, se trata de um solo argiloso fraco, com variação nas misturas entre solo argiloso com moderado IP (A-7-5) e alto IP (A-7-6). Os resultados corroboram àqueles encontrados por Constantino (2018).

4.2.3 Ensaio Proctor Normal

Na Figura 11, pode-se ver as curvas de compactação tanto do solo natural quanto das misturas. Nota-se que todas as curvas possuem um comportamento análogo, com apenas um pico, onde o seu peso específico aparente seco é o maior. Trata-se de um comportamento típico de solos finos, onde o teor de água ótimo é normalmente mais elevado do que os solos granulares e seu peso específico menor.

Figura 11. Curva de compactação do Solo natural de Paulista e suas misturas com cinza de casca de arroz

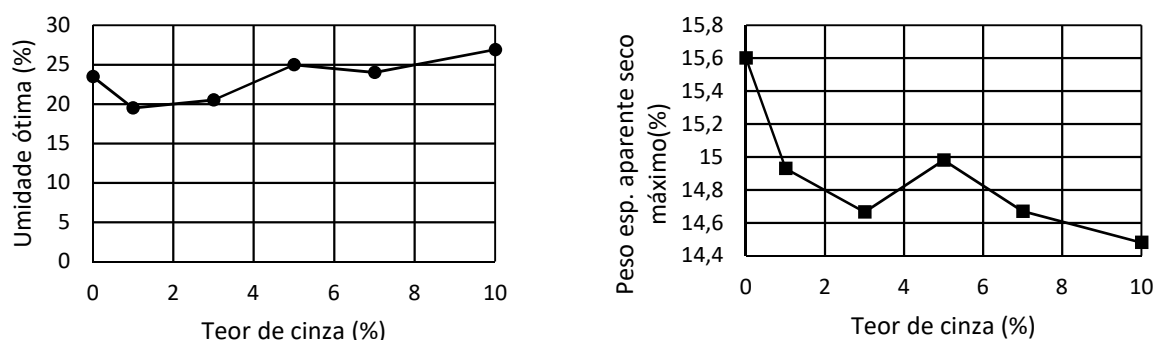


Verifica-se que o acréscimo da cinza de casca de arroz aumentou a umidade ótima das misturas a partir do percentual de 3%, Tabela 6. Isso se deve ao fato de que a cinza de casca de arroz é um resíduo agrícola com grande superfície específica e pozolanicidade e por causa disso, absorve mais água. Observa-se também uma diminuição contínua do peso específico, que pode ser explicado tendo em vista que a cinza é um material de baixo peso específico e ao ser adicionada, reduz a quantidade de partículas de solo, que possuem peso específico muito maior. Não se verificou tal fato nas porcentagens de 5% e 7%, onde ele apresentou um aumento brusco no valor. Porém, para as outras porcentagens, as tendências para o decréscimo se mantiveram. Ambos os comportamentos podem ser melhor observados na Figura 12.

Tabela 6 - Valores da umidade ótima e peso específico aparente seco máximo do solo e solo-CCA.

AMOSTRA	PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO MÁXIMO (kN/m ³)	UMIDADE ÓTIMA (%)
Solo natural	15,6	23,5
Solo + 1%	14,9	19,5
Solo + 3%	14,7	20,5
Solo + 5%	15,0	25
Solo + 7%	14,7	25,8
Solo + 10%	14,5	26,9

Figura 12. Gráficos da variação da umidade ótima e peso específico aparente máximo em função do teor de cinza da mistura.



