



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

JULIETTE MACENA DE SOUZA

**SOLO ESTABILIZADO COM CINZA DO BAGAÇO DA CANA DE
AÇÚCAR ÁLCALI-ATIVADA NA PAVIMENTAÇÃO**

Campina Grande - PB

Fevereiro de 2023

JULIETTE MACENA DE SOUZA

SOLO ESTABILIZADO COM CINZA DO BAGAÇO DA CANA DE
AÇÚCAR ÁLCALI-ATIVADA NA PAVIMENTAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadoras: Profa. Dsc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Profa. Dsc. Carina Silvani

Campina Grande - PB

Fevereiro de 2023

S729s

Souza, Juliette Macena de.

Solo estabilizado com cinza do bagaço da cana de açúcar alcali-ativada na pavimentação / Juliette Macena de Souza. – Campina Grande, 2023.

110 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena, Profa. Dra. Carina Silvani".

Referências.

1. Geotecnia. 2. CBCA. 3. Base Cimentada. 4. Estabilização Química. 5. Ciclos de Gelo e Degelo. 6. Módulo de Resiliência. I. Lucena, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes. II. Silvani, Carina. III. Título.

CDU 624.13(043)

Solo Estabilizado com Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar Álcali-Ativada na Pavimentação

JULIETTE MACENA DE SOUZA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 28 / 02 / 2023

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES L
Data: 14/03/2023 20:54:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª Dsc. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 CARINA SILVANI
Data: 13/03/2023 12:32:50-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profª. Dsc. Carina Silvani
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LU
Data: 14/03/2023 10:28:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Examinador interno

Documento assinado digitalmente
 SUELLY HELENA DE ARAUJO BARROSO
Data: 13/03/2023 20:48:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Dsc Suelly Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará - UFC
Examinador externo



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
 POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
 Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNA: JULIETTE MACENA DE SOUZA/ COMISSÃO EXAMINADORA: DR.ª LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.ª CARINA SILVANI - PPGECA/UFMG - COORIENTADORA, DR. ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFMG – EXAMINADOR INTERNO, DR.ª SUELLY HELENA DE ARAÚJO BARROSO – UFC - EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 05/2023). / TITULO DA DISSERTAÇÃO: “SOLO ESTABILIZADO COM CINZA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR ÁLCALI-ATIVADA NA PAVIMENTAÇÃO” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 09:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: HÍBRIDA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA DE FORMA HÍBRIDA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 28 DE FEVEREIRO DE 2023**

5.

6.

7.

8.

9. **SUELLY HELENA DE ARAÚJO BARROSO – UFC - EXAMINADORA EXTERNA**

Documento assinado digitalmente
 SUELLY HELENA DE ARAUJO BARROSO
 Data: 01/03/2023 15:20:54-0300
 Verifique em <https://verificador.iti.br>



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2023, às 14:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juliette Macena de Souza, Usuário Externo**, em 28/02/2023, às 15:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE (A)**, em 28/02/2023, às 16:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARINA SILVANI, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2023, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 01/03/2023, às 11:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3130155** e o código CRC **BAD5524D**.

“Aquilo que eu não posso, Deus pode”.

Dedico este trabalho aos meus avós, Gerônimo Gabriel de Macêdo e Terezinha Benedito Souza de Macêdo (In Memoriam) por todo apoio, amor e incentivo durante toda a minha vida.

Enquanto eu existir, vocês dois viverão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por sempre estar comigo, me guardando, protegendo e guiando em todos os momentos da minha vida. Por ter me dado força, coragem e determinação durante toda essa caminhada. Por várias vezes que pensei em desistir a minha fé me sustentou para que eu continuasse, sem ti, eu nada seria, obrigada por tudo e por tanto.

A Nossa Senhora de Aparecida por tanto cuidado, por toda proteção, por atender todas as minhas preces, pedidos e orações, se estou de pé e escrevendo esses agradecimentos foi por meio da sua interseção, não tenho nenhuma dúvida sobre isso, continue comigo sempre, nunca solte a minha mão.

Ao meu Padre Cícero que eu aprendi a admirar após ter ido residir em Juazeiro do Norte, no meu Cariri amado. Por todos os momentos de aflição que eu roguei pela sua interseção e sempre fui atendida.

Aos meus pais Idelfoso Macena (*in memoriam*) e Francisca Lúcia, ao meu pai por ter sido o melhor pai do mundo, por ter me ensinado o que realmente tem valor nessa vida, por ter sido um exemplo de caráter, dignidade e humanidade, um ser humano de um coração enorme e puro, por ter cuidado e me educado tão bem, tenho orgulho de ser sua filha, pela pessoa maravilhosa que o senhor foi. Á minha mãe, uma guerreira que apesar de todas dificuldades encontradas no caminho nunca saiu do meu lado, por ser meu alicerce, por ter cuidado e cuidar tanto de mim, por todos esses anos de carinho, dedicação e amor, por ser a pessoa nessa terra que mais se preocupa com o meu bem.

Aos meus avós maternos Gerônimo Gabriel (*in memoriam*) e Dona Terezinha (*in memoriam*). Vô o meu maior exemplo de vida, a pessoa que mais me apoiou durante toda a minha vida, sempre acreditou em mim (mais que eu mesma), sonhou meus sonhos junto comigo, sempre estava ao meu lado, por ter sido e ser o meu maior exemplo de caráter, honestidade, humanidade e dignidade, por ser meu amigo fiel que sempre estava ao meu lado em toda e qualquer circunstância e por ter sido o avô maravilhoso que o senhor foi. A minha vó, por ser a minha segunda mãe, por sempre estar ao meu lado, por se preocupar tanto comigo, por fazer minhas vontades, por ter sido essa mulher forte e guerreira que nunca deixou se abater por nada. O meu maior exemplo de fé, caridade, bondade e solidariedade. A sua partida foi a pior dor que já senti na minha vida, mas eu sigo em frente por vocês, sempre será por vocês. Obrigada por terem se preocupado tanto com

minha educação e construção do meu caráter, sempre me ensinando o certo e o errado. Vocês dois sempre serão o maior orgulho da nossa família, nossa base.

À minha madrinha Cleide Lúcia (*in memoriam*) que sempre me deu o apoio necessário todas às vezes que precisei, por ser minha confidente, amiga, por ser como uma mãe para mim, por sempre estar ao meu lado, por me apoiar em tudo e se preocupar tanto comigo. Infelizmente pela sua partida repentina, não consegui me despedir da senhora em vida, mesmo de passagem comprada e ter planejado passar o domingo ao seu lado. A sua partida me fez mais ainda refletir do quanto a vida é breve, e que realmente não devemos deixar para amanhã o que podemos fazer hoje.

À minha família pelo apoio e incentivo nesse árduo caminho.

À minha orientadora, a professora Dsc. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena, por todo incentivo, paciência e confiança durante o mestrado. Por ter acreditado em mim, que eu conseguiria terminar a pesquisa e defender em tempo hábil para assumir minha vaga no doutorado. Em momento algum você me disse que eu não conseguiria, pelo contrário, me ajudou no que foi possível, às vezes eu ficava sem entender a sua rapidez nas minhas correções para que desse tempo tudo ser feito. Isso foi extremamente importante para que eu não desistisse e continuasse tentado mesmo com um tempo tão curto para fazer tanta coisa. Minha admiração por toda a dedicação e empenho a pesquisa.

À minha orientadora, a professora Dsc. Carina Silvani, já inicio dizendo que Carina foi um presente de Nossa Senhora em minha vida, nada que eu fale, escreva ou faça será capaz de agradecer tudo que essa pessoa de luz fez por mim. Carina foi mãe, amiga, confidente, orientadora, psicóloga e mais algumas coisas. Nos meus piores dias parecia que ela sabia o exato momento de falar comigo, do nada chegava uma mensagem, ela me fazia rir quando eu acreditava que não era capaz, sempre me fazendo ver o lado bom das coisas, se hoje eu estou aqui tem muito dela nisso. Caso algum dia você esteja cansada e pense em “desistir” da docência, lembre-se que nós precisamos de você. Minha eterna admiração e gratidão, espero que um dia eu consiga ser para os meus alunos pelo menos metade do que você foi para mim.

À querida professora Dsc. Ana Maria Duarte, um anjo enviado por Nossa Senhora, em um dos momentos mais difíceis onde eu já estava conformada em desistir de assumir meu doutorado, ela falou comigo e me aconselhou da melhor forma possível. Ela me perguntou se eu não acreditava em Deus, e eu respondi, professora se eu não acreditasse em Deus e Nossa Senhora de Aparecida eu não estaria aqui. Então, ela me

disse que eu não iria desistir, que eu descansasse que amanhã seria outro dia, e que tudo daria certo.

Aos meus orientadores da graduação Dsc. Antonio Júnior Alves Ribeiro e Dsc. Perboyre Barbosa Alcântara, por terem me apresentado e inserido nesse mundo mágico que é a mecânica dos solos. Aonde eu for, por onde eu passar, vocês sempre serão exemplos de referência para mim.

Aos meus melhores amigos/irmãos Rogério Luís e Raimundo Jackson, Deus colocou vocês em minha vida porque sabia o quanto eu precisaria de todo apoio que vocês me dão, sempre estão comigo independente de qualquer circunstância, obrigada por nunca terem soltado a minha mão, vocês também são minha família.

Ao meu amigo/parceiro Manoel Leandro, por toda ajuda durante essa caminhada, por estar comigo em todos os momentos, por ser minhas segundas mãos e braços nessa pesquisa, por todos os momentos de descontração e também estresses (risos). Sem você tudo teria sido mais difícil.

À minha maravilhosa turma composta pelos colegas Gabriel, Samuel, Ingridy, Mateus, Alcidney, Renato, Danilo, Bruna, Alice e Aline. Passamos poucas e boas juntos, mas nossa união, amizade e persistência nos fez conseguir vencer todos os desafios. Nada foi fácil, mas sem vocês teria sido muito mais difícil.

Ao nosso trio parada dura do LEP, Ildinho, Dona Ladijane e Jadilson. Vocês tornam nossos dias mais leves, faça chuva ou faça sol, vocês estão conosco e nos ajudam de todas as formas possíveis, o LEP não seria o mesmo sem vocês.

Aos queridos Francisco e Auri, onde em um dos momentos de maior preocupação com o andamento desta pesquisa não mediram esforços para me ajudar e abriram as portas do bloco CW para mim, nunca esquecerei o que fizeram por mim e serei eternamente grata.

Ao meu parceiro de pesquisa Caio Augusto, por toda ajuda durante esta pesquisa, a professora Carina fez a melhor escolha colocando você para este PIBIC.

A Osires, Albaniza, Ingridy e Manoel, por terem me ajudado no dia do envio deste documento, pois ocorreu um imprevisto com a rede elétrica que fez com que meu computador apagasse e eu pensei que havia perdido tudo. Quando eu fiquei sem reação, eles reagiram por mim, e só saíram do meu lado após conseguir recuperar o documento. Não sei se eu teria conseguido sem vocês.

Ao pessoal do GGA nas pessoas dos meus amigos Daniel, Wlyses e a todos pelo acolhimento, conversas, momentos de descontração e por tudo. A Seu Netinho por toda

ajuda com todos os experimentos, por toda humildade, paciência, dedicação e disposição para sempre ajudar em tudo que fosse possível. Aos professores Veruschka e Márcio, pelos momentos de descontração, conversas e boas risadas. Também pela torcida para que eu conseguisse a aprovação no doutorado, além de várias vezes tentarem me tranquilizar dizendo que tudo já tinha dado certo.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, que contribuíram para a minha formação acadêmica e aos demais funcionários que conduzem esse programa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA e ao CNPq pelo apoio no desenvolvimento do meu trabalho.

Agradeço à minha banca composta pelos professores Dsc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena e Dsc Suelly Helena de Araújo Barroso, por aceitarem nosso convite e contribuírem com o desenvolvimento do meu trabalho.

A todos que de alguma forma contribuíram para realização desta pesquisa.

RESUMO

Em rodovias, o solo é utilizado como material de suporte e compõe as camadas de base, sub-base, reforço do subleito e a fundação do pavimento, devendo apresentar características que confirmam estabilidade e resistência mecânica quando submetido aos esforços solicitantes do tráfego durante a sua vida útil. A estabilização de solos é uma das técnicas mais aplicadas quando se fala em melhoramento de solos na engenharia geotécnica. Materiais como cinzas volantes, escória de alto forno, cinzas de casca de arroz entre outros já foram estudadas como forma de substituição aos materiais utilizados na pavimentação. A Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar (CBCA), por ter grande potencial pozolânico, pode ser utilizada para substituição parcial do cimento *Portland*. Existem poucos estudos que avaliem como a CBCA se comporta em sistemas com baixos teores de cálcio e sua utilização como material para uso em pavimentação. Portanto, esta pesquisa avaliou a influência do teor de CBCA álcali ativada com hidróxido de sódio (NaOH) sobre a resistência mecânica de um solo estabilizado com estes materiais. O solo utilizado nesta pesquisa foi uma areia de natureza quartzosa (areia comercial), que foi estabilizado com teores de 10%, 20% e 30% de CBCA álcali ativada com hidróxido de sódio (NaOH) na concentração molar de 6mol. Os ensaios mecânicos realizados foram compressão simples, ciclos de gelo e degelo, módulo de resiliência e índice de suporte Califórnia. Com base nos resultados obtidos, pode-se inferir que a associação da CBCA álcali ativada ao solo proporcionou uma melhora das propriedades mecânicas em termos de 340% no módulo de resiliência e 9 vezes de aumento no valor para o índice de suporte Califórnia em comparação com o solo puro. Por meio dos ensaios verificou-se que o rejeito promoveu ganhos de resistência a medida que o teor de CBCA era adicionado, atingindo valores RCS de 2,9 MPa, para o teor de 30% de CBCA aos 28 dias de cura. Para os ciclos de gelo e degelo foram obtidos valores da ordem 8,0MPa para a mistura de 30% de CBCA ao final do ciclo. Em geral, a associação da CBCA álcali ativada, estudada nesta pesquisa, mostrou-se eficaz na estabilização do solo estudado, tornando a técnica eficiente para uso em camadas de pavimentos rodoviários.

Palavras Chaves: CBCA, base cimentada, estabilização química, ciclos de gelo e degelo, módulo de resiliência.

