



Comportamento geotécnico de um solo expansivo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal hidratada

Geotechnical behavior of an expansive soil stabilized with rice husk ash and hydrated lime

Jayne Araújo Silva^a, Maria Isabela Marques da Cunha Bello^a, Silvio Romero de Melo Ferreira^b

^a Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Centro Acadêmico do Agreste. Rodovia BR-104, Km 59, s/n, Nova Caruaru, Caruaru, Pernambuco, Brasil. CEP: 55002-970. E-mail: jayne.a.silva@hotmail.com, isabelamcvbello@hotmail.com.

^b UFPE, Centro de Tecnologia e Ciências. Avenida Prof. Moraes Rego, n. 1235, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 50670-901. E-mail: sr.mf@hotmail.com.

ARTICLE INFO

Recebido 10 Mar 2020
Aceito 30 Jun 2020
Publicado 30 Jun 2020

ABSTRACT

Expansive soils are unsaturated soils, which are stored clay mined in the increased rainy season and the dry period against its surface. Based on laboratory tests, it is possible to evaluate the expansion stress, the degree of expansion, and the type of clay-mineral component. To reduce or expand the annular soil, use stabilization methods with the use of additive stabilizers. This study presents a physical and chemical characterization of the expansive soil located in the municipality of Agrestina in the State of Pernambuco and the percentages of its mixtures with hydrated lime and rice husk ash (CAA) to combat the soil expansion. Soil expansion was analyzed under natural condition and after optimum compaction, and also in the various percentages of soil mixtures with CCA substitution, by weight, of 2%, 4% 6% 8%, 10%, 12%, and 14 % and with substitution, in lime weight, in the proportions of 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, and 13%. The X-ray diffraction test was performed to identify the soil or clay mineral. The soil, in natural condition, showed variation of 6.58%, overload with 10k Pa, and the average expansion voltage of 155kPa. The replacement of the soil by hydrated lime and CCA reduces the expansion, affects the chemical and physical characteristics, proving to be effective in combating the expansion.

Keywords: Expansiveness, additives, geotechnical property, stabilization.

RESUMO

Solos expansivos são solos não-saturados, que contêm argilominerais que na estação chuvosa aumentam de volume e no período seco contraem em sua superfície. A partir de ensaios de laboratório é possível avaliar a tensão de expansão, grau de expansividade e tipo de argilomineral constituinte. Para reduzir ou anular a expansão do solo, utiliza-se métodos de estabilização com o uso de aditivos estabilizantes. Este artigo apresenta a caracterização física e química do solo expansivo localizado no município de Agrestina, no Agreste de Pernambuco, assim como dos percentuais de suas misturas com cal-hidratada e com cinza de casca de arroz (CAA), para combater a expansão deste solo. Foi analisada a expansividade do solo em seu estado natural e após a compactação ótima, e também nos diversos percentuais das misturas do solo com CCA substituição, em peso, de 2%, 4% 6% 8%, 10%, 12% e 14% e com substituição, em peso de cal, nas proporções de 3%, 5%, 7%, 9%, 11% e 13%. Para identificar o argilomineral do solo foi realizado o ensaio de Difração de Raio X. O solo, em estado natural, apresentou expansão livre de 6,58%, com sobrecarga de 10 kPa e tensão de expansão média de 155 kPa. A substituição do solo natural por Cal-Hidratada e CCA reduziu a expansão, influenciando suas características físicas e químicas, mostrando-se eficaz no combate a expansão.

Introdução

A instabilidade volumétrica ocasionada nos solos expansivos acontece por influência de fatores como tipo de solo, climatologia, estado de tensões, variação da umidade, além da estrutura laminar dos argilominerais tipo 2:1, que englobam as montmorilonitas ou vermiculitas. Na época de estiagem, este solo apresenta altas resistências, sendo difícil a sua remoção. Em períodos mais chuvosos ou em ocasiões que gerem uma elevação da sua umidade, pode-se alcançar valores de expansão elevados (Ferreira, 1995).

Diversas soluções estão disponíveis para corrigir o comportamento expansivo em solos. Ferreira (1995) comenta sobre a necessidade de identificação dos solos problemáticos, pois estes podem causar sérios danos às obras de engenharia.

As estabilizações em solos expansivos podem ser físicas, mecânicas ou químicas. Pinto (2008) relata sobre a influência, quando aplicada a correção granulométrica de solos, da forma, tamanho e distribuição das partículas. Bento (2006) comenta sobre a estabilização química, na qual utiliza aditivos orgânicos ou inorgânicos, como cal, cimento, materiais betuminosos e resinas. Este tipo de estabilização busca melhorar a resistência ao cisalhamento através da adição de ligantes entre o contato dos grãos. Gondim (2008) relata que a estabilização mecânica altera, apenas, a forma como as partículas de solo estão dispostas, ou a granulometria dele, e afirma que se sobressai à compactação e à correção granulométrica.

A cal provém da calcinação do metal de cálcio, sendo um óxido de cálcio (CaO) ou misturas de cálcio e magnésio (CaO, MgO). A adição de água na cal virgem gera a cal hidratada, através de uma reação química exotérmica. Quando se adiciona cal ao solo, observam-se variações em seu aspecto e nas propriedades, como plasticidade, expansão e contração. A troca de íons e a floculação são reações que são interdependentes, que são ocasionadas logo após a mistura, reduzindo o índice de plasticidade do solo, que pode ser pelo aumento do limite de plasticidade e/ou pela diminuição do limite de liquidez. A contração e a expansão do solo deixando-o mais estável as variações de umidade (Azevêdo, 2010).

Hilt & Davidson (1960) comentam que as reações que ocorrem lentamente são responsáveis pelo ganho de resistência da mistura entre solo e cal com o passar do tempo. Isso se deve ao caráter pozolânico dos minerais estabilizados. A adição de água a cal gera uma crosta cimentante envolta das partículas de cal e em resultado, a parte externa do aglomerado se hidrata, transformando-se em cal

hidratada, e seu núcleo ainda permanece como óxido de cálcio e com a formação da crosta, a velocidade de mistura entre a água e a cal diminui e as condições de equilíbrio podem não serem atingidas rapidamente.

Serafini et al. (2004) estudaram o efeito do tempo e da temperatura no processo de reações pozolânicas, observando que houve aumento significativo na resistência nas misturas, ao longo do tempo de cura, propondo curas de 28 dias.

Para a realização das misturas, uma das metodologias bastante recorrida é o Método do pH, proposto por Eades & Grim (1966), no qual afirmam que a menor porcentagem de cal aplicada ao solo e que gere a este um pH de 12,4, após uma hora de realizada a mistura, é a necessária para estabilizar o solo.

A casca de arroz é um resíduo agrícola que tem atraído a atenção de ambientalistas. A principal aplicação das cascas de arroz é a sua utilização no processo de secagem e parboilização do arroz, pois oferece um alto poder calorífico, se tornando fonte alternativa de energia, e gerando elevado teor de cinza, comumente descartada de forma inadequada.

O uso da cinza de casca de arroz (CCA) na estabilização de solos como material aditivo tem sido bastante estudado. Alhassan (2008), Patel & Mahiyar (2014) estudaram a adição de CCA em teores de 5, 10, 15 e 20%, em um solo expansivo. Tashima et al. (2011) relatam que para haver a reação pozolânica na CCA é necessário que o material utilizado para a adição tenha elevada finura, grandes quantidades de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ em sua composição e uma estrutura mineralógica amorfa. Pouey (2006) apresentou relatos sobre a composição mineralógica das cinzas provenientes da queima em diferentes temperaturas e tempos, afetando a estrutura da sílica da CCA.

A superfície específica da CCA, que está correlacionada com a finura do material, influencia a sua atividade pozolânica, devido a distribuição dos grãos, a forma, a rugosidade das partículas e como os poros estão distribuídos (Tiboni, 2007).

Este estudo objetiva avaliar a estabilização do comportamento expansivo de um solo coletado no município de Agrestina, Pernambuco, tanto no seu estado natural indeformado, quanto no seu estado natural deformado e misturado com CCA e cal-hidratada em diversos percentuais.

Material e Métodos

Características da área de estudo

A cidade de Agrestina, em Pernambuco, ocupa uma área de 200,581 km² e apresenta um

bioma de Caatinga e Mata Atlântica. Está situada a 22,5 km de Caruaru e 149 km de Recife.

No Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina (EMBRAPA, 2017b) são encontrados os tipos: Regossolos, Podzólicos Vermelho-Amarelos e Podzólicos Amarelos, além dos Planossolos e Solonetz Solodizados.

O clima é tropical e a pluviometria, durante o ano, varia de forma bastante considerável. Nos meses de julho e novembro, respectivamente, encontra-se as maiores e menores precipitações do ano, sendo a maior precipitação média registrada de 130 mm e a menor precipitação média registrada de 13 mm. O gradiente térmico durante o ano é de 4°C, sendo a maior temperatura média registrada de 24°C e a menor temperatura média registrada de 20°C (Climate-data, 2017).

A área do estudo é caracterizada por uma obra civil de um pavimento térreo, com 1000 m² de área construída. Na fase de projeto, a investigação geotécnica foi realizada com as sondagens à percussão (SPT). Durante a execução da obra, percebeu-se pequenas fissuras no solo, resolvendo-se portanto, verificar seu comportamento de expansão. Após realizar ensaios de caracterização e adensamento, detectou-se ser um solo expansivo.

Sistema de estudo

O estudo seguiu as seguintes etapas: (a) caracterização física e química do solo e das misturas solo-cal e solo com CCA; (b) investigação do teor, em peso, de cal-hidratada e de CCA a ser adicionada para estabilizar o solo, quanto à expansão livre e tensão de expansão; (c) obtenção dos parâmetros mecânicos e de deformação para análise das tensões de expansão do solo e das misturas com diferentes períodos de cura.

Foi retirada uma amostra indeformada tipo bloco a 40 cm de profundidade para moldagem dos corpos de prova a serem ensaiados nas umidades ótimas, tanto do solo *in natura*, quanto das misturas em diferentes proporções de cal. Foram também retirados sacos com 130 kg de solo amolgado.

No campo, havia um horizonte com 3 transições. O primeiro horizonte tinha 40 cm de profundidade, constituído de um solo mais solto. O segundo, também com 40 cm de profundidade, continha um solo mais resistente. O terceiro horizonte, com 1,0 m de profundidade, era constituído de rocha alterada.

A cal utilizada na mistura solo-cal é uma cal hidratada, caracterizada por Barbosa (2013) como de ótima qualidade, classificando-se, segundo a NBR 6473 (ABNT, 2003), como CH I. Os ensaios de Espectrometria de Fluorescência de Raio X indicaram um teor de óxido de cálcio de 66,42%.

A CCA foi caracterizada no seu estado bruto, sem beneficiamento. Apresentou tonalidade acinzentada, granulometria fina e presença de alguns resíduos de casca de arroz, que foram retirados com a peneira #16, deixando apenas o material de potencial pozolânico (Lacerda, 2018).

Os ensaios de pH foram realizados no solo natural, nas misturas de solo com cal-hidratada (1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11% e 13%), solo com CCA (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14%) e por horizontes, sendo estas análises feitas 1 hora após realizadas as misturas. Na medida de pH nas amostras de solo-cal-hidratada, utilizou-se a metodologia proposta para avaliação da fertilidade do solo, chamada de “cachimbada” pela EMBRAPA (2017a). Foram realizados os ensaios de carbono orgânico e matéria orgânica nas amostras de solo-CCA e nas amostras dos horizontes. Outras análises químicas foram feitas no solo natural, por horizontes e nas amostras de solo-CCA, como Al⁺⁺, Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺, Na⁺ e K⁺ trocável, H⁺ + Al⁺⁺⁺ extraível.

O espectrômetro de fluorescência de raios-X foi realizado para a cinza pura, para as três camadas de solo em profundidade e para as misturas com CCA nas porcentagens de 2, 4, 6, 8 e 10%. Os resultados da varredura semi-quantitativa foram recalculados para 100% após a incorporação do valor da perda ao fogo.

O ensaio de DRX foi realizado para os três horizontes em estudo e no solo usado nos ensaios laboratoriais. As lâminas foram preparadas através dos seguintes tratamentos: (a) Tratamento do solo com Potássio, na temperatura ambiente e aquecida a 550°C; e (b) Tratamento do solo com Magnésio Glicol, na temperatura ambiente. O ensaio foi realizado com tensão de 40 KV, corrente de 40 µA, passo de 0,020U, incremento a cada 1 s e velocidade de varredura de 2° min⁻¹, com o intervalo da angulação de 2° a 42°.

