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

MAGNO AUGUSTO MOTTA MACIEIRA DRUMOND

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA CINZA RESULTANTE DA QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE O POTENCIAL EXPANSIVO DE UMA ARGILA PROVENIENTE DO MUNICÍPIO DE PAULISTA-PE

Recife
2019

MAGNO AUGUSTO MOTTA MACIEIRA DRUMOND

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA CINZA RESULTANTE DA QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE O POTENCIAL EXPANSIVO DE UMA ARGILA PROVENIENTE DO MUNICÍPIO DE PAULISTA-PE

Dissertação submetida ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Recife

2019

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

D795a Drumond, Magno Augusto Motta Macieira.
Avaliação da aplicação da cinza resultante da queima do bagaço da cana-de-açúcar sobre o potencial expansivo de uma argila proveniente do município de Paulista-PE / Magno Augusto Motta Macieira Drumond. – 2019.
65 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Solos expansivos. 3. Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. 4. Estabilização de solos. 5. Sustentabilidade. I. Jucá, José Fernando Thomé. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2020-24

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA CINZA RESULTANTE DA QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE O POTENCIAL EXPANSIVO DE UMA ARGILA PROVENIENTE DO MUNICÍPIO DE PAULISTA-PE

defendida por

Magno Augusto Motta Macieira Drumond

Considera o candidato APROVADO

Recife, 13 de novembro de 2019.

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho (Examinador externo)
Universidade de São Paulo

_____

Prof.ª Dr.ª Maria Odete Holanda Mariano (Examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de concluir meu trabalho.

A minha família da Quinta pelo apoio e incentivo, principalmente meus pais e irmãos pelo apoio incondicional e a tia Milene pelas revisões.

Ao meu orientador D.Sc. Jucá pelo brilhantismo em me conduzir até o final deste trabalho, sua experiência foi imprescindível e com ele aprendi além da engenharia, pois aprendi que precisamos estar felizes, afinal é isso que importa.

A todos amigos que fiz em Recife, em especial aos geoamigos, Ana, Bruno, Carlla, Carlos, Danilo, Fellipe e Sávio, vocês tornaram a árdua caminhada mais leve e divertida.

A Sara pelo companheirismo e paciência.

Aos professores Silvio Romero e Washington Moura pelas contribuições dadas na realização de meus ensaios.

À equipe técnica do Laboratório de Geotecnia da UFPE, principalmente ao Gutemberg e Antônio Brito pelas incansáveis ajudas.

Ao professor Dr. Sérgio Paiva da UNICAP pela realização dos ensaios químicos.

A equipe do laboratório do Núcleo de Estudos de Geoquímicos da UFPE pela realização do ensaio de espectrometria de fluorescência de raio-x.

Ao Grupo JB pela doação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

A Arthur e Felipe pela ajuda em conseguir o solo expansivo e todo o companheirismo.

Ao CNPQ pela bolsa de estudo, dando oportunidade de realizar esta pesquisa.

RESUMO

O Estado do Pernambuco é mundialmente conhecido pelas especificidades do seu solo. Do litoral ao sertão existem solos moles, rochosos, expansivos e colapsíveis. O objetivo principal deste trabalho é investigar o potencial de uso das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), como material estabilizante em solos expansivos. A argila expansiva do município Paulista/PE apresenta alta expansividade, apresentando uma pressão de expansão de 192,50 KPa, podendo apresentar danos às edificações e até mesmo acarretar demolições. A CBCA é um resíduo utilizado como fertilizante agrícola, de uso restrito, pelas agências ambientais, por falta de comprovação de efeitos e contribuições sustentáveis para o meio ambiente. Mas, por análises químicas, foram constatados, nas cinzas, consideráveis teores de óxido de cálcio e de magnésio, propriedades que contribuem para que ocorra reações pozolânicas e cimentantes quando misturados ao solo. Foram adicionados teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de CBCA, a fim de reduzir a expansividade do solo. Neste trabalho foram realizados ensaios para caracterização física, química e mecânica do solo natural e das misturas com CBCA. A pressão de expansão e a expansão “livre” não chegaram a valores nulos, mas apresentaram com a inserção da CBCA valores baixos, sendo possível deduzir que a cinza reduz a expansão do solo e pode ser usada a depender das características do projeto. Outro fato que vale destacar é que o uso da cinza contribui com a destinação final mais plausível do resíduo da cana-de-açúcar, além de tornar o processo produtivo mais sustentável.

Palavras-chave: Solos expansivos. Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. Estabilização de solos. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The state of Pernambuco is worldwide known for the peculiarities of its soil. From coast to the “Sertão”, a mesoregion located in the state’s interior, there are soft, rocky, expansive, and collapsible soils. The main objective of this work is to investigate the potential use of sugarcane bagasse ash (CBCA) as a stabilizing material to expansive soils. The expansive clay from the municipality of Paulista/PE present high expansiveness, presenting an expansion pressure of 192.50 KPa, which can damage buildings and even lead to demolitions. CBCA is a waste used as agricultural fertilizer; CBCA’s application is restricted to environmental agencies due to the lack of evidence about its effects and sustainable contributions to the environment. Notwithstanding, by chemical analysis it was found in the ash considerable calcium oxide and magnesium contents; these chemical compounds have properties that contribute to occur pozzolanic and cementing reactions when they are mixed with the soil. Contents of 5, 10, 15, 20, 30, and 40% of CBCA were added to the soil in order to reduce its expansiveness. In this paper, laboratory tests were performed for physical, chemical, and mechanical characterization of the natural soil and the CBCA mixtures. Even though expansion pressure and free expansion did not reach null values, they presented low values with CBCA insertion; therefore, it is possible to deduce that the ash reduces the expansion of the soil and can be used depending on the project characteristics. It is worthy highlighting that the use of the ash contributes to a more plausible final disposal of sugarcane residue, in addition to make the production process more sustainable.

Keywords: Expansive soils. Sugarcane bagasse ash. Soils stabilization. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de suscetibilidade à expansão dos solos no estado de Pernambuco 17
Figura 2 – Uma das formas de aplicação de cinza no plantio de cana-de-açúcar .. 25
Figura 3 – Local de coleta do solo expansivo 29
Figura 4 – Histórico bibliográfico da argila expansiva de Paulista 30
Figura 5 – Amostras da CBCA, AE e das misturas solo-cinza..... 33
Figura 6 – Célula edométrica 36
Figura 7 – Prensa de cisalhamento direto 36
Figura 8 – Curva Granulométrica da CBCA 37
Figura 9 – Curva Granulométrica da argila expansiva e as misturas com CBCA ... 40
Figura 10 – Peso específico real dos grãos da argila expansiva e das misturas com CBCA 41
Figura 11 – Curvas de compactação do solo natural e das misturas com CBCA 44
Figura 12 – Variação da W_{otm} no solo natural e nas misturas com CBCA 45
Figura 13 – Variação do $\gamma_{d\ máx}$ do solo natural e nas misturas com CBCA 45
Figura 14 – Relação $\gamma_{d\ máx}/W_{otm}$ para solo natural e as misturas com CBCA 46
Figura 15 – Expansão Livre em percentual para o solo natural e as misturas solo-CBCA 51
Figura 16 – Relação $\gamma_{d\ máx}/W_{otm}$ para solo natural e as misturas com CBCA..... 52
Figura 17 – Ábaco para definição do grau de expansividade das argilas baseado na atividade e percentual de argila 52
Figura 18 – Pressão de Expansão para o solo natural e as misturas solo-CBCA..... 54
Figura 19 – Tensão cisalhante máxima de ruptura dos corpos de prova..... 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise Granulométrica do solo natural e das misturas solo-cinza.....39
Tabela 2 – Resultados de Limites de Atterberg.....41
Tabela 3 – Grau de atividade das argilas.....42
Tabela 4 – Classificação das amostras.....42
Tabela 5 – Resultados das análises químicas no solo natural e nas misturas com CBCA.....47
Tabela 6 – Percentuais dos óxidos e perda ao fogo da argila expansiva e da CBCA.....49
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de Expansão “Livre”.....50
Tabela 8 – Resultados do ensaio de Pressão de Expansão.....53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGEITEC	Agência Embrapa de Informação Tecnológica
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CBCA	Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
OCDE	Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCD	Resíduo da Construção Civil e Demolição
RSU	Resíduo Sólido Urbano

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATVA DA PESQUISA 12
1.2 OBJETIVOS 14
1.2.1 Objetivo geral 14
1.2.2 Objetivos específicos 15
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16
2.1 ARGILA EXPANSIVA 16
2.1.1 Características de solos expansivos e sua importância 16
2.1.2 Resistência de solos argilosos 19
2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS 20
2.2.1 Contexto geral de resíduos sólidos 20
2.2.2 Produção de cana-de-açúcar no Brasil e sua Importância 22
2.2.3 Características e destinação dos resíduos e sub-resíduos da cana-de-açúcar 23
2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS 25
2.3.1 Mecanismo de Interação Solo-Cinza 25
2.3.2 Alteração das Propriedades do Solo com a Inclusão de um Resíduo Sólido 27
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL 28
3.1 MATERIAIS 28
3.1.1 Solo Expansivo 28
3.1.2 CBCA (Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar) 31
3.2 MÉTODOS 32
3.2.1 Preparação das amostras 32
3.2.2 Ensaios 33
3.2.2.1 Caracterização Física 33
3.2.2.2 Caracterização Química 34
3.2.2.3 Caracterização Mecânica 35
4 RESULTADOS E ANÁLISES 37
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA 37
4.1.1 Caracterização física da CBCA 37

4.1.2 Caracterização física do solo natural e das misturas 38
4.1.2.1 Caracterização granulométrica 38
4.1.2.2 Peso específico real dos grãos 40
4.1.2.3 Limites de consistência 41
4.1.2.4 Classificação dos solos 42
4.1.2.5 Grau de compactação 43
4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA 46
4.2.1 Análise química 46
4.2.2 Espectrometria de fluorescência de raio-x 49
4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA 50
4.3.1 Expansividade 50
4.3.1.1 Ensaio de Expansão “Livre” 50
4.3.1.2 Ensaio de Pressão de Expansão 53
4.3.2 Resistência ao cisalhamento 54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 56
5.1 CONCLUSÕES 56
5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS 60
REFERÊNCIAS 61

1 INTRODUÇÃO

Nessa seção será abordado um exórdio de relevância que justificará a realização do trabalho.

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATVA DA PESQUISA

Os processos pedogenéticos são os responsáveis pela gênese do solo e por atribuir características tão variadas ao mesmo. Isso gera aos engenheiros grandes desafios, visto que a cada local o solo possui características particulares, complexas e variáveis. Diante destas adversidades, pode advir que o solo não atenda aos atributos demandados pelo projeto. Entre as alternativas dos engenheiros geotécnicos se destacam a remoção seguida de substituição do material ou modificação e melhoramento das propriedades deste solo. Busca-se dessa forma um ganho na resistência e uma aplicabilidade adequada ao que se pede nas diferentes obras da engenharia.

As estruturas de um solo podem ser alteradas pela mudança no arranjo das partículas no interior da massa ou pela inserção de novos materiais que irão propiciar novas características ao solo.

A inserção de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) é uma técnica de melhoria do solo, onde se sucede reações pozolânicas, mesmo que não tenha necessariamente reações cimentantes, já que as reações pozolânicas permitem que a troca de cátions ocorra. Por tanto quanto maior for o percentual de óxido de cálcio no componente que está sendo misturado, maior será essas reações (FERREIRA, 2018).

A CBCA é um subresíduo resultante da queima do bagaço. Esse resíduo se obtêm da sobra da extração do melaço da cana-de-açúcar. Por ser um material altamente calórico o bagaço da cana é vastamente utilizado como fonte de calor de caldeiras para produção de energia.

Devido ao grande crescimento das atividades agroindustriais, milhões de toneladas de resíduos são gerados. O Brasil é um país que se destaca por ser uma grande potência agrícola, sendo também um dos maiores produtores no mundo de resíduos do bagaço da cana.

Na produção agroindustrial brasileira temos em proeminência os produtos derivados da cana-de-açúcar, principalmente para a produção do etanol e a açúcar. Esses produtos são de grande consumo no mercado nacional e internacional, contudo há um crescente aumento de resíduos que necessita de remanejamento seguro e sustentável.

Segundo levantamento divulgado pela CONAB a safra 2016/2017 de cana-de-açúcar atingiu 657,18 milhões de toneladas. Segundo Cacuro e Waldman (2015) a produção de cana-de-açúcar gera em torno de 175 milhões de toneladas ano de resíduos, aproximadamente 27% da produção.

A destinação dos resíduos gerados pelo processo de produção dos derivados da cana é um crescente problema. O descarte adequado do bagaço da cana acarreta um custo a mais no processo de produção. Constata-se que esses resíduos também representam um sério problema ambiental, devido a sua contínua disposição no meio ambiente. Encontrar aplicações agregando valor a estes resíduos torna o processo produtivo mais sustentável, pois diminui substancialmente o impacto ao meio ambiente. Outra vantagem se obtém com a diminuição do custo do tratamento deste resíduo para sua disposição final (CACURO E WALDMAN, 2015).

Segundo informações da AGEITEC, a cada uma tonelada de cana processada são resultantes aproximadamente 280 kg de bagaço, 28%. Segundo CONAB, a produção de cana-de-açúcar do estado de Pernambuco é a segunda maior produção do nordeste, onde se produziu 11,82 milhões de toneladas na safra 2016/2017. Sendo assim, para a produção dos insumos resultantes da cana foi produzido 3,31 milhões de toneladas de bagaço no Estado. Com estes dados é possível estimar que a produção de cinza chega em torno de 79,47 mil toneladas por ano. Com o emprego destas cinzas como estabilizante do solo daria para construir 95 km de rodovia utilizando o resíduo em base de pavimentação (nas dimensões 0,20m x 7m x 1000m), considerando o teor de 30% de cinza em peso. A nível nacional, a cinza possibilitaria em torno de 5250 km de rodovias, afinal o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e precisa dar correta destinação aos resíduos dessa importante produção.

Segundo Farias (2005) a adição de cinza aumenta o valor da capacidade de suporte do solo, diminui a sua expansividade, reduz a massa específica aparente seca e deixa a mistura pouco sensível à umidade, ou seja, ele reage diferente com a umidade. Com isso, é possível averiguar que as cinzas provocam uma melhoria nas características geotécnicas.

Segundo Santana e Silveira (s.d.) quando a cinza do bagaço é adicionada ao solo poderá ser obtido um material mais leve que o solo puro, pois os valores de densidade real dos grãos da cinza são inferiores ao do solo.

Conforme as considerações finais da pesquisa de Santos (2015, p. 115)

> Os resultados da composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram teores médios de CaO, Al_2O_3 e Fe_2O_3 e elevado teor de SiO_2, que são positivos para a ocorrência das reações pozolânicas, as quais integram o processo de estabilização química do solo.

Sendo um material com grande quantidade de óxido de silício (SiO_2), quando adicionado água, gera propriedades aglomerantes necessárias a cimentação. As quantidades de sílica nas cinzas variam de acordo com o processo de incineração. E neste processo vários fatores interferem, mas o principal é a temperatura de queima do bagaço. Quanto maior a temperatura de queima, menor é o valor de perda de massa ao fogo e maior será a atividade pozolânica do material. O que faz necessário uma caracterização química do material mais detalhada (CORDEIRO, TOLEDO FILHO E FAIRBAIRN, 2009).