ABSTRACT

On highways, the soil is used as a support material and makes up the base layers, sub-base, subgrade reinforcement and the pavement foundation, and must present characteristics that provide stability and mechanical resistance when subjected to the stresses of traffic during its construction. lifespan. Soil stabilization is one of the most applied techniques when it comes to soil improvement in geotechnical engineering. Materials such as fly ash, blast furnace slag, rice husk ash, among others, have already been studied as a way to replace the materials used in paving. Sugarcane Bagasse Ash (SABC), due to its great pozzolanic potential, can be used to partially replace Portland cement. There are few studies that evaluate how CBCA behaves in systems with low levels of calcium and its use as a material for use in paving. Therefore, this research evaluated the influence of the content of CBCA alkali activated with sodium hydroxide (NaOH) on the mechanical resistance of a soil stabilized with these materials. The soil used in this research was quartz sand (commercial sand), which was stabilized with levels of 10%, 20% and 30% of CBCA alkali activated with sodium hydroxide (NaOH) at a molar concentration of 6mol. The mechanical tests performed were simple compression, freeze and thaw cycles, resilience modulus and California support index. Based on the results obtained, it can be inferred that the association of alkali-activated CBCA to the soil provided an improvement in the mechanical properties in terms of 340% in the resilience modulus and a 9-fold increase in the value for the support index California compared to the pure soil. Through the tests, it was verified that the waste promoted resistance gains as the CBCA content was added, reaching RCS values of 2.9 MPa, for the 30% CBCA content at 28 days of curing. For the freeze and thaw cycles, values of the order of 8.0MPa were obtained for the mixture of 30% CBCA at the end of the cycle. In general, the association of activated alkali CBCA, studied in this research, proved to be effective in stabilizing the studied soil, making the technique efficient for use in layers of road pavements.

Keywords: CBCA, cemented base, chemical stabilization, freeze-thaw cycles, resilience module.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Modelo de Glukhosvky para ativação alcalina | 30 |
| Figura 2: Estrutura do pavimento flexível | 40 |
| Figura 3: Estágios de degradação da camada cimentada | 42 |
| Figura 4: Distribuição do carregamento devido à passagem do veículo..... | 44 |
| Figura 5: Fluxograma da pesquisa..... | 53 |
| Figura 6: Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA) | 55 |
| Figura 7: Distribuição granulométrica das partículas da CBCA | 56 |
| Figura 8: Difração dos Raio-X da CBCA..... | 58 |
| Figura 9: Solo | 59 |
| Figura 10: Distribuição granulométrica das partículas do solo | 60 |
| Figura 11: Difração dos Raio-X do Solo | 62 |
| Figura 12: Cinza do bagaço da cana de açúcar no fundo da caldeira | 63 |
| Figura 13: Programa experimental dos ensaios de resistência a compressão simples para diferentes molaridades da solução de NaOH | 64 |
| Figura 14: Etapas do ensaio de compressão simples | 64 |
| Figura 15: Corpos de prova - (a) Tipo A e (b) Tipo B..... | 67 |
| Figura 16: (a) Molde de prata (b) Prensa para moldagem | 68 |
| Figura 17: Curva Proctor modificada e saturação do solo..... | 69 |
| Figura 18: Curvas Proctor modificada do solo e das misturas com adição de CBCA..... | 70 |
| Figura 19: Programa experimental dos ensaios de ciclos de gelo e degelo | 71 |
| Figura 20: Protocolo experimental dos ensaios de ciclos de gelo e degelo | 72 |
| Figura 21: Triaxial de carga repetida utilizado nos ensaios de módulo de resiliência - (a) Visão total do equipamento e (b) visão aproximada da célula..... | 75 |
| Figura 22: Rompimento do corpo de prova..... | 76 |
| Figura 23: Distribuição granulométrica das partículas das misturas | 77 |
| Figura 24: Resistência a compressão simples para diferentes molaridades de NaOH..... | 79 |
| Figura 25: Resistência das misturas submetidas ao protocolo de ciclos de gelo e degelo..... | 81 |
| Figura 26: Resistência das misturas submetidas ao protocolo de ciclos de gelo e degelo por duração de ciclos..... | 82 |
| Figura 27: Difração dos Raio-X da mistura..... | 84 |
| Figura 28: Difração dos Raio-X da mistura após ciclos de gelo e degelo | 85 |
| Figura 29: Módulo de Resiliência para o solo e teores de CBCA | 87 |
| Figura 30: MR x Tensão Desvio para o solo puro..... | 89 |
| Figura 31: MR x Tensão Desvio para o teor de 10% de CBCA | 89 |
| Figura 32: MR x Tensão Desvio para o teor de 20% de CBCA | 90 |
| Figura 33: MR x Tensão Desvio para o teor de 30% de CBCA | 90 |
| Figura 34: MR x Tensão Confinante para o solo puro | 91 |
| Figura 35: MR x Tensão Confinante para o teor de 10% de CBCA..... | 91 |
| Figura 36: MR x Tensão Confinante para o teor de 20% de CBCA..... | 91 |

| | |
|--|----|
| Figura 37: MR x Tensão Confinante para o teor de 30% de CBCA..... | 92 |
| Figura 38: Modelo Composto para o solo puro | 93 |
| Figura 39: Modelo Composto para o teor de 10% de CBCA | 93 |
| Figura 40: Modelo Composto para o teor de 20% de CBCA | 94 |
| Figura 41: Modelo Composto para o teor de 30% de CBCA | 94 |
| Figura 42: Resultados obtidos no ensaio de ISC – Proctor modificado, para o solo puro e o teor de 30% de CBCA..... | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Ensaio de caracterização da CBCA..... | 56 |
| Tabela 2: Propriedades físicas da CBCA..... | 56 |
| Tabela 3: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X da CBCA | 57 |
| Tabela 4: Ensaio de caracterização do Solo..... | 60 |
| Tabela 5: Propriedades Físicas do Solo..... | 60 |
| Tabela 6: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X do Solo | 61 |
| Tabela 7: Variáveis controláveis | 65 |
| Tabela 8: Variáveis fixadas | 65 |
| Tabela 9: Variáveis de ruído..... | 66 |
| Tabela 10: Pontos máximos das curvas Proctor | 70 |
| Tabela 11: Ensaio de resistência mecânica | 71 |
| Tabela 12: Tensões aplicadas nos corpos de prova para ensaio de módulo de resiliência | 73 |
| Tabela 13: Propriedades Físicas das Misturas | 78 |
| Tabela 14: Resistência a compressão simples: sem ciclos, com ciclos e após ciclos de gelo e degelo | 81 |
| Tabela 15: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X da Mistura com 30%, de CBCA sem cura, Solo e CBCA..... | 83 |
| Tabela 16: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X da Mistura após ciclos de gelo e degelo e sem cura | 84 |
| Tabela 17: Valores dos coeficientes de regressão para o solo puro e estabilizado | 87 |
| Tabela 18: Características do Solo | 95 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1: Estudos com estabilização de solos usando o processo de ativação alcalina | 31 |
|---|----|

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 21 |
| 1.2 | Objetivo Geral | 21 |
| 1.3 | Objetivos Específicos | 21 |
| 2. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 22 |
| 2.1 | Estabilização de solos | 22 |
| 2.1.1 | Estabilização química | 24 |
| 2.1.2 | Ativação alcalina | 26 |
| 2.1.3 | Ativação alcalina de cinzas..... | 31 |
| 2.1.4 | Cinza do bagaço da cana de açúcar | 35 |
| 2.2 | Pavimentos..... | 40 |
| 2.2.1 | Carregamento de pavimentos | 43 |
| 2.2.1.1 | Ciclos de gelo e degelo em pavimentos..... | 46 |
| 2.3 | Considerações Finais | 51 |
| 3. | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 52 |
| 3.1 | MATERIAIS | 54 |
| 3.1.1 | Água..... | 54 |
| 3.1.2 | Hidróxido de sódio | 54 |
| 3.1.3 | Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA)..... | 55 |
| 3.1.3.1 | Propriedades Físicas da CBCA..... | 55 |
| 3.1.3.2 | Análise Química da CBCA | 57 |
| 3.1.3.2.1 | Difração de Raio-X e Espectrometria de Fluorescência de Raio-X | 57 |
| 3.1.4 | Solo..... | 59 |
| 3.1.4.1 | Propriedades Físicas do Solo..... | 60 |
| 3.1.4.2 | Análise Química do Solo..... | 61 |
| 3.1.4.2.1 | Difração de Raio-X e Espectrometria de Fluorescência de Raio-X..... | 61 |
| 3.2 | MÉTODOS..... | 62 |
| 3.2.1. | Coleta da CBCA..... | 63 |
| 3.2.3 | Planejamento Experimental | 65 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.4 | Preparação das amostras | 66 |
| 3.2.5 | Determinação das curvas de compactação das misturas solo + CBCA..... | 66 |
| 3.2.6 | Moldagem e Cura dos Corpos de Provas..... | 67 |
| 3.2.7 | Ensaio Resposta | 68 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 77 |
| 4.1 | Análise das Misturas..... | 77 |
| 4.1.1 | Propriedades Físicas das Misturas | 77 |
| 4.2 | Ensaio de Resistência à Compressão Simples..... | 78 |
| 4.3 | Ciclos de Gelo e Degelo | 79 |
| 4.4 | Análise Química das Misturas | 83 |
| 4.4.1 | Difração de Raio-X e Espectrometria de Fluorescência de Raio-X..... | 83 |
| 4.5 | Módulo de Resiliência – MR..... | 86 |
| 4.5.1 | Modelos de Regressão | 88 |
| 4.6 | Índice de Suporte Califórnia-ISC | 94 |
| 5. | CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 97 |
| 5.1 | Conclusões..... | 97 |
| 5.2 | Sugestões | 98 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 99 |

1. INTRODUÇÃO

O setor produtivo mundial está em constante desenvolvimento, necessitando da extração de recursos naturais, e conseqüentemente acarretando impactos negativos ao meio ambiente devido a extração e descarte de materiais não aproveitados nos processos industriais. A partir dessa constatação surge à necessidade de reaproveitamento/ reuso desses materiais descartados como alternativa para minimização dos impactos ambientais.

A estabilização de solos é uma das técnicas mais aplicadas quando se fala em melhoramento de solos na engenharia geotécnica. Em muitas situações o solo que se encontra disponível no local da obra não apresenta bom desempenho frente as necessidades do projeto, e a remoção de camadas, do ponto de vista econômico e ambiental, é inviável, tornando a estabilização uma alternativa necessária. Portanto, a estabilização visa modificar as propriedades do solo de modo a melhorá-lo por meio de procedimentos físicos, químicos e mecânicos.

Alguns materiais como cinzas volantes, escória de alto forno, cinzas de casca de arroz, resíduos de cerâmica vermelha entre outros, estão sendo estudados por diversos autores como forma de substituição aos materiais já utilizados na pavimentação. Um dos resíduos estudados, na construção civil em geral, é a Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar (CBCA), resíduo advindo da indústria sucroalcooleira e que pode ser aproveitado após passar por modificações físicas e químicas que potencializam suas propriedades mecânicas, como por exemplo aumento em sua resistência à compressão simples (SAVASTANO et al., 2009).

A estimativa é que o Brasil produza cerca de 596,1 milhões de toneladas de cana de açúcar na safra 2022/2023, um acréscimo de quase 2% em relação à safra passada (CONAB, 2022). Durante a extração do caldo de cana, 30% da cana-de-açúcar moída se torna bagaço. Dessa totalidade do bagaço, cerca de 95% é queimado em caldeiras para produção de energia motriz e tem como rejeito a cinza do bagaço de cana-de-açúcar CBCA (FERNANDES, TASHIMA et al., 2015). Pesquisas apontam que a cada tonelada de cana-de-açúcar são gerados aproximadamente 6 kg de cinzas (ANDRADE NETO et al., 2021, SALES et al., 2010, GAR et al., 2017). Com isso, baseado na produção anual (safra 2022/2023) de 596,1 mil toneladas de cana produzida (CONAB, 2022), os valores estimados para geração de cinzas são de aproximadamente 4 mil toneladas no país.

Dessa forma, a CBCA por ter grande potencial pozolânico pode ser utilizada para substituição parcial do cimento *Portland* ou até utilizada como agregado miúdo para

produção de concretos. A vantagem dos materiais pozolânicos é que esses são ricos em alumínio e silício em fase amorfa e são utilizados nas reações de alcali ativação na formação de materiais cimentantes. Dessa forma pode ser utilizada na construção civil como compósito, por conta do teor de óxido de silício (SiO_2) encontrado em grande quantidade em sua massa (SOUZA et al., 2007, MORAES FILHO, 2019). Portanto, a utilização da CBCA como precursor em sistemas álcali-ativados apresenta um alto potencial, além de apresentar uma nova possibilidade de disposição e de redução dos custos inerentes ao processo de tratamento e descarte.

Os materiais álcali-ativados são formados por meio de uma reação entre um aluminossilicato sólido que, em condições alcalinas, produz um ligante com capacidade de desenvolver características de um material consolidado (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; SHI; ROY; KRIVENKO, 2003). Nessa configuração, a fonte de aluminossilicato é denominada de “precursor”, e a fonte alcalina de “ativador” (SOUZA, 2021).

Os materiais ativados alcalinamente (MAA) se mostram promissores como alternativa ao cimento Portland em diversas aplicações. A possibilidade de uso dos MAA é comprovada devido ao bom desempenho que esses materiais vêm apresentando em diversos estudos (CAICEDO et al., 2023; FERREIRA et al., 2023; BRUSCHI et al., 2022; MARTINATO, 2021), como: melhor desenvolvimento da resistência mecânica, a exemplo de ganhos em resistência à compressão simples especialmente nas primeiras idades (JIAO et al., 2018), excelente durabilidade com melhor resistência ao ataque de sulfato e ácido, e resistência ao fogo significativamente maior que o cimento convencional (BERNAL et al., 2011a; RASHAD et al., 2012). Assim como essas características, as propriedades de deformabilidade dos materiais de pavimentação também são fundamentais para o dimensionamento de pavimentos e podem ser investigadas a partir da composição de misturas estabilizadas quimicamente.

De acordo com Pereira *et al.* (2015) a cinza do bagaço da cana de açúcar pode ser usada como precursor mineral para produzir aglomerantes alcalinamente ativados e torna-se uma alternativa viável em substituição aos materiais convencionais, uma vez que os custos de produção desses materiais podem ser menores do que os de produção do cimento tradicional (DUXSON et al., 2007). Portanto, a aplicação da CBCA em estabilização de obras rodoviárias é uma possibilidade de uso desse resíduo, tendo em vista o volume que pode ser consumido e a necessidade de materiais para essas atividades. Entretanto, existem poucos estudos que avaliem como a CBCA se comporta em sistemas

com baixos teores de cálcio e sua utilização como material para uso em pavimentação, como será realizado nesta pesquisa.

Baseada nessas informações, esta pesquisa estudou o uso da CBCA na estabilização de solos, para construção de camadas de pavimentos rodoviários, em substituição ou incorporação a outros materiais convencionais, pois este material se apresenta como uma alternativa viável para resolução de problemas em solos na engenharia geotécnica.

1.1 OBJETIVOS

1.2 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento mecânico de misturas álcali-ativadas de Solo-Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar para aplicação na área de pavimentação.

1.3 Objetivos Específicos

- Analisar o efeito dos teores do precursor (CBCA) e ativador alcalino (NaOH) na estabilização do solo.
- Verificar a influência do teor de geopolímero (CBCA+NaOH) na resistência à compressão simples;
- Analisar a recuperação mecânica do solo estabilizado com CBCA álcali-ativada sujeito aos ciclos de gelo e degelo;
- Avaliar a microestrutura das misturas empregadas e identificar os produtos de reações formados, de forma a validar a álcali-ativação para estabilização de solos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção explana acerca dos principais assuntos abordados nesta pesquisa: estabilização de solos, estabilização química, ativação alcalina, cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) e pavimentação.