4.3 Caracterização da expansividade

4.3.1 Ensaio de Expansão Livre

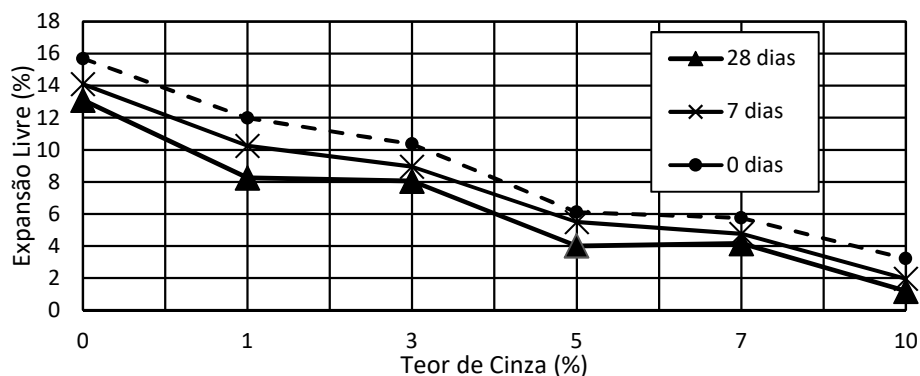
Os ensaios edométricos se deram sob uma sobrecarga de 7 kPa, da maneira convencional. Os corpos de prova foram compactados na umidade ótima, obtendo o maior peso específico aparente seco e consequentemente o maior grau de compactação. A água utilizada foi aquela disponível nas torneiras do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, proveniente dos poços do próprio centro. Os tempos de cura escolhidos para os ensaios foram de 0, 7 e 28 dias e seus resultados encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7. Valores da expansão livre, em percentual, para os diferentes tempos de cura e porcentagens de mistura

Amostra / Tempo de Cura	Expansão “Livre” (%)		
	0 Dias	7 Dias	28 Dias
Solo Natural (compactado)	15,7	14,1	13,1
Solo + 1%	11,98	10,25	8,25
Solo + 3%	10,35	8,95	8,05
Solo + 5%	6,1	5,5	4,00
Solo + 7%	5,75	4,75	4,15
Solo + 10%	3,2	1,95	1,18

Pode-se notar que há um decréscimo considerável no percentual de expansão, tanto com relação ao aumento do teor de cinza adicionado quanto ao tempo de cura, que variou de 15,7 % - solo natural, compactado, a 0 dias – para 1,18, com adição de 10% de CCA e um tempo de cura de 28 dias, conforme Figura 13. Pelo critério de Cuellar (1978), e usando um tempo de cura de 0 dias, apenas a amostra com 10% de CCA apresentaria alguma mudança, passando de alta para média. Porém, considerando o tempo de cura de 7 dias, a amostra com 7% já mostraria média expansividade, enquanto a com 10% já estaria na classificação de baixa expansividade. Para o tempo de cura de 28 dias, o solo com 5% de CCA incorporado também entraria na classificação de média expansividade, levando a confirmar a ideia de que teores menores de cinza precisariam de um maior tempo de reação entre a cinza e o solo para garantir resultados satisfatórios.

Figura 13. Gráfico comparativo dos valores encontrados no ensaio de expansão livre, para diferentes tempos de cura e porcentagens de mistura.



4.3.2 Ensaio de Tensão de Expansão - Volume Constante.

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos nos ensaios de tensão de expansão, utilizando o método de volume constante, para os tempos de cura de 0, 7 e 28 dias. Para o solo natural, observou-se uma tensão de expansão inicial de 81,70 kPa - valor que se modificou com o acréscimo da cinza de casca de arroz, diminuindo até chegar ao valor de 9,807 kPa, quando se adicionou 10% em peso do referido material.

Tabela 8. Resultados dos ensaios de Tensão de Expansão para o solo natural e misturas com CCA.

Amostra / Tempo de Cura	0 Dias	7 Dias	28 Dias
Solo natural (compactado)	81,7	64,6	80,1
Solo + 1%	69,5	62,9	53,1
Solo + 3%	49,0	45,8	40,9
Solo + 5%	38,4	37,6	29,4
Solo + 7%	21,3	18,8	17,2
Solo + 10%	9,8	9,8	8,2

Não foi observada a redução de 100% de expansão para as porcentagens analisadas, cabendo aqui uma análise futura de teores maiores que esses, porém, dependendo do projeto a ser instalado no solo em estudo, o projeto estrutural já pode ser feito com consciência dessa deformação que ainda haverá no solo.

Como se observa na Figura 14 e na Tabela 9, o aumento do teor de cinza é um fator mais determinante na redução da expansão do que o tempo de cura,

já que o percentual de redução dentro de um mesmo teor se apresenta menor do que aquele entre esse teor e o solo natural.