Nesta pesquisa é analisado diferentes percentuais de solo-cinza, para analisar a interação do material e qual a sua contribuição para reduzir a expansividade de solos e o aumento da resistência mecânica. O uso da cinza se justifica no intuito de minimizar os impactos ambientais das usinas que utilizam o bagaço como fonte de combustível. Além de propiciar uma destinação final ambientalmente correta do resíduo e um beneficiamento pela reutilização, gerando lucros. Colocaria fim aos altos custos para se fazer o devido tratamento e descarte adequado deste material.

1.2 OBJETIVOS

Nessa seção serão abordados os objetivos que motivaram o trabalho. Inicialmente, será apresentado o objetivo geral mais abrangente. E, por último, mas não menos importantes, os objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta dissertação é investigar o potencial de uso das cinzas resultantes da queima do bagaço da cana-de-açúcar, como material estabilizante para aplicação em solos expansivos e sua contribuição na melhoria da resistência.

1.2.2 Objetivos específicos

De acordo com o objetivo geral, são descritos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar física e quimicamente a CBCA e o solo expansivo.
- Analisar o comportamento físico, químico e mecânico das misturas solo-resíduo;
- Avaliar o uso de CBCA em solos expansivos nas misturas com os seguintes teores de cinza em peso: 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40%.
- Avaliar a utilização da CBCA para reduzir a expansividade dos solos;
- Avaliar a utilização da CBCA na melhoria dos parâmetros de resistência do solo em estudo;
- Por meio dos resultados, verificar se há viabilidade técnica e ambiental do uso de CBCA em solos expansivos.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em 5 capítulos, apresentados na seguinte forma:

- O Capítulo 1 expõe a introdução, onde apresenta a relevância e justificativa da pesquisa, objetivo e estrutura da dissertação;
- O Capítulo 2 exibe a revisão da literatura com destaque nas características e resistência dos solos expansivos, características da CBCA e sua interação em solos expansivos;
- O Capítulo 3 apresenta o programa experimental com a descrição dos materiais e métodos utilizados na obtenção dos resultados;
- O Capítulo 4 mostra os resultados e análises da pesquisa com a inserção de CBCA no solo do Janga;
- O Capítulo 5 realiza as conclusões da pesquisa e apresenta sugestões para futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos encontrados sobre a composição das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, suas características físicas e químicas, índices geotécnicos e as propriedades de solos expansivos estabilizados com CBCA serão suscintamente colacionados para sedimentar o presente trabalho.

2.1 ARGILA EXPANSIVA

Nesse tópico será descrito os temas de maior relevância referente a argila expansiva.

2.1.1 Características de solos expansivos e sua importância

As obras em geral necessitam de uma fundação para serem apoiadas e quando se trata de um projeto sobre solos expansivos logo se vem a preocupação quanto a estabilidade da obra, pois eles apresentam características de expansão na estação chuvosa e fissuras quando ressacados na estação seca, ou seja, apresentam uma variação volumétrica que podem gerar sérios danos e em alguns casos até ocasionar a total destruição da obra.

A expansividade está ligada a dois requisitos básicos, um intrínseco (composição mineralógica, textura e estrutura do solo) e outro extrínseco (climatologia, hidrogeologia, vegetação e ocupação antrópica). A união dessas características é capaz de produzir instabilidade volumétrica, sendo possível de contrair e expandir a argila expansiva (MORAIS, 2017).

Para JUCÁ e PONTES FILHO (1997) o mecanismo de expansão dos solos é abstruso devido ao amplo número de fatores intervenientes no processo. Além disso, eles defendem que a formação de minerais argílicos potencialmente expansivos dependem, principalmente, do tipo da rocha matriz e das condições e processos ambientais a que estão submetidas.

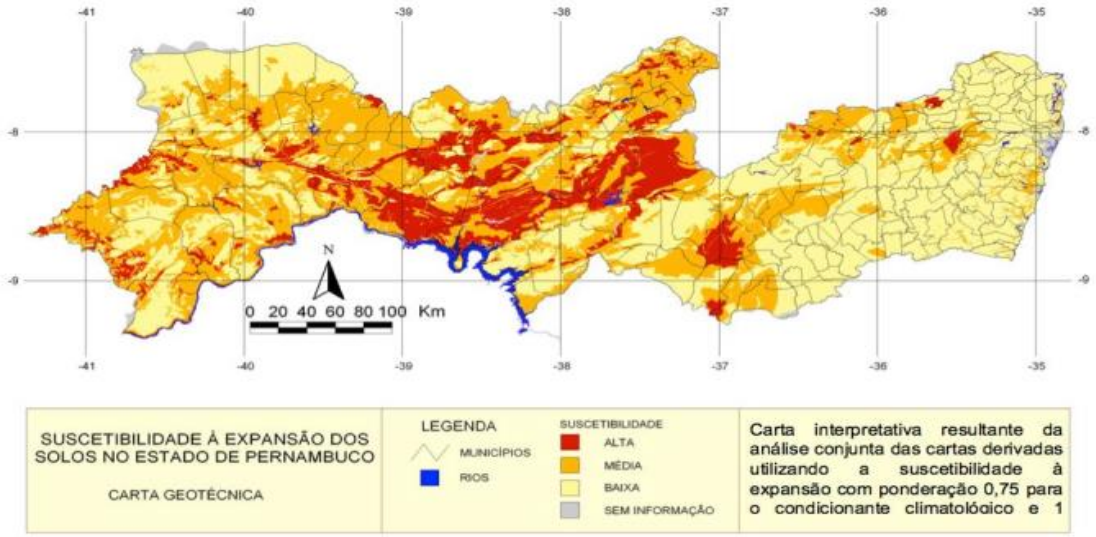
A ocorrência de solos expansivos tem sido identificada em todas as partes do mundo, principalmente nos países como Austrália, Estados Unidos, Canadá, China, Israel, Índia, Egito e outros. Segundo FIROOZI *et al* (2017), os danos anuais causados por solos expansivos ultrapassam 1 bilhão de dólares nos Estados Unidos, 150 milhões de libras no Reino Unido e vários bilhões de libras pelo mundo afora. A grande

questão destes solos não são ausência de soluções, mas a dificuldade de identificar a existência e a magnitude da expansão desses solos principalmente na fase inicial dos projetos.

No Brasil, várias regiões nos deparamos com as ocorrências de solos expansivos: no sul, nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul; no sudeste, em São Paulo; no nordeste, no norte da Bahia passando por Pernambuco até atingir o Ceará (MAHLER, 1994). Porém os prejuízos não são contabilizados, devido à falta de dados que mensure tais danos.

No trabalho de pesquisa de Amorim (2004), através dos mais recentes levantamentos climatológicos, pedológicos e geológicos, ele mostra que o solo expansivo no estado de Pernambuco está presente na região metropolitana de Recife, no agreste, na zona da mata, até o sertão do estado. No meio de vários solos expansivos estudados no estado, os maiores valores de pressão de expansão são encontrados nos solos de Igarassu, Nova Cruz, Olinda, Paulista, Petrolândia e Recife. Estes solos apresentam de média a alta susceptibilidade a expansão. Considerando toda a extensão do estado, os resultados de sua pesquisa mostram uma suscetibilidade à expansão alta em 12,5% da área, média em 38,7% e baixa em 45,2%, conforme Figura 1. (AMORIM, 2004). No entanto, se torna perceptível que essa suscetibilidade definida pelo autor não possui nenhum significado para a expansividade potencial do solo, uma vez que não se tem um banco de dados completo da expansividade de todas as cidades do estado.

Figura 1 – Mapa de suscetibilidade à expansão dos solos no estado de Pernambuco



Fonte: Amorim (2004).

Já em Morais (2017) foi avaliado o comportamento de um solo expansivo na condição natural, localizado no município de Paulista, no estado de Pernambuco. O que lhe permite concluir que para qualquer tipo de obra a ser realizada neste solo ou com este solo deve ser levado em conta o período climático, o alto grau de expansividade e as formas de estabilização.

O período de estiagem prolongado altera o potencial expansivo de um solo. Como exemplo, temos Londres que quase toda a cidade está sobre solo potencialmente expansivo, mas a ocorrência de verões mais secos permitiu que o solo passasse do potencialmente para expansivo propriamente dito. Mas Morais (2017), afirma que vários fatores podem influenciar no potencial de expansão e contração dos solos, entre eles destaca-se a presença de argilominerais, os fatores ambientais e variação tensional interna (resultante da pressão total aplicada) ou externa (sucção ou pressão equivalente da água intersticial).

De acordo com Mitchell (1993), devido ao pequeno tamanho da partícula e sua grande área superficial, as argilas apresentam uma maior suscetibilidade aos efeitos dos campos de forças desbalanceadas, que surgem no momento em que as interfaces das partículas do solo possuem uma interação com a água e cátions adsorvidos em soluções.

Segundo Ferreira (1988) um solo terá características expansivas quando estiver na condição de solo não saturado. Em contrapartida a essa afirmação, um solo saturado pode apresentar características expansivas. Sendo assim, a umidade estará em equilíbrio com a transpiração da vegetação local, a evaporação à superfície do terreno e a ascensão capilar da água. Isso ocorrerá se não houver interferências pela ação antrópica ou por fatores naturais. Já de acordo com Pereira (2004) um solo é expansivo quando apresenta variação de volume superior a 1% sendo resultante da variação de umidade ou sucção.

Os solos expansivos podem ser identificados no local de ocorrência, através da topografia, vegetação, sinais de contração do solo ou fissuras nas edificações. Outra maneira de serem identificados e a mais correta são por meio de ensaios em laboratório para caracterização física, química e mineralógica (por termogravimetria (TG) e difratometria de raio-x)(PAIVA, 2009).

Principais características dos solos expansivos:

- possuem argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1 principalmente do grupo esmectitas, como as montmorilonita ou vermiculita;

- contrações e expansões com aparecimento de trincas;
- solos com drenagem baixa e atividade alta, derivados de rochas ígneas, essencialmente basalto, diabases e gabos, e de rochas sedimentares, basicamente folhelhos, margas e calcários. (Barbosa, 2013).

Entre os principais processos de estabilização de um solo expansivo, a adição de cal ou cimento é mais comumente utilizado. Nos últimos anos, devido à grande necessidade de reutilização dos resíduos sólidos, vários materiais vêm sendo aplicados, como por exemplo a CCA e a CBCA. Em obras de pavimentação uma medida é a impermeabilização do pavimento, pois a ausência de água impede a expansividade do solo. Na ausência das demais medidas é feita a remoção e/ou substituição do material expansivo.

2.1.2 Resistência de solos argilosos

A resistência ao cisalhamento de um solo está ligada a capacidade dele suportar cargas e conservar a sua estabilidade. Isso está diretamente ligado as componentes do ângulo de atrito e coesão do solo.

Ferreira (2018)[1] expõe que a parcela devido à resistência dos grãos depende do atrito mineral e do arranjo, sendo este arranjo gerado pelo efeito de entrosamento de grande ou pequena escala. Quanto mais fino for este solo, menor será este efeito. Já a parcela de resistência devido a coesão desse solo ou a interligação das partículas é resultado de forças atrativas e repulsivas, conforme seja o argilomineral que esteja presente. Por tanto, a resistência é a parcela devido a parte granular e outra devido a coesão (informação verbal).

Um solo argiloso é considerado potencialmente expansivo quando contém um percentual significativo de minerais expansivos e na variação de umidade ele vem a expandir ou contrair.

No trabalho de Jucá *et al*. (1997) é destacado a importância das propriedades do solo, das condições ambientais e o estado de tensão que se encontram, bem como irão influenciar no mecanismo de variação volumétrica de um solo potencialmente expansivo. Ainda defende que levando em consideração os estudos da estrutura e

[1] Informação fornecida por Ferreira durante aula do curso de Pós-graduação da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

das condições de umidade de uma argila expansiva não saturada, é perceptível que a sucção é o parâmetro que melhor representa o solo, juntamente com o estado tensional atuante. Mas vários fatores são intervenientes e contribuem para a resistência de uma argila, como por exemplo, o microclima, a vegetação, o tipo de solo, o nível do lençol freático e a ação antrópica.

Jucá (2018)[2] afirma que é importantíssimo saber de onde vem o solo para saber de qual clima ele vem, qual seu processo de formação. Solos como a montmorillonita, possuem alta atividade, ou seja, expande e contrai mais facilmente na presença ou falta de água. Estes solos, possuem também maior troca catiônica, o que suscita maiores variações volumétricas (informação verbal).

Quando se fala em solos compactados, Jucá (2018) e Ferreira (2018) afirmam que a umidade propicia a formação de estruturas diferentes para uma mesma energia de compactação aplicada. Pois a microestrutura predomina no solo expansivo e domina seu comportamento. Sendo assim, uma argila expansiva mesmo em altas sucções ainda se mantém alta a umidade, ou seja, há grande dificuldade de perda de água das argilas expansivas devido a maior capacidade de retenção deste solo (informação verbal).

A pressão negativa na água intersticial controla as características mecânicas dos solos, tais como resistência e deformabilidade. Além disso, diversos outros fatores influenciam no potencial de expansão do solo, como as condições ambientais, as condições de tensões e principalmente as propriedades do solo.

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

No presente tópico será descrito, num contexto geral, os resíduos sólidos.

2.2.1 Contexto geral de resíduos sólidos

Nas últimas décadas, o crescente aumento na produção de bens e serviços gerou um aumento na produção de resíduos, o que resulta na preocupação com a gestão destes resíduos, uma vez que a sua destinação adequada não se trata apenas

[2] Informação fornecida por Jucá durante aula do curso de Pós-graduação da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

no viés de questões ambientais, mas se faz necessária para a melhoria da saúde pública, onde ambas andam intrinsecamente relacionadas.

Quando se pensa no tratamento de resíduos sólidos é corriqueiro proceder em vista à sua reutilização ou pelo menos à sua inertização. Devido a vasta diversidade de resíduos não existe um único procedimento de tratamento a seguir, com isso é indispensável a realização de pesquisas e desenvolvimento de métodos economicamente viáveis e sustentáveis.

Segundo Jucá (2019), o Brasil é o oitavo maior gerador de resíduos sólidos urbanos do mundo, cerca de 200 milhões de toneladas por ano, sendo que 98% de todo este resíduo tem destinação para aterros sanitários ou lixões. Tendo em vista o quanto o país cuida mal dos seus resíduos, se torna necessário ampliar as linhas de pesquisas com recursos financeiros e humanos para este setor que ainda se encontra em lento crescimento.

No Brasil temos como ferramenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/10, que dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Cuja as ações estão voltadas para a busca de soluções para os resíduos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável. Onde a destinação final dever ser ambientalmente correta e os resíduos devem ser valorizados mecanicamente, biologicamente e/ou energeticamente (BRASIL, 2010).

O aproveitamento de resíduos sólidos como fonte de energia ainda é muito restrito no Brasil, isso se dá pela falta de políticas públicas que tragam incentivos ao desenvolvimento sustentável e entre outras questões internas do país. Mas em vários países do mundo, processos como a incineração dos resíduos são altamente praticados, principalmente os resíduos com alto potencial calórico que são utilizados como fonte de calor e/ou também na geração de energia. Esses resíduos chegam a ter redução de volume e peso em cerca de 60 a 90% quando passam pelo processo de combustão (CIMM, s.d.).

No Brasil, segundo o PNRS, é obrigação da indústria que produz o resíduo sólido, o gerador no caso, a responsabilidade de realizar o tratamento adequado e a correta destinação final. Podendo ser executado por tratamento interno ou terceirização dos serviços por uma empresa especializada, onde o gerador deve

apresentar aos respectivos órgãos estaduais informações sobre geração, características, armazenamento e destinação de seus resíduos (IPEA, 2012).