Após a compactação das amostras na umidade ótima e moldagem dos anéis, esperou-se as idades de 7, 14 e 21 dias de cura (mistura com cinza) e as idades de 7, 14, 28 e 120 dias de cura (mistura com Cal-Hidratada) para realização dos ensaios de expansão a volume constante e expansão livre, no edômetro, para avaliar a influência das porcentagens de aditivos e idades nas respectivas expansões. Para avaliar a expansão máxima que cada mistura alcançava, moldou-se um corpo de prova para cada uma delas e deixou-as no edômetro, sob umidade por 4 dias, com uma tensão aplicada de 10 kPa, até que seu potencial expansivo se tornasse constante.

Aplicou-se as seguintes metodologias para caracterização mecânica da expansividade e das tensões de expansão dos solos: (a) Expansão

“Livre”, (b) Carregamento após expansão com diferentes tensões de consolidação, (c) Expansão e Colapso sob Tensão, (d) Tensão de Expansão a Volume Constante. Nas misturas, as Tensões de Expansão foram determinadas com a metodologia de Tensão de Expansão a Volume constante e a caracterização da expansão com a metodologia de Expansão “Livre”. Essas metodologias foram aplicadas em estudos de Barbosa (2013) e Paiva (2016).

O ensaio de expansão livre mede a expansão do solo quando submetido a variação da umidade com uma pequena carga aplicada, que pode ser de 7 kPa ou 10 kPa. O objetivo é avaliar a deformação do solo, medindo-se as variações dele ao longo do tempo até sua completa estabilização, com uma carga aplicada de 10 kPa. A altura final com relação à altura inicial permite saber o potencial de expansão deste solo.

No ensaio de Tensão de Expansão a Volume Constante determina-se a carga que impede o solo de expandir quando sua umidade varia. No ensaio de Expansão sob Tensão, acompanha-se a evolução da expansão de um corpo de prova com uma tensão aplicada previamente. As sobrecargas aplicadas neste estudo foram de 10 kPa, 20 kPa, 40 kPa, 80 kPa e 160 kPa.

No ensaio de Carregamento após expansão, avalia-se a tensão necessária para regredir a expansão máxima do solo, aplicando-se incrementos de tensões.

O ensaio de expansão e colapso, avalia os coeficientes de compressão do solo e de re-compressão. Foi realizado este processo para duas amostras: uma inundada previamente, por 24 horas e outra sem inundação, sendo as duas extraídas do bloco indeformado. Para o ensaio de compressão simples, foram moldados dois corpos de prova para o solo natural e para cada mistura do solo.

Resultados

O ensaio de granulometria do solo natural, mostrou um solo bem graduado, com fração mais fina de aproximadamente 52% do solo (silte e argila). O argilomineral presente e o teor de silte e argila definem o grau de expansão que o solo terá. Segundo a Classificação Unificada dos Solos, este solo pode ser classificado como um CH ou CL.

A umidade de campo que o solo apresentou foi de 14%. Os valores obtidos de LL foi de 50%, de LP de 20%, e IP de 30, enquadrando-se nos valores típicos de Caulinita, com plasticidade alta, segundo Das (2007). O peso específico natural foi de 19,66 kN m⁻³, peso específico real dos grãos de

26,8 kN m⁻³, umidade ótima de 16 % e peso específico aparente seco máximo de 17,9 kN m⁻³.

Pelas Cartas de Skempton (1953), de Williams & Donaldson (1980) e de Seed (1962), que associam a atividade da argila e a sua expansibilidade com o IP do solo e a fração fina de argila, o solo apresentou-se com potencial de expansão inativo, alto e médio, respectivamente, verificando grande variação nos resultados de caracterização do potencial de expansão entre as três cartas. O índice de atividade foi de 0,73.

A curva de compactação apresentou uma umidade ótima de 16% e uma densidade seca máxima de 17,9 kN m⁻³. O formato da curva é típico de solos mais argilosos.

Para o ensaio de expansão e tensão de expansão na umidade e densidade de campo, as cargas de tensão de inundação foram de 10, 20, 40, 80 e 160 kPa, para avaliar o comportamento expansivo do solo e a carga necessária para combater a expansão. Com a sobrecarga de 10 kPa, a expansão foi de 6,58%.

Crítérios de expansibilidade

De acordo com o mapa de susceptibilidade à expansão dos solos em Pernambuco, de Amorim (2004), a região em estudo possui uma probabilidade de baixa expansão (Figura 1).

O mapa pedológico da EMBRAPA (2017b) mostra que a região apresenta Planossolos e Solonetz-Solodizado, considerando os critérios de suscetibilidade à expansão e ao colapso para as unidades de solo componentes, possui grau de expansão baixo/alto e alto, respectivamente.

Na Tabela 1 estão os resultados das classificações, segundo critérios orientativos e qualitativos, para os solos de Agrestina, de Ipojuca, Cabrobó e Paulista. Verifica-se grande variação nos resultados de caracterização do potencial de expansão, entre os diferentes critérios e entre os cinco locais comparados.

Ensaio de expansão

Na Figura 2 é apresentado o comportamento da expansão do solo com diferentes tensões aplicadas. O comportamento compressivo apresentado nas cargas de 40 kPa e 160 kPa ocorre pelo fato de a pressão externa ser maior que a pressão interna no solo, no intervalo de tempo determinado. Quando a pressão interna supera a externa, o solo volta a expandir e elevar seus valores para patamares positivos. Após 48 horas de inundação, na sobrecarga de 160 kPa, houve uma expansão próxima a 0,8%, sendo, portanto, a tensão de expansão por este método.

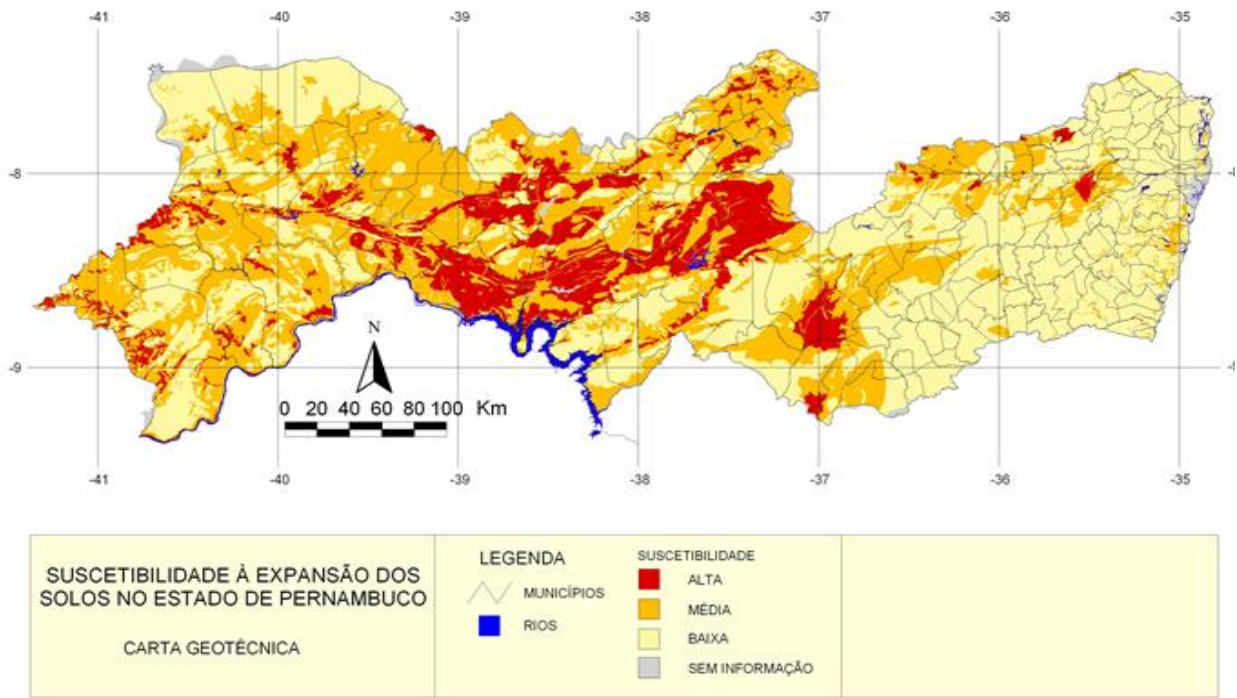


Figura 1. Localização da cidade de Agrestina no mapa de susceptibilidade à expansão dos solos em Pernambuco. Fonte: Amorim (2004).

Tabela 1. Critério de classificação quanto a expansão do solo. Fonte: Barbosa (2013), Paiva (2016) e Silva (2018).

Probabilidade ou Critério de Classificação	Grau de expansão				
	Barbosa (2013)	Paiva (2016)		Silva (2018)	
	Cabrobó	Ipojuca	Cabrobó	Paulista	Agrestina
Amorim (2004)	Médio/Alto	Baixo/Médio	Médio/alto	Baixo	Baixo
EMBRAPA	Alto	Baixo	Alto	-	Baixo/Alto
WES	Baixo	Alto	Baixo/Alto	Médio/Alto	Médio/Alto
Chen (1975)	Baixo	Muito Alto	Médio	Alto/Muito Alto	Alto/Médio
Seed et al. (1962)	Médio	Muito Alto	Médio	Alto	Alto
Daksanamurthy & Raman (1973)	-	Muito Alto	Médio	Alto	Médio
Vijayvergiya & Ghazzaly (1973)	Alto	Muito Alto	Alto	Muito Alto	Alto
Holtz & Gibbs (1956)	Baixo	Alto	Baixo	Médio	Alto
Cuellar (1978)	Média	Muito Alta	Média	Alta	Média
USBR – Holtz (1953)	Muito	Muito Alta	Muito	Muito	Muito
	Alta/Média		Alta/Média	Alta/Alta	Alta/Média

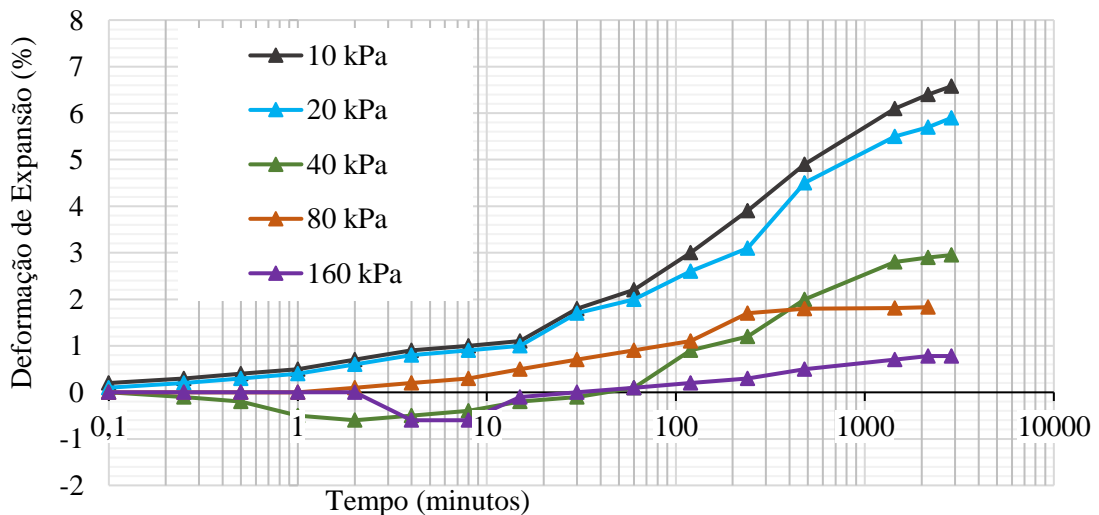


Figura 2. Curva de expansão sob tensão do solo natural com diferentes tensões. Fonte: Silva (2018).

A Tabela 2 mostra índices físicos antes e após a inundação do solo, como a umidade (h), índice de vazios, peso específico aparente seco (ρ_d), peso específico úmido (ρ_h), grau de saturação (S_r) e potencial de expansão (SP). Para avaliar a expansão, um dos métodos a ser aplicado pode ser o de expansão livre. Este método usa a aplicação de uma tensão baixa (7 kPa ou 10 kPa) para obter o valor de expansão do solo quando inundado. A expansão com 10 kPa, mostrou que o solo

consegue expandir 6,58%. A tensão de 160, medida pelo método de Tensão de Expansão a Volume Constante, o solo apresentou uma Tensão de Expansão de 100 kPa. O solo de Cabrobó apresentou 87 kPa e os solos de Ipojuca e Paulista apresentaram 87 kPa, 245 kPa e 275 kPa, respectivamente. Realizando-se uma média entre as tensões resultantes de cada método, pode-se inferir que o solo em campo oferece uma Tensão de Expansão de 155,25 kPa (Tabela 3).