Figura 14. Gráfico comparativo dos valores encontrados nos ensaios de Tensão de Expansão para o solo natural e as misturas com cinza de casca de arroz

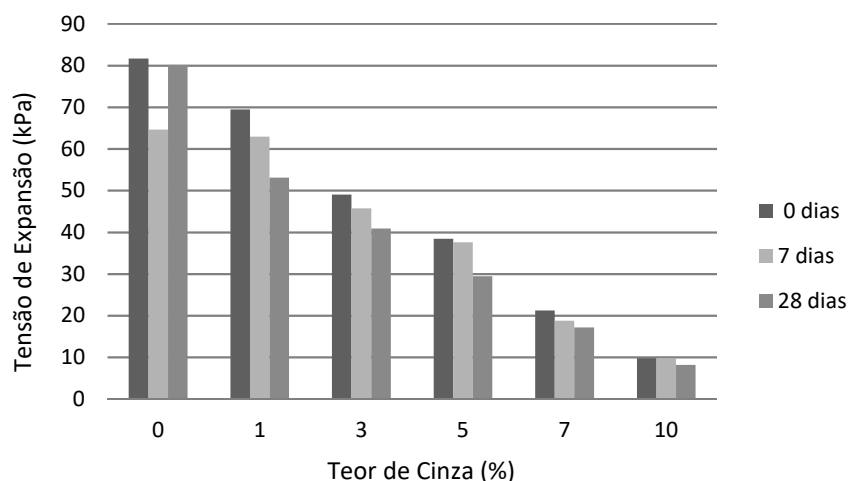


Tabela 9. Resultados comparativos, em porcentagem, da redução na tensão com a adição do teor ao solo natural.

Tensão de expansão (kPa) – Volume constante			
Amostra / Tempo de Cura	0 Dias	7 Dias	28 Dias
Solo + 1%	14,98%	2,59%	33,68%
Solo + 3%	39,99%	29,16%	48,99%
Solo + 5%	52,99%	41,81%	63,27%
Solo + 7%	73,99%	70,90%	78,58%
Solo + 10%	88,00%	84,82%	89,80%

Utilizando o critério de Jimenez Salas (1980), a 0 dias, o solo natural apresenta tendências a aparições de Fissuras Importantes. Conforme mostra a Tabela 10, não há mudança quando se aumenta o tempo de cura, permanecendo na mesma classificação. Porém, quando há o incremento da participação da cinza de casca de arroz, há uma redução na tendência da fissuração das estruturas, passando de Fissuras Importantes (1%) para Fissuras Pequenas (3%, 5% e 7% - a 0 dias) e depois a Sem Danos (7% - a 7 e 28 dias, 10%). A única porcentagem onde o tempo de cura realmente influenciou na mudança da fissuração foi no teor de 7%, onde as avaliações de fissuras passaram de Fissuras pequenas em 0 dias a Sem danos a partir de 7 dias. Tal

resultado é condizente com o estudo de Constantino (2018), onde o percentual de 8%, adjacente ao de 7%, apresenta, desde o tempo de cura de 0 dias, uma redução de fissuração à situação de que não causa mais danos às estruturas.

Tabela 10. Classificação segundo Jimenez Salas (1980).

CRITÉRIO JIMENEZ SALAS (1980)			
Amostra	0 Dias	7 Dias	28 Dias
Solo natural	Fissuras importantes	Fissuras importantes	Fissuras importantes
Solo + 1%	Fissuras importantes	Fissuras importantes	Fissuras importantes
Solo + 3%	Fissuras Pequenas	Fissuras Pequenas	Fissuras Pequenas
Solo + 5%	Fissuras Pequenas	Fissuras Pequenas	Fissuras Pequenas
Solo + 7%	Fissuras Pequenas	Sem Danos	Sem Danos
Solo + 10%	Sem Danos	Sem Danos	Sem Danos

4.3.3 Comparação do uso da cinza de casca de arroz na estabilização de solos de outros locais

De acordo com (1) Constantino (2018), outros autores, também realizaram estudos sobre a adição da casca de arroz, sendo eles: (2) Bezerra (2018) que estudou a estabilização do solo de Brejo da Madre de Deus; (3) Lacerda (2018), que estudou o melhoramento do solo de Cabrobó e por último, (4) Silva (2018), que fez seu projeto utilizando o solo de Agrestina. A Tabela 11 sumariza os resultados para os percentuais de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, para um tempo de cura de 7 dias.