Nesta pesquisa foram estudados diversos resíduos afim de encontrar o que contribui positivamente na melhoria das qualidades dos solos. Diversos resíduos foram pesquisados, como esterco resultante da produção bovina, mas material já utilizado na agricultura como fertilizante; munha da produção de carvão vegetal, material de pouco volume, não tem sobra que justifique seu uso; RCD, somente duas usinas no estado e material não apresenta características físicas adequadas para uso; escória de alto forno, material sem disponibilidade no estado de Pernambuco; fibra de vidro, material 100% reciclável sem perder a qualidade e a pureza do produto; cinza de RSU, material descartado em aterros, a sua queima não se aplica, apesar de ser uma alternativa de gestão dos resíduos; fibra (metálica) de aço, material com problema de corrosão; fibra de poliéster, material já reciclado, não se justifica seu uso; e dentre outros resíduos que foram descartados por não apresentarem características físicas e mecânicas adequadas ao uso.

2.2.2 Produção de cana-de-açúcar no Brasil e sua Importância

No cenário atual o Brasil se destaca como o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. São em torno de 9 milhões de hectares em plantação. Em 2017, o setor sucroenergético foi o quarto segmento na pauta de exportação do agronegócio do Brasil, ficando atrás da soja, carnes e produtos florestais, segundo dados do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. O valor bruto movimentado pelo setor supera US$ 100 bilhões (cem bilhões de dólares), com um PIB de aproximadamente US$ 43 bilhões (quarenta e três bilhões de dólares), cerca de 2% do PIB brasileiro (UNICA, 2018).

A cana-de-açúcar é a primeira fonte de energia renovável do país, responsável por 17,5% da matriz nacional ou 43,5% de toda a energia renovável ofertada. Este percentual já coloca o Brasil em um patamar mais elevado na média mundial (13,5%) e dos países desenvolvidos da OCDE (9,4%) no uso de energias limpas e renováveis (UNICA, 2018).

A maior parte dessa produção está destinada a fabricação de açúcar e etanol. Destacando assim o país como o maior produtor e exportador de açúcar do mundo, com 38,6 milhões de toneladas produzidas e 27,8 milhões de toneladas exportadas

no ciclo 2017/2018 – quantias equivalentes a 20% produção global e 45% da exportação mundial do setor respectivamente (UNICA, 2018).

Já na produção de etanol, o país encontra-se em segundo lugar no ranking global, perdendo somente para os Estados Unidos. Na safra 2017/2018, foi produzido cerca de 27,9 bilhões de litros. O etanol é considerado uma fonte de combustível limpa e renovável, o que contribui para a sustentabilidade da atividade, pois a sua substituição à gasolina favorece na redução das emissões de gases de efeito estufa em cerca de 90% (UNICA, 2018).

Toda essa produção se destaca pelo país ter uma vasta área, clima adequado para cultivo e ter avançado muito nos últimos anos em pesquisa e melhorias para aumentar a produtividade e reduzir os impactos ambientais causados pelo setor.

2.2.3 Características e destinação dos resíduos e sub-resíduos da cana-de-açúcar

Dos vários resíduos produzidos pela cana-de-açúcar, o bagaço sem dúvida é um dos mais atrativos, pois devido as suas características apresenta diversas usos, como por exemplo, adubação orgânica, alimentação de ruminantes, indústrias de cosméticos, confecção de papeis 100% recicláveis, confecções de painéis (diminuindo a utilização de madeira), produção de bioplásticos, produção de concreto ecológico e entre outros. Mas a sua principal destinação é como fonte de combustível, por causa do seu elevado potencial calórico. Agregando grande contribuição na cogeração de energia pelo fato de coincidir com o período de seca dos reservatórios das usinas hidrelétricas e, assim ser um importante complemento de tal.

A queima do bagaço da cana-de-açúcar é a fonte renovável mais utilizada na matriz energética brasileira do setor industrial (BEN, 2017). No processo de incineração do bagaço é gerado um sub-resíduo, a cinza, que atualmente é um grande problema para as usinas que utilizam de tal fonte de energia, pois seu descarte ainda é extremamente restrito e custoso.

No Brasil, toda CBCA é lançada em grandes depósitos ou reutilizados como substrato para compostagem junto à torta de filtro, outro resíduo resultante da usina sucroalcooleira, que possui características que permitem seu uso como fertilizantes organo-minerais e fertirrigantes, diferente das cinzas que possuem um material pobre em nutrientes minerais e de difícil degradação (AGEITEC, s.d.).

A qualidade dessa cinza depende muito da velocidade que se dá essa queima e a taxa com que a temperatura se eleva dentro do forno com o tempo. Alguns países, em especial China e Índia, onde boa parte desses altos fornos possuem o controle da temperatura. Isso permite um maior potencial de qualidade das cinzas. As cinzas possuem na sua composição química a predominância de dióxido de silício (SiO_2), normalmente acima de 60% em massa (FERREIRA, 2018).

Hodiernamente a cinza é aplicada na produção de cimento, argamassas, algumas obras utilizam também no concreto, pois reduz o uso de areia. Existe alguns estudos para aplicação em misturas de blocos cerâmicos para construção civil, em blocos de concreto para pavimentação, em massa cerâmica para produção de telha e entre outras aplicações. Segundo Oliveira (2015), o principal destino do resíduo (CBCA) tem sido utilizado como substrato para compostagem junto à torta de filtro e empregados em áreas de cultivo da cana-de-açúcar, porém este método não é autorizado pelas agências ambientais do país ou pelo Ministério da Agricultura. Outro grande impasse é a escassez de estudos direcionados a sua reutilização e a carência de avaliações sobre vantagens e desvantagens de sua aplicação.

Segundo CARVALHO (2015), a CBCA quando aplicada no solo como fertilizante, conforme Figura 2, cria uma reserva de carbono recalcitrante com carga negativa, funciona como uma malha que retira CO_2 da atmosfera e armazena no solo. Sua capacidade de retenção de nutrientes contribui para reduzir o uso de fertilizantes, sendo que proporciona efeitos corretivos em decorrência a sua composição química, mas varia com as características do solo. O grande problema é a presença de algumas impurezas na cinza que causam efeitos negativos ao solo e à planta, como por exemplo, a presença de Na (sódio), um metal alcalino, além da presença de outros metais pesados.

Figura 2 – Uma das formas de aplicação de cinza no plantio de cana-de-açúcar

Fonte: AGEITEC (s.d.).

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Nessa seção serão abordados os principais métodos de estabilização de solos utilizando cinzas.

2.3.1 Mecanismo de Interação Solo-Cinza

Toda vez que se utiliza uma mistura com solo, é necessário conhecer os materiais isoladamente. O que era o solo antes e o que será a mistura depois. Em alguns casos conhecer também a água da adição que será feita, por que a depender dessa água pode ser inserindo uma quantidade muito grande de um reagente. Cada mistura em diferentes teores é um novo material.

O solo-cinza tem se mostrado um atrativo devido aos bons resultados encontrados em pesquisas. Mas a estabilização do solo com a cinza ainda depende de algumas características do solo, como da sua origem, da formação e da constituição mineralógica. Além de depender do processo de incineração do resíduo, pois está diretamente ligado as suas propriedades químicas e físicas do mesmo (FERREIRA, 2018).

Na China, Índia, Rússia, algumas partes dos Estados Unidos e Inglaterra o procedimento de adicionar cinza da queima de resíduos ao solo é muito utilizado. Países como Holanda, é aproveitado 95% do RCD, por que não se tem areia. Areia vem da Grécia, África, precisa vir pelo mediterrâneo, ou seja, o custo final do produto é muito elevado. Por isso, os índices de aproveitamento de resíduos são altíssimos.

Já no Brasil, isso não acontece, por exemplo, em todo o Estado de Pernambuco existe somente duas unidades de reciclagem, quantidade irrisória se comparado ao tamanho do estado e a quantidade de resíduos que são produzidos (FERREIRA, 2018).

Entre os vários trabalhos realizados com cinza, vale ressaltar o trabalho realizado por Lacerda (2019), onde é feita a adição de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de CCA para reduzir a expansividade de dois solos da cidade de Cabrobó/PE, o melhor resultado foi alcançado com o percentual de 10% de CCA, o que leva a redução da expansão “livre” e a pressão de expansão a níveis praticamente nulos, tornando o solo que apresentava fissuras consideráveis nas edificações a sem danos.

Em Santos (2015) é analisado o comportamento de um solo arenoso e de um solo argiloso, reforçado e não reforçado com CBCA e com CCA, com teores entre 5% a 20%. Ele concluiu que a utilização de CBCA, nos dois solos estudados, revela-se viável, melhorando os parâmetros de resistência ou não ocasionaram alterações significativas. Para a CCA, em solo arenoso mostrou-se inviável, onde causou decréscimo no ângulo de atrito e nenhum acréscimo de coesão. Já nas misturas com solo argiloso resultou em melhorias nos parâmetros de resistência, sendo viável sua aplicação. Em ambas as cinzas, nas misturas com solo argiloso, o teor de 20% foi o que apresentou o melhor comportamento. Nas misturas de areia não foi possível determinar um teor ótimo de cinza a ser utilizado, pois não houve um aumento proporcional da resistência com o aumento do teor de cinza.

No trabalho de pesquisa de Oliveira (2015) avaliou-se os efeitos da aplicação de CBCA em diferentes doses nos atributos químicos do solo. Verificou-se que a inserção de CBCA aumenta a concentração de Ca, Mg e K no solo e também provoca a lixiviação pela presença dos ânions acompanhantes sulfato e cloretos na cinza. Dos solos avaliados, o solo arenoso, em função da sua textura teve alteração na taxa de mineralização do carbono pela inserção da CBCA, sendo gerado uma inibição da respiração da microflora do solo.

No artigo de Santana e Silveira (2014) é feito um estudo experimental de misturas de solo arenoso e CBCA para aplicação em obras geotécnicas. As misturas foram de 5%, 10% e 20% calculados em relação ao solo seco. De uma forma geral, os percentuais de cinza nas devidas umidades apresentaram aumento da resistência ao cisalhamento e o objetivo de reutilização das cinzas foram conquistados.

Na dissertação de Vizcarra (2010), foi analisado a aplicabilidade de cinza de RSU para base de pavimentos, onde realizou ensaios mecânicos e de módulo de

resiliência. Pode concluir que as cinzas aumentaram o CBR, o que indica melhoria na capacidade de suporte, ela também reduziu a expansividade do solo, sendo que a cinza volante apresentou maior ação estabilizante a depender do teor de cinza. Os melhores resultados foram apresentados no teor de 40%, o que reduziu a expansão do solo até menos de 0,5% e viabilizou o seu uso em base de pavimentos.

2.3.2 Alteração das Propriedades do Solo com a Inclusão de um Resíduo Sólido

Um dos grandes desafios enfrentados pela engenharia na atualidade é o gerenciamento dos resíduos sólidos. Outro problema é quando a qualidade do solo não atende os requisitos de projeto. Mas a junção desses dois problemas gera o compósito, que nada mais é que a mistura de compostos de naturezas diferentes que imprimem novas características aos materiais.

A técnica de inclusão de resíduos nos solos como elemento de reforço vem despertando grandes interesses ao meio científico, pois busca-se uma destinação final mais nobre a estes insumos.

O objetivo maior da inclusão dos resíduos como elemento de reforço é proporcionar um aumento da capacidade de suporte ou uma redução das deformações do sistema em relação ao solo sem reforço. Tendo em vista, que os carregamentos externos de compressão ou alívio de tensões atuam na massa de solo provocando deformações internas que transferem esforços para os elementos de reforço (CASAGRANDE, 2005).

Os elementos de reforço apresentam propriedades peculiares, o que gera diversas interações com o solo, tudo a depender das reações químicas que possam ocorrer com a mistura, podendo apresentar aumento ou redução nas características de resistência e deformabilidade, com isso exercer influência fundamental no comportamento tensão x deformação do solo reforçado.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Abaixo segue um levantamento dos materiais utilizados para realização da pesquisa. E, ainda a apresentação dos métodos de trabalho mediante a descrição dos ensaios realizados.

3.1 MATERIAIS

Nesse tópico será descrito o solo expansivo e a CBCA utilizados para realização do trabalho.

3.1.1 Solo Expansivo

O programa de investigação geotécnica foi desenvolvido com coleta de amostras deformadas e indeformadas na Estação de Tratamento de Esgotos do Janga (ETE-Janga) da Companhia de Saneamento do Estado de Pernambuco, no município de Paulista-PE, litoral norte do estado de Pernambuco.

O local de retirada da amostra está situado na latitude de 7º55’35.9” e longitude de 34º50’47.9”, conforme Figura 3. Nesta área já foi realizado diversas pesquisas e publicadas em diferentes fontes de divulgação científica, conforme Figura 4.

Figura 3 - Local de coleta do solo expansivo

Fonte: Adaptado do Google Maps (2019).

Figura 4 – Histórico bibliográfico da argila expansiva de Paulista

Fonte: Adaptado de MORAIS (2017) e COSTANTINO (2018).

Segundo BASTOS (1994), o solo em estudo é proveniente do intemperismo de rochas sedimentares, cuja a sua geologia apresenta sedimentos não consolidados e rochas sedimentares. O calcário margoso da formação Maria Farinha é intercalado com argilito e afloramentos. Que se estende, aproximadamente, a todo litoral norte do estado de Pernambuco.

Segundo Ferreira *et al* (2017), o clima da região é considerado tropical úmido, com estação chuvosa no inverno. Apresenta, normalmente, dois períodos de chuvas e estiagem, sendo um período úmido curto e o outro período seco longo. A temperatura anual varia de 23ºC a 31ºC e a umidade relativa em torno de 70% a 80%.

Segundo Paiva *et al* (2016), a argila expansiva de Paulista apresenta um potencial de expansão médio a alto pelos critérios de Van der Merwe (1964) e Seed *et al* (1962) e alto pelos critérios de Daksanamurthy e Raman (1973) e Yilmaz (2006).

3.1.2 CBCA (Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar)

A coleta da CBCA foi realizada no dia 05 de dezembro de 2018*,* na Companhia Alcoolquimica Nacional, localizada no endereço rodovia PE 45, km 14, Eng. Cachoeirinha, s/nº, Zona Rural, Vitória de Santo Antão-PE. Essa Companhia faz parte do Grupo JB, que se destaca no setor agroindustrial pela diversidade e capacidade produtiva atendendo aos mercados nacional e internacional de açúcar, álcool, gás carbônico, energia, combustíveis, armazenagem e indústria química.

O processo de incineração é realizado em caldeiras, onde o bagaço chega triturado e apresenta uma umidade de 50%. Grande parte deste material é exposto ao ar livre para secagem, mas este processo ainda necessita ser melhorado, pois é armazenado em montes e o empilhamento contribui para reter umidade, ficando seco somente o material superior das pilhas. Quando levado ao forno, o material é queimado por uma hora numa temperatura entre 1250°C a 1300°C. Devido ao seu alto potencial calórico, toda fonte de calor é aproveitada na geração de energia elétrica, o que contribui para o funcionamento de toda Companhia Alcoolquímica. De todo o material queimado, gera-se em torno de 30% de cinza, ou seja, na queima de 1 tonelada de bagaço é gerado 300 kg de cinza.