Tabela 2. Índices físicos do solo indeformado no início e término dos ensaios Edométricos Simples. Fonte: Silva (2018). W = umidade; e = índice de vazios inicial; ρ_d = peso específico aparente seco; ρ_h = peso específico úmido; S_r = grau de saturação.

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

Tabela 3. Tensões de expansão aplicadas por diversos métodos no solo natural nas condições de campo, segundo Barbosa (2013), Paiva (2016) e Silva (2018).

Método de Ensaio para Tensão de Expansão	Tensão de Expansão (kPa)				
	Silva (2018)	Barbosa (2013)	Paiva (2016)		
	Agrestina	Cabrobó	Cabrobó	Ipojuca	Paulista
Expansão sob tensão com diferentes tensões aplicadas	160	320	-	-	-
Carregamento após expansão	160	90	90	190	300
Expansão e colapso	201	100	100	220	180
Volume constante	100	87	87	245	275

O solo de Cabrobó, uma expansão de 7,45%, ou seja, 0,87 ponto percentual a mais no valor de expansão em relação ao solo de Agrestina, mostrou que, por este método, a tensão de expansão foi de 320 kPa, induzindo que este solo pudesse ser submetido a mais uma tensão. Porém, não se prosseguiu nos ensaios com esta tensão, pois com a tensão de 160 kPa havia ocorrido uma boa redução da expansão do solo.

Pelo método de Carregamento após Expansão, a tensão que não haverá expansão é a de 160 kPa (Figura 3). Por este método, o solo de Cabrobó apresentou uma tensão de expansão 90 kPa e os solos de Ipojuca e Paulista apresentaram 90 kPa, 190 kPa e 300 kPa, respectivamente.

Pelo método de Expansão e Colapso, a tensão de expansão foi de 201 kPa. Não foram aplicadas as cargas até 160 kPa, o que não levou a uma expansão nula ou ao colapso, utilizando-se da equação da linha de tendência para determinar o

valor de tensão de expansão, obtendo-se uma boa correlação entre os dados (Figura 4).

O solo de Cabrobó apresentou uma tensão de expansão 100 kPa e os solos Ipojuca e Paulista uma expansão de 100 kPa, 220 kPa e 180 kPa, respectivamente.

Solo compactado em laboratório

Para avaliar a expansão do solo após a sua compactação em umidade ótima, onde alcança-se a maior densidade seca máxima em um corpo de prova, ainda que sem mistura, aplicou-se a sua umidade ótima (16%) e foram realizados os ensaios de Expansão Livre sob uma tensão de 7 kPa e Tensão de Expansão. Para a Expansão Livre, o solo expandiu, nestas condições, 20%. O método de estabilização mecânica não é eficiente para combater a expansão deste solo, pois houve um aumento da expansão em relação ao corpo de prova moldado com o solo indeformado (Figura 5).

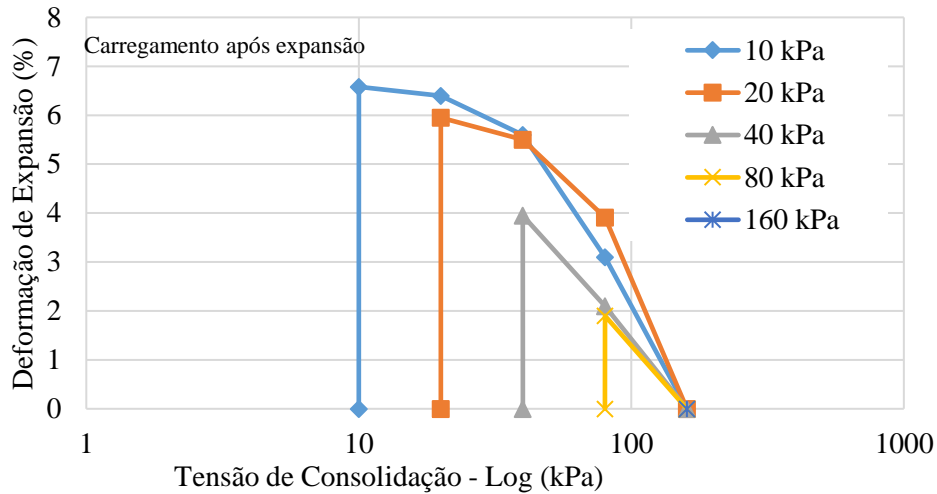


Figura 3. Curva de expansão com carregamento após expansão. Fonte: Silva (2018).

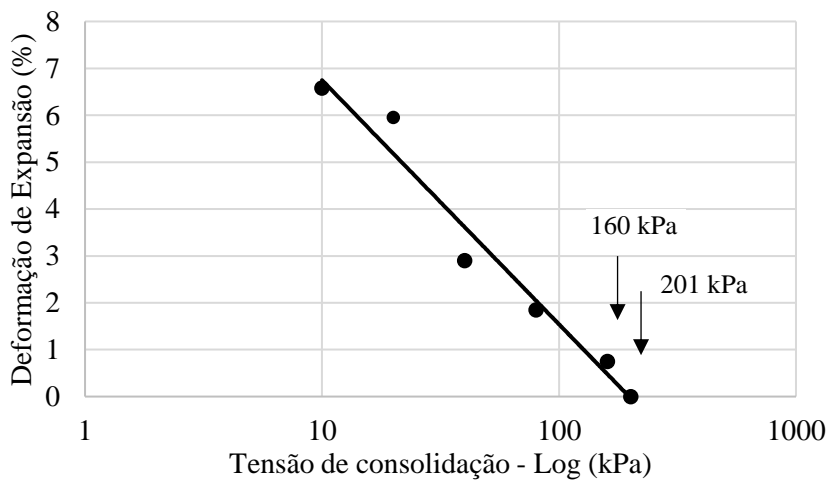


Figura 4. Curva de expansão e colapso. Fonte: Silva (2018).

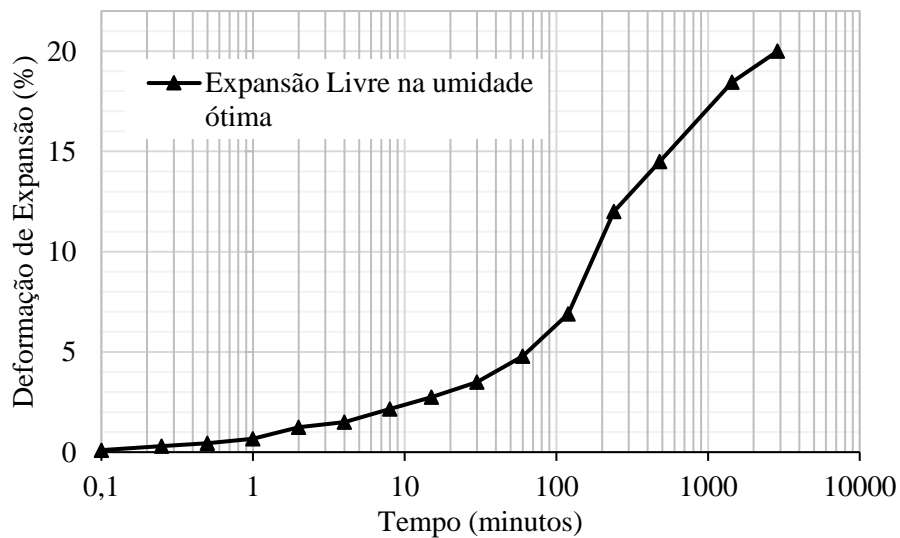


Figura 5. Curva de expansão após compactação do solo em umidade ótima. Fonte: Silva (2018).

A densidade superior entre um corpo de prova em bloco indeformado e um corpo de prova moldado após a compactação revela que há um maior peso de solo no segundo caso. Isso também auxilia na compreensão de que, com uma maior

superfície específica de solo em um mesmo volume, a expansão apresentaria a tendência de ser mais alta, como realmente revelou o resultado obtido. O grau de compactação (GC) do solo, foi de 96,34%.

Para os corpos de prova ensaiados, para 20% de Expansão e umidade ótima de 16%, a Tensão de Expansão foi de 215 kPa.

Granulometria dos horizontes

As granulometrias dos horizontes próximos a superfície apresentam uma grande proximidade em suas curvas, com teores de argila entre 35% de sua caracterização granulométrica. O último horizonte tem granulometria predominantemente grossa, com um teor de finos, silte e argila, inferior a 15% de sua caracterização. Todos os ensaios de caracterização física, compactação, Tensões de Expansão e Expansão “Livre”, foram realizados no Horizonte A.

Pode-se classificar os horizontes A e B como um solo residual maduro e o horizonte C, como um solo saprolítico. Segundo o IBGE (2007), o Horizonte A é o horizonte mineral, superficial, com acúmulo de matéria orgânica decomposta e extravio ou decomposição de elementos minerais como Fe, Al e argila. O Horizonte B é o horizonte subsuperficial de aglomeração de argila, Fe, Al, Si, húmus, CaCO₃, CaSO₄, ou de extravio de CaCO₃, ou de aglomeração de sesquióxidos; ou com bom avanço estrutural. O Horizonte C é possui material não consolidado embaixo do *solum*, levemente afetado por processos pedogenéticos, a contar do qual o *solum* pode ter se formado ou não, sem expressão ou com pouca expressão de propriedades que levem a identificação de outro horizonte.

Os dois primeiros horizontes apresentam LL = 50%, LP = 20%, IP = 30% e LL = 45,29%, LP = 21,43% IP = 32,86%, respectivamente, enquanto o último, não apresenta valores. Existe um teor de finos considerável nos dois primeiros horizontes e o último, tem uma granulometria grossa. Os horizontes que apresentam um potencial de expansão são os dois primeiros. O terceiro horizonte, por ter uma granulometria grossa, e não apresentar limites de Atterberg, seu potencial para expansão é muito baixo, o que não exclui a possibilidade de ser constituído do mesmo argilomineral expansivo dos demais horizontes.

Espectometria de raio X dos horizontes

No ensaio de espectometria de raio X para os três horizontes, os constituintes químicos do solo mais observados foram a Sílica (SiO₂) e o Óxido de Mágnesio (MgO). Percebe-se altos teores de SiO₂ e MgO no solo natural, nos três horizontes. No horizonte A, a SiO₂ constitui 71,90% do solo e o MgO, 1,33%. No horizonte B, a SiO₂ constitui 56,41% do solo e o MgO, 2,69%. No horizonte C, a SiO₂ constitui 61,65% do solo e o MgO, 1,99%.

Os cátions favorecem a acidez, neutralidade e basicidade de uma amostra. Estes foram

calculados, como os Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e os íons H⁺ + Al³⁺, para conhecer a acidez extraível, ou seja, a quantidade de cátions nas amostras que podem ser observadas dispersas em solução (Silva, 2018).

Caracterização química dos horizontes

Os ensaios químicos foram realizados nos três horizontes do solo. Os pHs em água, tiveram valores que mostram proximidade da neutralidade. Nas demais soluções, apenas a amostra de rocha do horizonte C foi básica, sendo as demais ácidas.

A Matéria Orgânica presente no solo mostrou-se com baixo percentuais em todas as amostras, sendo o maior valor de 0,011%. Segundo a EMBRAPA (1997), este solo é pobre em matéria orgânica, com teor inferior a 5%.

A soma do valor S e da acidez extraível resulta no valor de capacidade de troca catiônica da amostra. Segundo a EMBRAPA (2001), valores superiores a 27 cmol kg⁻¹, como os das amostras do horizonte B e horizonte C, são classificadas com alta capacidade de troca catiônica.

Os teores de Óxido de Ferros nas amostras variaram entre 1,30 g kg⁻¹ e 4,50 g kg⁻¹, estando com valores inferiores a 80 g kg⁻¹, caracterizando-as como hipoférricas, segundo a Ageitec (2018). Quanto a condutividade elétrica, as amostras dos horizontes A, B, C apresentaram 33,73 µS, 251,70 µS, 830 µS e 103,20 µS, respectivamente. Segundo a EMBRAPA (2001), para valores maiores que 7 µS, pode-se inferir que há uma alta condutividade elétrica, com indicação de alta salinidade.

Os valores de saturação com sódio no horizonte A apresentaram valores entre 6% e 15% (12,30%), caracterizando-o com o caráter solódico, segundo Ageitec (2018). Os demais horizontes apresentam valores maiores que 15%, que caracterizam o caráter sódico do solo. Os valores para saturação por alumínio foram menores que 1%. Segundo Osaki (1991), menor do que 5% é considerada um valor de saturação muito baixo.