Tabela 11. Resultados da utilização de CCA na estabilização de outros solos – Dados da expansão livre.

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

Adaptado de Constantino (2018).

Nota-se que para todos os solos a maior redução de expansão ocorre para o teor de 10%, chegando a zerar para o solo de Cabrobó. Os dois maiores percentuais de redução se deram nos solos de Paulista e Cabrobó, enquanto em Brejo da Madre de Deus, a redução foi menor do que 50%. O solo de Cabrobó já apresentava um baixo potencial de expansão, enquanto que o de Brejo da Madre de Deus estava entre os maiores valores iniciais, porém o solo de Paulista apresentava um valor considerável e a redução se deu de maneira significativa.

4.3.4 Comparação da estabilização do solo de Paulista utilizando outros materiais.

Além de Constantino (2018), Paiva (2016) também utilizou o solo de Paulista nos seus estudos da estabilização da expansividade desse solo, só que dessa vez utilizado cal. Os percentuais utilizados por esse autor foram de 3%, 5%, 7% e 11%, em peso, e as amostras foram preparadas por compactação na sua umidade ótima e peso específico aparente seco máximo. No solo natural foi verificada uma expansão de 12,3%, diminuindo para 1,1%, 0,2% e chegando a zerar quando foi adicionada a porcentagem de 7%, como pode-se ver na Tabela 12. Analisando-se o resultado pelo método de Cuellar (1978), o solo natural apresentava alta expansividade, mudando para baixa expansividade quando se adicionou apenas 3% de cal. Para que se obtenha um resultado semelhante, é preciso adicionar 10% de cinza de casca de arroz ao mesmo solo.

Tabela 12. Comparativo de diferentes formas de estabilização do solo expansivo de Paulista

Amostra (Paulista)	Expansão Livre(%)		Tensão de Expansão – Volume Constante (kPa)	
	CCA	Cal	CCA	Cal
Solo natural	15,7	12,3	81,7	280,0
Solo + 3%	10,35	1,1	49,03	10,0
Solo + 5%	6,1	0,2	38,41	6,0
Solo + 7%	5,75	0,0	21,25	0,0

5 CONCLUSÕES

Aqui resumem-se as principais conclusões resultantes da análise da utilização da cinza de casca de arroz na estabilização de um solo expansivo, originário de Paulista/PE.

- Da análise física da cinza de casca de arroz, observou-se que os grãos apresentavam dimensões entre 0,3 e 5 mm, mostrando que se trata de um material muito fino. O peso específico real é de $19,1 \text{ kN/m}^3$, enquanto que o peso específico aparente apresenta valor de $5,15 \text{ kN/m}^3$ e uma umidade ótima de 109%. Possui um comportamento não plástico.
- O solo de Paulista apresenta um percentual de grãos passantes na peneira 200 de mais de 70%, caracterizando-o como um solo fino. Apresenta uma porcentagem de argila com valor de 53,4% e de silte de 17,75%, com relação silte e argila da ordem de 0,33, um valor comum entre as argilas expansivas.
- A mistura com a cinza de casca de arroz não causa muita diferença na granulometria, com a relação silte/argila das misturas se mantendo entre 0,40 e 0,30.
- Os índices de plasticidade variaram entre 33 e 28, tendo sido observado uma diminuição desse índice com o aumento da porcentagem de cinza. Porém, todos ainda continuaram maiores que 15, sendo considerados como muito plásticos.
- De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos solos, todas as amostras foram classificadas como argilas muito plásticas e compressíveis, CH.
- De acordo com a AASHTO, o solo natural foi classificado como A-7-6 e as misturas variaram entre solos argilosos fracos com alto IP (A-7-6) e IP moderado (A-7-5).
- As curvas de compactação tanto do solo natural quanto das misturas apresentaram comportamento característico de solos finos, com apenas um pico, bem pronunciado.
- Notou-se uma melhora significativa na trabalhabilidade do material quando o teor de cinza foi aumentado.
- O peso específico aparente diminuiu concomitantemente com o aumento do teor de cinza, devido ao baixo peso específico real que a cinza possui. A