Na indústria, as cinzas são dispostas em montes, que ficam armazenados ao tempo, como no dia da coleta estava chovendo, a umidade do resíduo estava 188,60%, fazendo-se necessário a secagem ao ar livre de todo o material coletado.

Após a secagem prévia, o resíduo foi passado na peneira nº 4 (4,75 mm), afim de verificar a presença de impurezas (resíduos não queimados).

3.2 MÉTODOS

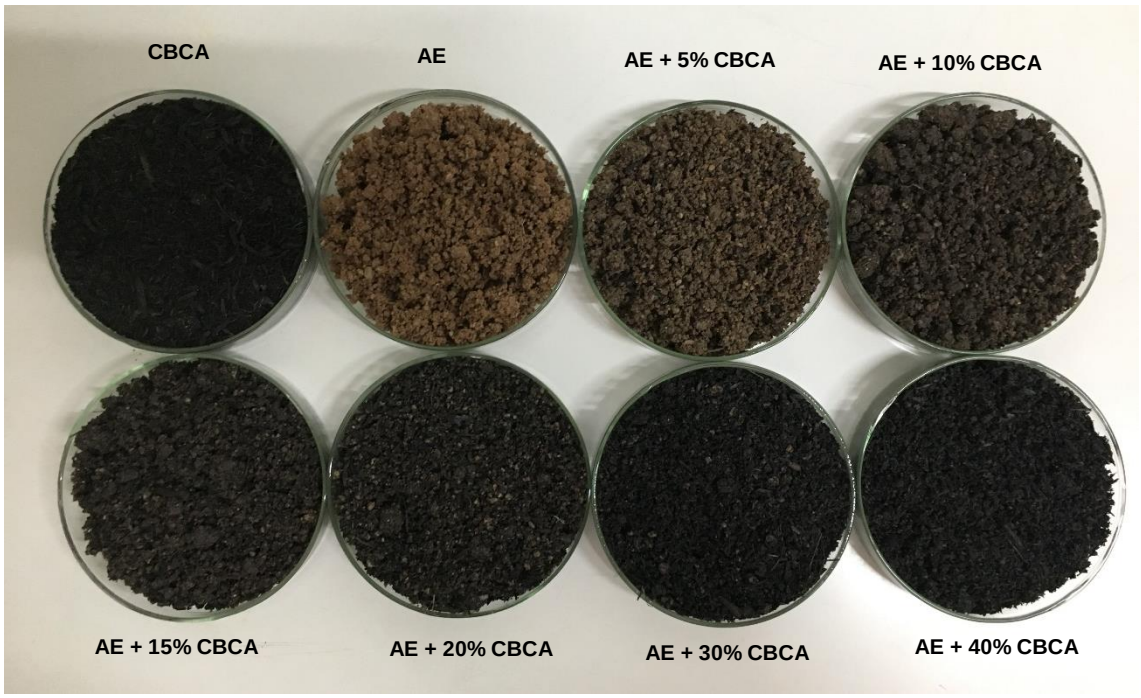
Para obter os objetivos propostos neste trabalho, serão abordadas como métodos de trabalho informações contidas na literatura corrente, bem como os resultados obtidos a partir de ensaios realizados em laboratórios. Os métodos de ensaios utilizados foram propostos pelo DNIT, DNER, Normas Brasileiras – NBR, American Society for Testing and Materials – ASTM e American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO.

3.2.1 Preparação das amostras

As amostras de solo utilizadas nessa dissertação foram amostras indeformadas e deformadas. Elas foram preparadas de acordo com a NBR: 6457:2016 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. O processo consistiu em secar, destorroar, quartear, pesar e peneirar, onde se obteve uma quantidade de material suficiente, homogêneo e representativo do solo em estudo.

Para realização dos ensaios, as amostras foram preparadas tomando como referência o peso seco do solo natural e foi adicionado CBCA em teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% em peso, conforme Figura 5. Todas as misturas foram homogeneizadas 24 horas antes da realização de cada ensaio. Nos ensaios de caracterização mecânica, que após a homogeneização das misturas, as mesmas foram compactadas estaticamente na umidade ótima e no peso específico seco máximo.

Figura 5 – Amostras da CBCA, AE e das misturas solo-cinza



Fonte: O Autor (2019).

3.2.2 Ensaios

Os ensaios de caracterização física e mecânica do solo foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE e os ensaios de espectrometria de fluorescência de raio-x foram realizados no Laboratório do Núcleo de Estudos de Geoquímicos (NEG) também da UFPE.

3.2.2.1 Caracterização Física

Os ensaios de caracterização física do solo, da cinza e das misturas implicam efetivamente nos seguintes ensaios e normas:

- Análise Granulométrica segundo a norma NBR 7181 (ABNT, 2016);
- Umidade segundo a norma NBR 6457 (ABNT, 2016);
- Limites de Consistência:
- Limite de Liquidez segundo norma NBR 6459 (ABNT, 2016);
- Limite Plasticidade segundo NBR 7180 (ABNT, 2016);
- Densidade real dos grãos segundo a norma NBR 6458 (ABNT, 2016 - Versão Corrigida 2:2017);

- Compactação segundo norma NBR 7182 (ABNT, 2016) e ME 164 (DNIT, 2013);

3.2.2.2 Caracterização Química

Os ensaios de análise química foram realizados no laboratório de Análises Químicas da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), seguindo a metodologia do Manual de Métodos de Análise de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (DONAGEMA *et al.*, 2011) e pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2013). Foram analisadas as seguintes determinações em cada solo com a finalidade de verificar a qualidade do solo e a suscetibilidade à expansão com a adição de cinza: potencial hidrogeniônico em água (pH em H_2O); potencial hidrogeniônico em cloreto de potássio (pH em KCl); potencial hidrogeniônico em cloreto de Cálcio (pH em $CaCl_2$); condutividade elétrica no extrato de saturação (µS/cm/25ºC); cátions trocáveis (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}); íons (H^+ e Al^{3+}); soma de cátions (S); capacidade de troca catiônica (T); saturação por base (V); saturação por alumínio (m); saturação por sódio (n); óxido de ferro (Fe_2O_3); óxido de alumínio (Al_2O_3); óxido de silício (SiO_2); carbono orgânico (g/kg); matéria orgânica (MO); Ki e Kr.

Os ensaios de espectrometria de fluorescência de raio-X foram performados nas amostras de CBCA e de solo; tais ensaios foram realizados no Laboratório do Núcleo de Estudos de Geoquímicos, também na UFPE. Para ensaiar a CBCA tomou-se uma porção de amostra que foi secada em estufa a 110 ºC. Em seguida, uma porção de amostra seca foi prensada em cápsula de alumínio com 30 toneladas de força. A pastilha prensada foi analisada em espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores; os resultados da varredura semi-quantitativa foram, então, expressos em percentual de peso. Quanto ao ensaio feito na amostra de solo, secou-se uma porção da mesma em estufa a 110 ºC. Uma porção de amostra seca foi pesada e levada a uma mufla a 1000 ºC por 2 horas para determinação de perda ao fogo. Uma outra porção de amostra seca foi prensada em cápsulas de alumínio com 30 toneladas de força. A pastilha prensada foi analisada no mesmo espectrômetro de fluorescência de raios-X supracitado. Os resultados da varredura semi-quantitativa foram recalculados para

100% após a incorporação do valor da perda ao fogo e, então, expressos em percentual de peso.

3.2.2.3 Caracterização Mecânica

Para a realização da caracterização mecânica do solo natural e das misturas com CBCA foram realizados ensaios de pressão de expansão, expansão livre e cisalhamento direto.

Os ensaios de expansão “livre” foram realizados em células edométricas convencionais, conforme Figura , nas amostras indeformadas do solo e nas misturas solo-cinza em amostras compactadas estaticamente na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo em anéis de aço inoxidável de diâmetro de 60,0 mm e altura de 20,0 mm, e submetidas a pequenas tensões seguindo os procedimentos descritos na D4829 (ASTM, 2011). Tais ensaios foram acompanhados até a estabilização da amostra.

A pressão de expansão no solo foi determinada pelo método do volume constante. Tal método estabelece que o corpo de prova seja colocado na célula e ajustado na prensa, conforme Figura 6, para, então, ser inundado; uma vez observado aumento de volume do solo após a inundação, adiciona-se uma sobrecarga com o escopo de se impedir tal variação. A pressão de expansão do solo a volume constante é, portanto, determinada a partir do somatório dos valores de sobrecargas utilizadas para se manter o volume do solo constante. Ressalta-se que a pressão de expansão determinada pelo método de volume constante nas misturas solo-cinza foi analisada em amostras compactadas na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo.

A norma de referência para realização do ensaio de cisalhamento direto é a ASTM D3080-04- “ Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”. O ensaio é utilizado basicamente para definir a resistência ao cisalhamento última ou máxima de amostras de solo. É o ensaio mais antigo, mais simples e rápido para se determinar a resistência do solo. Onde se força a amostra em uma prensa, conforme Figura 7, a romper numa superfície de cisalhamento pré-definida.

Figura 6 – Célula edométrica

Fonte: O Autor (2019).

Figura 7 – Prensa de cisalhamento direto

Fonte: O Autor (2019).

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão discutidos os resultados de ensaios que visam a analisar o potencial de uso da CBCA como estabilizante em solos expansivos. Para isso, será ponderada a caracterização física, química e mecânica do solo natural e das misturas.

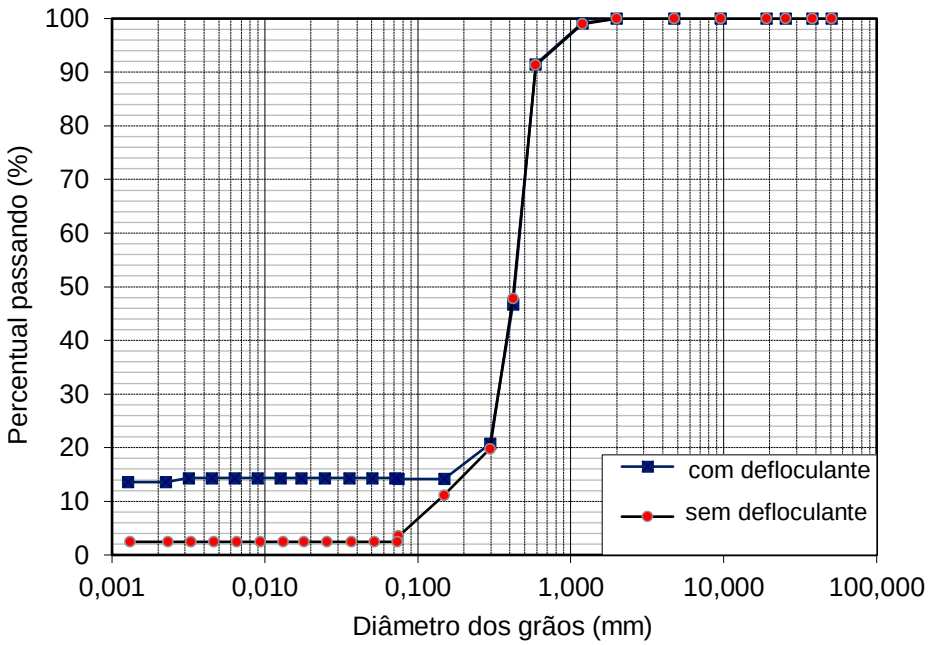
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Nesse tópico será abordado a caracterização física da CBCA, do solo natural e das misturas solo-cinza.

4.1.1 Caracterização física da CBCA

Para as CBCA, foram utilizados os mesmos procedimentos para caracterização do solo. A Figura 8, apresenta a curva granulométrica da CBCA com e sem uso de defloculante no ensaio de sedimentação, onde através da curva é perceptível notar maior presença de solo grosso, com mais de 50% da cinza retida na peneira nº 40 (0,42mm). A gradação dos grãos variam entre 0,07 e 1,20 mm.

Figura 8 – Curva Granulométrica da CBCA



Fonte: O Autor (2019).

A CBCA nos ensaios de limite de consistência apresentou-se comportamento não plástico. O peso específico dos grãos da CBCA foi de 24,97 KN/m³ e uma umidade média de 13,53%.

4.1.2 Caracterização física do solo natural e das misturas

Nesse tópico será abordado a caracterização física do solo natural e das misturas solo-cinza

4.1.2.1 Caracterização granulométrica

A caracterização granulométrica da argila expansiva e das misturas solo-cinza foram realizadas por peneiramento até a peneira de nº 200 (0,075 mm), a fração de finos passantes foram por sedimentação com o uso de defloculante. As curvas granulométricas e as frações dos solos estão apresentadas na Tabela 1 e Figura 9.

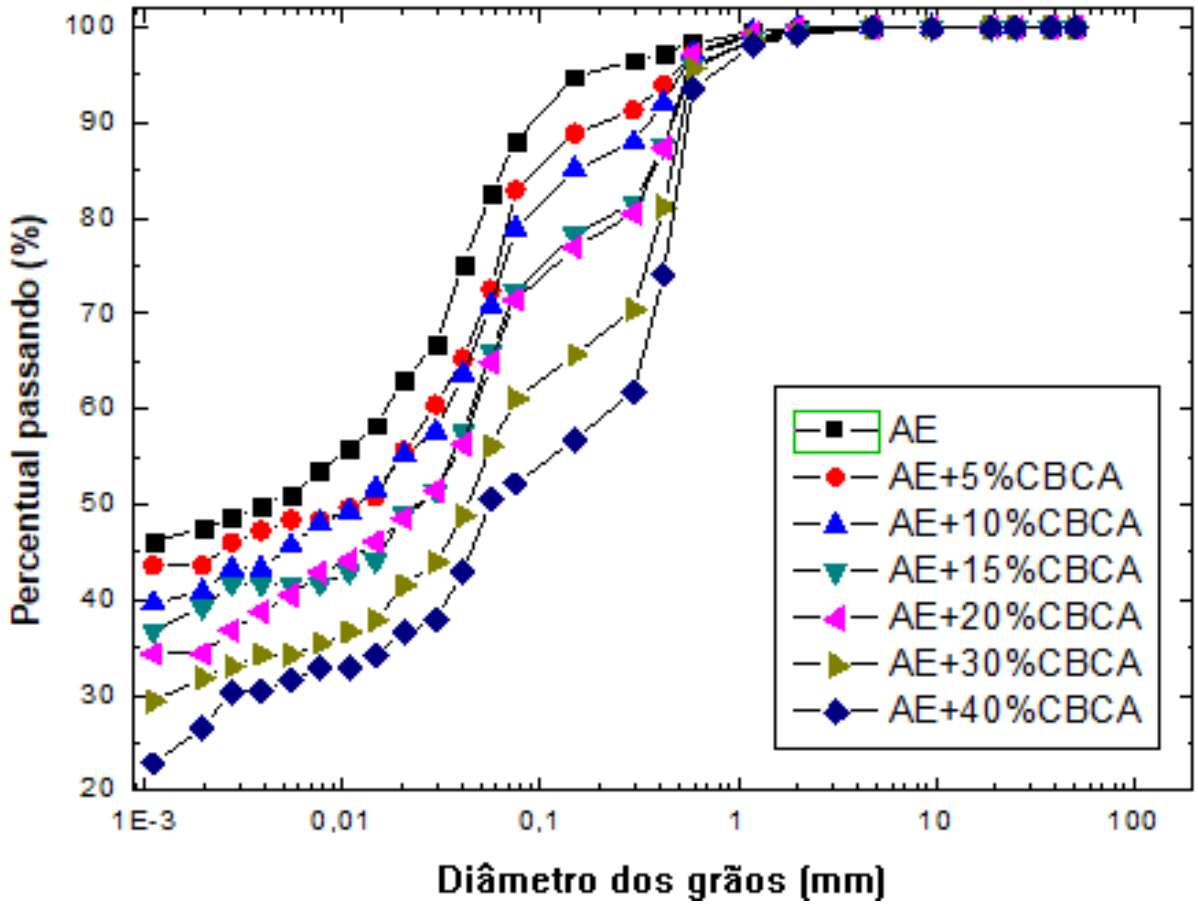
Nota-se que o solo natural (AE) e as adições da CBCA, apresentaram maiores percentuais de areia e argila em sua composição granulométrica. O solo natural de Paulista apresentou 51,01% de argila, 24,77% de areia e 24,22% de silte. A adição de CBCA tornou o solo mais graduado à medida que se aumenta o teor de cinza, pois houve um incremento de material mais granular nas misturas em comparação ao seu estado natural.