2.1 Estabilização de solos

A estabilização de solos é definida como método que proporciona o melhoramento das propriedades mecânicas, hidráulicas e de deformabilidade de um solo, de maneira a fazer com que esse material se torne apropriado para um determinado uso. As propriedades físicas e químicas do solo assim como as solicitações para sua utilização são condições decisivas na escolha da técnica de estabilização (SANTIAGO, 2001). Segundo Tran (2013) a estabilização do solo é o procedimento de desenvolver ou melhorar algumas propriedades desejadas, de maneira a deixá-lo estável e útil para um determinado uso.

O processo de estabilização pode melhorar o comportamento de: solos sensíveis à água ou em condição muito úmida; solos granulares ou solos finos muito moles; solos com baixa capacidade de suporte ou elevada deformabilidade para serem solos reutilizados nas condições técnicas e econômicas aceitáveis. Dessa forma, tornando-se desnecessárias as operações de substituição do solo e aterro de materiais no local (DAASSI-GLI, 2020).

Cristelo (2011) indica que as técnicas de estabilização de solos mais utilizadas são a estabilização mecânica, a estabilização física e a estabilização química. As técnicas de estabilização mecânica são aquelas nas quais é buscado aprimorar as propriedades do solo, sobretudo a redução do volume de vazios neles presente, por meio de uma melhoria na distribuição de seus grãos constituintes e/ou recorrendo a alterações da sua composição granulométrica (SECCO, 2020).

A estabilização mecânica também é o processo que consiste em densificar o solo, compactando-o por meio de equipamentos mecânicos, aplicação de pressão, impacto ou vibração, em campo ou em laboratório. No campo, geralmente é usado um rolo compactador para obras de maior significância, onde é desejado ter um maior controle tecnológico, já em pequenas obras usam-se outros equipamentos com menor porte, como sapo mecânico e outras ferramentas improvisadas no local. Resumidamente, a estabilização mecânica consiste em aplicar uma carga ao solo, compactando-o, reduzindo seus vazios, aumentando as tensões internas e por consequência elevando sua estabilidade e resistência mecânica (DAASSI-GLI, 2020).

De acordo com Secco (2020) as técnicas de estabilização física são aquelas onde são promovidas mudanças nas características do solo. Nesse tipo de estabilização as propriedades físicas do solo são modificadas, alterando em geral sua textura e granulometria. Essa técnica consiste basicamente na mistura de dois ou mais materiais, de maneira que se enquadre dentro de uma determinada especificação granulométrica, ou a adição de fibras. Desta combinação de materiais, forma-se um terceiro material que agrega as características de suas fases constituintes, denominado de material compósito.

Como citado anteriormente, a estabilização física de solo também pode ser realizada por processos classificados como elétricos, que são baseados na passagem de uma corrente elétrica para estabilizar o solo. Em solos arenosos saturados o procedimento envolve descargas sucessivas de alta tensão e em solos argilosos são utilizadas descargas de baixa tensão contínuas gerando fenômenos de eletromose, eletroforese e consolidação eletroquímica (SILVA, 2007).

Para estabilização física existe ainda outra opção que é o tratamento térmico, feito por meio do uso da energia térmica de congelamento ou termosose. A solução de congelamento é mais usada e, geralmente, temporária, mudando a textura do solo. A termosose é um método de drenagem que proporciona a difusão de um fluido por um meio poroso pela ação de gradientes de temperaturas (ALMEIDA, 2009).

Segundo Taha *et al.* (2018) muitas vezes é necessário realizar uma estabilização granulométrica, onde é feita uma composição artificial de solo estabilizado, usando a proporção adequada de cada solo e sua mistura, a fim de obter granulometria final desejada. Para os autores em questão a estabilidade de uma mistura irá depender da forma e do tamanho das partículas, sua distribuição granulométrica, densidade relativa, fricção interna e da coesão. Um material granular concebido para a máxima estabilidade deve possuir fricção interna alta para resistir à deformação imposta pelas cargas.

Em sequência existe a estabilização química que promove de maneira permanente alterações químicas nas propriedades do solo por meio do uso de aditivos. Neste trabalho será dado destaque para esse tipo de estabilização por ser a utilizada na pesquisa.

A estabilização química dos solos refere-se ao processo no qual uma quantidade de material químico qualquer (aditivo) é adicionado ao solo natural, para melhorar uma ou mais de suas características. Entre os aditivos mais utilizados na estabilização de solos é possível destacar a cal e o cimento (ALMEIDA, 2016; PAIVA *et al.*, 2016). Aditivos alternativos como magnésio, soda caustica e cinzas estão sendo analisados por pesquisadores (POURAKBAR *et al.*, 2015; HUAT *et al.*, 2017; SECO *et al.*, 2017;

BRUSCHI et al., 2022). Para uma escolha apropriada do tipo de estabilização que será realizada é fundamental definir quais as características do solo que necessitam ser alteradas e os propósitos aos quais se destinam o procedimento de estabilização.

2.1.1 Estabilização química

De acordo com Casanova (2014) a estabilização química dos solos, no Brasil, teve início em 1948 com uso na construção de bases e sub-bases de pavimentos asfálticos. Ainda segundo o autor os solos mais adequados para o uso dessas técnicas são os solos granulares e argilosos tanto com índice de plasticidade elevado como reduzido.

A estabilização química é definida como a adição de uma determinada substância química no solo, chamada de agente cimentante, de maneira a proporcionar alterações que influenciem nas características de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade desse, alcançando-se assim sua estabilização e produzindo um material cimentado artificial (HORPIBULSUK *et al.*, 2015).

O uso de agentes cimentantes para a estabilização de solos possui o propósito de produzir materiais geotecnicamente compatíveis com as exigências de deformabilidade e resistência encontradas naquela região. Solos cimentados de forma artificial podem ser utilizados em diversas situações, por exemplo: na execução de fundações superficiais sobre solos moles, na proteção e construção de taludes, reforço em aterros, contenção em escavações, prevenção de liquefação em areais, construção de túneis, fundações para prevenção de retração, dilatação e recalques como radier em estruturas leves e construção de bases e sub-bases para pavimentos (CONSOLI *et al.*, 2013, 2019; THOMÉ *et al.*, 2015).

Na estabilização química, como o nome indica, acontece uma reação química do aditivo com os minerais do solo (fração coloidal) ou a constituição de conteúdo dos vazios pelo produto de reação química do aditivo com a água. Por exemplo, no solo-cal e na segunda fase da estabilização com cimento existe, uma reação que é caracterizada melhor como físico-química: os cátions Ca^{++} liberados pela hidratação do cimento ou advindos da cal reagem com a superfície dos argilominerais e alteram o pH da solução eletrolítica. Os produtos cimentantes que são gerados posteriormente, por meio de reações pozolânicas, acrescem na rigidez da mistura (DOURADO, 2013).

Também de acordo com Dourado (2013) quando é gerada a mistura solo-estabilizador pode acontecer que o estabilizador gere ou não uma matriz contínua com o solo. Na matriz contínua o agente estabilizador preenche todos os vazios e os grãos de

solo ficam mergulhados na matriz, como se fossem inertes. Nesta situação as características do sistema são as da matriz e as características mecânicas do estabilizador predominam. Na matriz descontínua o estabilizador não preenche todos os vazios e então podem acontecer três maneiras de ação:

- Alteração das propriedades das superfícies das partículas;
- Vedação inerte dos vazios;
- Interconexão dos grãos de solo-solda por pontos

Há vários agentes cimentantes que podem ser usados como estabilizantes químicos dos solos, dentre eles os mais usados são o cimento Portland e a cal.

2.1.1.1 Estabilização química com cimento

De acordo com Horpibulsuk *et al.* (2015) o uso de cimento Portland é o método mais usado dentre os disponíveis. Nesse tipo de estabilização, as reações químicas geradas levam a produzir um material mais resistente e com minimização do índice de plasticidade e melhora da trabalhabilidade (LA ROCHELLE *et al.*, 2019).

Esse tipo de estabilização é formado pela combinação de óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro, oriundos do calcário, da argila e do gesso. A existência de sílica (SiO_2) e da alumina (Al_2O_3) possui valor fundamental na produção de materiais com grandes resistências (FARO, 2014).

O procedimento de produção do cimento Portland é indicado como uma das principais formas de emissões de CO_2 entre as atividades nas indústrias. Para Yang *et al.* (2014) a cada 1000 kg de cimento Portland fabricado é lançado no meio ambiente cerca de 900 kg de CO_2 . Segundo Olivier *et al.* (2015) e Torres-Carrasco (2017) a quantidade desse gás gerado durante a fabricação de cimento representa 7% do número total emitido em todo o mundo. Com o intuito de diminuir o número total de CO_2 liberado no meio ambiente, materiais alternativos com propriedades aglutinantes próximas ao cimento Portland vêm sendo estudados, como o uso de cal de carbureto, pó de vidro reciclado e cinzas volantes.

2.1.1.2 Estabilização química com materiais alternativos

É possível encontrar atualmente muitas pesquisas (RIOS *et al.*, 2016; SALDANHA *et al.*, 2018; CONSOLI *et al.*, 2018, 2019, 2020; MIRANDA *et al.*, 2020) que estudam a adição de outros produtos alternativos ao cimento Portland, por exemplo, para uso na estabilização de solos, com o objetivo de maximizar a eficácia técnica e/ou econômica do processo, considerando as vantagens para o meio ambiente.

Dentre as pesquisas Saldanha *et al.* (2018), Dalla Rosa (2019) e Consoli *et al.* (2018, 2019, 2020) analisaram o uso de vários resíduos, como a cal de carbureto, cinza volantes e pó de vidro reciclado em substituição ao cimento Portland para produção de solos cimentados artificialmente. Consoli *et al.* (2018) verificaram o efeito de misturas de vidro moído e cal de carbureto em areias finas e buscaram avaliar possíveis variações da perda acumulada de massa. Os resultados mostraram que, para as amostras testadas, a perda de massa varia a uma taxa proporcional ao aumento dos teores usados de vidro moído e cal de carbureto, onde nessa pesquisa foram usados teores de 0 a 10%.

Consoli *et al.* (2019) propuseram uma metodologia para realização da dosagem de areia e arenito de Botucatu artificialmente estabilizados com resíduos de cal de carbureto, pó de vidro e cinza de casca de arroz, em proporções que variavam de 0 a 10%. Para isso realizaram ensaios de compressão não confinada e durabilidade, onde os resultados mostraram que com o aumento dos teores dos resíduos adicionados teve uma redução na variação volumétrica e aumento da resistência à compressão proporcional à medida que aumentava a quantidade de resíduos. Essa redução na variação volumétrica alcançou, aproximadamente, 5% nas amostras com maior quantidade de resíduos em relação a amostra sem o material estabilizante e o aumento da resistência à compressão chegou a alcançar cerca de 20% para a mesma amostra.

Dentre os materiais alternativos ainda existem as cinzas que também podem ser usadas como estabilizante químico. Essas se encontram dentro de um grupo alternativo de materiais que são resultados da ativação alcalina de aluminossilicatos, onde variados aglomerantes são alcançados depois da ativação desses materiais com soluções alcalinas. Esses produtos, ativados por meio de uma solução alcalina, possuem propriedades de alta resistência mecânica e boa durabilidade, propriedades essas que, a depender de fatores como produtos precursores e condições de cura, por exemplo, podem ser desenvolvidas com um tempo reduzido em relação a outros métodos alternativos (CHEN *et al.*, 2016, NEUPANE *et al.*, 2016, TORRES-CARRASCO, 2017). Dentre as cinzas usadas para estabilização de solos existem as cinzas provenientes do bagaço da cana de açúcar que são foco deste estudo.

2.1.2 Ativação alcalina

Puro (1940) apud Davidovits (1994) ao realizar testes com escórias para adicionar ao cimento, fez uma observação em determinado momento de sua pesquisa, onde essas reagiam com substâncias alcalinas e se transformavam em uma liga, endurecendo

rapidamente. Essa pesquisa iniciou os estudos em relação ao uso de bases fortes sobre os materiais aluminossilicatos (BRITO, 2018).

Segundo Palomo (2003) ativação alcalina é o processo químico que permite a transformação de estruturas vítreas (amorphas, parcialmente amorphas ou metaestáveis) em um compactado material cimentício. Tanto em geopolímeros quanto nos aglomerantes álcali-ativados (AGA) a ativação alcalina é uma reação entre um ativador alcalino e um aluminossilicato (CAL *et al.*, 2018), onde este exerce a função de precursor no seu estado sólido com estrutura amorfa, constituindo um aglomerante endurecido ao final do processo (PROVIS *et al.*, 2014).

O mecanismo de reação que dá origem aos aglomerantes ativados alcalinamente é um processo químico complexo de dissolução alcalina e orientação/precipitação numa solução aquosa de um precursor sólido, sendo responsável pelo endurecimento e propriedades dos aglomerantes ativados alcalinamente (CONSOLI *et al.*, 2022a).

Dessa maneira, os ativadores são definidos como compostos químicos utilizados para ativar os precursores, gerando compostos cimentantes. Esses podem ser hidróxidos de sódio, de cálcio ou potássio, silicatos de sódio ou potássio, carbonatos ou sulfatos (PROVIS, 2014). Os mais utilizados são os hidróxidos e silicatos (DUXSON *et al.*, 2007). De acordo com Lima e Thaumaturgo (2005) os silicatos proporcionam uma fonte adicional de sílica ao sistema, enquanto os hidróxidos asseguram alta alcalinidade as misturas.

Segundo Consoli *et al.* (2022b) o objetivo principal dos ativadores alcalinos consiste no fornecimento de cátions de metais alcalinos, de maneira a elevar o pH da mistura e acelerar a dissolução do precursor sólido. Esses ativadores são divididos em quatro grandes grupos: hidróxidos alcalinos, silicatos alcalinos, carbonatos alcalinos e sulfatos alcalinos.

Já os precursores são provenientes de resíduos e subprodutos industriais ou argilas calcinadas. Os precursores utilizados nos processos de álcali-ativação, podem ser desde pozolanas, fontes de silício e alumínio a materiais ricos em CaO. O metacaulim é o material mais usado como precursor, porém existe outros materiais como: minerais naturais, resíduos metalúrgicos, as cinzas orgânicas, as escórias de alto-forno e a cal (SHEHAB *et al.*, 2016; ASSI; EDDIE DEEVER; ZIEHL, 2018; PARVEEN *et al.*, 2018). Outra possibilidade é a utilização de mais de um precursor concomitantemente, por exemplo, alguma cinza rica em sílica ou alumina, mas sem presença de CaO com um material rico em CaO ou alumina.

Os materiais precursores de aluminossilicatos, usados no processo de ativação alcalina, podem ser separados em dois grupos: os materiais calcinados (cinzas volantes, escória, resíduos de construção e resíduos pozolânicos) e os materiais não calcinados (caulinita, feldspato, argilas e rejeitos de processamento mineral) (ZHANG *et al.*, 2013).