umidade ótima, por outro lado, aumentou à medida que mais cinza foi adicionada à mistura, já que a cinza tem uma grande capacidade de absorver água.

- Com o incremento da cinza de casca de arroz, houve uma diminuição da porcentagem de expansão livre, chegando ao seu valor mais baixo (3,2%) com o percentual de 10%.
- O incremento da CCA também diminui a tensão de expansão, reduzindo de uma situação de fissuras importante para sem danos, com o teor de 10%. Verificou-se que a mudança no teor influenciava mais na redução da expansão do que o tempo de cura.
- Conclui-se que a cinza é uma boa alternativa para o tratamento de solos expansivos, uma vez que, pode levar a reduções de até 8 vezes menos a tensão de expansão inicial. Para se ter como resultado uma situação onde não há danos, recomenda-se usar um teor maior que 7%, porém próximo a ele, já que esse teor apenas apresentava danos graves no período de cura de 0 dias.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5734/2016**: peneiras para ensaio com telas de tecido metálico. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457/2016**: Preparação para ensaio de Compactação e ensaio de Caracterização: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459/2016**: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6508/2016**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180/2016**: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181/2016**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182/2016**: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ALCÂNTARA, M. A. M.; SANTOS, L. P.; SOUZA, A.; LIMA, D. C. (2017). **Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de mistura solo-cal**. Revista Matéria, v.22, n.3, 2017.
- ANDERSON, J.U.; ELFADIL, F.K.; O'CONNOR, G.A. (1973). **Factors affecting the coefficient of linear extensibility in Vertisols**. Soil Soc. Am. J. 37, 298–299.
- AMORIM, S. F. **Contribuição a cartografia geotécnica: Sistema de Informações Geográfica dos Solos Expansivos e Colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC-PE). 2004**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.
- AYALA, J.F. (1975). **Las arcillas expansivas y el carts, dos problemas geotécnicos**. Tecniterrae, n.º 7, 1975, p. 26-31.
- 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: Geologia Ambiental. Instituto Geologico y Minero de España. Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Publicas. España, Madrid.
- BAPTISTA, C. F. N. (1976) **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, RS.

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

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

CARTER, M., BENTLEY, S.P., 1991. **Correlations of Soil Properties**. Pentech Press, London, UK.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. (1972). **A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings**. Discussion. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering, Vol. 92, Issue 2, Mai. 1992, p. 82-89

CONSTANTINO, C. S. (2018) - **Análise do comportamento geotécnico de um solo expansivo no município de Paulista/PE estabilizado com cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2018 (No Prelo)

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

DELLA V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. **Reciclagem de resíduos Agroindustriais: cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica**. *Cerâmica Industrial*, 10(2):22-25, 2005.

DRISCOLL, R. A. (1984). **Review of British Experience of Expansive Clay Problems**. In: *Anais do FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS*, 5th., Adelaide, Preprints of Papers, 1984. p.191-195.

FERREIRA, S.R.M. (1999). **Mapa de Risco a Colapsibilidade e Expansividade de Solos do Estado de Pernambuco – Geotecnia Ambiental**. Relatório Técnico do CNPQ, 100p.

FERREIRA, S.R.M. (1995). **Colapso e expansão em solos naturais não saturados devidos à inundação**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro, VI, 381 (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil).

FERREIRA, S. R. M. (2008). **Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil** In: VI Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, Salvador. EDUFBA. v.2. p. 593–619, 2008.

FERREIRA, S. R. M.; AMORIM, S. F.; VAREJÃO-SILVA, M. A. (2008). **Tecnologia da Geoinformação aplicada aos estudos de solos expansivos e colapsíveis do estado de Pernambuco**. In: II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação, Recife, Set. 2008.