Tabela 1 – Análise Granulométrica do solo natural e das misturas solo-cinza

				AE	AE+5% CBCA	AE+10% CBCA	AE+15% CBCA	AE+20% CBCA	AE+30% CBCA	AE+40% CBCA
GRANULOMETRIA NBR 7181/2016	PENEIRAMENTO (%PASSANDO)	PENEIRA	2 "	50,800	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
			1 1/2 "	38,100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
			1 "	25,400	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
			3/4 "	19,100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
			3/8 "	9,520	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
			Nº 4	4,760	100,00	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
			Nº 10	2,000	100,00	99,66	100,00	99,64	100,00	99,26	99,26
			Nº 16	1,190	99,58	99,08	99,51	98,73	99,40	98,70	98,09
			Nº 30	0,590	98,27	97,17	97,32	96,02	97,17	95,67	93,55
			Nº 40	0,420	97,39	93,94	92,06	87,53	87,30	81,17	74,06
			Nº 60	0,297	96,54	91,30	87,94	81,63	80,47	70,41	61,84
			Nº 100	0,149	94,80	88,90	85,14	78,27	76,94	65,68	56,78
			Nº 200	0,075	88,11	82,94	78,94	72,30	71,40	61,04	52,15
	SEDIMENTAÇÃO	% DAS AMOSTRAS POR TAMANHO DOS GRÃOS		0,056	82,49	72,50	70,79	66,07	64,84	56,09	50,46
				0,041	75,23	65,27	63,61	57,53	56,30	48,79	42,92
				0,030	66,75	60,45	57,62	51,43	51,42	43,93	37,89
				0,020	63,12	55,62	55,23	48,98	48,49	41,50	36,63
				0,015	58,28	50,80	51,64	44,10	46,05	37,85	34,12
				0,011	55,86	49,59	49,24	42,88	44,10	36,64	32,86
				0,008	53,43	48,39	48,05	41,66	42,88	35,42	32,86
				0,005	51,01	48,39	45,65	41,66	40,44	34,20	31,60
				0,004	49,80	47,18	43,26	41,66	38,73	34,20	30,35
				0,003	48,59	45,98	43,26	41,66	36,77	32,99	30,35
				0,002	47,38	43,57	40,86	39,22	34,33	31,77	26,57
				0,001	46,17	43,57	39,67	36,78	34,33	29,34	22,80

Fonte: O Autor (2019).

Figura 9 – Curva Granulométrica da argila expansiva e as misturas com CBCA

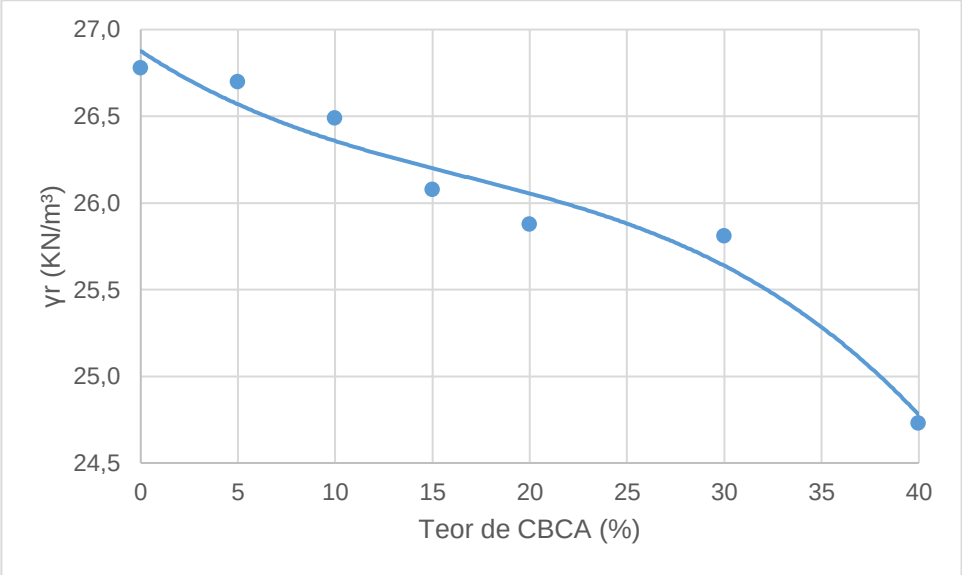


Fonte: O Autor (2019).

4.1.2.2 Peso específico real dos grãos

A inserção de CBCA no solo de Paulista provocou uma redução nos valores do peso específico real dos grãos, conforme Figura10.

Figura 10 – Peso específico real dos grãos da argila expansiva e das misturas com CBCA



Fonte: O Autor (2019).

A redução do peso específico dos grãos com o aumento dos teores de cinza é esperada, uma vez que a CBCA é menos densa que solo e parte da massa seca desse está sendo substituída.

4.1.2.3 Limites de consistência

Os resultados encontrados nos ensaios de limites de Atterberg no solo natural de Paulista e suas respectivas misturas estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados de Limites de Atterberg

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Ia
AE	65,15	25,80	39,35	0,83
AE + 5% CBCA	62,00	24,42	37,57	0,86
AE + 10% CBCA	59,93	28,24	31,70	0,78
AE + 15% CBCA	54,86	25,79	29,08	0,74
AE + 20% CBCA	57,36	28,85	28,52	0,83
AE + 30% CBCA	56,61	28,88	27,73	0,87
AE + 40% CBCA	58,18	32,07	26,11	0,98

Fonte: O Autor (2019).

Comparando os resultados obtidos entre o solo natural e as misturas, percebe-se que o percentual de limite de liquidez (LL) é maior na argila pura, com a inserção de cinza houve uma tendência de reduzir, mas apresentou-se uma oscilação nos resultados. Já o limite de plasticidade (LP), apresentou uma tendência de aumentar

seu percentual com a inserção de cinza, apresentando uma pequena oscilação nos teores de 5% e 15%.

Tabela 3 – Grau de atividade das argilas

Descrição	Atividade
Argilas inativas	< 0,75
Argilas normais	0,75 - 1,25
Argilas ativas	1,25 - 2,00
Argilas altamente ativas	> 2,00
(por exemplo, bentonita)	(6 ou mais)

Fonte: Adaptado de Head (2006).

No caso do índice de plasticidade (IP) tanto o solo natural como as misturas classificam-se como altamente plásticos, pois apresentam IP > 15. No que tange ao índice de atividade (Ia), segundo o critério de Skempton (1953), a amostra AE + 15% CBCA é inativa, já o solo natural e as demais misturas são normais com o grau de atividade entre 0,75 e 1,25, conforme Tabela 3.

4.1.2.4 Classificação dos solos

Em posse dos dados de granulometria e dos limites de Atterberg permitiu-se a classificação do solo natural e das misturas com base no Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS) e na Highway Research Board (HRB) da AASHTO (ASTM D3282, 2009), conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação das amostras

Amostras	SUCS	HBR
CBCA	SP	A-3
AE	CH	A-7-5 / A-7-6
AE + 5% CBCA	CH	A-7-5 / A-7-6
AE + 10% CBCA	CH	A-7-5 / A-7-6
AE + 15% CBCA	CH	A-7-5 / A-7-6
AE + 20% CBCA	CH	A-7-5 / A-7-6
AE + 30% CBCA	CH	A-7-5 / A-7-6
AE + 40% CBCA	OH/MH	A-7-5 / A-7-6

Fonte: O Autor (2019).

Pela classificação do SUCS, a CBCA é uma areia mal graduada (SP), o solo natural e as demais misturas são argilas de alta plasticidade (CH), exceto a mistura

AE + 40% CBCA que é caracterizada como um solo orgânico de alta plasticidade (OH) ou um silte de alta plasticidade (MH).

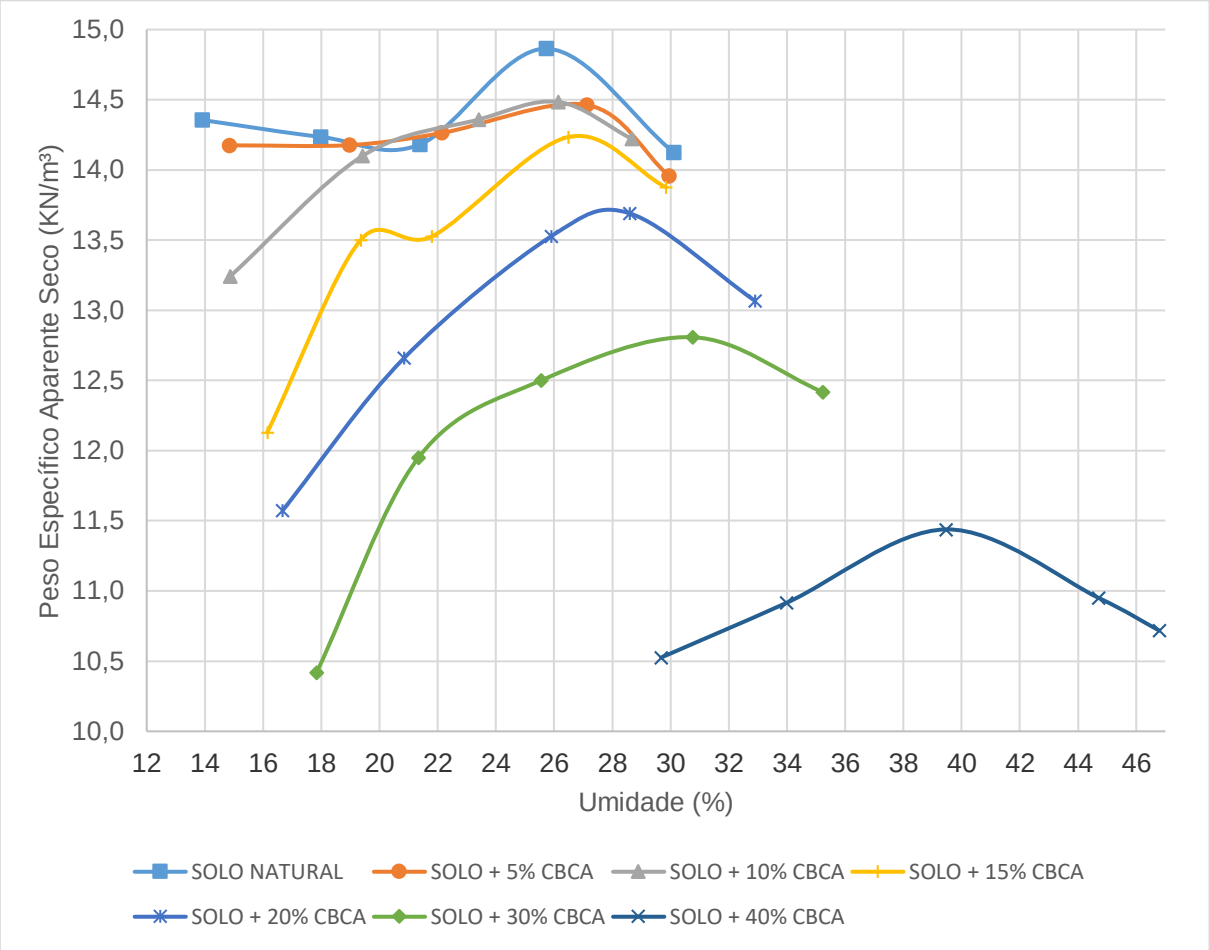
Pela classificação HBR, a CBCA é uma areia fina (A-3) e o solo natural e misturas são solos argilosos (A-7-5 ou A-7-6), para uso em subleito são classificados de regular a mau.

4.1.2.5 Grau de compactação

As curvas de compactação do solo natural e os diferentes teores de cinza estão representados na Figura 11. Analisando o formato das curvas e levando em conta o critério de Lee Suedkamp (1972), as amostras 0%, 5% e 15% são do tipo C, os teores de 10% e 30% são do tipo D e enquanto os percentuais de 20% e 40% apresentam comportamento do tipo A. As curvas do tipo A apresentam um formato típico de predominância de solos granulares, já as curvas do tipo C e D apresentam formato típico de solos com predominância de finos em sua composição.

Os dois picos apresentados nas curvas de compactação do solo natural (0%) e das misturas de 5% e 15% são frequentes em solos com limite de liquidez superior a 70%, muito coesivos e argilo mineral montmorilonita, segundo Lee e Suedkamp (1972). A argila expansiva e as misturas estudadas apresentam limite de liquidez próximos a 70%, o solo também é muito coesivo e possui mineral argílicos expansivos, ou seja, um solo com propriedades muito próximas dos encontrados pelos autores.

Figura 11 – Curvas de compactação do solo natural e das misturas com CBCA

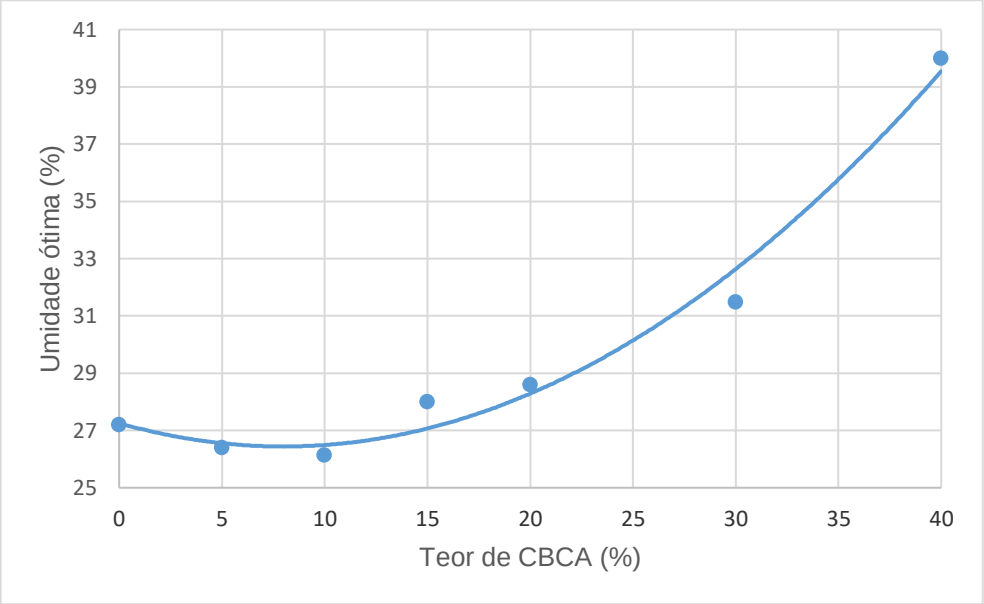


Fonte: O Autor (2019).