Edométrio duplo

Na Figura 6 estão as curvas de edométrio duplo do solo inundado previamente e sem inundação. Observa-se um comportamento mais expansivo do solo quando inundado. Apesar de ser um solo expansivo, mesmo quando inundado, a aplicação dos estágios de cargas resultou na diminuição dos vazios na amostra. O índice de vazios com o solo inundado previamente teve um valor mais elevado em relação à amostra não inundada exatamente pelo fato de haver a expansão do solo quando em contato com a água e afastando os grãos uns dos outros. Na primeira aplicação de carga, 10 kPa, a amostra apresentava um índice de

vazios de 0,68. No solo não inundado, este índice era um pouco inferior a 0,60.

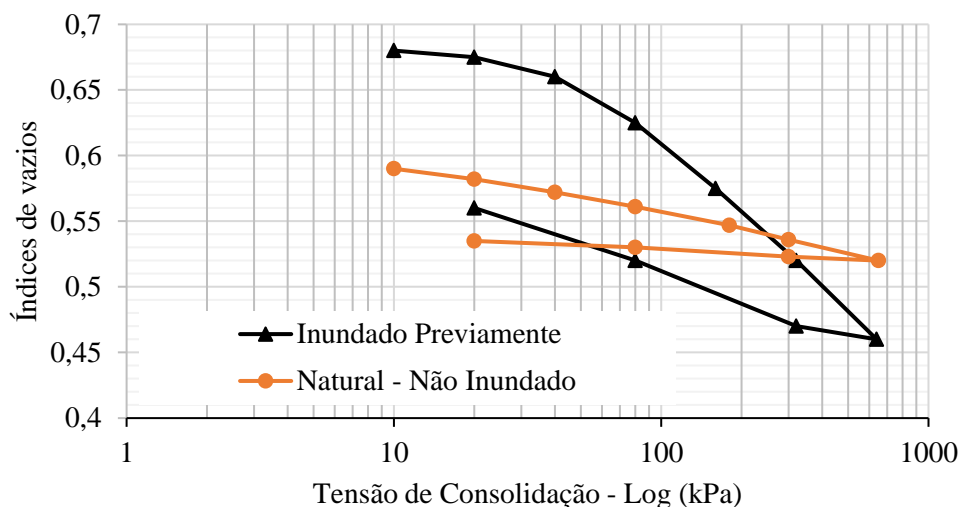


Figura 6. Edométrio duplo do solo inundado previamente ao ensaio e natural – sem inundação prévia. Fonte: Silva (2018).

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

Para a amostra previamente inundada, obteve-se um coeficiente de compressão (C_c) de 0,1777 e um coeficiente de re-compressão (C_r) de 0,08306. Para a amostra não inundada, o coeficiente de compressão (C_c) foi de 0,04114 e o coeficiente de re-compressão (C_r) foi de 0,01219. Os índices de expansão (C_s) apresentados foram de 0,050 na amostra não inundada e de 0,077 na amostra previamente inundada.

Caracterização mineralógica - DRX

De acordo com os picos gerados e seus respectivos valores obtidos no ensaio de DRX, os argilominerais presentes em cada horizonte são: (a) Horizonte A: Caulinita e Montmorilonita; (b) Horizonte B: Caulinita e Mica; (c) Horizonte C: Caulinita e Vermiculita.

Havia fortes indícios de uma caracterização do argilomineral como sendo Caulinita, de acordo com o IP do solo, e com a Espectrometria de Raio X dos horizontes, que era um solo decomposto pelo intemperismo da rocha local. Com a identificação do argilomineral dos horizontes confirmou-se estes indícios, visto que em todos os horizontes havia presença de Caulinita, que tem expansão baixa. A presença da Montmorilonita, Vermiculita e Mica nos horizontes são o que caracteriza a condição de expansão deste solo.

Espectrometria da CCA

Este ensaio traz a composição da CCA na sua forma pura. Quanto maior o teor de Dióxido de Silício ou Sílica (SiO_2) e de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) maior será o potencial para a reação pozolânica. O teor de SiO_2 foi bastante elevado, sendo igual a 95,37% da composição da cinza de casca de arroz, o de MgO com um valor baixo, 0,37%, o de CaO com um valor de 0,75% e o de Al_2O_3 com um valor igual a 0,80%.

A CCA pura utilizada por Patel & Mahiyar (2014), apresentou valor de SiO_2 igual a 90,23%, MgO igual a 0,53%, CaO igual a 1,58% e Al_2O_3 de 2,54% da sua composição. A cinza de utilizada em Agrestina tem percentual similar, comprovando bons indicativos de excelência para ser aplicada na estabilização.

Shrivastava et al. (2014) caracterizaram a CCA para avaliar o percentual de SiO_2 constituinte. Eles encontram um teor de 85,14%. Segundo Alhassan (2008), a caracterização da cinza pura apresentou o valor de SiO_2 igual a 67,3%, Óxido de Magnésio igual a 1,81%, Óxido de Cálcio igual a 1,36% e Al_2O_3 igual a 4,90%. Pode-se observar que há um bom percentual de Sílica, fundamental para o processo de reação pozolânica.

Misturas de solo com CCA

As curvas granulométricas, tanto do solo natural quanto das misturas nas diferentes porcentagens com cinza de casca de arroz (CCA) realizadas com o horizonte A, se mantiveram muito próximas umas das outras. Isto ocorre pelo fato da CCA ter uma densidade leve e a substituição de solo pelo teor de cinza não influenciar muito durante as pesagens nos ensaios granulométricos.

Por este motivo, a fração fina das misturas apresentaram comportamentos similares entre si. Em um peso padrão qualquer, aplicado a todas as misturas, é possível observar um aumento do volume, devido à baixa densidade da cinza em relação ao mesmo peso apenas com o solo natural.

Na Tabela 4 é possível observar os percentuais da caracterização granulométrica das amostras com CCA e solo natural. É possível observar que houve uma redução da relação silte e argila, pois ocorreu o aumento do teor de argila nas misturas em relação ao solo natural.

Tabela 4. Caracterização do solo e das misturas solo-cinza de casca de arroz (CCA). Fonte: Silva (2018).

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

Umidade das misturas com CCA

Nas análises das umidades higroscópica (Figura 7) observou-se uma pequena variação na umidade nas misturas com cinza, fluando dos valores entre os valores de 7 a 7,8%. O solo e a

CCA estavam secos ao ar no momento dos ensaios. A CCA se apresentava com um aspecto mais seco, quando comparado ao solo. Com a substituição de uma fração de solo pela CCA, a umidade final acabou sendo inferior a uma amostra sem CCA.

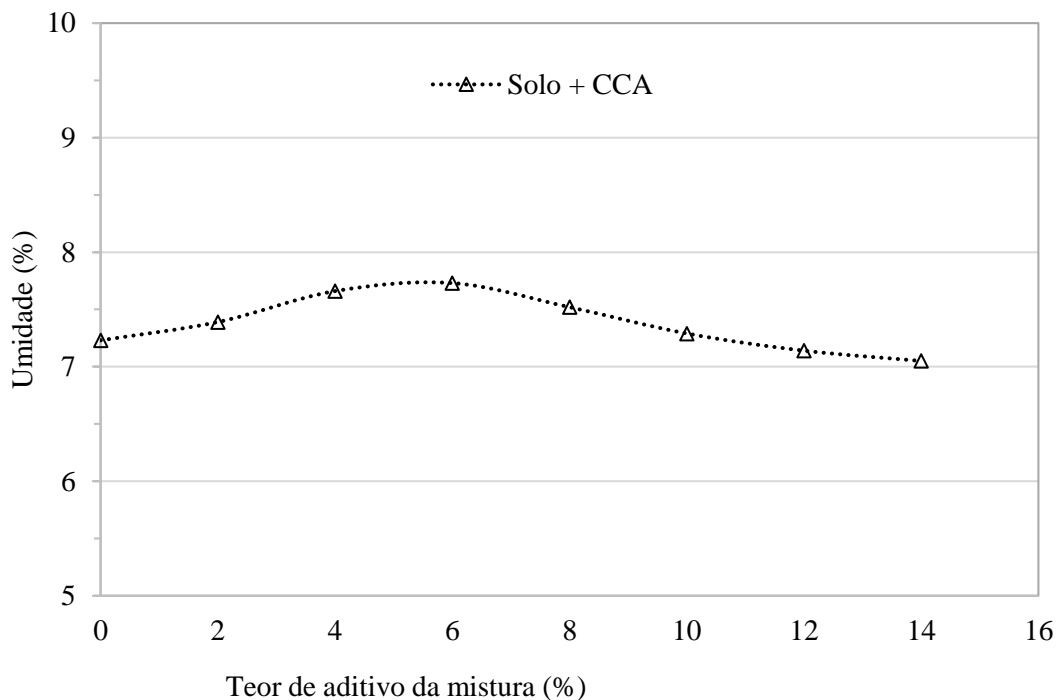


Figura 7. Umidade das misturas Solo + cinza de casca de arroz (CAA) com Teor de CAA como aditivo. Fonte: Silva (2018).

As umidades não foram realizadas em um mesmo dia, podendo ter influenciado em alguns acréscimos nas misturas.

Densidade real dos grãos das misturas com CCA

As misturas com cinza apresentaram uma variação média de, aproximadamente, 0,07% entre os resultados da densidade real dos grãos. A mistura com 14% de cinza obteve uma redução em sua densidade na ordem de 17,68% do valor de densidade, em relação ao solo natural (Figura 8).

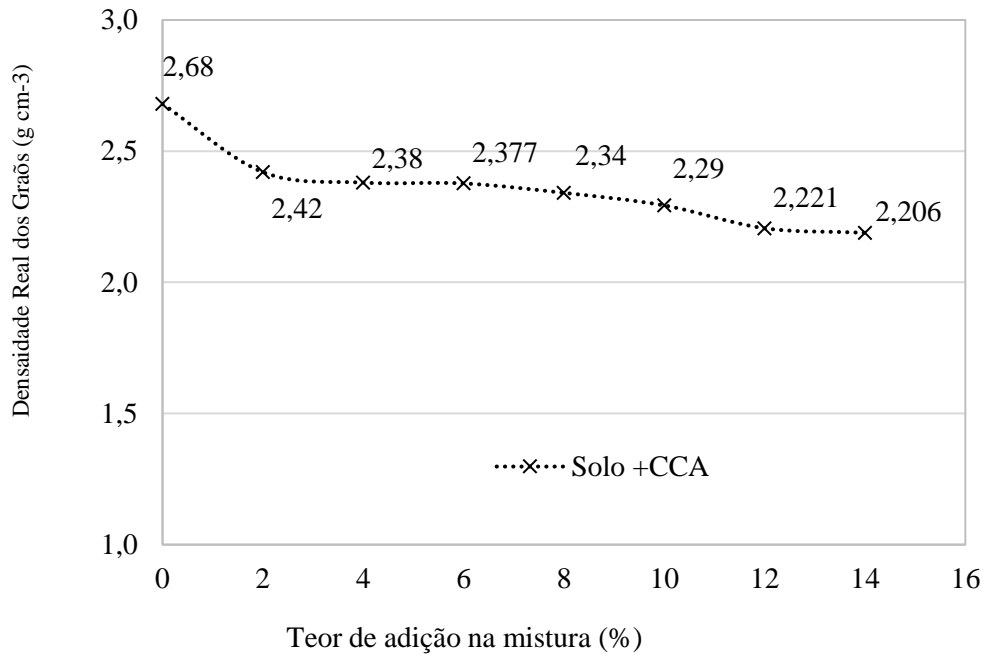


Figura 8. Densidade real dos grãos das misturas com cinza de casca de arroz (CCA). Fonte: Silva (2018).

Como houve a substituição de uma porcentagem do solo, mais denso, por uma fração de cinza, menos densa, o volume da mistura em relação ao volume do solo sem mistura se torna maior ao longo dos teores, levando em consideração o mesmo peso entre eles. Por este motivo, era esperado que houvesse uma redução gradativa dos valores de densidade.