O processo com a utilização de precursores calcinados normalmente possui uma taxa mais rápida de dissolução e gelificação, resultando em produtos com maior resistência à compressão inicial em relação aos produtos provenientes dos materiais não calcinados. Esse fenômeno é justificado pela elevada reatividade produzida pelo processo de calcinação, que muda a estrutura previamente cristalina para uma estrutura amorfa, de mais fácil dissolução (ZHANG *et al.*, 2018).

De acordo com Santos (2021) a ativação alcalina é um processo químico de polimerização de uma mistura de uma fonte rica em aluminossilicatos e uma solução de alto valor de pH, produzida a partir de um metal alcalino, gerando um material cimentante designado de aglomerante álcali-ativado.

Os materiais alcalinamente ativados tem despertado interesse crescente, por conta das suas boas propriedades térmicas e mecânicas quanto à compressão, tração e durabilidade, já existindo algumas aplicações patenteadas (DAVIDOVITS, 1982, 1996, 1999). Esses materiais são produzidos por meio da reação entre uma fonte de metal alcalino e uma fonte de aluminossilicatos (DAVIDOVITS, 1994). A fonte alcalina deste sistema pode incluir hidróxidos alcalinos, carbonatos e sulfatos ou, ainda, qualquer substância solúvel que possa: fornecer cátions de metais alcalinos, elevar o pH da mistura e acelerar o processo de dissolução do precursor (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015). Esse procedimento é capaz de transformar estruturas vítreas (parcialmente amorfas e/ou metaestáveis) em materiais cimentantes (PACHECO-TORGAL; CASTRO-GOMES; JALALI, 2008).

Uma das características mais importantes da tecnologia de ativação alcalina consiste na possibilidade de uso tanto de materiais naturais como de subprodutos da indústria. Além disso, ligantes álcali-ativados possuem potencial de portar várias características comercialmente atrativas como a resistência e durabilidade química (ALAM, DAS; RAO, 2019), resistência a altas temperaturas (KUA *et al.*, 2016) e baixo custo de produção (ZHANG *et al.*, 2013).

A compreensão do comportamento de um material cuja geração é proveniente de um procedimento de reações químicas, depende de forma direta da caracterização dos processos de reação por trás de seu sistema (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015). Quando

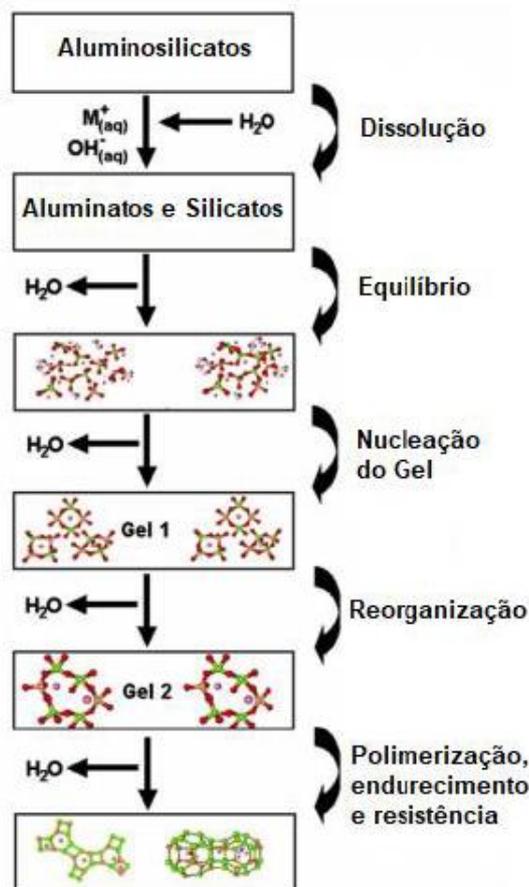
se trata da álcali-ativação, as reações que acontecem entre a solução ativadora e os precursores definem a natureza do produto gerado (DUXSON *et al.*, 2007).

Os materiais formados principalmente por sílica e/ou alumina possuem, na teoria, potencial para serem ativados alcalinamente (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015). Porém, é preciso enfatizar que as quantidades altas de sílica e alumina não garantem a reatividade do sistema ligante álcali-ativado. Essa reatividade depende de diversos critérios como a quantidade de material amorfo, a superfície específica do material, a quantidade de fase vítrea e o tamanho dos grãos (DUXSON *et al.*, 2007).

Além dos precursores e ativadores, outras causas também fazem um papel primordial no processo de ativação alcalina, como: moagem e trituração do precursor (CHAND; SUBBARAO, 2007; KUMAR; KUMAR, 2011), temperatura de cura do processo (MIRANDA *et al.*, 2020) e o teor de água na mistura (KARTHIK; SUDALAIMANI; VIJAYA KUMAR, 2017).

Consoli *et al.* (2022) apontam que as duas principais características para caracterização dos sistemas álcali-ativados são: a composição dos precursores e a concentração do ativador. Dessa forma, os ligantes álcali-ativados dividem-se em dois grupos, o primeiro composto por sistemas com baixo teor de cálcio e altos teores de aluminossilicatos e o segundo com alto teor de cálcio e sílicatos, mas com menores quantidades de aluminatos. Os sistemas com baixo teor de cálcio ao serem ativados com soluções com maior concentração de ativador e os sistemas com alto teor de cálcio ativados com menor concentração de ativador.

Muitas são as incógnitas ainda sobre os mecanismos de formação dos sistemas álcali-ativados, no entanto, existem alguns modelos, dentre eles o modelo de Glukhosvky, principal modelo utilizado para explicar o processo de polimerização. Na Figura 1 é exposto o modelo de Glukhosvky, detalhado por Duxson *et al.* (2007). O processo é dividido basicamente em três etapas: destruição-coagulação, coagulação- condensação e condensação-cristalização.

Figura 1: Modelo de Glukhosvky para ativação alcalina

Fonte: Duxson et al., 2007.

A primeira etapa consiste na degradação das ligações (Ca-O, Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si) dos precursores. Esse processo varia conforme as características específicas do sólido e do grau de saturação da fase líquida, sendo que para essa dissolução ocorrer são necessários meios fortemente alcalinos, proporcionados pelo uso de soluções alcalinas simples ou combinadas (SANTOS et al, 2022).

Para que aconteça o equilíbrio do sistema, alguns fatores precisam ser considerados visto que esses proporcionam a continuação do processo de polimerização. Assim, pode se mencionar fatores como: a concentração dos ativadores, a velocidade da mistura, o tamanho da partícula, a área superficial e a composição dos precursores, fontes de Al-Si. A dissolução e equilíbrio desses aluminossilicatos levará, posteriormente, a formação de géis (gelificação) (DUXSON *et al*, 2007).

A gelificação faz parte da etapa de coagulação-condensação e consiste na formação de uma estrutura condensada. Após essa fase, o sistema continua a se rearranjar e organizar favorecendo cada vez mais as reações de condensação devido a expulsão da dos poros, formando uma rede tridimensional (CONSOLI *et al.*, 2022).

O processo final de endurecimento e cristalização irá ocorrer quando dar-se a evaporação da água e a quantidade de gel for pequena e ele estiver completamente condensado, de maneira que os poros se encontrem distribuídos e uniformes. Os principais produtos gerados pelo mecanismo de polimerização são os géis C-A-S-H (silicato de cálcio modificado com alumínio) e N-A-S-H (aluminossilicato de sódio hidratado) (SANTIQUERA *et al.*, 2013).

O C-A-S-H possui uma estrutura cristalina desordenada, análoga ao gel gerado pela hidratação do cimento (C-S-H), enquanto o N-A-S-H possui estrutura amorfa ou semi-cristalina com maior alcalinidade e não possui cal (PUERTAS; PALACIOS *et al.*, 2011; GARCIA-LODEIR; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

O uso de ativadores alcalinos, como o hidróxido de sódio, em subprodutos ricos em Al_2O_3 e SiO_2 aumenta a taxa na qual as características mecânicas de solos estabilizados são melhoradas. Essa adição eleva o pH do solo, que por consequência, potencializa as reações pozolânicas e ligações cimentícias que ocorrem na mistura (CONSOLI *et al.*, 2022). O Quadro 1 apresenta alguns estudos que analisaram o desempenho mecânico de solos estabilizados por meio da ativação alcalina. No tópico seguinte será discutido a ativação alcalina em cinzas bem como apresentados trabalhos sobre o presente tema.

Quadro 1: Estudos com estabilização de solos usando o processo de ativação alcalina

| Tipos de análises | Autores | Ensaio realizado |
|-------------------|--|---|
| Físico-mecânica | Martinatto (2021) | Compressão simples |
| | Caicedo et al (2021) | Compressão simples |
| | Sargent et al. (2013) | Compressão Triaxial |
| | Horpibulsuk; Rachan; Suddeepong (2011) | Compressão simples |
| | Wilkinson; Haque; Kodira (2010) | Compressão simples; Palheta (<i>Vane Test</i>) |
| | Horpibulsuk et al. (2010) | Compressão simples |
| | Hughes; Glendiming (2004) | Compressão simples |

Fonte: Adaptado de Bruschi, 2020.

2.1.3 Ativação alcalina de cinzas

Atualmente, é possível notar a necessidade de minimizar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) geradas pela produção de Cimento Portland, assim como, melhorar a durabilidade dos agentes cimentantes. O cimento e a cal são usados há bastante tempo como materiais aglomerantes, onde o cimento ainda é considerado como destaque por fornecer aumentos rápidos de resistência (JEGANDAN *et al.*, 2010).

No entanto, o uso desses dois produtos como agentes cimentícios entravam de maneira direta com a definição de sustentabilidade, principalmente por conta do grande consumo de energia, custo financeiro e emissões de carbono produzidos durante o processo de produção (GARTNER, 2004). Assim, é fundamental a busca por novos agentes aglomerantes que sigam critérios mais sustentáveis. Esses novos materiais precisam apresentar propriedades mecânicas e de deformabilidade comparáveis ou superiores aos materiais aglomerantes tradicionais (JEGANDAN *et al.*, 2010). Desse modo, os ligantes ativados alcalinamente podem ser uma alternativa potencial ao cimento Portland (AL-SWAIDANI, HAMMOUD e MEZIAB, 2016; PACHECO-TORGAL, CASTRO-GOMES e JALALI, 2008).

Como a álcali ativação pode ser aplicada a qualquer material precursor, que apresente teores suficientemente elevados e reativos de Al_2O_3 e SiO_2 , a cinza está sendo usada cada vez mais em subprodutos industriais à base de aluminossilicatos, que podem diminuir em até 64% os gases do efeito estufa. Além disso, os custos de produção desses materiais podem ser menores do que os de produção do cimento tradicional (DUXSON *et al.*, 2007).

Os subprodutos das indústrias à base de aluminossilicatos mais conhecidos são a escória granulada de alto forno, a escória de aço, as cinzas volantes e o resíduo da fabricação de dióxido de titânio (gesso vermelho) (HUGHES *et al.*, 2011; GAZQUEZ *et al.*, 2013). Além disso, as cinzas provenientes da queima de determinados materiais orgânicos, como é o caso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, possuem potencial de uso, pois possuem grandes níveis de pozolanicidade e reatividade juntamente com uma elevada quantidade de CaO e sílica em sua composição (SHIMOLA, 2018).

2.1.3.1 Ativação alcalina de cinzas na construção civil

Tippayasam *et al.* (2010) analisaram as características mecânicas de geopolímeros formados por diversos resíduos agroindustriais em substituição a cinza volante (CV), dentre esses, a cinza de bagaço da cana-de-açúcar (CBCA). Os valores de resistência à compressão atingiram valores da ordem de 11,03, 16,16 e 3,01 MPa, respectivamente para as amostras com 20, 50 e 80% de CBCA, com 8 dias de cura, e razões de Si/Al de 2,48, 4,06 e 7,47, após ativação alcalina com solução de silicato de sódio e NaOH 10M e cura à temperatura ambiente.

Fernandes Filho (2012) avaliou o potencial da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar, na produção de materiais cimentícios alcalinamente ativados. O autor

observou a predominância de sílica na CBCA, com teor médio de 80%. Na composição onde foi usada 100% da CBCA como material precursor e silicato de sódio como ativador foi possível obter uma pasta com 20 MPa de resistência à compressão axial. Para o pesquisador os resultados foram animadores, pois o estudo pode contribuir de forma sustentável para o descarte adequado de um resíduo, ao invés de ser um problema ambiental como tantos outros vistos atualmente.

Castaldelli *et al.* (2013) estudaram em pasta e argamassa álcali-ativadas a substituição parcial de escória granulada de alto-forno (EGAF) por CBCA, nas seguintes proporções de 0, 15, 25 e 40%. Os resultados da pesquisa mostraram que a presença da CBCA colaborou para o melhoramento das reações de ativação alcalina nos primeiros dias de cura (7 e 28 dias), com isso, tendo um aumento de até 15% da resistência à compressão. Ainda, as análises dos materiais testados mostraram que a cura à 20°C resultou uma em uma matriz álcali-ativada mais compacta quando comparado à cura térmica (65°C).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi utilizada na produção de sistemas binários de cinza/escória de alto forno. As matrizes foram produzidas utilizando o ativador alcalino KOH, para produção das argamassas foi usada uma solução de concentração molar igual a 8 e 25% de CBCA em substituição a escória, e alcançaram 50MP aos 90 dias. Em relação à durabilidade das argamassas, quando comparadas com as produzidas com cimento Portland, os corpos de prova apresentaram resistência aos ataques de ácidos e de sulfatos. Dessa forma, a CBCA, usada como precursor mineral para produzir aglomerantes alcalinamente ativados torna-se uma alternativa viável (PEREIRA *et al.*, 2015).

Akbar *et al.* (2021) realizaram estudos sobre as características mecânicas de argamassas de geopolímeros tendo como precursor a CBCA e utilizando o NaOH 12 M e silicato de sódio como ativadores principais além das fibras de polipropileno. Nessa pesquisa, foi realizada a requeima da CBCA à uma temperatura de 900°C por 2 horas e sua moagem, as amostras foram curadas à 60°C por 24horas. Os pesquisadores compararam a argamassa ao cimento Portland, onde observaram melhorias significativas nos resultados obtidos nas características mecânicas de compressão simples e resistência à tração, e ainda que a adição de fibras de polipropileno é ideal para esse emprego no percentual de 1%.

2.1.3.2 Ativação alcalina de cinzas em solos

No estudo de Cristelo *et al.* (2013) foi feita uma análise com cinzas volantes ativadas com sódio e foi visto que ocorre a geração de uma pasta que quando misturada com o solo endurece, produzindo um material com maior resistência mecânica e reduzida deformabilidade em relação ao solo de origem. Nesse estudo os autores concluíram com base nos resultados alcançados que a ativação alcalina é tecnicamente viável para ser usada na estabilização de solos. Além disso, indicaram que existem melhoras depois de cerca de 21 dias, sendo um procedimento diferente, por exemplo dos métodos com o uso de cimento Portland que chegam a sua resistência máxima após uma cura de 28 dias.