O aumento no percentual de CBCA no solo ocasionou um aumento na umidade ótima (W_{otm}) e uma redução no peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\ máx}$), exceto nos percentuais de 5% e 10% que apresentou uma leve redução W_{otm} e em relação ao $\gamma_{d\ máx}$ o percentual de 10% em relação ao de 5% teve um leve aumento, um comportamento atípico em relação aos demais resultados.

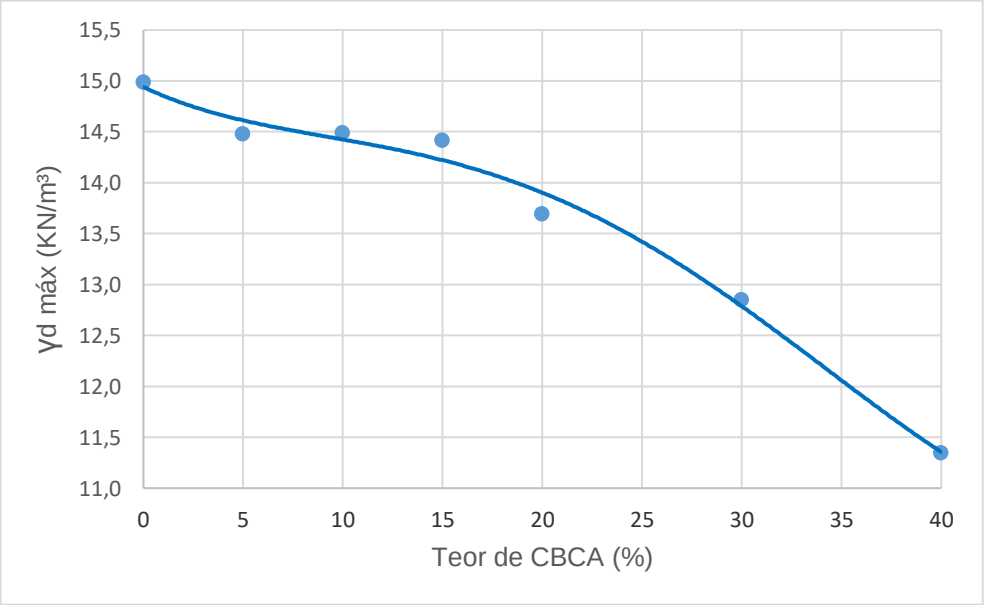
O aumento da W_{otm}, conforme Figura 12, se justifica pelo aumento do teor de CBCA, pois ela possui a capacidade de absorver mais água que o solo, elevando a W_{otm} da mistura para uma mesma energia de compactação. Este aumento do teor de CBCA também provoca a redução na $\gamma_{d\ máx}$, conforme Figura 13, isso se explica pela substituição de parte do solo por um material com grãos de densidade menor ocasionando a redução na massa ocupada num mesmo volume. O aumento da W_{otm} chegou à 47,06% e a redução $\gamma_{d\ máx}$ à 24,28%.

Figura 12 – Variação da W_{otm} no solo natural e nas misturas com CBCA



Fonte: O Autor (2019).

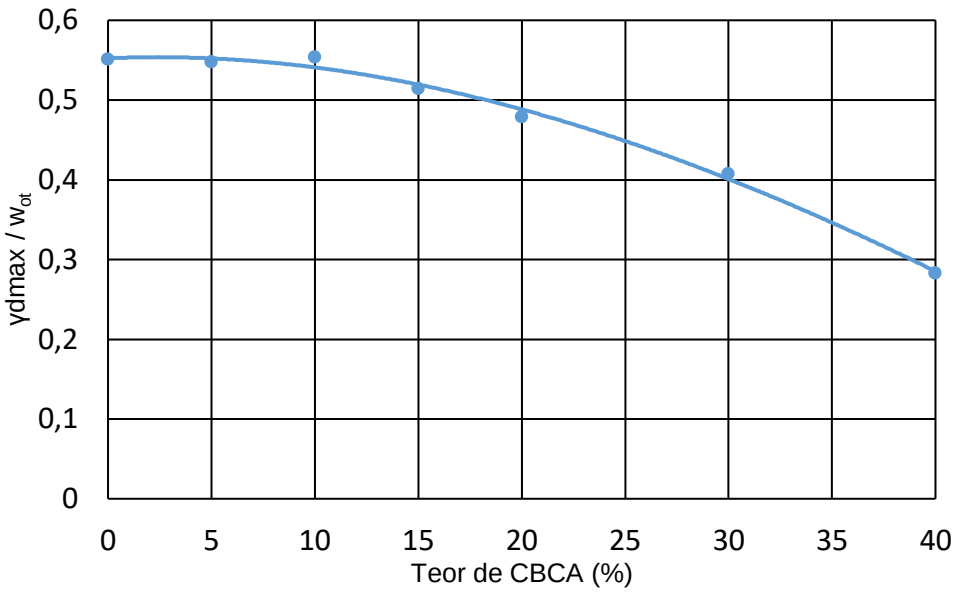
Figura 13 – Variação do $\gamma_{d\ máx}$ do solo natural e nas misturas com CBCA



Fonte: O Autor (2019).

O $\gamma_{d\ máx}$ dividido pela W_{otm} versos o teor de CBCA apresenta-se variações curiosas, pois mantém constante até a mistura de 10%, após este valor há uma redução à medida que se aumenta o teor de CBCA, conforme Figura 14. Ou seja, a partir de 10% de CBCA alguma mudança ocorre e se faz necessário uma análise mais apurada, como uma microscopia eletrônica de varredura para se analisar a microestrutura e o que realmente está ocorrendo.

Figura 14 – Relação $\gamma_{d\ máx}/W_{otm}$ para solo natural e as misturas com CBCA



Fonte: O Autor (2019).

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Nesse tópico será abordado os resultados dos ensaios de caracterização química da CBCA, do solo natural e das misturas solo-cinza. Além disso, apresenta os resultados da espectrometria de fluorescência de raio-x da CBCA e da argila expansiva.

4.2.1 Análise química

Os resultados de caracterização química da argila expansiva e suas misturas com CBCA estão apresentados na Tabela 5. Onde está apresentado os valores de pH em água, pH em KCl e pH em $CaCl_2$, da condutividade elétrica no extrato de saturação (CE), dos cátions trocáveis (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) e dos íons (H^+ e Al^{3+}), da soma de cátions (S), da capacidade de troca catiônica (T), da saturação por base (V), da saturação por alumínio (m), da saturação por sódio (n), do óxido de ferro (Fe_2O_3), do óxido de alumínio (Al_2O_3), do óxido de silício (SiO_2), do carbono orgânico (CO), da materia orgânica (MO), do Ki e do Kr.

Tabela 5 – Resultados das análises químicas no solo natural e nas misturas com CBCA

Determinação	Unidade	Amostras						
		AE	AE + 5% CBCA	AE + 10% CBCA	AE + 15% CBCA	AE + 20% CBCA	AE + 30% CBCA	AE + 40% CBCA
pH em H_2O	-	5,02	5,09	5,09	5,12	5,19	5,14	5,19
pH em KCl		3,08	3,10	3,26	3,40	3,57	3,66	3,72
pH em $CaCl_2$		3,30	3,70	3,68	3,70	3,90	3,92	4,01
CE	µS/cm/25°C	95,95	234,10	36,00	308,10	0,28	0,20	7,10
Na^+	$cmol_c/kg$	36,29	35,22	33,08	32,01	34,15	23,46	27,74
K^+		4,30	4,20	4,00	3,90	4,10	3,20	3,60
Ca^{2+}		1,40	1,40	1,40	1,40	1,60	2,00	3,20
Mg^{2+}		2,20	4,60	8,30	4,70	3,40	2,40	4,90
Al^{3+}		26,30	22,00	18,20	13,00	14,50	11,50	6,00
H^+		4,90	8,40	7,40	10,80	6,50	5,40	6,60
S		44,21	45,45	46,81	42,05	43,28	31,03	39,39
T		75,41	75,85	72,41	65,85	64,28	47,93	51,99
V	%	58,63	59,92	64,65	63,86	67,33	64,74	75,76
m		37,30	32,62	27,99	23,61	25,10	27,04	13,22
n		48,12	46,43	45,68	48,61	53,12	48,95	53,35
Fe_2O_3		1,60	5,00	3,90	3,50	3,35	3,35	2,65
Al_2O_3		38,40	35,20	4,40	21,20	5,10	4,80	7,62
SiO_2		70,10	69,60	68,20	67,70	70,00	70,70	73,80
CO	g/kg	0,09	0,84	0,89	1,90	0,01	1,60	1,34
MO		0,15	1,45	1,53	3,27	0,01	2,75	2,31
K_i	-	3,11	3,36	26,33	5,43	23,32	25,05	16,47
K_r		3,02	3,08	16,82	4,91	16,44	17,34	13,48

Fonte: O Autor (2019).

A acidez das amostras foi determinada relacionando o pH em água com o pH em KCl, sendo associada a presença de argilomineral em processo de intemperização e pela presença de alumínio trocável, responsável pela floculação do argilomineral. Sendo observado que a adição de cinza ocasionou um aumento no pH. Sendo o pH em água para todas as amostras classificado como fortemente ácido, sendo justificado pela pobreza em bases (cálcio e magnésio, principalmente).

O pH fornece indícios das condições químicas gerais do solo e indica a quantidade de íons hidrogênio (H^+) que existe no solo. Sendo as amostras ácidas quando possui muitos íons H^+ e poucos íons cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) adsorvidos em seu complexo coloidal de troca (RONQUIM, 2010).

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos, contido no manual da Embrapa (2006), à capacidade de troca de cátions correspondente à fração argila, é usada para explicar algumas propriedades do solo, como intemperismo, presença de minerais argílicos (como, montmorillonita) e característica de expansividade. É calculada pela expressão: $T = S + Al^{3+} + H^+$ de argila. A atividade da

fração de argila é considerada alta para valores igual ou superior a 27 $cmol_c$/kg de argila, sem correção para carbono e baixa para valores inferior a 27 $cmol_c$/kg de argila, sem correção para carbono. Sendo assim, as amostras estudadas apresentam alta atividade, pois todos apresentam valores superiores a 27 $cmol_c$/kg de argila, o que pode explicar a presença de montmorilonita (mineral responsável pela expansividade do solo). Ou seja, apesar da diminuição da T à medida que se aumenta do teor de CBCA, as misturas ainda possuem alta T.

A saturação por base (V = 100xS/T), expressa em porcentagem, são classificadas como altas para solos com saturação por bases igual ou superior a 50% (Eutrófico) e baixa saturação para valores inferiores a 50% (Distrófico). Tanto o solo natural como as misturas com CBCA são superiores a 50%, sendo caracterizados como solos eutróficos de alta fertilidade (Embrapa, 2006).

As amostras não apresentam caráter alumínico, pois a saturação por alumínio ($m = 100Al^{3+}/S+Al^{3+}$) é menor que 50%. Mas apresentam um caráter sódico, pois apresentam saturação por sódio ($n = 100xNa^{+}/T$) maior que 15% (Embrapa, 2006).

A condutividade elétrica no extrato de saturação (CE) apresentou valores acima de 7 µS para o solo natural (AE) e para as misturas com 5%, 10%, 15% e 40% de CBCA, indicando salinidade, que pode ser justificada pelo elevado teor de finos e a dificuldade na penetração da água. Já nos teores de 20% e 30% apresentou baixos valores, o que não apresenta salinidade. Vale observar que o teor de 40% (7,10 µS) estava muito próximo de 7 µS, podendo também ser considerado como não salino, o que permitiria concluir que o aumento da cinza reduz a salinidade do solo até um determinado percentual e após isso a presença da cinza não provoca mais alterações, ou seja, a substituição de parte do solo pela CBCA reduz a condutividade das amostras até um certo teor de cinza. O que se faz necessário estudar a estrutura do material compactado usando tomografia ou microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As amostras apresentam teor de óxido de ferro (Fe_2O_3) por extração com ataque sulfúrico menor que 8%, segundo manual da Embrapa (2006), são classificados como solos com baixo teor de óxidos de ferro (hipoférrico).

A inserção de cinza provoca uma redução nos óxidos de alumínio (Al_2O_3), o que pode ser explicado pela redução de alumínio extraível por KCl a medida que se aumenta os teores de cinza. Apesar disso, o solo natural apresentou um valor considerável de Al_2O_3 (38,40%).

4.2.2 Espectrometria de fluorescência de raio-x

Através da técnica analítica da espectrometria de fluorescência de raio-x é possível identificar os teores dos óxidos presentes no solo, conforme Tabela 6. Nas amostras estudadas, os óxidos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3), ferro (Fe_2O_{3t}) e cálcio (CaO) prevalecem sobre os demais óxidos, representando 86,57% no solo natural e 72,66% na CBCA respectivamente. De acordo com a revisão bibliográfica feita se esperava um percentual de sílica maior na CBCA, mas este ainda se mostrou um material extremamente interessante de se analisar, pois apresentou consideráveis teores de óxidos de cálcio (11,67%) e magnésio (3,75%). Quanto maior a quantidade de óxido de cálcio e de magnésio, maior o potencial deste material apresentar reações pozolânicas (Ferreira, 2018).

Tabela 6 - Percentuais dos óxidos e perda ao fogo da argila expansiva e da CBCA

Constituinte	Solo Natural	CBCA
	Composição (%)	
SiO_2	59,73	39,77
Al_2O_3	21,47	8,93
Fe_2O_{3t}	5,28	12,29
CaO	0,09	11,67
K_2O	2,76	8,79
P_2O_5	0,03	6,18
SO_3	0,08	5,09
MgO	0,96	3,75
TiO_2	0,90	1,55
MnO	-	0,89
CuO	-	0,33
ZnO	-	0,15
ZrO_2	0,15	0,06
Na_2O	0,09	0,30
BaO	0,09	-
Cr_2O_3	0,01	0,08
SrO	0,01	0,07
PbO	0,01	-
Ga_2O_3	-	0,04
NiO	-	0,03
Rb_2O	0,01	0,03
P.F	8,31	-
Total	100	100

Fonte: O Autor (2019).

4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

A análise mecânica está baseada na determinação da expansão “livre”, pressão de expansão e resistência ao cisalhamento direto no solo natural e nas misturas solo-CBCA.

4.3.1 Expansividade

Nesse tópico será abordado os resultados dos ensaios de Expansão Livre e Pressão de Expansão.

4.3.1.1 Ensaio de Expansão “Livre”

O ensaio de expansão livre do solo natural foi realizado com uma amostra indeformada e com uma amostra compactada. As misturas de solo-CBCA foram compactadas estaticamente na umidade ótima e no peso específico aparente seco máximo, os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Resultados dos ensaios de Expansão “Livre”

Amostra	Expansão “Livre” (%)	W_{otm} (%)	W_i (%)	W_f (%)
Solo Natural Indeformado	10,35	-	18,74	30,71
Solo Natural Compactado	6,10	27,20	27,53	33,10
Solo + 5% CBCA	5,30	26,40	28,82	34,36
Solo + 10% CBCA	7,90	26,14	29,03	31,10
Solo + 15% CBCA	10,83	28,00	29,77	41,65
Solo + 20% CBCA	6,25	28,60	30,53	39,52
Solo + 30% CBCA	5,45	31,50	32,25	40,65
Solo + 40% CBCA	3,48	40,00	41,62	49,29

Fonte: O Autor (2019).