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

Compactação das misturas com CCA

A Figura 9 mostra as curvas de compactação do solo natural e das misturas com

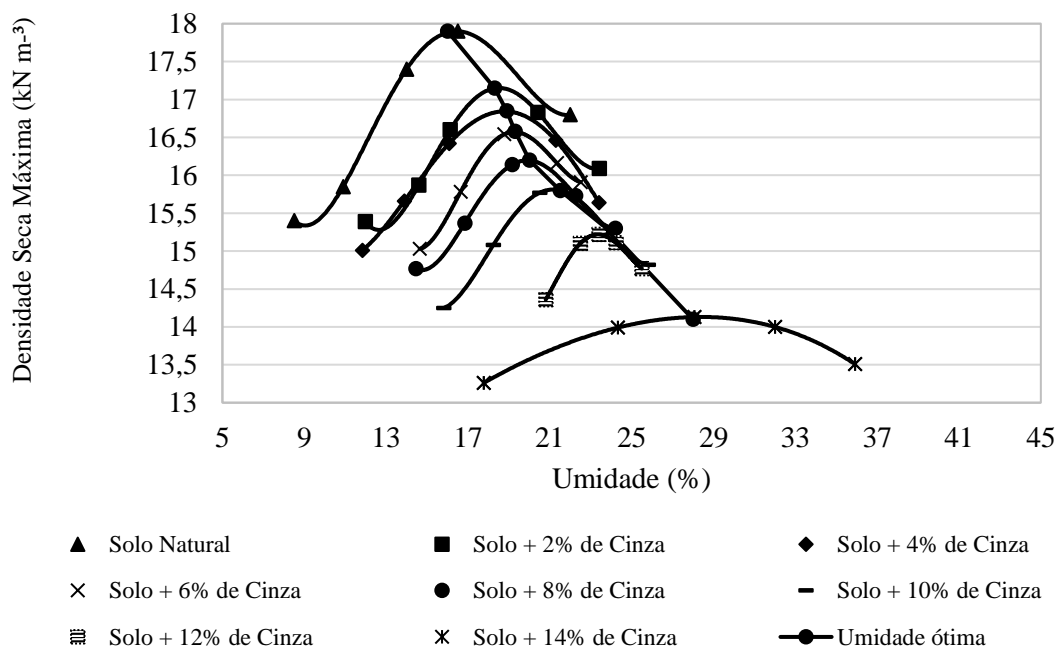


Figura 9. Curvas de Compactação do solo natural e misturas com cinza de casca de arroz. Fonte: Silva (2018).

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

Na Figura 10 estão os valores de densidade seca máxima e umidade ótima extraídos das curvas de compactação do solo e das misturas com CCA. Nota-se o comportamento crescente da umidade e decrescente da densidade seca máxima.

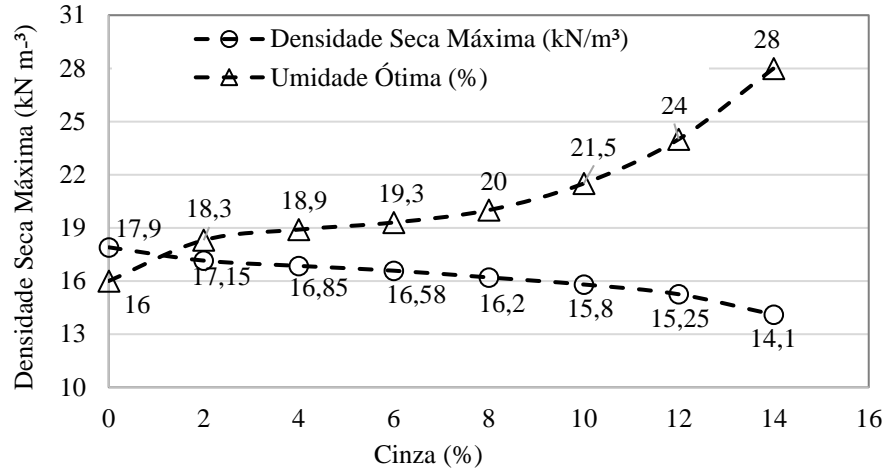


Figura 10. Massa específica aparente seca do solo com as diversas porcentagens de cinza de casca de arroz (CCA) e suas respectivas umidades ótimas. Fonte: Silva (2018).

Lacerda (2018) comenta sobre o CCA ser um resíduo agrícola com características pozolânicas, porque contém sílica e que este também possui uma elevada superfície específica. Isto explica a maior absorção de água quando aumentado os incrementos de CCA nas misturas, elevando sua umidade ótima. Patel & Mahiyar (2014) também mostram o mesmo comportamento

na compactação das misturas em relação ao solo natural. Com o aumento do teor de cinza houve um decréscimo da densidade seca máxima e um aumento na umidade ótima.

O comportamento ao longo da adição de CAA mostrou um aumentando de LP e uma certa constância nos LL, decaindo os IP (Figura 11).

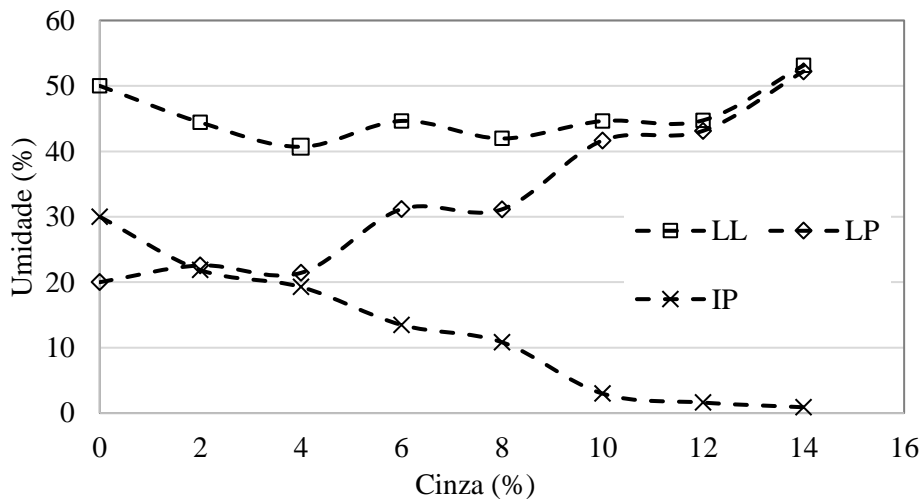


Figura 11. Limites de Atterberg para as diversas misturas com cinza de casca de arroz (CCA). Fonte: Silva et al. (2018).

Com a mistura de solo com 14% de CCA, conseguiu-se trazer a muito próximo de zero o IP. Os valores de LL foram, aproximadamente, constantes, ocorrendo leve redução deste valor, em relação ao solo sem CCA, para as porcentagens entre 2 a 12%, com um acréscimo de 3,12% na

umidade na mistura de 14%. Os valores de LP mostram forte influência da reação pozolânica característica destas misturas, elevando seus valores diretamente, sofrendo um decréscimo de 97,03% em comparação com o valor do solo sem mistura.

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

Adhikary & Jana (2016) observaram o mesmo comportamento nos IP com o aumento da umidade. No estudo deles, os LL e LP se elevaram gradativamente ao longo das misturas em relação aos valores do solo sem CCA, mas o acréscimo destes índices não ocorreu na mesma proporção, resultando na queda dos valores dos IP. Este comportamento foi associado à propriedade cimentícia entre as partículas, afirmado que houve um impacto direto sobre os dois Limites. No estudo de Patel & Mahiyar (2014), os IP se mantiveram quase que constantes e, no maior teor de CCA aplicado na mistura (20% CCA), não houve valores para os Limites de Atteberg. O LL do solo natural obteve um valor maior do que os LL das misturas apresentando um comportamento similar ao observado nas análises deste estudo. Os valores de LP se mantiveram constantes nas misturas, assim como os IP.

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

Ensaio químicos das misturas de solo com CCA

Apesar de não haver nenhum indicativo de associação do método de Eades & Grim (1966) para este tipo de mistura, realizou-se o pH nestas misturas para investigar alguma correlação entre este método e as misturas solo-CCA, para observar se poderia utilizá-lo como método de dosagem para este tipo de mistura. Era esperado que o solo estabilizasse com teores próximos a 10% de CCA, porém, não foi obtido este comportamento quando realizado os ensaios de expansão. Seguiram-se os ensaios com teores superiores a 10% de CCA, não sendo realizados ensaios para teores de 12% e 14%.

Os pHs em água e CaCl_2 das misturas apresentaram-se com valores próximos da neutralidade; na solução de KCl mostrou valores levemente ácidos.

A matéria orgânica presente nas misturas mostrou-se com baixos percentuais em todas as amostras (0,21%), sendo caracterizado como solo pobre em matéria orgânica, segundo a EMBRAPA (1997). Segundo a EMBRAPA (2001), as amostras foram classificadas com alta capacidade de troca catiônica, por ter valores superiores ao de referência.

Os teores de óxido de ferro nas amostras variaram entre 1,60 g Kkg^{-1} e 2,40 g kg^{-1} , estando com valores inferiores a 80 g kg^{-1} , caracterizando as misturas como hipoférricas, segundo a Ageitec (2018a). Quanto à condutividade elétrica, as misturas apresentaram valores entre 1758 μS e 1949 μS . Segundo a EMBRAPA (2001), como todos estes valores são maiores que 7 μS , pode-se inferir que há uma alta condutividade elétrica, com indicação de alta salinidade nas misturas.

Os valores de saturação na base, em todas as misturas, são superiores a 50%, o que as caracterizam como eutróficas, sendo, portanto, consideradas férteis, segundo a Ageitec (2018). Os valores de saturação com sódio nas misturas apresentam-se com valores maiores que 15%, que caracterizam o caráter sódico delas, segundo Ageitec (2018). A saturação por alumínio, observa-se que os valores foram nulos (0%). Quando a saturação por Al% é menor que 5%, segundo Osaki (1991), é considerada um valor de saturação muito baixo.

Espectrômetro de fluorescência de raio-x para solo e misturas com CCA

Em todas as análises das misturas de solo com CCA e solo natural, os valores de SiO_2 variaram de 60 a 69% e o Óxido de Magnésio com valores baixos, abaixo de 1,2% (Silva, 2018).

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

Expansão das misturas com CCA

As expansões são as resultantes do solo natural compactado em laboratório e das misturas

de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14% de CCA, nas idades de 7, 14 e 21 dias.

A Figura 12 mostra o comportamento expansivo das misturas ao decorrer das idades de ensaio, em seus respectivos períodos de cura.

Percebe-se tendência decrescente às expansões ao longo do aumento dos teores das amostras e com os diferentes períodos de cura, influenciado diretamente, pelas propriedades

cimentícias geradas na reação solo-CCA, onde o teor de sílica presente na CCA, que é superior a 95%, favorece uma boa reação pozolânica devido ao seu potencial a esta reação. Quanto maior o teor de sílica presente na amostra de CCA, maior o potencial em relação a reação pozolânica, provando a eficiência do material na aplicação de estabilização.

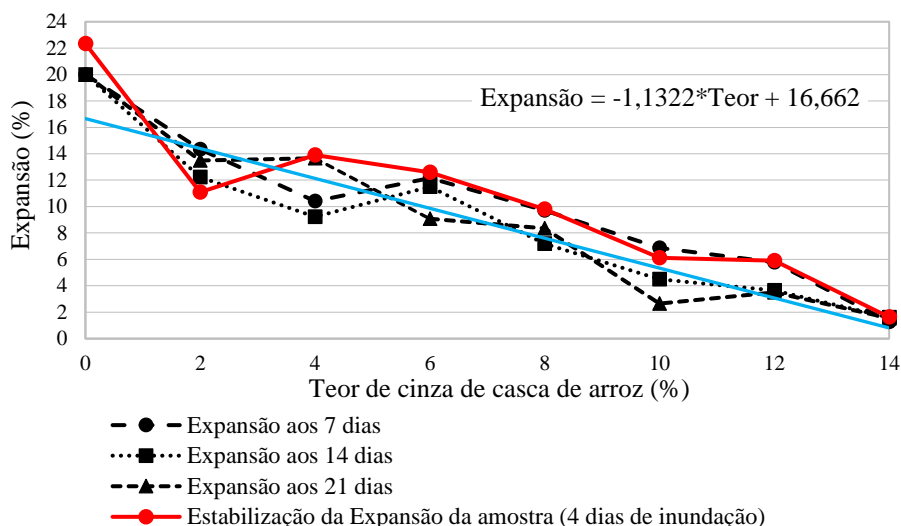


Figura 12. Expansão das misturas ao longo das idades. Fonte: Silva (2018).

Houve redução da expansão do solo com a adição de CCA em 4 pontos. O gráfico foi iniciado com a expansão do solo sem nenhum teor de CCA, mas com o valor da expansão do solo obtida após a compactação da amostra no laboratório, quando adicionado 2% de CCA, a expansão foi bastante superior ao valor obtido na expansão do solo nas

condições de campo, e que só passou a apresentar valores próximos ou inferiores a ele, com porcentagens a partir de 10% de CCA.

Dentro da mesma idade de cura, o decréscimo das expansões foi alcançado em todas idades propostas. Na Tabela 5 são apresentados os valores das expansões das misturas.

Tabela 5. Valores de expansões para as misturas. Fonte: Silva (2018).