Rios *et al.* (2016) avaliaram a ativação alcalina com hidróxido e silicato de sódios também em cinzas volantes com o objetivo de alcançar melhor desempenho mecânico em uma areia siltosa. Para isso os autores fizeram uso de ensaios de compressão não confinados, ensaios triaxiais e testes de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Com os resultados foi possível verificar que a resistência dos corpos de prova que possuíam 15% de cinza aumentou significativamente, variando de 0,3 para 5,2 MPa dentro de 90 dias e com os resultados do MEV foi vista a dissolução da maioria das partículas de cinza e a geração correspondente de gel de aluminossilicatos.

Bruschi *et al.* (2021) estudaram a viabilidade técnica do processo de álcali-ativação na estabilização do rejeito de mineração de bauxita, que é resultante do processo de obtenção do alumínio, por meio de ensaios de resistência, rigidez e durabilidade. Os resultados demonstraram que o ligante álcali-ativado se apresenta como uma opção adequada para o melhoramento do comportamento mecânico do rejeito de mineração de bauxita, onde os maiores valores de resistência à compressão simples foram encontrados nas amostras compostas por 70% de CBCA e 30% de CC, com concentração molar de 1M e concentração de álcalis de 3,86%. Ainda, o índice porosidade/teor volumétrico de ligante foi um parâmetro adequado para a avaliação da estabilização dos materiais, mostrando a influência do peso específico aparente seco e da percentagem de ligante.

Santos *et.al.*, (2022) estudaram a viabilidade de se utilizar um cimento álcali-ativado com hidróxido de sódio a base de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar para estabilização de um rejeito de mineração de ouro, por meio de ensaios de resistência, rigidez, durabilidade e lixiviação. Os teores utilizados variaram de 10 a 30% e os resultados evidenciaram que o ligante álcali-ativado é uma satisfatória alternativa para estabilização do rejeito de mineração de ouro, com aumento proporcional de resistência à compressão à medida que aumentava o teor da CBCA, chegando a um

aumento de 15% em relação à amostra de referência. Além disso, o índice porosidade/teor volumétrico de aglomerante mostrou-se adequado como metodologia de dosagem para previsão do comportamento mecânico do rejeito álcali-ativado.

2.1.4 Cinza do bagaço da cana de açúcar

De acordo com o Instituto de Economia Agrícola (IEA) o Brasil é o maior produtor mundial de cana de açúcar e seus derivados (açúcar e etanol). A produção desse insumo é de extrema importância para a economia brasileira e uma das alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao enorme potencial de etanol e seus respectivos subprodutos (POGGIALI, BEZERRA *et al.*, 2012). O conjunto sucroenergético, açúcar e etanol, merece enfoque na pauta de exportação, e em 2020 o setor teve participação nacional de 9,9%, sendo o quarto setor com mais representação no país. De toda a quantidade exportada no Brasil, o açúcar representou 87,8%, e foi o campo mais expressivo no estado de São Paulo, com uma participação de 37,1%. Em todo o país, o estado de São Paulo é o destaque na liderança da produção respondendo por cerca de 54 % do valor produzido na safra 2020/2021. Além disso, nessa safra o estado foi responsável pela produção de 48,4% de etanol e 63,2% de açúcar (IEA, 2022).

No estado da Paraíba, as circunstâncias climáticas ao longo da safra 2021/2022 foram decisivas para a produção da safra atual 2022/2023. As chuvas foram menos do que o esperado e abaixo da média histórica em várias áreas produtoras, gerando um impacto no potencial produtivo da cultura, assim como na sua qualidade. De maneira geral, a geração total foi cerca de 6000 toneladas de cana de açúcar com uma redução de 2,6% em relação à safra 2021/2022. Apesar da redução, a Paraíba subiu para a terceira e quarta posição como maior produtor de etanol e açúcar do Nordeste, respectivamente (CONAB, 2022). A indústria da produção de álcool e açúcar gera um resíduo, o bagaço de cana-de-açúcar (BCA), durante a moagem da cana de açúcar para a extração do caldo. O bagaço da cana de açúcar é uma biomassa que geralmente é queimado como combustível em caldeiras que produzem vapor d'água usada na produção de açúcar e álcool e em procedimentos de cogeração de energia. O bagaço de cana-de-açúcar, também, é utilizado por termoelétricas no Brasil, entre outras, no processo de geração de energia (ANEEL, 2017). Durante períodos de seca no Brasil há um aumento na vulnerabilidade energética e uma das fontes utilizadas nesse período para complementação de energia é por meio da queima do bagaço de cana-de-açúcar.

Segundo a Conab (2022) a estimativa é que o Brasil produza cerca de 596,1 milhões

de toneladas na safra 2022/2023, um acréscimo de quase 2% em relação a safra passada. Durante a extração do caldo de cana, 30% da cana-de-açúcar moída se torna bagaço. Dessa totalidade do bagaço, cerca de 95% é queimado em caldeiras para produção de energia motriz e tem como rejeito a cinza do bagaço de cana-de-açúcar CBCA (FERNANDES, TASHIMA *et al.*, 2015). Pesquisas apontam que a cada tonelada de cana-de-açúcar são gerados aproximadamente 6 kg de cinzas (ANDRADE NETO *et al.*, 2021, SALES *et al.*, 2010, GAR *et al.*, 2017). Com isso, baseado na produção anual (safra 2022/2023) de 596,1 mil toneladas de cana produzida (CONAB, 2022), os valores estimados para geração de cinzas são de aproximadamente 4 mil toneladas no país.

Essa cinza, normalmente, é depositada em regiões inapropriadas, e precisa de um descarte adequado. Essa situação gera um grande entrave, pois seu descarte apropriado gera um custo adicional ao processo, assim é preciso desenvolver aplicações que agreguem valor a este resíduo e que tornem o método produtivo mais sustentável (CACURO; WALDMAN, 2015).

De acordo com a Conab (2022) o estado da Paraíba produziu cerca de 1824,39 mil toneladas de bagaço de cana-de-açúcar e como já mencionado o bagaço é queimado e transformado em cinza é possível fazer uma estimativa de cerca de 383,12 mil toneladas por ano de cinzas produzidas. Com o uso dessas cinzas como aditivo para estabilizar solo seria possível construir 458 km de rodovia usando o resíduo como base de pavimentação, considerando um solo estabilizado com 30% de cinza em peso. Se ampliar o cenário para todo o país, o uso da cinza iria possibilitar a construção de 43.050 km de rodovia, já que o Brasil é o maior produtor do mundo da cana-de-açúcar e necessita de um descarte apropriado dos resíduos gerados no processo produtivo (SILVA, 2022).

A CBCA tem sido estudada frequentemente como pozolanas para a produção de cimento Portland e concretos (GANESAN *et al.*, 2007). Esses estudos comumente utilizam de processamento mecânico e térmico das cinzas, seja por simples moagem ou por queima em temperaturas variadas (CORDEIRO *et al.*, 2008; CORDEIRO *et al.*, 2009a; CORDEIRO *et al.*, 2009b; SOARES *et al.*, 2014; FERREIRA *et al.*, 2017; BEZERRA *et al.*, 2017). Lombardi (2019) afirma a substituição, mesmo que de maneira parcial, dos agregados miúdos pela cinza, em argamassas e concretos, além de diminuir os resíduos que seriam descartados, também preserva os recursos naturais não renováveis.

De maneira geral, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar possui uma concentração de sílica, geralmente acima de 80% em massa, além de possuir alumínio, ferro, óxidos alcalinos e alcalino-terrosos em teores reduzidos (DRUMOND, 2019; CORDEIRO *et al.*,

2019). Devido a sua composição química, as cinzas podem ser usadas como aditivo material para pastas argamassas e concretos (PAIVA *et al.*, 2016), pois, quando incrementado no cimento se combinam e/ou são ativadas pelo hidróxido de cálcio liberado nas reações de hidratação do clínquer, gerando compostos de características ligantes.

2.1.4.1 Uso de CBCA na Construção Civil

Freitas *et al.* (1998) pesquisaram o efeito da adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar na resistência à compressão simples de argamassas confeccionadas com cimento Portland CP-I 32 e areia normal, com substituição parcial do cimento por 0, 5, 10, 15 e 20 % de cinzas. O rompimento dos corpos de prova se deu aos 3, 7, 14, 21, 28 e 63 dias de cura, sendo observado nos resultados que a adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar aumentou os valores da resistência à compressão em até 22% (aos 28 dias e para o teor de 15 % de cinzas), em relação à argamassa de referência.

Ganesan; Rajagopal; Thangavel (2007) verificaram os efeitos da cinza do bagaço da cana de açúcar como substituição parcial do cimento nas características físicas e mecânicas do concreto. As propriedades do concreto como, resistência à compressão, resistência à tração, absorção de água, características de permeabilidade, difusão de cloreto e resistência à penetração de íons cloreto foram melhoradas quando utilizado o teor de 20% da CBCA em substituição ao cimento.

Souza *et al.* (2007) utilizaram cinzas residuais do bagaço (CBCA), com índice de atividade pozolânicas de 86%, em substituição parcial ao cimento na produção de três traços de argamassas (um padrão e outros dois com substituição de 10% e 20% do cimento por CBCA) e caracterizaram essas argamassas experimentalmente no estado endurecido. Os resultados experimentais mostraram que ambos os traços produzidos com substituição parcial do cimento por CBCA tiveram desempenho igual ou superior quanto a resistência à compressão do traço padrão na idade de 28 dias, comprovando que o material é eficaz para o teor de substituição.

A utilização da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar foi avaliada em substituição ao cimento em teores de 20% e 40% em blocos intertravados. Os blocos com teores de 20% mostraram uma resistência média à compressão de 35 Mpa aos 28 dias, atingindo 88% da resistência do bloco produzido com o concreto de referência, que foi de 40 MPa. Para os teores de substituição de 40% os blocos apresentaram resistência de 26 MPa aos 28 dias, alcançando 65% da resistência dos blocos produzidos com o traço

de referência (NASCIMENTO *et al.*, 2008).

Outro estudo realizado por Moraes Filho (2019) verificou o potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e a sua influência na adição ao poliestireno expandido na fabricação de placas cimentícias. O autor usou cinzas pesadas provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar para produzir corpos de prova usando argamassa com concentração variando entre 12 e 70% de cinza. Esses corpos de provas possuíam dimensões retangulares de 120 cm e 240 cm e de cada amostra foram extraídas 12 unidades para realização de ensaios físicos e mecânicos. Segundo os parâmetros da NBR 15.498/2016 foi verificado que, os materiais gerados com a concentração de cinza entre 12 e 40% atenderam os critérios exigidos para os ensaios de resistência a tração na flexão simples, absorção de água e permeabilidade. Dessa maneira, o autor chegou à conclusão da possibilidade de aplicar a placa cimentícia tanto para vedação interna, vedação externa e mezaninos em sistemas construtivos a seco.

Wu *et al.* (2022), analisaram a utilização da cinza do bagaço da cana de açúcar (CBCA) em substituição ao cimento em concreto de ultra alto desempenho ecologicamente correto (UHPC). Foram analisados os efeitos da CBCA na fluidez, tempo de presa, resistência à compressão, resistência à flexão e retração autógena de concreto. Os resultados mostraram que a aplicação da cinza no concreto como substituto do cimento não só mantém a resistência à compressão, mas também influencia nas propriedades relacionadas à durabilidade, como porosidade, permeabilidade à água, ataque por sulfato, resistência à abrasão, resistência à corrosão, resistência ao congelamento e degelo e desempenho à fadiga. Ao comparar ao grupo controle, o UHPC preparado com taxa de reposição de 40% obteve um bom desempenho. A retração autógena diminuiu 24,48%, e a resistência à compressão foi quase a mesma do grupo controle. Dessa forma, o estudo verifica a viabilidade técnica da aplicação da CBCA como substituta do cimento em UHPC.

2.1.4.2 Uso da CBCA em solos

A aplicação da CBCA em estabilização de obras rodoviárias seria uma possibilidade de uso desse resíduo, tendo em vista o volume que pode ser consumido e a necessidade de materiais para essas atividades. O setor de transportes principalmente o rodoviário não sustenta as demandas do potencial de crescimento econômico. A crescente infraestrutura de transportes, e as rodovias devem ser percebidas como essenciais, e necessitam de manutenção e expansão, por este tipo de transporte ser de grande demanda

e de acesso a todos (SANTOS, 2021). Dessa forma, e com a necessidade de se testar esse novo material muitos autores (VALENCIANO; FREIRE, 2004; LIMA, 2019; SILVA *et al.*, 2020) iniciaram pesquisas com a CBCA.

Valenciano e Freire (2004) analisaram em seus estudos misturas de solo, cimento e cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, visando a possibilidade de sua aplicação na fabricação de materiais alternativos na construção civil. As amostras de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, antes de serem adicionadas às misturas de solo e cimento, passaram por um tratamento prévio de peneiramento e moagem. Foram estudadas diferentes combinações de cimento-cinza, onde, para cada uma delas determinou-se a consistência normal e a resistência à compressão simples, aos 7 e 28 dias. Em seguida foram moldados os corpos de prova com tais misturas de solo-cimento-cinzas, e os mesmos foram submetidos a ensaios de compactação, compressão simples e absorção de água. Segundo os autores os resultados das amostras apontaram que a substituição do cimento Portland na mistura por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar pode ser até 20%, com aumento da resistência à compressão de até 15%.

Lima (2019) estudou o uso de solo laterítico, incorporado a cinza bagaço de cana-de-açúcar para testar a possibilidade de sua utilização em pavimentação. O comportamento do compósito, sólido laterítico - cinza, foi avaliado por meio de ensaios de caracterização dos materiais e ensaios mecânicos. Para realização da estabilização do solo foram utilizados cimento Portland CII-E-32, cal hidratada e cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Foram preparadas cinco misturas: solo + 5% cimento; solo + 5% cal; solo + 5% cinza; solo + 5% cinza + 1% cal; e solo + 5% cinza + 2% cal. Ao ser realizado o ISC (índice de Suporte Califórnia) foi obtido um valor de 40% para o solo natural. A adição de 5% de CBCA no solo natural, sem adição de cimento e cal, acarretou na diminuição do ISC para 32%. Entretanto, a inserção de 5% de cinza e 1% de cal atingiu ISC de 78% o que possibilita seu uso em camadas de sub-base de pavimentos ou bases de baixo volume de tráfego à luz de métodos de dimensionamentos empíricos. Ainda, com a mistura 5% de cinza e 2% de cal foi atingido um ISC de 83%, o que permite seu uso em camadas de base.

Silva *et al.* (2020) avaliaram a adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material pozolânico em pavimentação. A realização dos experimentos visava utilizar a cinza em substituição parcial ao cimento Portland no uso de misturas solo cimento, para aplicação em pavimentos rodoviários como base e sub-base para baixo volume de tráfego. A caracterização do solo se deu por meio de ensaios de compactação, umidade

higroscópica e ensaio de Índice de Suporte Califórnia. Obtendo resultados satisfatórios, com valores de ISC de 74%.