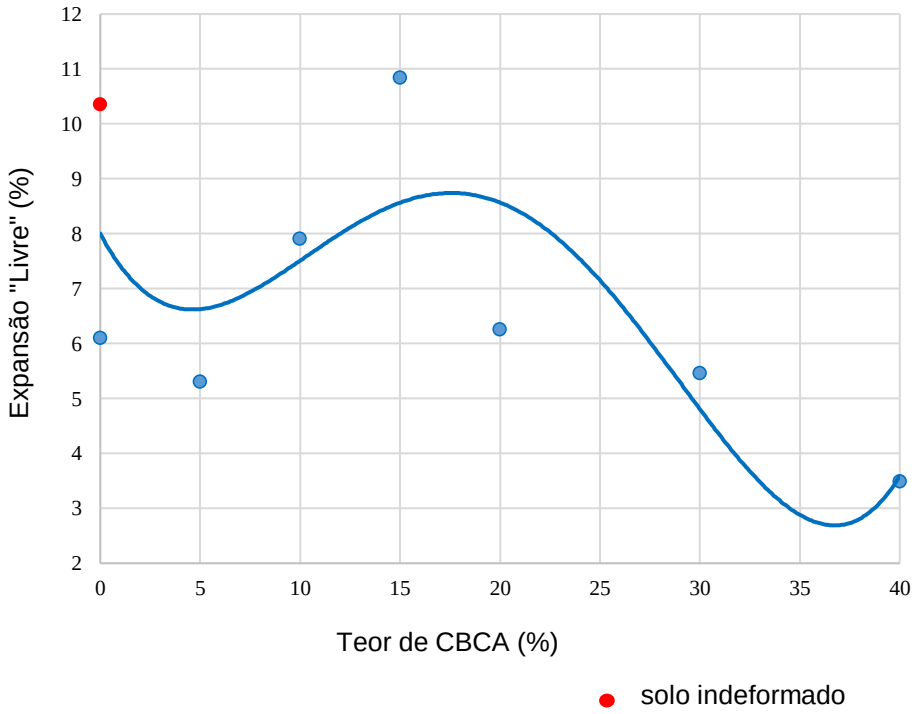
O solo natural teve uma redução na expansão “livre” de 4,25% do material indeformado para compactado, isso se justifica pelo fato que o solo natural compactado possui uma umidade inicial (W_i) maior que o solo natural indeformado, ou seja, o solo tendo uma W_i mais alta significa que a variação de umidade é menor até ele se saturar, consequentemente ele se expande menos.

Sendo a expansão “livre” em função da umidade do solo, um solo se expande mais livremente quanto menos úmido ele for. Mas em via de regra as misturas solo+10%CBCA, solo+15%CBCA, solo+20%CBCA e solo+30%CBCA apresentaram

um aumento em relação ao solo+5%CBCA, conforme Figura 15, um comportamento atípico e que só pode ser justificado após uma criteriosa análise química e mineralógica que possa decifrar as interações entre solo-CBCA.

Com a adição de 40% de CBCA ao solo natural, houve uma tendência na redução da expansão do solo, apresentando apenas 3,48% de expansão.

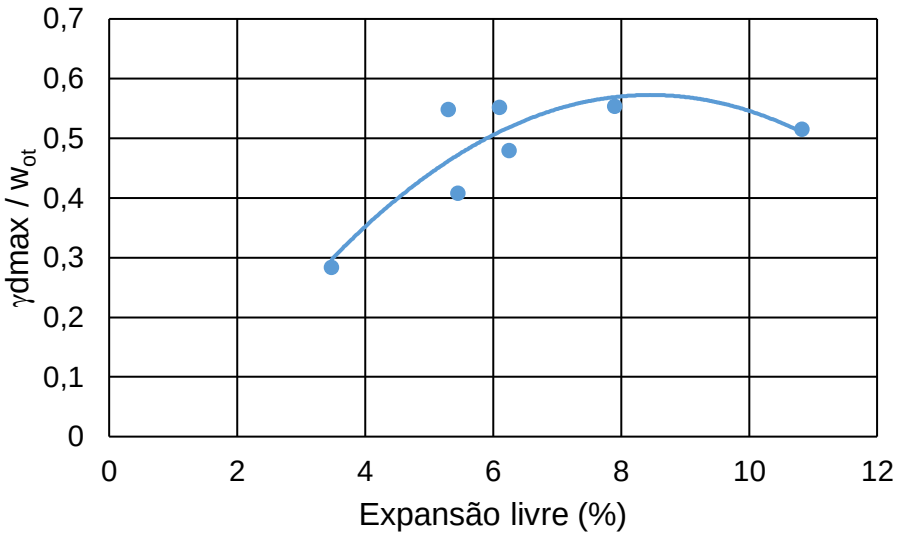
Figura 15 - Expansão Livre em percentual para o solo natural e as misturas solo-CBCA



Fonte: O Autor (2019).

O $\gamma_{d\ máx}$ dividido pela W_{otm} apresenta uma variação com a expansão livre que é apresentado na Figura 16, onde mostra que a medida que a relação $\gamma_{d\ máx}/W_{otm}$ foi aumentando tendeu-se a um aumento na expansão livre.

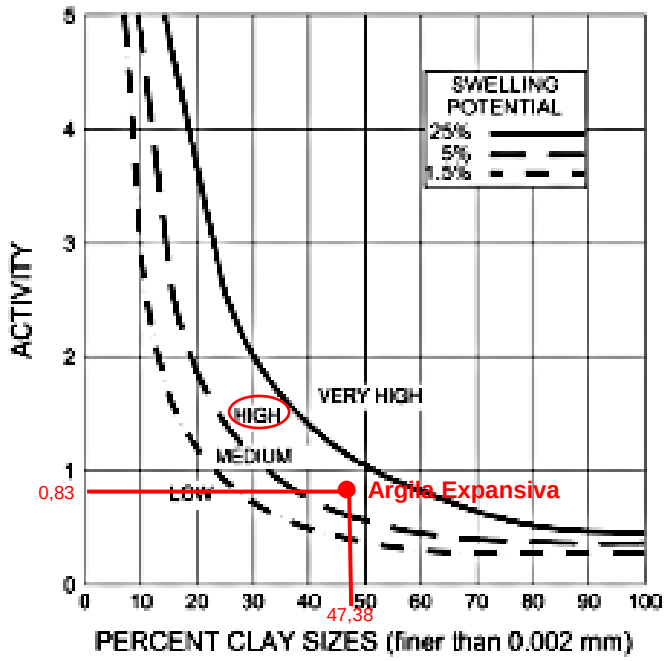
Figura 16 - Relação $\gamma_{d\ máx}/W_{otm}$ para solo natural e as misturas com CBCA



Fonte: O Autor (2019).

Segundo o critério de Seed, Woodward e Lundgren (1962), o solo natural apresenta alta expansividade, conforme destacado na Figura 17. A mistura AE+5% CBCA também apresenta alta expansividade, já as demais misturas apresentam médio grau de expansividade.

Figura 17 - Ábaco para definição do grau de expansividade das argilas baseado na atividade e percentual de argila



Fonte: Adaptado de Seed; Woodward; Lundgren (1962).

4.3.1.2 Ensaio de Pressão de Expansão

A Tabela 8 apresenta os resultados dos ensaios de pressão de expansão do solo natural indeformado e compactado e das misturas de solo-CBCA resultantes do ensaio do método do volume constante. O solo natural indeformado apresentou uma pressão de 192,50 kPa e a adição de CBCA resultou na redução da pressão de expansão à medida que aumentou o teor de cinza, exceto no percentual de 10% que houve um pequeno aumento em relação ao de 5% e no teor de 40% se manteve igual ao de 30%, conforme pode ser analisado na Figura 18.

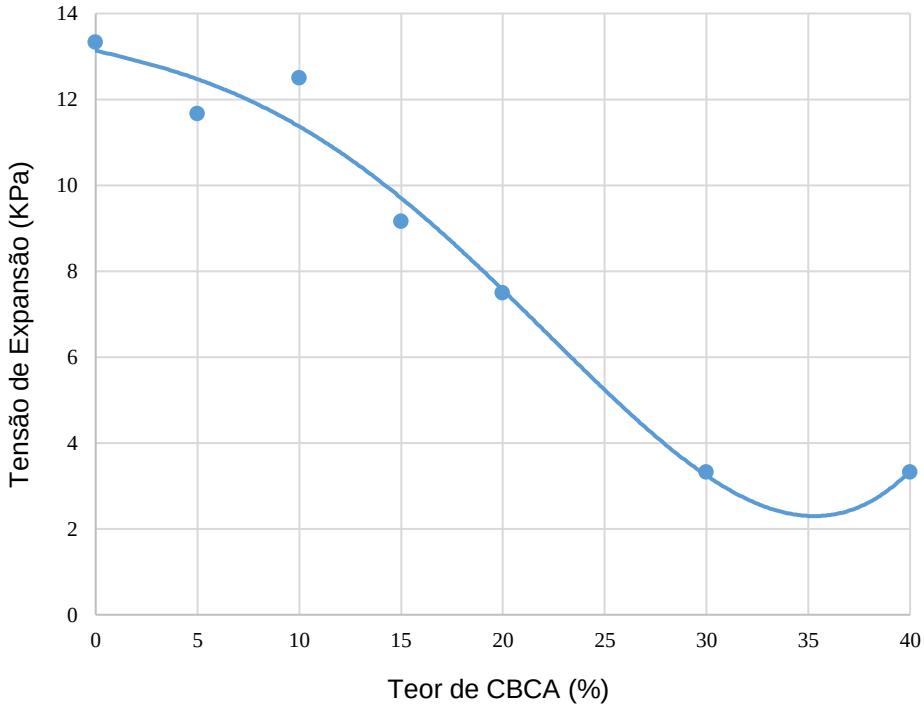
. Para os teores estudados neste trabalho, não foi possível zerar a prressão de expansão, mas a adição de CBCA reduziu consideravelmente a expansividade, o que pode ser administrado a depender do projeto estrutural a que o solo será exposto.

Tabela 8- Resultados do ensaio de Pressão de Expansão

Amostra	Pressão de Expansão (KPa)	W_{otm} (%)	W_i (%)	W_f (%)
Solo Natural Indeformado	192,50	-	18,74	27,78
Solo Natural Compactado	13,33	27,20	27,53	29,82
Solo + 5% CBCA	11,67	26,40	28,82	31,92
Solo + 10% CBCA	12,50	26,14	29,03	36,97
Solo + 15% CBCA	9,17	28,00	29,77	31,77
Solo + 20% CBCA	7,50	28,60	30,53	33,42
Solo + 30% CBCA	3,33	31,50	32,25	36,71
Solo + 40% CBCA	3,33	40,00	41,62	47,27

Fonte: O Autor (2019).

Figura 18 – Pressão de Expansão para o solo natural e as misturas solo-CBCA



Fonte: O Autor (2019).

4.3.2 Resistência ao cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento direto (CD) foram realizados com o solo natural e nas misturas com CBCA, onde foram compactados estaticamente na umidade ótima e peso especifico aparente seco máximo. A temperatura durante a realização dos ensaios oscilou de 25°C a 29°C.

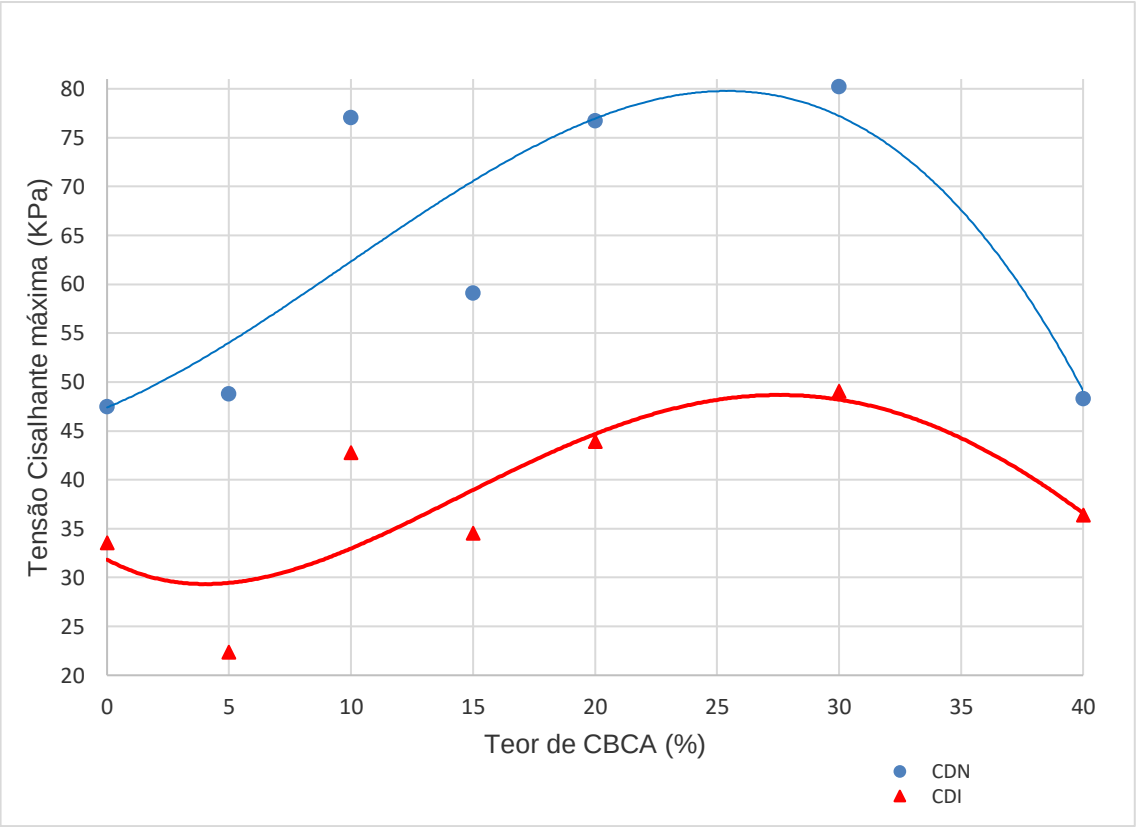
Os ensaios cisalhamento direto natural (CDN) foram realizados na velocidade de 0,48 mm/min e os ensaios de cisalhamento direto inundado (CDI) foram na velocidade de 0,048 mm/min. Essas velocidades foram calculadas a partir do adensamento prévio antes da realização do rompimento dos corpos de prova.

A tensão normal aplicada de 10 kPa foi a mesma para todos os ensaios, pois o que se visa com o ensaio é analisar a influência da inserção dos percentuais de CBCA na variação da tensão máxima de cisalhamento do solo e também pelo fato das argilas expansivas apresentarem maiores danos em obras de menor porte.

Na Figura 19 é apresentado a tensão máxima ou de pico para cada teor de CBCA na condição natural e inundado. É nítido que na condição natural o solo apresenta maiores valores de tensão máxima se comparado ao inundado, isso pode

ser entendido devido às amostras durante a fase de saturação apresentarem evidências comprovadas de expansibilidade, ou seja, houve um aumento na altura dos corpos de prova, ocasionando uma redução de tensão total e, consequentemente, a sua resistência, no caso a redução da tensão de pico.

Figura 19 - Tensão cisalhante máxima de ruptura dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2019).

A tensão de pico varia para os diferentes teores de CBCA, isso se explica pelo fato dos diferentes teores de cinza provocarem diferentes reações com solo e essa variação gera diferentes picos de resistência.