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

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

Observa-se, na Tabela 5, um leve aumento da expansão nas idades de 7 e 14 dias de cura, na mistura com 6% CCA, quando se esperava um valor menor ao obtido no ensaio de expansão com 4% de CCA. Ambas as expansões tiveram

acréscimos próximos a 2% em relação ao anterior, comportamento diferente do esperado. Avaliando os índices físicos, percebe-se que dentro das porcentagens de 6% de CCA, os corpos de prova se mantiveram, basicamente, iguais quanto aos seus

volumes. Esta elevação da expansão nos corpos de prova de 6% de CCA aos 7 e 14 dias é justificada pela perda de umidade durante a preparação do ensaio, que modificaram a suas condições de sucção iniciais e que permitiu uma maior absorção de umidade e uma expansão mais elevada. Existe a possibilidade de criar uma linha de tendência entre 2 a 14% de CCA, que mostrariam claramente o sentido decrescente da expansão.

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

Quando avaliado por mesmas porcentagens com idades distintas, percebe-se que não há uma diminuição gradativa entre as idades em todas as misturas. Em algumas amostras houve decréscimo dos valores de expansão ao longo dos períodos de cura, enquanto outras, especificamente as amostras de 2% CCA e 4% CCA na cura de 21 dias, os valores se elevaram. O valor obtido no ensaio com a amostra de 14% de CCA aos 7 dias,

que foi inferior aos valores subsequentes, mas que estes dois últimos mostram tendência sutil, de diminuição dos valores ao longo do tempo. O fator de maior impacto na aplicação da CCA é o teor utilizado nas amostras e não o tempo de cura, pois este apresentou pouca influência na expansão.

Na Tabela 6 estão os dados relativos aos constituintes de cada corpo de prova, com as respectivas porcentagens de solo, CCA, água e ar da amostra. O teor de solo vai diminuindo, para ser substituído por CCA, água e ar. O teor de CCA aumenta gradativamente, interferindo no aumento da água, pois conforme observado nas curvas de compactação, a umidade ótima aumentava paralelamente ao teor de CCA e também há o aumento da porção de ar, pois a densidade seca máxima diminui, aumenta os vazios na amostra, sendo preenchidos por água e ar.

Na Figura 13 são apresentados os percentuais constituintes de cada amostra.

Compreende-se que a redução dos valores para o solo e o aumento dos valores para CCA, devido aos teores, de água, pois se eleva a umidade ótima em relação ao solo sem CCA e, conseqüentemente, o teor de água na amostra, e o de ar, pois além do aumento da umidade ótima ao longo das misturas, há uma queda do peso específico destas, ocasionando um maior teor de vazios ocupados por água e ar.

Tabela 6. Porcentagem constituinte das amostras de solo-CCA. Fonte: Silva et al. (2018).

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

Os valores de umidade inicial e final após o ensaio de Expansão Livre serviram para observar a perda de umidade durante o processo de cura das amostras. As amostras não alcançaram saturação após as 48 horas inundadas. Caso haja uma discrepância entre os valores de umidade inicial, a amostra poderá obter um valor de sua expansão muito mais elevado em relação a uma amostra com

mesmo teor de CCA, mas com uma umidade maior, pois ocorre mudança nas condições de sucção da amostra. Nas amostras de expansão livre, o teor de umidade é maior que nas amostras submetidas a expansão sob tensão, pois esta tensão impede a expansão e acaba por não favorecer a infiltração vertical da água em grandes quantidades.

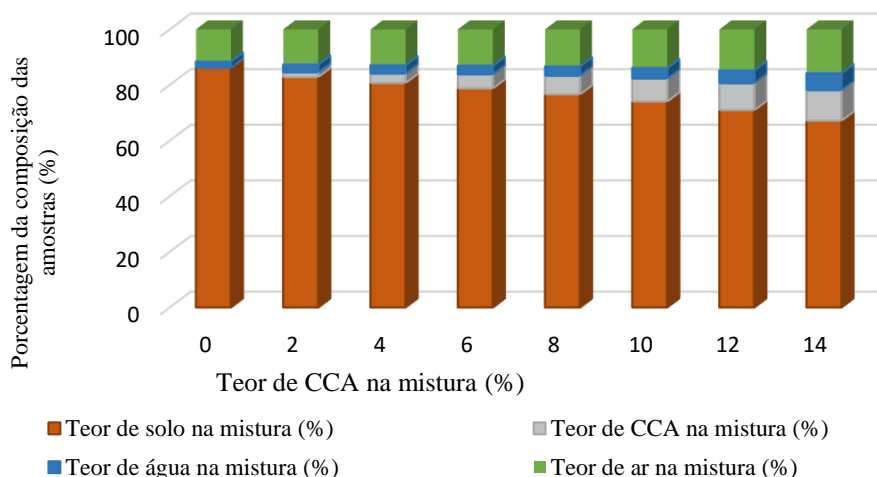


Figura 13. Percentual dos constituintes de cada amostra com cinza de casca de arroz (CCA) em análise. Fonte: Silva (2018).

Na Tabela 7 estão as tensões de expansão das amostras em suas respectivas idades de cura. Considerando as mesmas porcentagens, as amostras não mostraram um comportamento uniforme nestas tensões. Na maioria das tensões obtidas se pode observar que houve um decréscimo delas na idade de 21 dias de cura em relação a idade de sete dias. Apenas na amostra com 4% de CCA

este comportamento não foi observado, havendo um acréscimo na tensão de 21 dias de cura em relação a de sete dias de cura, mantendo os valores de Tensão de Expansão, nas demais idades, ainda superior ao de sete dias. No geral, houve diminuição das tensões de expansão com o aumento do teor de CCA.

Tabela 7. Tensão de Expansão a Volume Constante nas misturas. Fonte: Silva (2018).

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

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

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

Considerando o critério de Jimenez (1980), as tensões oferecidas para a mistura de 14% de CCA não oferecem possibilidade de danos às estruturas, estando todas inferiores a 20 kPa (Tabela 7).

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

Os valores de umidades iniciais e finais das amostras submetidas ao ensaio de Tensão de Expansão serviram para observar a perda de umidade durante o processo de cura das amostras e

os valores destas umidades após o ensaio. As umidades finais deste ensaio são inferiores às aquelas obtidas no ensaio de Expansão livre. Os teores de umidade infiltrado nestas amostras são ainda mais baixos dos que os teores infiltrados nos ensaios de Expansão Livre, pois a Tensão aplicada na amostra impede-a de absorver mais umidade, condição não imposta nas amostras do ensaio de Expansão Livre.

Compressão simples das misturas com CCA

Com os dados de densidade seca máxima e umidade ótima das misturas de CCA, o volume do cilindro utilizado nas moldagens, determina-se o valor aproximado da massa úmida necessária a ser colocado no cilindro e realizar a compressão da amostra e deixá-la na densidade seca máxima referente a sua porcentagem de CCA.

O valor a ser compactado é decrescente, pois enquanto a umidade se eleva, a densidade seca máxima diminui, resultando em uma menor massa a ser colocada em um determinado volume para alcançar a densidade seca máxima da amostra.

Na Tabela 8 estão os valores das tensões de compressão simples dos dois corpos de prova avaliados para cada mistura de CCA na idade zero.

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

Tabela 8. Tensões de compressão para o solo natural e para misturas de CCA. Fonte: Silva (2018).

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

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

Nas porcentagens de 8% e 10% observa-se uma elevação dos valores desta resistência a compressão simples, que pode ser explicado por uma maior eficácia da reação pozolânica e da cimentação entre os grãos, quando comparada as demais porcentagens. Os valores apresentados

pelas amostras de 10% de CCA são próximos aos das amostras com 2% de CCA, e apresentaram valores iguais nos dois corpos de prova, mostrando a eficiência da cimentação pozolânica, pois em 10%, há menor contato grão a grão na amostra com 2% de CCA e mesmo assim, apresenta um valor próximo de resistência a compressão.

Nas porcentagens de 12% e 14% os valores decaem. Adhikary & Jana (2016) e Alhassan (2008) relatam que o aumento na tensão de compressão simples é atribuído à formação de compostos cimentícios entre o Hidróxido de Cálcio, presente no solo, e os compostos pozolânicos presentes na CCA. A diminuição dos valores de tensão de compressão pode ser devido ao excesso de CCA introduzido no solo, que geram ligações fracas entre solo e compostos formados.

Na Figura 14 estão os valores das tensões de expansão média e resistência a compressão simples média para as misturas de CCA estudadas.

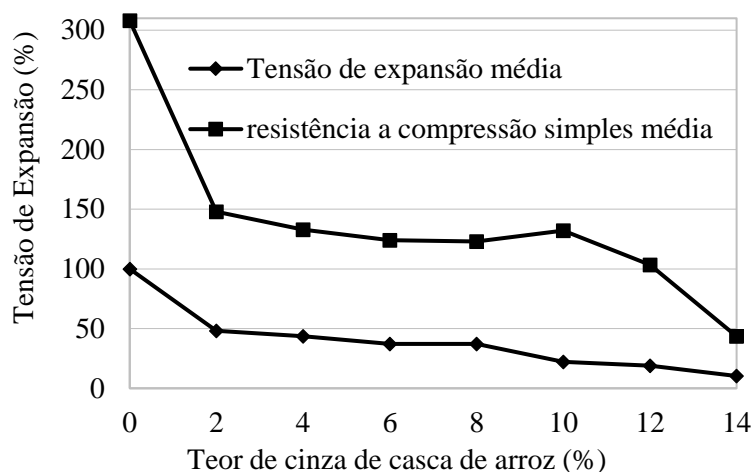


Figura 14. Tensões de expansão média e resistência a compressão simples média. Fonte: Silva (2018).

Adhikary & Jana (2016) mostraram um comportamento, na data zero de cura, com valores decrescentes de compressão em porcentagens anteriores as de 10% de CCA, subindo de valores em 10% de CCA, mas não superando o valor do solo natural com porcentagens menores de 15% de CCA, divergindo com Silva (2018) apenas nas porcentagens superiores a 10% de CCA. Alhassan (2008), mesmo não estudando a compressão simples na data zero, observou que após o teor de 10% de CCA, sempre há diminuição da tensão de compressão, independente do período de cura das amostras.

Misturas de solo com cal-hidratada

As curvas granulométricas do solo natural e das misturas nas diferentes porcentagens de cal-hidratada, permaneceram próximas entre si (Silva, 2018).

A Tabela 9 mostra os dados relativos à caracterização das curvas do solo e das misturas com cal-hidratada. A maior influência da cal-hidratada na granulometria das misturas ocorre na fração fina das amostras, silte e argila. No solo natural, todas as misturas elevaram a porcentagem de silte, diminuindo a fração de argila.

Tabela 9. Caracterização do solo e das misturas com cal-hidratada. Fonte: Silva (2018).

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

A avaliação da relação silte/argila é necessária para compreender se houve o processo de floculação. Nas misturas solo-cal-hidratada, um fenômeno comumente observado é a floculação, onde há o aumento das partículas argila, ficando retidas na fração de silte das amostras. Azevedo (2010) fala sobre este aumento da dimensão das partículas. Por este motivo, há uma diminuição da fração argilosa e um aumento da fração siltosa em algumas das misturas. As curvas granulométricas de Barbosa (2013) e Paiva (2016) também apresentam comportamento da floculação.

Os resultados das umidades das misturas de solo com cal hidratada. Com o aumento do teor de cal-hidratada no solo, houve um decréscimo deste valor, de cerca de 1,3% na umidade na mistura com

13% de cal-hidratada em relação ao solo natural. Esta variação é ocasionada pela substituição do solo pela cal-hidratada, que praticamente não apresentava umidade. O solo natural se encontrava seco ao ar. Quando em uma mesma massa há a retirada de parte deste solo e substituição por um material que tenha uma umidade menor, há a tendência deste decréscimo ao longo do aumento das porcentagens no solo (Ferreira & Ferreira, 2009), comprovando os resultados obtidos.

A variação média dos resultados dos ensaios de densidade real dos grãos das misturas com cal-hidratada foi próxima a 9,71%. A mistura com 13% de cal-hidratada obteve uma redução em sua densidade na ordem de 25,37% do valor de densidade, em relação ao solo natural. Houve uma

redução gradativa dos valores de densidade, mostrando-se mais acentuada ao longo dos acréscimos das porcentagens em relação a CCA, pois a densidade da cal-hidratada era maior que a densidade da CCA, então a substituição do solo pela cal-hidratada precisaria de um volume menor de cal-hidratada do que a relação à cinza.

Em Cabrobó, o solo natural apresentou um valor de Peso Específico Real dos Grãos de 26,06 kN m⁻³ e, com o aumento das porcentagens de cal-hidratada no solo, estes valores tiveram um leve aumento, voltando ao valor próximo a 26,1 kN m⁻³ na porcentagem de 7% de cal-hidratada. Em Ipojuca e Paulista, os valores foram praticamente

iguais. O solo de Cabrobó apresentou-se com valor de 26,06 kN m⁻³, Ipojuca, 36,36 kN m⁻³ e Paulista, 26,14 kN m⁻³. Com a porcentagem estabilizante, os valores obtidos foram 26,10 kN m⁻³, 26,75 kN m⁻³ e 26,48 kN m⁻³, respectivamente.