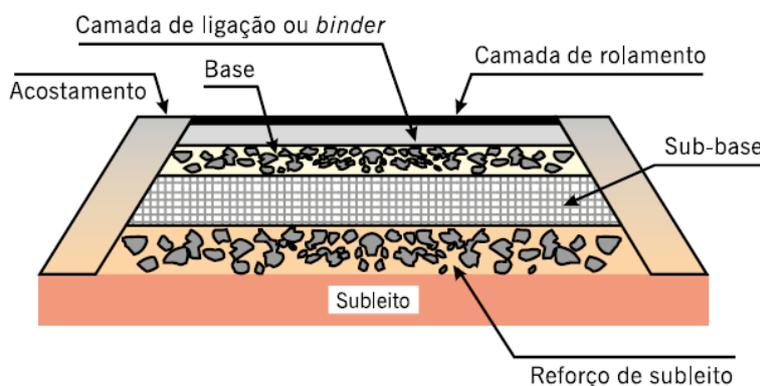
2.2 Pavimentos

O pavimento é um sistema de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente para resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, assim como proporcionar aos usuários melhores condições de rolamento, com conforto, econômica e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2022; DNIT, 2006). Dessa forma, o pavimento deve ser feito de tal maneira que possua resistência e durabilidade e proporcione uma boa qualidade de rolamento e segurança aos usuários.

A concepção de uma rodovia está relacionada em proporcionar aos seus usuários uma condição segura e confortável ao longo de toda a sua vida útil, independentemente da época do ano e sob qualquer condição climática, assegurando as principais demandas funcionais e estruturais. Assim, a estrutura do pavimento é formada com o objetivo de distribuir as tensões e deformações induzidas pelo tráfego ao longo de suas camadas, até um nível de intensidade que cada material dessa estrutura consiga suportar (BALBO, 2007).

A maioria dos pavimentos brasileiros são do tipo flexível, formados por uma delgada camada de revestimento asfáltico, que em função do tráfego e do terreno natural, apresentam as camadas de base, sub-base e reforço do subleito, como é apresentado na Figura 2.

Figura 2: Estrutura do pavimento flexível



Fonte: Bernucci *et al.*, 2022.

A escolha dos materiais que irão formar as camadas dos pavimentos é uma etapa fundamental, visto que o estado de tensões a qual o pavimento estará submetido muda de acordo com a rigidez de cada camada e a combinação entre elas (ROZA, 2018).

A espessura das camadas de um pavimento varia, basicamente, de acordo com as propriedades do subleito, dos materiais utilizados e do tráfego. As características do subleito geralmente são determinadas pelo projeto geométrico quando é definido o traçado e a localização de uma estrada ou rua. A profundidade do corte ou a necessidade de aterro são condicionantes para essa camada e, quando existe a presença de materiais de baixa capacidade de suporte no subleito é necessário o seu reforço (ROZA, 2018).

O material usado como reforço de subleito, por definição básica, apenas necessita ter qualidade superior ao subleito, sendo usualmente utilizado um solo argiloso escolhido próximo ao local e que tenha propriedades físicas e mecânicas dadas pelos parâmetros de escolha. O uso deste reforço indica que a espessura final do pavimento será maior devido a presença de um subleito com baixa capacidade de carga (PINTO; PREUSSLER, 2002).

Ainda, de acordo com os autores Pinto e Preussler (2002), em rodovias com tráfego intenso e pesado a camada da sub-base, que é a camada de pavimento logo acima do reforço do subleito, deve ser estável e ter propriedades que resistam aos esforços impostos pelo tráfego que não tiverem se dissipado pelas outras camadas de revestimento e base. A sub-base apresenta propriedades de resistência maior que a camada de reforço de subleito e complementa a camada de base, por condições técnicas-econômicas. Normalmente, essas camadas são formadas de materiais estabilizados granulometricamente ou granulares, provenientes de jazidas. Também é comum o uso de brita graduada tratada com cimento (BGTC).

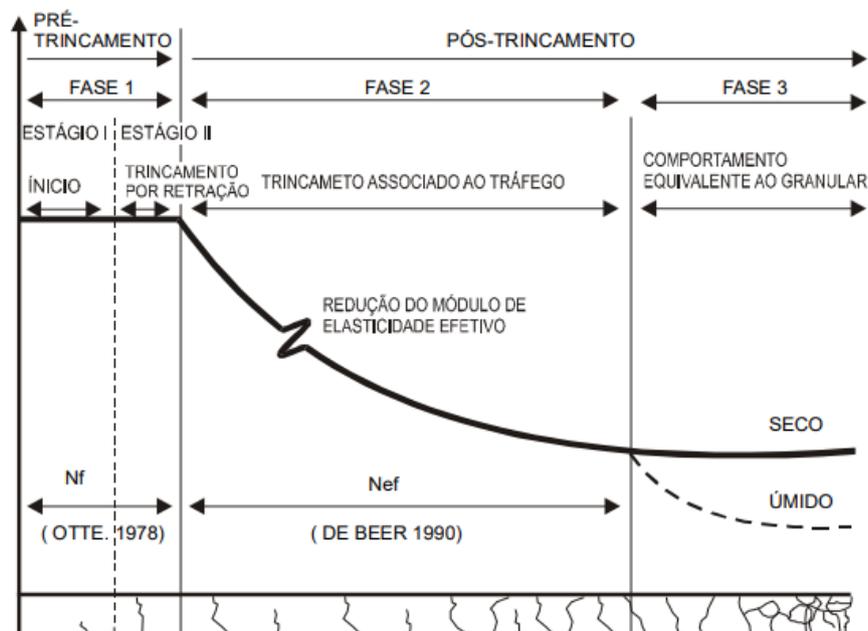
A camada do pavimento encarregada de diminuir as tensões de compressão no subleito e proporcionar que as tensões de flexão não levem o trincamento prematura do revestimento é chamada de base. Essa camada tem como função principal suportar as forças provenientes do tráfego, promovendo rigidez e resistência à fadiga. Os materiais usados para esta camada podem ser os materiais de britagem, misturas de solo e materiais britados, além de materiais estabilizados com cimento Portland, cal ou outros produtos. Os materiais mais comumente usados são: brita graduada, brita corrida, macadame hidráulico, macadame betuminoso, solo estabilizado granulometricamente, solo cimento, solo brita e brita graduada tratada com cimento (PINTO; PREUSSLER, 2002).

Segundo Taborda (2012) o comportamento estrutural das camadas de base cimentadas pode ser dividido em quatro estados com as seguintes propriedades: intacto

(bem cimentado), trincamento por retração, trincamentos relacionados ao tráfego e comportamento equivalente ao material granular.

Na Figura 3 é mostrado o comportamento da vida de fadiga em camadas cimentadas, onde N_f é o número de repetições de carga para o início do trincamento e N_{ef} a vida de fadiga em camadas cimentadas na fase pós trincamento, chamada vida de fadiga efetiva. A fase pré trincamento, formada pelos estágios i e ii, possui valores de módulo de resiliência relativamente altos, cerca de 4000 MPA. No entanto, na fase pós-trincamento (fases 2 e 3) o módulo cai significativamente. Na fase 3, como resultado da do rompimento, o material cimentado se comporta como um material granular (TABORDA, 2012).

Figura 3: Estágios de degradação da camada cimentada



Fonte: Taborda, 2012

Segundo Roza (2018) é observado que a grande maioria dos materiais que formam a camada do pavimento utilizam materiais britados como constituinte, pelos critérios atuais de seleção. No entanto, a falta de produtos pétreos em algumas regiões leva a busca de solos locais que possuam a capacidade de suporte e propriedades geotécnicas que permitam resistir aos esforços provocados pelo tráfego. No caso das obras rodoviárias brasileiras, as jazidas de solos mais usadas são as de laterita, onde estas existem. Elas são usadas, pois esse solo apresenta de maneira geral comportamento satisfatório em ensaios tradicionais como o ISC. Porém, é preciso verificar as especificações da norma DNIT

098/2007 para atender aos critérios de faixas granulométricas contínuas, índice de plasticidade e Kr.

Com o novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), os ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente são usados como critérios de deformabilidade para a seleção de materiais tanto de base como de sub-base e reforço de subleito. Para os solos que não possuem bom desempenho mecânico como material de subleito, sub-base ou base, ou que possuem propriedades expansivas é fundamental a estabilização. E, como já mencionado nos tópicos anteriormente essa estabilização pode ser feita com cimento, cal, álcali-ativação ou outros materiais alternativos de cunho sustentável (DELGADO, 2016).

Para finalizar, a camada mais externa: o revestimento asfáltico é formado por um conjunto de agregados minerais e ligante asfáltico que possuem propriedades de impermeabilidade, flexibilidade, segurança (micro ou macro textura) e trincamento e que resista aos esforços do tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2022).

2.2.1 Carregamento de pavimentos

A estrutura de um pavimento asfáltico é submetida a um carregamento superficial distribuído em uma área circular, aproximadamente uma elipse e as duas dimensões irão depender do tipo de pneu, pressão de enchimento e da carga que a roda submete ao pavimento (FRANCO, 2007). Assim, no dimensionamento de pavimentos a aproximação da área ao círculo traz a equação para área de contato entre pneu-pavimento pela Equação 1.

$$A = \frac{P}{\rho} \quad (\text{Equação 1})$$

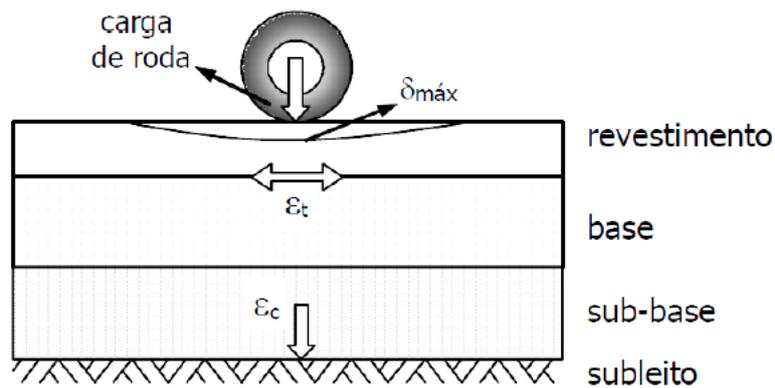
Onde: A é a área de contato entre o pneu-pavimento;

P é a carga da roda;

ρ é a pressão de enchimento do pneu.

A Figura 4 mostra o esquema de carregamento e tensões atuantes nos pavimentos, submetidos pelas rodas dos veículos. De acordo com Branco (2006) os esforços são transmitidos por ações verticais, que provém do peso na forma de pressão na superfície de contato, e as forças tangenciais são provenientes do rolamento do veículo ou também oriundas da derrapagem e travagem.

Figura 4: Distribuição do carregamento devido à passagem do veículo



Fonte: Branco, 2006.

No pavimento é possível observar que existem os carregamentos cíclicos, que de acordo com Medina e Motta (2015) causam danos intermitentes, ou seja, na fase carregamento o dano aumenta, enquanto na fase de descarregamento o dano mantém-se constante, desconsiderando o fenômeno de *healing* das trincas. Ou seja, cargas cíclicas geram falhas nos materiais para valores de tensão mais baixos do que aqueles obtidos na ruptura em ensaios estáticos. Segundo os autores ainda pode-se afirmar que os sistemas de pavimento também estão sujeitos ao carregamento dinâmico e cíclico, e aplicações repetitivas das cargas de tráfego podem provocar falha de fadiga no pavimento.

Existem diferentes tipos de comportamentos cíclicos dos solos que de acordo com Benahmed (2001) são:

- Quando os materiais são submetidos a processos de carregamento sob tensão controlada:
 - Catraca: as deformações crescem de maneira contínua, até o material alcançar a ruptura, seja por liquefação ou por mobilidade cíclica;
 - Acomodação: o comportamento tensão-deformação chega a ser estabilizado em um ciclo de histerese, sem produzir acúmulos de deformação nos ciclos posteriores, no entanto mantendo uma tendência de dissipação de energia;
 - Adaptação: o material poderá atingir um estado de adaptação, estabilizando seu comportamento tensão-deformação ao longo de um segmento de linha, correspondendo a uma tendência elástica sem dissipação.
- Quando os materiais são submetidos a processos de carregamento sob deformação controlada:
 - Rigidização do material: a amplitude de tensões aumenta entre ciclos;

- Amolecimento: a amplitude de tensões reduz com o aumento nos ciclos.
- Os carregamentos podem ser mudados, onde a tensão cíclica varia entre valores positivos e negativos, ou podem ser executados completamente em compressão ou em extensão.

Outra abordagem semelhante foi estudada por Werkmeister *et al.* (2005) para camadas em aplicações de pavimentação considerando solos parcialmente saturados. O autor observou quatro categorias para a resposta do solo quando submetido a níveis de carregamentos variados.

- Completamente elástica: neste caso o material apresentará comportamento puramente elástico;
- *Shakedown* elástico: o solo acumulará deformações até um certo valor, após o qual seu comportamento será completamente elástico;
- *Shakedown* plástico: haverá uma tendência de acúmulo de deformações até um determinado valor, a partir do qual o comportamento do material ocorrerá em um ciclo de histerese sem novos acúmulos para ciclos seguintes;
- Colapso incremental: nesta situação, o solo sempre irá acumular deformações.

Com a caracterização de toda a estrutura e dos materiais e as espessuras das camadas predefinidas, os módulos de resiliência, os coeficientes de Poisson e a composição do tráfego atuante a resposta do pavimento pode ser estimada de acordo com os cálculos das tensões, deformações e deslocamentos provocados na estrutura (FRANCO, 2007). A teoria da elasticidade é amplamente usada como instrumento para o cálculo dessas tensões, deformações e deslocamentos e os métodos usados consideram os materiais segundo dois comportamentos tensão-deformação distintos, sendo eles: comportamento elástico linear e comportamento elástico não linear (RIBAS, 2014).

Balbo (2007) defende a teoria de sistemas de camadas elásticas para o estudo mais completo e detalhado das estruturas de um pavimento, porque possibilita a determinação de estado de deformações e tensões em vários pontos das camadas e, assim, possibilita a aplicação dos modelos de degradação por fadiga ou deformação plástica dos materiais. Para isto Boussinesq desenvolveu em 1885 várias equações para o cálculo de tensões e deformações em um espaço semi-infinito, linear, elástico, homogêneo e isotrópicos

submetido a um carregamento pontual (BALBO, 2007; FRANCO, 2007; PAPAGIANNAKIS, MASAD, 2007).

Esses cálculos levam em consideração as tensões e deformações para uma determinada região e espaço de tempo infinitesimal, ou seja, ao se deslocar a roda do ponto inicial de aplicação da carga, as tensões e deformações relativas reduzem e anulam-se. O pavimento asfáltico recupera quase em sua totalidade a sua condição inicial, porém uma pequena fração da deformação não é recuperada por conta dos materiais que formam a estrutura do pavimento não serem perfeitamente elásticos (FERNANDES, 2016).