De modo geral ensaio apresenta os maiores valores de tensão cisalhante máxima nos teores de 10%, 20% e 30% de CBCA tanto na condição natural como inundada. Sendo o maior valor no teor de 30%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são retratadas as principais conclusões da pesquisa e sugestões para novos trabalhos na área. Resultado de um programa experimental planejado, analisado e concluído.

5.1 CONCLUSÕES

Com base na discussão apresentada neste trabalho, as seguintes conclusões puderam ser alcançadas:

- O solo natural de Paulista em seu estado natural é classificado pelo SUCS como argila de alta plasticidade (CH) e pela HRB também como solo argiloso (A-7-5 ou A-7-6), sendo para uso em subleito classificados de regular a mau. Apresentou 51,01% de argila, 24,77% de areia e 24,22% de silte. É um solo altamente plástico e de fração argílica normal (Ia=0,83), segundo o critério de Skempton (1953). Apresenta uma umidade ótima de 27,20% e um peso específico aparente seco máximo 14,99 kN/m³. É um solo eutrófico (alta fertilidade), com pH em água de 5,02 (fortemente ácido), com presença de salinidade e alta atividade da fração de argila. A “expansão livre” na amostra indeformada é de 10,35%, enquanto na amostra compactada na umidade ótima e no peso específico aparente seco máximo é de 6,10%, sendo um solo de alta expansividade.

- A adição de CBCA tornou mais graduado as misturas à medida que se aumentou o teor de cinza, pois houve um incremento de material mais granular nas misturas em comparação ao seu estado natural, concluindo-se que a CBCA causa modificações na granulometria do solo natural.

- Houve uma redução do peso específico dos grãos com o aumento dos teores de cinza, o que se justifica pelo fato da CBCA ser menos densa que solo e parte da massa seca desse está sendo substituída.

- Se comparado o LL e LP do solo natural com as demais misturas é perceptível uma redução do LL e um aumento do LP com a adição da cinza. Já o IP

apresentou tendência de redução, mesmo assim todas as amostras foram classificadas como altamente plásticos, pois apresentam IP > 15. No que tange ao índice de atividade (Ia), segundo o critério de Skempton (1953), a amostra AE + 15% CBCA é inativa, já o solo natural e as demais misturas são normais com o grau de atividade entre 0,75 e 1,25.

- Pela classificação do SUCS, a CBCA é uma areia mal graduada (SP), o solo natural e as demais misturas são argilas de alta plasticidade (CH), exceto a mistura AE + 40% CBCA que é caracterizado como um solo orgânico de alta plasticidade (OH) ou um silte de alta plasticidade (MH). Pela classificação HBR, a CBCA é uma areia fina (A-3) e o solo natural e misturas são solos argilosos (A-7-5 ou A-7-6), para uso em subleito são classificados de regular a mau.

- Pelo critério de Lee Suedkamp (1972), as amostras de solo natural e as misturas nos teores de 5% e 15% são do tipo C, solos com predominância de finos. Os teores de 10% e 30% são do tipo D, também solos de predominância de finos. Enquanto os percentuais de 20% e 40% apresentam comportamento do tipo A, típico de solos granulares.

- O aumento no percentual de CBCA no solo ocasionou um aumento na umidade ótima, pelo fato de aumentar o teor de cinza e ela possuir a capacidade de absorver mais água que o solo, elevando a umidade ótima da mistura para uma mesma energia de compactação. Já peso específico aparente seco máximo reduziu, pois teve uma substituição de parte do solo por um material com grãos de densidade menor, ocasionando a redução na massa ocupada num mesmo volume.

- A adição de cinza ocasionou um aumento no pH, sendo o pH em água para todas as amostras classificado como fortemente ácido, sendo justificado pela pobreza em bases.

- As amostras estudadas apresentam alta atividade, pois todos apresentam valores de capacidade de troca de cátions superiores a 27 $cmol_c/kg$ de argila,

o que pode explicar a presença de montmorilonita, mineral responsável pela expansividade do solo.

- Levando em conta a saturação por bases, todas as amostras são caracterizadas como solos eutróficos com alta fertilidade. Já o baixo teor de óxido de ferro permite classificar as amostras como hipoférrico.

- As amostras não apresentam caráter alumínico, mas apresentam um caráter sódico. Levando em consideração a condutividade elétrica no extrato de saturação, o solo natural (AE) e as misturas com 5%, 10%, 15% e 40% de CBCA, apresentam salinidade, já os teores de 20% e 30% não apresentam. Permitindo destacar que o aumento da cinza reduz a salinidade do solo até um determinado percentual e após isso a presença da cinza não provoca mais alterações, ou seja, a substituição de parte do solo pela CBCA reduz a condutividade das amostras até um certo teor de cinza.

- Apesar do baixo teor de óxido de sílica na CBCA, ela se mostrou um material extremamente interessante de se analisar, pois apresentou consideráveis teores de óxidos de cálcio (11,67%) e magnésio (3,75%). Quanto maior for a quantidade de óxido de cálcio e de magnésio, maior o potencial deste material apresentar reações pozolânicas.

- O solo natural teve uma redução na expansão “livre” de 4,25% do material indeformado para compactado, isso se justifica pelo fato que o solo natural compactado possui uma umidade inicial (W_i) maior que o solo natural indeformado, ou seja, o solo tendo uma W_i mais alta significa que a variação de umidade é menor até ele se saturar, consequentemente ele se expande menos. Três coisas acontecendo ao mesmo tempo, teor de umidade, densidade e o material.

- Segundo o critério de Seed, Woodward e Lundgren (1962), o solo natural e a mistura AE+5% CBCA apresentam alta expansividade. Já as demais misturas apresentam médio grau de expansividade.

- O solo natural indeformado apresentou uma pressão de expansão no valor de 192,50 kPa e a adição de CBCA resultou na redução da pressão de expansão à medida que aumentou o teor de cinza, exceto no percentual de 10% que houve um pequeno aumento em relação ao de 5% e no teor de 40% se manteve igual ao de 30%. Para os teores estudados neste trabalho, não foi possível zerar a pressão de expansão, mas a adição de CBCA reduziu consideravelmente a expansividade, o que pode ser administrado a depender do projeto estrutural a que o solo será exposto.

- Pelo ensaio de cisalhamento direto foi apresentado a tensão máxima para todas as amostras na condição natural e inundado. É nítido que na condição natural o solo apresenta maiores valores de tensão máxima se comparado ao inundado, isso pode ser entendido devido às amostras durante a fase de saturação apresentarem evidências comprovadas de expansibilidade.

- A tensão de pico varia para os diferentes teores de CBCA, isso se explica pelo fato dos diferentes teores de cinza provocarem diferentes reações com solo e essa variação gera diferentes picos de resistência, apresentando os maiores valores nos teores de 10%, 20% e 30% de CBCA tanto na condição natural como inundada, sendo o maior valor de tensão no teor de 30%.

- Levando-se em consideração todos experimentos realizados, a amostra que mostrou melhor suscetibilidade para uso foi o teor de 30%. Vale esclarecer que com este teor, obteve-se médio grau de expansividade e a pressão de expansão foi uma das menores (3,33 KPa), sendo igual ao teor de 40%, o que permite observar que ao se acrescentar cinza acima de 30% não se tem melhorias e somente perda de resistência, como pode ser visto no ensaio de cisalhamento direto, onde houve uma redução no valor da tensão de pico. Sendo importante frisar que qualquer tipo de obra a ser realizada neste solo ou com este solo dependerá das características do projeto. Mas a utilização da cinza para fins construtivos se mostrou viável principalmente quando se fala em obras mais sustentáveis, pois permite dar ao resíduo uma destinação mais

plausível e menos prejudicial ao meio ambiente, evitando assim seu descarte inadequado.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Estudar o comportamento das misturas levando em conta diferentes tempos de cura.

- Averiguar influência da sucção na mistura de solo-cinza.

- Analisar o comportamento de diferentes CBCA quando queimadas em diferentes temperaturas.

- Analisar o comportamento do solo expansivo com misturas de cal e CBCA em diferentes teores, uma vez que já existe estudos que comprovam a eficiência da cal na redução da expansividade.

- Realizar ensaios de microscopia eletrônica de varredura para análise de características microestruturais.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D3282**. Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. 2009.

_____ ASTM. **D4829**: Standard Test Method for Expansion Index of Soils, 2011. p. 5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro: ABNT, 2016. p. 9.

_____ ABNT. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2016. Versão Corrigida 2:2017. p. 10.

_____ ABNT. **NBR 6459**: Solo – determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, 2016. p. 9.

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

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

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

AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. **Árvore do conhecimento:** Cana-de-Açúcar. Campinas, SP: AGEITEC, [s.d]. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html. Acesso em: 31 out. 2018.

_____ AGEITEC. **Adubação:** resíduos alternativos. Campinas, SP, [s.d]. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html. Acesso em: 16 mar. 2018.

BASTOS, E.G.; JUCÁ, J. F.T. Variação volumétrica de uma argila expansiva em Pernambuco. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10., 1994, Foz do Iguaçu. **Anais** [...].Foz do Iguaçu, v. 4, p. 1365-1372, 1994.

BEN**. Balanço Energético Nacional**. 2017. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf. Acesso: 10 nov. 2018.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras

providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>. Acesso em: 12 fev. 2019.

CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Cinzas da queima de biomassa: aplicações e potencialidades. **Revista Virtual de Química**, Sorocaba-SP, v.7, n.6, p. 2154-2165, 2015. Disponível em: < http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/v7n6a17.pdf>. Acesso em: 26 out. 2018.

CAMPELLO, E. F. **Comportamento mecânico de argamassas reforçadas por fibras sintéticas e metálicas**. 2013. 168p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Niterói, RJ. Disponível em: <http://www.poscivil.uff.br/sites/default/files/dissertacao_tese/comportamento_mecanico_de_argamassas_reforcadas_por_fibras_sinteticas_e_metalicas_1.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018.

CASAGRANDE, M.D.T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. 219p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 2005.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA - CIMM. **Resíduos Sólidos Industriais**. S.d. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3668#.XI0pkvZFzIV>. Acesso em: 12 fev. 2019.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Revista Química Nova**. Campos dos Goytacazes-RJ, v.32, n.1, p.82-86, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/qn/v32n1/v32n1a16.pdf>. Acesso em: 26 out. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **164-ME**: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 2013. p.7.

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

FARIAS, E.R. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**. 2005, 107 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC/UFSC. Florianópolis, 2005.

FERREIRA, S.R.M. (2018) **Solos expansivos e colapsíveis**. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 06/10/2018, 20/12/2018. Notas de Aula.

FEUERHARMEL, M.R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 133p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, RS. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2804>. Acesso: 26 nov. 2018.

GRUPO JB. Disponível em: <http://www.grupojb.com.br/portal/>. Acesso em: 11 mai. 2019.

HEAD, K.H. **Manual of Soil Laboratory Testing**. Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests. 2006, third edition, Whittles Publishing. Scotland, UK.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120927_relatorio_residuos_solidos_industriais.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2019.

JUCÁ, J.F.T. **Geotecnia ambiental aplicada a depósitos de resíduos sólidos: investigação ambiental, projetos e controle tecnológico de obras**. Palestra Milton Vargas, ABMS, 2019. São Paulo. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=weW5V4f8U14>. Acesso em: 17 mai. 2019.

JUCÁ, J. F.T.; PONTES FILHO, I.D.S. **Comportamento de solos expansivos**. 3º Simposio Brasileiro sobre Solos Não Saturados, 1997. Rio de Janeiro. v. 2. p. 461-489.

JUCÁ, J. F.T.; FERREIRA, R. N.; BASTOS, E. G.; SILVA, J. M. J. **Comportamento Geotécnico de uma Argila Expansiva Não Saturada**. 3º Simposio Brasileiro sobre Solos Não Saturados, 1997. Rio de Janeiro. v. 1. p. 145-151.

JUCÁ, J. F.T.; SILVA, J.M.J.; GUSMÃO FILHO, J.A.; BASTOS, E.G. **Ensaios de laboratório e monitoramento de campo em uma argila expansiva não saturada**. 10º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 1994. Foz do Iguaçu, v.4, p. 1229-1235.

JUSTINO DA SILVA, J.M. **Variação volumétrica de uma argila contráctil-expansiva não saturada submetida a diferentes condições climáticas**. São Paulo, 2001. 249p. Tese (Doutorado no Departamento de Estruturas e Fundações) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LACERDA, L.S.S.N. **Análise do comportamento geotécnico de solos de Cabrobó, potencial expansivos, estabilizados com cinza de casca de arroz**. Recife, 2019. 79p. Dissertação (Mestrado) no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal de Pernambuco.

LEE, P.W.; SUEDKAMP, R.J. **Characteristics ofIrregularty Shaped Compactation Curves of Soils. Highway Research Record**, n. 381, National Academy of Sciences, Washington, D.C., p 1-9, 1972.

MAHLER, C. F. **Análise de obras assentes em solos colapsíveis e expansivos**. 267p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). UFRJ - Rio de Janeiro, 1994.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Safra de cana-de-açúcar 2017/2018 é estimada em 647,6 milhões de toneladas**. 2017. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/noticias/safra-de-cana-de-acucar-2017-2018-e-estimava-em-647-6-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 13 out. 2018.

MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil Behaviour**. 1993. 2nd Ed., Wiley, New York.

MORAIS, J.J.O. **Caracterização geotécnica da expansividade de um solo argiloso do município de Paulista-PE**. 2017, 127f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil. Recife, 2017

MOURA, L.S. **Incorporação de cinzas de algaroba geradas no APL de confecções do agreste pernambucano em concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ**. 2017. 97f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil e Ambiental. Caruaru, 2017.

NEW YORK STATE DIVISION OF HOMELAND SECURITY AND EMERGENCY SERVICES - NYS DHSES. **Land Subsidence and Expansive Soils**. 2014. Section 3.13., 14p. Disponível em: <http://www.dhses.ny.gov/recovery/mitigation/documents/2014-shmp/Section-3-13-Land-Subs-Expansive-Soil.pdf >. Acesso em: 06 fev.2019.

OLIVEIRA, D.L.A. **Caracterização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar e aplicação no solo**. 2015, 137 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Jaboticabal, 2015.

PAIVA, W. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo**. 2009. 193f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, CTG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil. Recife, 2009.

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. 168f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, CTG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil. Recife, 2016.

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

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas, SP. 2010. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31004/1/BPD-8.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2019.

SANTANA, L.M.; SILVEIRA, P.H. **Estudo experimental de misturas de solo arenoso e cinza de bagaço de cana de açucar para aplicação em obras geotécnicas.** 2014. 19p. Departamento de Engenharia Civil. PUC-RJ. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.puc-rio.br/Pibic/relatorio_resumo2014/relatorios_pdf/ctc/CIV/CIV-%20Leanderson%20Muniz%20de%20Santana%20e%20Paula%20Helene%20Silveira.pdf>. Acesso: 13 out. 2018.

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

SANTOS, S.H.T. **Análise do Comportamento de Misturas de Solos com Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar e Cinzas de Casca de Arroz**. 2015. 125f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=27064@1>. Acesso em: 13 out. 2018.

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

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2 ed. São Paulo: Pini, 2007 761p.

TEODORO, J.M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas**. São Paulo, 1999. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de São Carlos/ USP. Disponível em: < http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-14062018-144401/pt-br.php >. Acesso em: 26 out. 2018.

TAYLOR, G.D. **Materials in construction**. 2ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994, 284p.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-açúcar. São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=35831777>. Acesso em: 12 nov. 2018.

VIZCARRA, G.O.C. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos**. 2010. 120f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=16327@1>. Acesso em: 12 nov. 2018.