Compactação das misturas de solo com cal

A Figura 15 apresenta as curvas de compactação do solo natural e das misturas com cal-hidratada. Com o aumento do teor de cal-hidratada nas misturas, houve diminuição da densidade seca máxima e um aumento da umidade ótima.

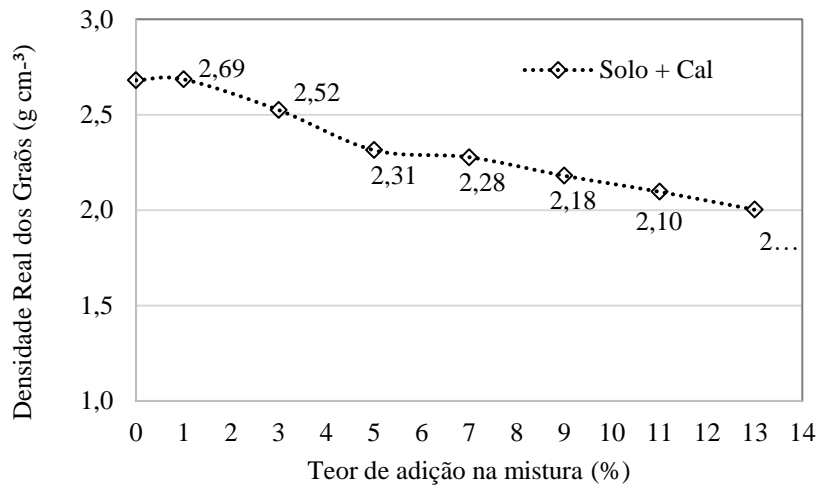


Figura 15. Densidade real dos grãos do solo e das misturas com cal-hidratada. Fonte: Silva (2018).

Na Figura 16 apresentam-se os dados interpretados das curvas de compactação com

respectivas densidades seca máximas e as umidades ótimas em cada teor de cal-hidratada.

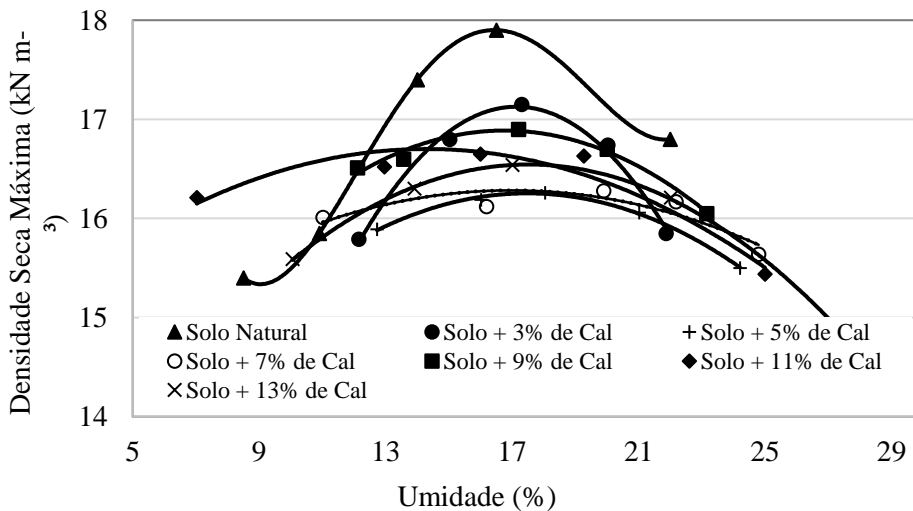


Figura 16. Curvas de Compactação do solo natural e misturas com cal-hidratada. Fonte: Silva (2018).

Nota-se um comportamento pouco crescente da umidade e decrescente da densidade seca máxima, conforme observado, inclusive, nas misturas de 7% de cal-hidratada. Depois há a inversão de comportamento, mas as variações da

densidade seca máxima e da umidade ótima são baixas entre as misturas de 9% a 13% de cal-hidratada.

Na Figura 17 observa-se um acréscimo da umidade e decréscimo da densidade seca máxima nos teores de 3%, 5% e 7% de cal-hidratada.

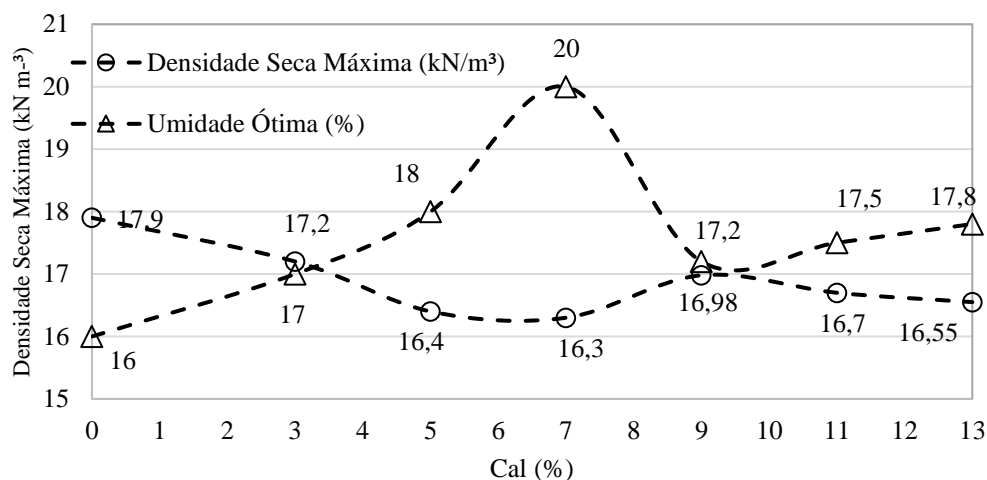


Figura 17. Massa específica aparente seca do solo com diversas porcentagens de cal-hidratada e suas respectivas umidades ótimas. Fonte: Silva (2018).

O comportamento não segue o padrão subsequente nas demais porcentagens, mesmo que nelas, o fenômeno do aumento da umidade e decréscimo da densidade seca máxima ocorra. Isto aconteceu porque nas três primeiras porcentagens, usou-se uma amostra de solo e nas demais, 9%, 11% e 13%, usou-se outra amostra de solo. Mesmo as amostras sendo do mesmo local, não notou-se comportamento seguido entre todas, podendo gerar uma envoltória, como nas amostras com CCA.

Nas amostras acima de 9% de cal-hidratada, percebe-se um sutil aumento da umidade ótima em relação a porcentagem anterior em apenas 0,3%. A partir de certa porcentagem de cal-hidratada na amostra, a elevação da umidade e a diminuição da densidade seca máxima se torna cada vez menor. Barbosa (2013) e Paiva (2016) também observaram este fenômeno nas misturas, a partir do teor de 5% de cal-hidratada no solo.

Com as misturas de cal-hidratada, o comportamento se manteve como o da CCA, crescentes para LP, praticamente constantes para os LL e decrescentes para os IP. O maior teor de cal, 13%, trouxe o IP para valores próximos a 13%, reduzindo 55,13% em relação ao valor inicial. Brandl (1981) relata que as variações que ocorrem rapidamente nos valores dos Limites de Atterberg quando se adiciona a cal no solo, ocorre devido as modificações na estrutura e a flocculação.

Segundo Burmister (1949), IP entre 5 e 10, classifica-se como de plasticidade baixa e entre 10 e 20, plasticidade média, sendo os valores encontrado para os IP's das duas últimas misturas com 11% e 13% de Cal-Hidratada, muito próximo a este intervalo. Quanto ao valor do solo natural,

confirma-se diminuição da plasticidade do solo quando adicionado Cal-Hidratada.

Barbosa (2013) observou decréscimo dos IP com o aumento das porcentagens de cal-hidratada. Paiva (2016) observou-se elevação do IP no solo de Ipojuca e decréscimo do IP no solo de Paulista.

Ensaio químicos das misturas de solo com cal

Estes ensaios foram realizados para encontrar o teor mínimo do pH de 12,42, necessário para atender o critério de Eades & Grim (1966), após uma hora da realização da mistura. De acordo com este método, a porcentagem estabilizante química do solo foi de 13%. Barbosa (2013) e Paiva (2016) atenderam aos critérios de Eades & Grim (1966), com os respectivos teores: 3% e 7% de cal-hidratada no solo de Ipojuca e 5% de cal-hidratada no solo de Paulista.

Expansão das misturas com cal-hidratada

Na Figura 18 estão os valores de expansão do solo natural e das misturas de solo-cal-hidratada, nos quatro períodos de cura escolhidos para análise da expansão neste estudo, avaliados pelo método da expansão livre.

Como se pode observar, com o aumento da porcentagem de cal-hidratada, houve uma redução da expansão tanto ao longo dos teores quanto ao longo dos períodos de cura. O gráfico se iniciou com o valor da expansão do solo obtida na amostra indeformada, nas condições de campo, pois com a adição de 3% de Cal-Hidratada, percebeu-se que a expansão foi inferior a esta, ocorrendo o inverso ao comportamento obtido com a CCA.

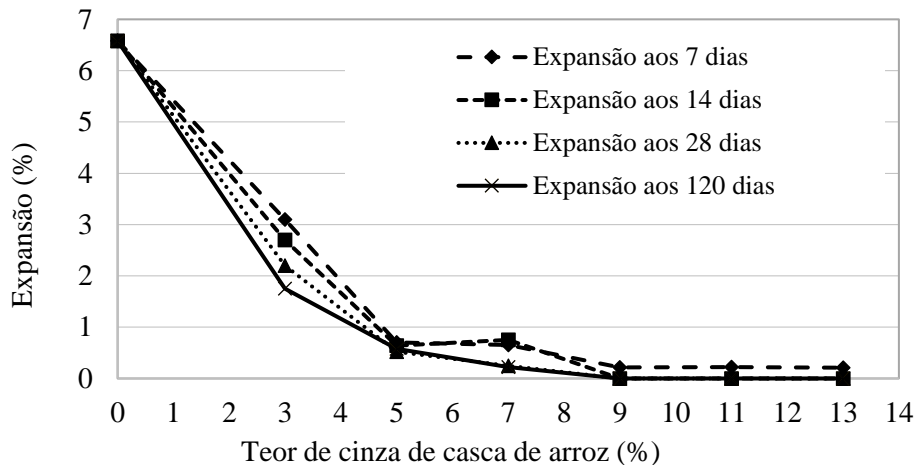


Figura 18. Comportamento de Expansão Livre das misturas em diferentes períodos de cura das misturas solo-cal-hidratada. Fonte: Silva (2018).

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

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

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

A redução da expansão do solo com a adição de cal-hidratada ocorre devido a cimentação pozolânica que ocorre entre o solo e a cal-hidratada quando umedecidos, como discutido

anteriormente. Segundo Herrin & Mitchell (1961), a cal gera influência no comportamento expansivo dos solos e que até certa quantidade, existe a redução de volume. Ao contrário das misturas com CCA, onde em determinado teor há uma máxima resistência à compressão e após este valor, há um decaimento desta resistência, nas misturas com cal-hidratada, quanto maior o teor aplicado, maior será o valor de resistência a compressão simples, como observado nos estudos com cal-hidratada.

Barbosa (2013) e Paiva (2016) afirmam que ocorreu a redução da expansão dos solos com o aumento dos teores de cal-hidratada, e embora tenha sido dispensada a análise da resistência a compressão, nos estudos destes autores, foi realizado este ensaio e comprovado o aumento da resistência à compressão simples.

Os valores de umidade inicial permaneceram praticamente constantes ao longo dos períodos de cura, mostrando boa conservação das amostras. Isto também reflete na expansão e na avaliação destas amostras de mesma porcentagem e em idades diferentes, pois quando há uma perda da umidade nas amostras, possibilita aumento de sucção e conseqüentemente, uma maior expansão.

Na Tabela 11 estão os valores de Tensão de Expansão avaliados pelo método da Tensão a Volume Constante.

Tabela 11. Tensão de Expansão a Volume Constante das misturas de solo com cal-hidratada. Fonte: Silva (2018).

Porcentagem de cal	Tensão de expansão (kPa)				
	Dias				Média
	7	14	28	120	
0* (Campo)	100	100	100	100	100
0** (Compactado)	215	215	215	215	215
3	17,5	15	10	19,17	15,42
5	5	3,75	5	4,17	4,48
7	1,25	2,5	2,5	2,5	2,19

9	0,83	-	-	-	0,83
11	0,83	-	-	-	0,83
13	0,83	-	-	-	0,83

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

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

Com a redução volumétrica das misturas, observa a redução da Tensão de Expansão das misturas com cal-hidratada. Evans & Bell (1981) afirmam que nos primeiros acréscimos de cal ocorrem as maiores reduções do comportamento expansivo do material, que podem ser constatadas nos valores obtidos por Silva (2018), Barbosa (2013) e Paiva (2016), sendo um comportamento típico das misturas de solo com cal-hidratada.