Nas camadas de base e sub-base as deformações plásticas (permanentes) acontecem devido a compactação do solo, deixando-o mais denso (ocorre mudança de volume), e das deformações cisalhantes repetidas, que fazem com que o pavimento fique com característica de depressão na superfície, no qual o volume é suprido pelo sollevamento de outra parte do pavimento (SINDETRANS, 2018).

Com a sucessiva passagem das rodas dos veículos, os efeitos mostrados anteriormente vão se repetindo, dessa maneira a deformação sucessiva pode levar a uma ruptura do pavimento ao final de determinado número de passagens. Este fenômeno é conhecido por fadiga dos materiais, ou seja, cada material é correspondente a uma deformação para determinado carregamento até alcançar a ruína do material por uma repetição em excesso deste carregamento (MEDINA, MOTTA, 2015). Já o módulo de resiliência das camadas asfálticas deve ser obtido por meio de ensaios por compressão direta e ele é considerado como elástico linear. Os parâmetros de análise são: critério de fadiga na camada asfáltica, deformação permanente total das camadas granulares, resultado da soma da deformação permanente de cada camada e, deformação permanente no subleito (FRANCO; MOTTA, 2020).

2.2.1.1 Ciclos de gelo e degelo em pavimentos

O comportamento estrutural do pavimento depende da espessura de cada uma de suas camadas, da rigidez dessas e do subleito, assim como da interação entre as diferentes camadas existentes na composição do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Ao utilizar solos estabilizados quimicamente como sub-base ou base de um pavimento é preciso observar os efeitos gerados pelas ações do tráfego e do clima, sobretudo a influência da água nessa camada. Ao considerar as condições severas de gelo e degelo as quais o pavimento é submetido, é fundamental analisar a durabilidade da camada de solo estabilizado a partir de ensaios que simulem essas condições.

A estabilização dos solos com materiais pozolânicos tipicamente eleva a resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, resistência à tração e módulo de elasticidade (rigidez do solo) e essas reações podem continuar por meses, melhorando de maneira contínua essas propriedades. A resistência ao gelo/degelo e à umidade também são aumentados pela estabilização química (NICHOLSON, 2015).

As condições a que o material estabilizado é submetido em laboratório durante ensaios de durabilidade, tem por objetivo final simular as condições ambientais de campo. Por isso, é importante que as técnicas de durabilidade considerem parâmetros como a ocorrência de chuvas, temperatura local, umidade do ar e temperatura das camadas do pavimento. Esse último fator é importante tendo em vista que nos processos de estabilização dos solos em que intervêm reações químicas, a velocidade de ganho de resistência é função da temperatura (ADHIKARI, 2017).

Dessa forma, a durabilidade está relacionada com a permanência de estabilizantes químicos e com a habilidade das partículas de solo e estabilizantes permanecerem juntos por um longo período de tempo. Assim, a avaliação da durabilidade, em laboratório, é feita normalmente a partir de ensaios de molhagem e secagem e de gelo e degelo, com o objetivo de simular as condições do material em campo, que está exposto ao intemperismo natural (ALMEIDA *et al.*, 2015; CONSOLI *et al.*, 2019).

Muitas técnicas de avaliação de materiais estabilizados têm sido estudadas. Entre essas podem-se destacar: perda de peso por abrasão, absorção de água, velocidade de propagação de pulsos, variação de volume e medidas de resistências. Os métodos mais comuns de laboratório são perda de peso e/ou perda de resistência para corpos de provas submetidos a ciclos de molhagem e secagem ou gelo e degelo (CRISTELO *et al.*, 2011).

O critério de avaliação da durabilidade por perda de resistência não possui especificações fixas. As indicações que existem são para corpos de provas submetidos aos ciclos de gelo e degelo. As misturas são consideradas como satisfatórias quando possuem uma razão de resistência de ao menos 80%. Essa razão de resistência é o quociente expresso em percentagem da resistência de corpos de prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem, gelo e degelo ou de vácuo-saturação, pela resistência de corpos de provas curados normalmente (NICHOLSON, 2015).

Hoover *et al.* (1958) desenvolveram o método *Iowa*, que avalia a durabilidade de materiais estabilizados quimicamente a partir da relação entre a resistência dos corpos de prova submetidos a ciclos (umedecimento e secagem ou gelo e degelo) e daqueles que

permanecem durante todo o tempo em cura úmida. O critério usado para aceitação quanto à durabilidade, é que o quociente das resistências deve ser no mínimo de 80%.

Núñez (1991) ao utilizar o método Iowa para analisar a durabilidade de misturas solo-cal, observou que com 5% de cal, o quociente entre as resistências foi igual a 89%, de maneira que a exposição prolongada à água e ao ar provocou efeitos pouco nocivos. Ao adicionar 9% de cal ao solo, foi verificado um aumento do quociente para 108%, de maneira que os ciclos de gelo e degelo provocaram uma elevação na resistência da mistura.

Thomé (1999) fez ensaios de durabilidade num solo residual de arenito Botucatu estabilizados com resíduos industriais de cinzas pesada e cal de carbureto. O ensaio de durabilidade usado foi uma adaptação do método Iowa. O autor usou corpos de provas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, os quais foram moldados para um tempo de cura e depois foram submetidos a 12 ciclos de gelo e degelo, cada ciclo consistia em um total de 48 horas, 24 de gelo e 24 de degelo. Depois da aplicação dos ciclos os corpos de provas foram imersos por 24 horas e rompidos à compressão simples. As resistências foram comparadas com aqueles que não foram submetidos aos ciclos, determinando-se o valor do coeficiente de durabilidade. Os resultados mostraram que os solos estabilizados em estudo aumentaram a resistência quando comparados ao solo sem a adição dos estabilizantes.

Lovato (2004) submeteu corpos de provas a ciclos de secagem e molhagem para verificar a durabilidade de um solo estabilizado com material pozolânico. O autor determinou a influência do teor e tipo de cal e do tempo de cura, nas resistências à compressão simples e no módulo de resiliência. Para isso foram usados teor de 3, 4 e 5% de cal e tempos de cura de até 168 dias. A durabilidade da mistura foi feita com seis ciclos de molhagem e secagem, onde metade dos corpos de provas iniciaram o ciclo pelo processo de molhagem e a outra metade pela secagem. Nesse ensaio foram encontrados resultados satisfatórios devido as amostras terem alcançado resistência de no mínimo 80%. O autor ainda concluiu que as misturas solo-cal estudadas apresentaram comportamento aceitável para uso em camadas de base e/ou sub-base de pavimentos.

Marcon (2007) estudou diferentes misturas de solos e estabilizantes e aplicou ciclos de gelo e degelo para determinar a durabilidade dessas misturas. Nessa pesquisa o solo analisado foi uma areia de duna costeira e foram adotadas três misturas: a primeira foi formada por 83% de areia de duna, 13% de cinza volante e 4% de cal; a segunda mistura era constituída pelas mesmas quantidades da primeira mistura em relação à cal,

cinza volante e areia de duna, porém foi adicionado 1% de cimento Portland de alta resistência inicial; e a terceira mistura foi formada por 53% de areia de duna, 30% de brita, 4% de cal, 13% de cinza volante e mais 1% cimento Portland de alta resistência inicial. O autor encontrou resultados satisfatórios para as misturas analisadas, ou seja, resistência maior que 80%, com exceção para a mistura 1. Essa mistura já apresentava a menor resistência quando rompida aos 14 dias, sem ser submetida a ciclos de durabilidade. Foi observado também que as misturas que continham cimento apresentaram resultados superiores de resistência. Vale salientar que a adição de agregado graúdo também é uma variável a ser levada em consideração nas misturas.

Cruz e Jalali (2010) analisaram os efeitos do uso de cimento em solos residuais graníticos com adição de cimento e diferentes ativadores alcalinos, sob o ponto de vista da capacidade de carga e da durabilidade. Os autores realizaram ensaios de compressão simples e avaliaram a absorção de água por capilaridade e a perda da resistência à compressão por saturação e devido a ciclos de molhagem e secagem e ciclos de gelo e degelo. Para os ciclos de gelo e degelo os corpos de provas com 7 dias de curam foram sujeitos a ciclos de congelamento, a uma temperatura negativa de 23°C, durante 24 horas, e de degelo por 23 horas em uma temperatura de 21°C. Todo esse procedimento foi feito durante 12 ciclos, sendo a resistência à compressão simples registrada as médias dos valores obtidos em 4 corpos de provas.

Na avaliação da durabilidade os autores verificaram que é significativo o melhor desempenho das misturas de solos estabilizados com cimento, pois as composições de solo não estabilizado não sofreram uma desagregação completa. Na análise da perda de resistência após os ciclos de gelo-degelo a composição de solo-cimento com bicarbonato de sódio demonstrou uma perda maior em comparação as outras.

Nas misturas de solo-cal analisadas por Behak (2013) a durabilidade oscilou entre 56 e 78%, sendo que o quociente entre as resistências aumentou com a acréscimo da quantidade de cal, apresentando uma variação de 22% entre as misturas com 3 e 9% de cal. Estudos de durabilidade feitos por Puppala (2016) com argilas expansivas estabilizadas com cal e cimento mostraram a presença de montmorilonita diminui a efetividade da estabilização. As análises incluíram solos com quantidades de montmorilonitas entre 20 e 70% na fração argila de maneira que o autor verificou que o acréscimo dessa quantidade ocorria uma redução da resistência retida e aumento da mudança na deformação volumétrica. Essa conclusão foi alcançada após ciclos de gelo e degelo, verificando que os solos com menor quantidade desse material sobreviveram aos

21 ciclos propostos pelo autor. E, aqueles solos que possuíam maiores quantidades de montmorilonitas resistiram a quantidades menores de ciclos de gelo e degelo. Nas amostras tratadas com cimento em teores que variavam de 0 a 7% foi possível observar que os corpos de prova contendo 7% de cimento aumentaram a resistência com o número de ciclos de gelo e degelo em comparação para misturas tratadas com 4 e 5% de cimento.

Bittar Marín *et al.* (2019) estudou misturas de solos sulfatados estabilizados com cinza volante e cal para verificar a viabilidade da construção de pavimentos com essas misturas. Em amostras de solo estabilizado com cal, após 12 ciclos de gelo e degelo, mediante microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi observado um aumento significativo na quantidade e o tamanho dos minerais etringita, deixando em evidência o efeito da hidratação e desidratação. Em amostras de solos estabilizados com cinza e cal a formação e o crescimento de etringita encontrou-se reduzida em relação a amostras de solo-cal mediante análises com MEV feitas em amostras após 130 dias de moldagem. Amostras moldadas e submetidas a 12 ciclos de gelo e degelo evidenciaram também maior crescimento de minerais etringita, porém em menor proporção do que em amostras de solo-cal. De maneira geral, após o processo de gelo e degelo foi visto que as misturas com cinza volante e cal melhoram consideravelmente a resistência, a durabilidade e a estabilidade volumétrica de solos sulfatados. O uso de cinzas volantes e densidade foram os fatores mais significativos que afetaram a resposta da durabilidade.

Araújo *et al.* (2023) avaliaram o comportamento mecânico e microestrutural de um solo argiloso estabilizado por um ligante ativado composto por dois resíduos (cinza do bagaço de cana de açúcar e cal da casca de ovo hidratada) e hidróxido de sódio; e outro solo estabilizado com cimento. Entre os ensaios realizados foi feito o teste de durabilidade que para isso foram feitos ciclos de gelo e degelo seguindo o padrão da ASTM D 559. Primeiramente, as amostras foram curadas por 7 dias em temperatura ambiente com o teor ótimo de umidade. A perda de massa foi medida em cada um dos 12 ciclos. Cada ciclo completo foi de 48 horas e compreendeu em três etapas: 5 horas imersão do corpo de prova em água; 42 horas de secagem em estufa a uma temperatura de $71^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$; escovagem da amostra seca. Com os ensaios feitos além do ensaio de durabilidade foi visto que o solo estabilizado com os dois resíduos tem maior variação volumétrica no ciclo final em comparação com a amostra de cimento Portland correspondente. Em relação às mudanças físicas foi observado semelhança no último ciclo, ou seja, rachaduras, fissuras e perda de material. Assim os autores puderam concluir que o novo

aglutinante atende aos limites mínimos de resistência padronizados para o solo estabilizado e é uma opção sustentável para obras de engenharia.

2.3 Considerações Finais

A análise das pesquisas permitiu perceber que existem avanços na engenharia da pavimentação, com o desenvolvimento de novos materiais e novas técnicas para melhorar a qualidade dos pavimentos. E nesse cenário ocorreram avanços também no uso de solos estabilizados quimicamente com uso da ativação alcalina. Além disso, cada vez mais aumenta a busca por materiais alternativos que possam ser utilizados como estabilizantes de solos, que proporcionem propriedades mecânicas adequadas assim como tenha vantagens ambientais e econômicas.

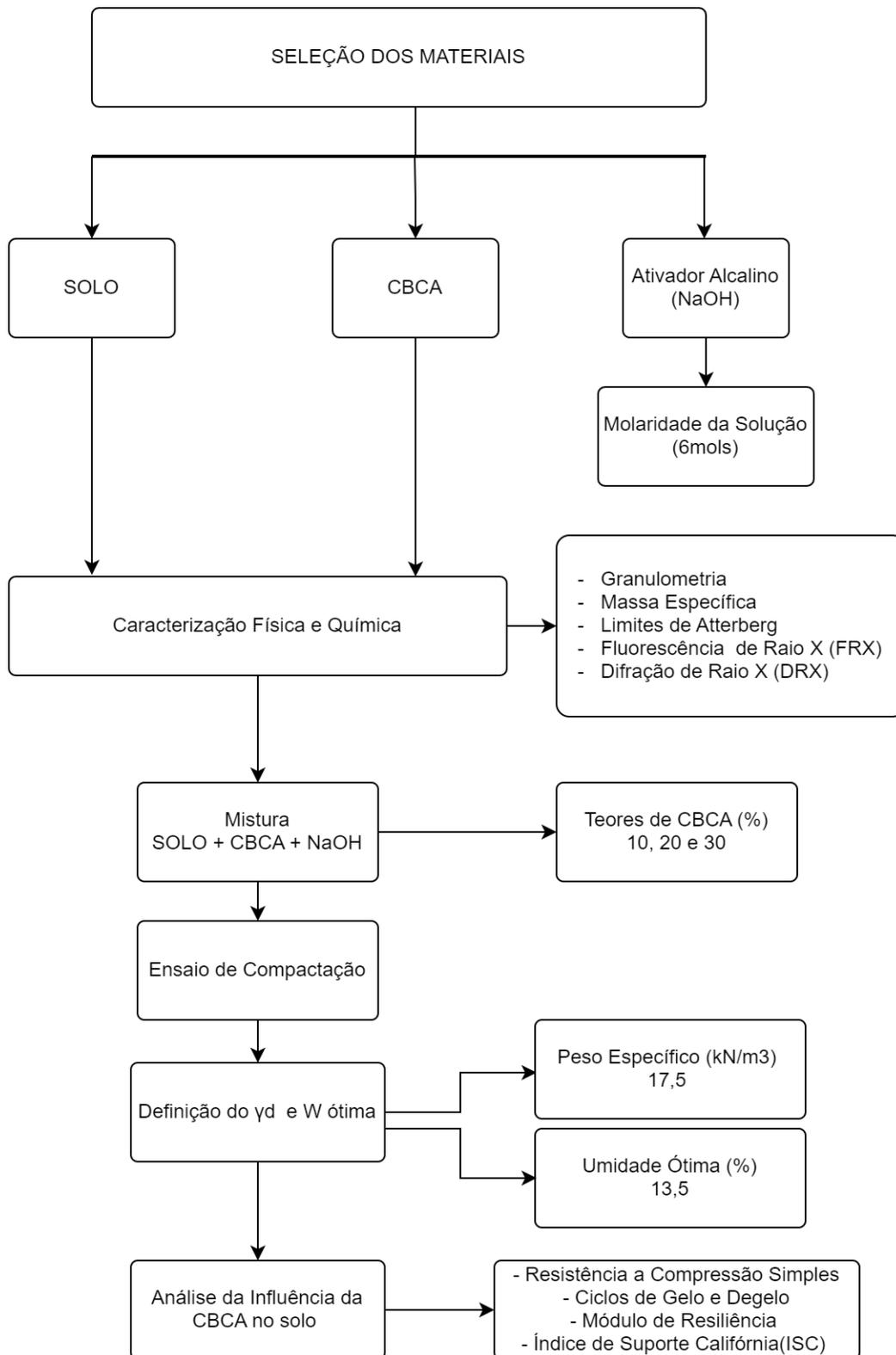
Durante o levantamento realizado, foi possível observar que a cinza do bagaço da cana de açúcar é um desses materiais promissores que podem ser usados para a estabilização dos solos e que quando usada com algum ativador alcalino produz um produto que atende aos requisitos necessários para que este material seja usado em base de pavimento. Além disso, por ser um rejeito o uso desse material alternativo pode ser vantajoso do ponto de vista econômico e ambiental, já que poderá ser usado em substituição ao cimento e a cal, por exemplo, para a estabilização química do solo.