GILL, W.R.; REAVES, C.A. (1957). **Relationships of Atterberg limits and cation-exchange capacity to some physical properties of soil**. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 21, 491–494.

- GRAY, C.W.; ALLBROOK, R. (2002). **Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils**. *Geoderma* 108 (3–4), 287– 299.
- HOFFMANN, R.; JAHN, S. L.; BAVARESCO, M.; SARTORI, T. C. **Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte**. 2007.
- HOLTZ, W.G. (1959). **Expansive clays—properties and problems**. *Q. Colo. Sch. Mines* 54 (4), 89– 117.
- HOUSTON, D. F.; **Rice: Chemistry and Technology**. American Association of Cereal Chemists. St. Paul: MN, 1972, p. 301-52.
- ISLABÃO, G.O. (2013). **Uso da cinza de casca de arroz como corretivo e condicionador do solo**. 2013. Tese (Doutorado em Agronomia), Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2013.
- JIMENEZ, S. J. A. (1980). **Cimentaciones en terrenos expansivos y colapsables**. in: *Geotecnia Y Cimentos 111*, Vol. 1, ED. Rueda, Madrid.PP533-650.
- JONES, D. E.; HOLTZ, W.G. **Expansive soils - hidden disaster**, Civil Eng., A.S.C.E., New York, NY. p. 87-89, Ago. 1973.
- KARIUKI, P. C.; VAN DER MEER, F. **A unified swelling potencial index for expansive soils**, *Eng. Geol.*, 72, 1-8.
- LACERDA, L.S.S.N. (2018) - **Análise do comportamento geotécnico de um solo de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco – Recife. 2018 (No Prelo).
- LAMBE, T. W. (1958). **"Compacted Clays: Structure/Engeneering Behaviour"**. In: *Jnl. of Soil Mech. and Found. Div. A.S.C.E.*, Vol.84, SM5, pp. 682-741.
- MOLL, L.L.; REGINATTO, A. (1972). **Investigación de Fundaciones en Suelos Colapsables**. In: *Anais do III RAMSIF*. Vol I.: 25-35, Bahía Blanca.
- OLIVEIRA, Simões de A.G.; JESUS, A.C. (2006). **Estudo Geológico – Geotécnico dos Solos Expansivos da Região do Recôncavo Baiano**. Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo-USP, São Carlos/SP.
- PAIVA, S. C. **Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca - PE e de suas misturas com Cal**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco.Recife, 2016.
- QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. **Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulóticos**. *Revista da Madeira*, 89:100-106, 2005.
- REED, R. F. (2006). **Alternative earthwork for expansive soils**, *Proc. 4th International Conference on Unsaturated Soils*, ASCE, 315-322.
- REGINATTO, A. R.; FERRERO, J. C. (1973). **Colapse potencial of soils and soil- water chemistry**. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL*

MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. 8, 1973. Proceedings. Moscow, v.2.2, p. 177-1833.

RIBEIRO, K. F. A.; VALIN JR., M. de O.; RIBEIRO JR. I. (2014). **Principais métodos estudados para a Estabilização da Expansão dos Solos Saprolíticos de Filitos da Baixada Cuiabana**. In *Anais do COBRAMSEG 2014*, Goiânia, Set. 2014.

ROESSLER, L. F.; VIVAN, G. A.; SILVEIRA, H. A. T.; BARBOZA, F. da S.; PEREIRA, R. O. **Planejamento e execução de um carbonizador de casca de arroz, com base no reuso de resíduos do processo de beneficiamento de arroz**. In: XV Congresso de Iniciação Científica - Pelotas, 2006.

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

SEED, H.B.; WOODWARD JR., R.J.; LUNDGREN, R. (1962). **Prediction of swelling potential for compacted clays**. J. Soil Mech. Found. Div., A. S. C. E. 88 (SM3), 53–87.

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.

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

YULE, D.F.; RITCHIE, J.T. (1980). **Soil shrinkage relationships of Texas vertisols: 1 small cores**. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 1285– 1291.