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

Na Tabela 12 estão os dados dos constituintes de cada corpo de prova, com as respectivas porcentagens de solo, cal-hidratada, água e ar da amostra. O teor de solo vai diminuindo, para ser substituído pela cal-hidratada, água e ar.

Tabela 12. Porcentagem constituinte das amostras de solo-cal-hidratada analisadas. Fonte: Silva (2018).

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

A Figura 19 mostra os valores dos percentuais constituintes de cada amostra.

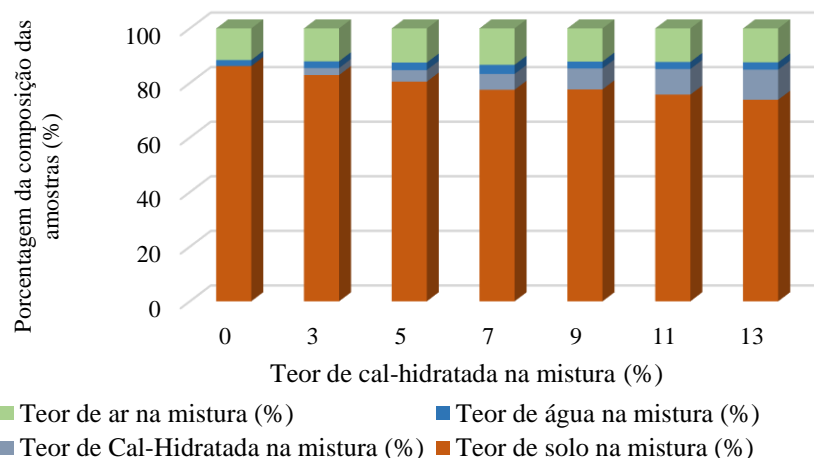


Figura 19. Percentual dos constituintes de cada amostra com Cal-Hidratada em análise. Fonte: Silva (2018).

O teor de cal-hidratada aumenta gradativamente, interferindo no aumento da água,

pois a umidade ótima aumentava paralelamente ao teor de cal-hidratada e há o aumento da porção de

ar, pois a densidade seca máxima diminui e com isto, há mais vazios na amostra, sendo preenchidos por água e ar. Este conceito é aplicado em todas as amostras, mas ressalta-se que, pela mudança de solo usado nas amostras entre 3% e 7% e entre 9% e 13%, houve variação na composição das amostras entre 7% e 9% de cal-hidratada, mas com comportamentos similares nas amostras dentro de seus intervalos.

Compreende-se a redução dos valores para o solo e o aumento dos valores para cal-hidratada, devido aos teores, de água, pois se eleva a umidade ótima em relação ao solo sem mistura e, conseqüentemente, o teor de água na amostra, e o de ar, pois além do aumento da umidade ótima ao longo das misturas, há uma queda do peso específico destas, ocasionando um maior teor de vazios ocupados por água e ar.

Conclusão

As misturas de solo com CCA apresentaram granulometrias próximas, pois a substituição do solo por CCA ofereceu pouca influência, devido a leveza da CCA. A densidade foi decrescente ao longo do aumento das porcentagens de CCA, pois esta apresenta baixa densidade e quando substituída no solo, diminui a massa da amostra. Houve aumento da umidade ótima e diminuição da densidade seca máxima nas amostras, ocasionada pela maior necessidade de absorção de água pela CCA quando se eleva seu teor. O acréscimo de CCA influenciou diretamente nos LP das misturas, elevando-os, e decaindo os IP, ocasionado pela cimentação pozolânica.

A CCA mostrou-se muito eficaz no combate a expansão do solo, necessitando para estabilização deste solo, um teor de 14% de CCA para alcançar valores de expansão próximos a 1,5%, reduzindo a Tensão de Expansão a Volume Constante para valores inferiores a 10 kPa. Influenciou na resistência a compressão axial simples, diminuindo os valores em relação ao solo natural e mostrando que há um limite ótimo entre as misturas quando se trata de compressão axial simples, que em Agrestina foi de 135 kPa para 10% de CCA, decaindo consideravelmente estes valores após isto. As fases das misturas com CCA mostram decréscimo da porcentagem de solo e aumento gradativo da porcentagem de água, CCA e ar.

As granulometrias das curvas de solo com cal-hidratada apresentaram uma elevação da relação silte/argila, mostrando que houve o fenômeno da floculação, chegando a 77% esta relação aos 13% de cal-hidratada. A densidade das amostras decaiu com o aumento do teor de cal-hidratada, também ocasionado pela menor densidade da cal-hidratada, em relação ao solo. As

curvas de compactação, mostraram que houve o aumento da umidade ótima e a diminuição da densidade seca máxima nas misturas. O LP decaiu com a elevação da porcentagem de cal-hidratada, apresentando uma tendência ao decréscimo do IP. A porcentagem de cal-hidratada no solo que atendeu o pH, aplicando metodologia selecionada neste estudo, foi de 13%.

A expansão do solo diminuiu com o aumento das porcentagens, estabilizando com 9% de cal-hidratada, ocorrendo a estabilização mecânica antes da estabilização química. A Tensão de Expansão diminuiu ao longo dos teores das misturas, alcançando valores próximos a 1 kPa a partir da porcentagem de 9% de cal-hidratada. Houve decréscimo da fração de solo e aumento das frações de água, ar e cal-hidratada. O solo, em estado natural e umidade e densidade de campo, apresentou expansão livre de 6,58% (com sobrecarga de 10 kPa) e tensão de expansão média de, aproximadamente, 155 kPa.

A substituição do solo por Cal-Hidratada e CCA reduziu significativamente a expansão, influenciando em suas características físicas e químicas, em relação ao solo natural, e mostrando-se eficaz na aplicação em solos expansivos para reduzir e/ou combater a expansão associada.

Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6473. 2003. Cal virgem e cal hidratada – Análise química.
- Adhikary, S.; Jana, K. 2016. Potentials of rice husk ash as a soil stabilizer. *International Journal of Latest Research in Engineering and Technology*, 2, (2), 40-42.
- Ageitec, Agência Embrapa de Informação Tecnológica. 2018. Relatório de Avaliação dos Impactos das Tecnologias Geradas pela Embrapa. Campinas, SP. https://bs.sede.embrapa.br/2018/relatorios/informaticaagropecuaria_2018_ageitec.pdf.
- Alhassan, M. 2008. Potentials of rice husk ash for soil stabilization. *Assumption University Journal of echnology*, 11, (4), 246-250.
- Amorim, S. F. 2004. Contribuição à Cartografia Geotécnica: Sistema de Informações Geográficas dos Solos Expansivos e Colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC-PE). Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil, UFPE. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5707>.
- Azevêdo, A. L. C. 2010. Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no

- solo após a adição de cal. Dissertação de Mestrado Profissional, Ouro Preto, UFOP. <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2281>.
- Barbosa, V. 2013. Estudo do Comportamento Geotécnico de um Solo Argiloso de Cabrobó, Potencialmente Expansivo, Estabilizado com Cal. Dissertação de Mestrado. Recife, UFPE. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/12488>.
- Bento, P. F. 2006. Uso de Cal e Fibras na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/5261>
- Brandl, H. 1981. Alteration of soil parameters by stabilization with lime. In: Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 3: 587-594.
- Burmister, D. M. 1949. Principles and techniques of soil identification. In: Proceedings of Annual Highway Research Board Meeting. National Research Council. Washington, DC, 29, 402-434.
- Climate-data. 2017. Clima: Agrestina. <https://pt.climate-data.org/location/43100/>.
- Das, B. M. 2007. Fundamentos de engenharia geotécnica. Tradução All Tasks, revisão técnica: Pérsio Leister de Almeida Barros, Tradução da 6ed. norte-americana, Thomson Learning, São Paulo, SP.
- Eades, J. L.; Grim, R. E. 1966. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. Highway research record, 139, 61-72. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1966/139/139-005.pdf>.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1997. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, RJ. https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2001. Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco. Recife. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Documentos; Nº. 35. <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/4697/zoneamento-agroecologico-do-estado-de-pernambuco-zape>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2017a. Manual de métodos de análise de solo / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 573p. <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181717/1/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2017.pdf>.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2017b. Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do município de Agrestina-PE. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/331168/levantamento-exploratorio---reconhecimento-de-solos-do-estado-de-pernambuco>.
- Ferreira, S. R. M. 1995. Colapso e Expansão em Solos Naturais não Saturados Devido à Inundação. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. http://www.coc.ufrj.br/pt/component/docman/?task=doc_download&gid=767&Itemid=.
- Ferreira, S. R. M.; Ferreira, M. D. G. D. V. 2009. Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um vertissolo no semiárido de Pernambuco. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33, (4), 779-791. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400004>
- Gondim, L. M. 2008. Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe, Ceará. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/1704/1/2008_dis_imgondim.pdf
- Herrin, M.; Mitchell, H. 1961. Lime-soil mixtures. Highway Research board bulletin, 304. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbbulletin/304/304-008.pdf>
- Hilt, G. H.; Davidson, D. T. 1960. Lime fixation in clayey soils. Highway Research Board Bulletin, 262. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbbulletin/262/262-002.pdf>
- Holtz, W. G. 1954. Engineering properties of expansive clays. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 121, 641-677. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2012.34072>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2007. Manual Técnico de Pedologia, 2ª Ed, Rio de Janeiro.
- Jimenez Salas, J. A. 1980. Cimentaciones en terrenos expansivos o colasables. Geotecnia y Cimientos III, 1, 533-650.

- <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv37318.pdf>
- 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 de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33207>.
- Millet, J. 1979. Influência da temperatura de calcinação e da natureza do calcário sobre a mineralogia das cales virgens (tradução Maria Alba Cincotto). Associação Brasileira dos Produtores de cal. São Paulo, Brasil.
- Osaki, F.; Darolt, M. R. 1991. Estudo da qualidade de cinzas vegetais para uso como adubos na região metropolitana de Curitiba. Revista Setor Ciências Agrárias, 11, (1-2), 197-215. http://www.iapar.br/arquivos/File/zip_pdf/da_rolt_qualcinzasv.pdf.
- 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. Tese de doutorado em Engenharia Civil-UFPE, Recife. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/25101>.
- Patel, P.; Mahiyar, H. K. 2014. An Experimental Study of Black Cotton Soil, Stabilized with Rice Husk Ash, Fly Ash and Lime. International Journal of Engineering Research and Technology, 3, (11), 660-665.
- Pinto, A. R. A. G. 2008. Fibras de Carauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, PUC-Rio.
- Pouey, M. T. F. 2006. Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico. Tese de Doutorado. Porto Alegre, UFRGS.
- Seed, H. B.; Lundgren, R. 1962. Prediction of swelling potential for compacted clays. Journal of the soil mechanics and foundations division, 88, (3), 53-87. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0268-4>.
- Serafini, L.; Alves, G. M.; Rosa, F.; Wesseling, D. H.; Gonçalves, F. P.; Thomé, A. 2004. Resultados de pesquisas em estabilização alcalina realizadas com materiais do norte do RS. Teoria e Prática na Engenharia Civil, 4, 1-11.
- Shrivastava, D.; Singhai, A. K.; Yadav, R. K. 2014. Effect of lime and rice husk ash on engineering properties of black cotton soil. Int. J. Eng. Res. & Sci. & Technology, 3, (2) 292-296.
- Skempton, A. W. 1953. The colloidal activity of clays. In: Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics on Foundation Engineering, 3, (1), 587-595.
- Silva, J. A.; Bello, M. I. M.; Oliveira Júnior, R. F.; Ferreira, S. 2018. Estabilização de um solo potencialmente expansivo, de Agrestina – PE, com a utilização da cinza da casca de arroz. 16º Congresso Nacional de Geotecnia, Ponta Delgada, Açores, Portugal.
- 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 de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste, UFPE.
- Tashima, M. M.; Sousa, L. C.; Akasaki, J. L.; Silva, E. J.; Melges, J. L. P.; Bernabeu, J. J. P. 2011. Reaproveitamento da cinza de casca de arroz na construção civil. Holos Environment, 11, (1), 81-89.
- Tiboni, R. 2007. A utilização da cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland (Tese, Universidade de São Paulo). <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-19102007-084553/pt-br.php>.
- Williams, A. A.; Donaldson, G. W. 1980. Developments related to building on expansive soils in South Africa. In: Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Denver. 2, 834-844.