Entretanto, nesse capítulo também ficou evidente que esse processo ainda demanda análises mais aprofundadas sobretudo em relação à sua recuperação mecânica frente ao processo de gelo e degelo que o pavimento está sujeito durante a sua vida útil.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. Para desenvolvimento deste estudo utilizou-se: solo (areia), cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) e solução ativadora (água destilada + hidróxido de sódio-NaOH). As metodologias empregadas são apresentadas nesta seção, bem como as normas e métodos utilizados na condução dos ensaios de caracterização física, química e mecânica dos materiais utilizados.

Em síntese a metodologia deste trabalho consistiu na estabilização de um solo arenoso com adições de CBCA e ativador alcalino (NaOH) para fins de pavimentação. O solo estabilizado foi analisado com o mesmo peso específico seco para três diferentes teores de CBCA e a solução ativadora na mesma molaridade (6 mols), onde os corpos de prova ensaiados foram compactados na energia de Proctor modificada e na umidade ótima das misturas. O solo foi avaliado por meio dos ensaios de resistência à compressão simples, ciclos de gelo e degelo, módulo de resiliência e índice de suporte Califórnia (ISC). A metodologia da presente pesquisa foi baseada no fluxograma apresentado na Figura 5.

Figura 5: Fluxograma da pesquisa

Fonte: Autoria Própria (2023)

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para desenvolvimento desta pesquisa foram: água destilada, hidróxido de sódio, cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) e solo.

3.1.1 Água

A água é considerada um solvente universal e é utilizada como reagente na maioria dos testes laboratoriais, sendo assim, deve seguir um padrão rigoroso de controle de qualidade. Os trabalhos que envolvem análises químicas, como a preparação de soluções demandam consideráveis quantidades de água. No entanto, a água natural contém sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloreto, ferro, carbonato e sulfato, além de gases dissolvidos (MESQUITA, 2013). Esses constituintes presentes na mesma podem causar alguma reação e alterar os resultados causando eventuais erros e falhas mecânicas em equipamentos analíticos (MENDES *et al.* 2011). Desta forma, a água utilizada neste trabalho foi a água destilada.

3.1.2 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio (NaOH) foi o ativador alcalino utilizado nesta pesquisa. Este é fornecido em pérolas de pureza analítica (P.A.) 97%. Esse composto se apresenta como um sólido, de coloração esbranquiçada, cristalino, altamente tóxico e corrosivo. A alta solubilidade em água é uma das suas características, sendo uma dissolução exotérmica, ou seja, libera energia na forma de calor. As soluções foram preparadas mediante a solubilização de uma massa pré-definida de NaOH em água destilada.

A justificativa da escolha do hidróxido de sódio como ativador alcalino ocorreu por meio de estudos da literatura atual voltados ao processo de ativação alcalina (LARROSA *et al.*, 2023; BRUSCHI *et al.*, 2022; SANTOS *et al.*, 2022; ALAM; DAS; RAO, 2019; KUA *et al.*, 2016; LI *i*, 2019; MORSY *et al.*, 2014; SUKMAK; HORPIBULSUK; SHEN, 2013a). Os autores mencionados concordam com o menor custo financeiro do produto comparado aos demais, facilidade de obtenção e menor impacto ambiental do hidróxido de sódio (NaOH), quando comparado a outros ativadores como o silicato de sódio (Na₂SiO₃), silicato de potássio (K₂SiO₃) e hidróxido de potássio (KOH), este último tendo a compra controlada pelo exército. Além disto, o hidróxido de sódio demonstrou a capacidade de potencializar os valores de resistência mecânica do produto final do processo de álcali-ativação (CAICEDO *et al.*, 2023; FERREIRA *et al.*, 2023; BRUSCHI *et al.*, 2022; MARTINATO, 2021; SHEKHAWAT; SHARMA; SINGH, 2019; HOY *et al.*, 2016; PHUMMIPHAN *et al.*, 2016; GUO; SHI; DICK, 2010).

3.1.3 Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA)

A cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA), apresentada na Figura 6, utilizada neste estudo foi coletada em uma indústria sucroalcooleira de pequeno porte, localizada na Fazenda Floresta, BR 230, KM 134, zona rural, distrito de Galante, Município de Campina Grande-PB. A indústria utiliza o bagaço da cana-de-açúcar, resíduo da extração de melado, como combustível para a caldeira, gerando um rejeito desse processo, que é a CBCA. Após a coleta, a CBCA foi acondicionada em sacos plásticos e armazenada em laboratório, esta foi utilizada in natura. Para os fins desta pesquisa, todo o material foi passado na peneira de malha #200 ($d < 0,075\text{mm}$) de modo a aumentar sua superfície específica e conseqüentemente sua reatividade.

Figura 6: Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA)



Fonte: Autoria Própria (2023)

3.1.3.1 Propriedades Físicas da CBCA

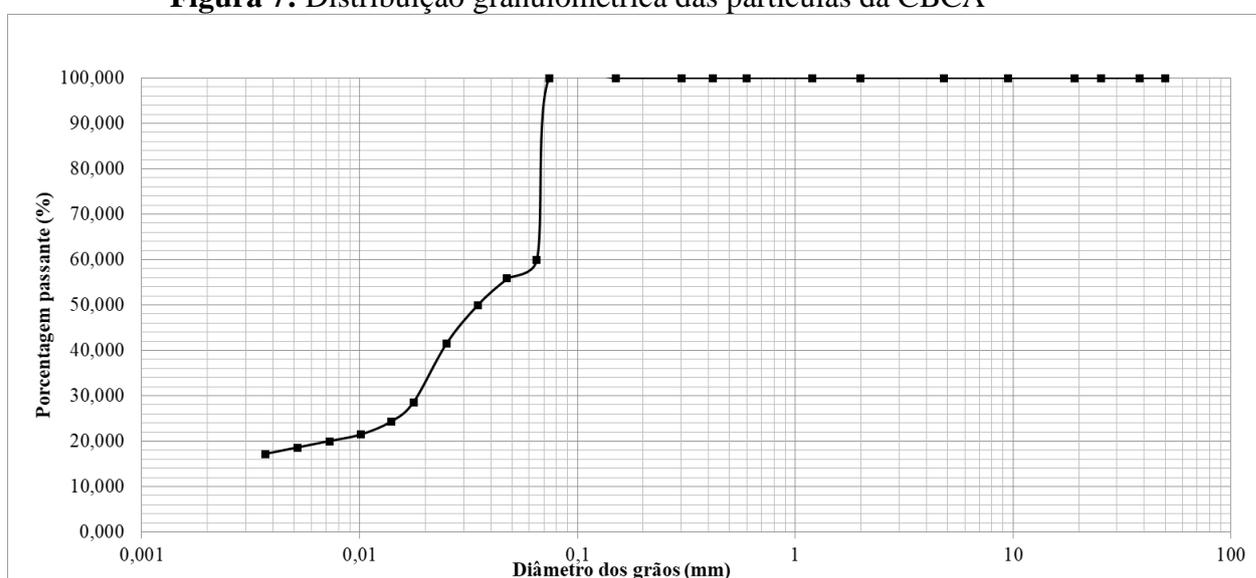
A cinza do bagaço da cana-de-açúcar utilizada nesta pesquisa foi caracterizada por meio dos ensaios citados na Tabela 1.

Tabela 1: Ensaios de caracterização da CBCA

| Ensaio | Método |
|------------------------------------|--|
| Análise granulométrica | ABNT NBR 7181/2018a |
| Limites de Atterberg | ABNT NBR 6459/2017 ABNT NBR 7180/2016 |
| Fluorescência de Raios X | ABNT NBR 16137/2016 |
| Difração de Raios X | - |
| Ensaio de Compactação | ABNT NBR 7182/2016 |
| Massa específica dos grãos do solo | ABNT NBR 6458/2017 |

Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Figura 7 é apresentada a curva granulométrica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) por sedimentação e na Tabela 2 são apresentadas as propriedades físicas da CBCA.

Figura 7: Distribuição granulométrica das partículas da CBCA

Fonte: Autoria Própria (2023)

Tabela 2: Propriedades físicas da CBCA

| Propriedades | Valores | Norma Técnica |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------|
| Limite de liquidez | NL | ABNT NBR 6459/2017 |
| Limite de plasticidade | - | ABNT NBR 7180/2016 |
| Índice de plasticidade | NP* | |
| Massa específica real dos grãos | 2,39 g/cm ³ | ABNT NBR 6458/2017 |
| Areia grossa (%) $0,6 \leq d < 2$ mm | 0,00 | |
| Areia média (%) $0,2 \leq d < 0,6$ mm | 0,00 | |
| Areia fina (%) $0,06 \leq d < 0,2$ mm | 0,00 | ABNT NBR 7181/2018a |
| Silte (%) $0,002 \leq d < 0,06$ mm | 78,57 | |
| Argila (%) $- d < 0,002$ mm | 21,43 | |
| Classificação | ML* | ASTM D 2487/ 2017 |

NP* – Não Plástica; ML – Silte de baixa compressibilidade

Fonte: Autoria Própria (2023)

Silva (2022), Arkask et al.(2022), Yadav et al.(2022) em estudos realizados utilizando a CBCA, obtiveram resultados de massa específica da ordem de 2,5 g/cm³, 2,48 g/cm³ e 2,26 g/cm³, respectivamente. A variabilidade na massa específica da CBCA justifica-se por tratar-se de um resíduo utilizado em diferentes granulometrias.

De acordo com o índice de plasticidade, a CBCA foi classificada como uma cinza não plástica (NP), propriedade comum as cinzas resultantes do processo de queima de matéria orgânica como bagaços e cascas (SILVA, 2022; SILVANI et al, 2022; SHARMA, PHANIKUMAR e VARAPRASADA, 2008; DANG; HADI; Ni, 2021). Desta forma, tomando como base o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), a CBCA é classificada como um silte de baixa compressibilidade (ML).

3.1.3.2 Análise Química da CBCA

3.1.3.2.1 Difração de Raio-X e Espectrometria de Fluorescência de Raio-X

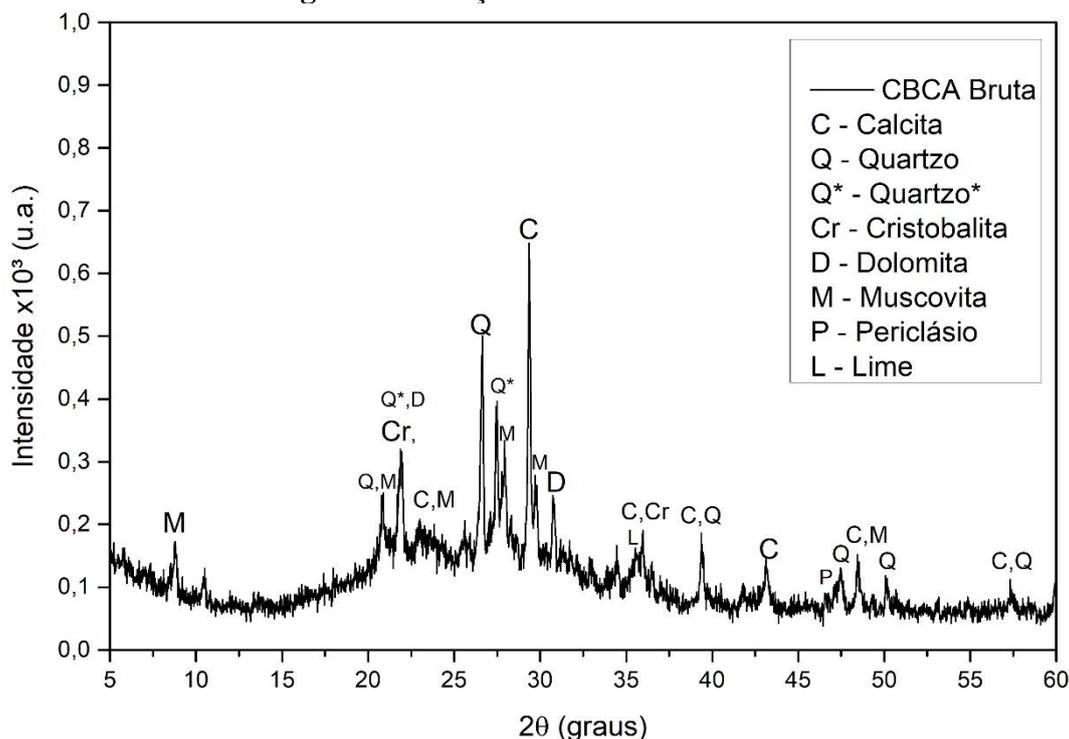
A Tabela 3 apresenta os principais elementos químicos encontrados na análise da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) por meio da espectrometria de Fluorescência de Raio-X (FRX). O presente ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 16137/2016 com atmosfera a vácuo e cátodos de cobre.

Tabela 3: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X da CBCA

| Elemento Químico | SiO ₂ | MgO | K ₂ O | Al ₂ O ₃ | CaO | P ₂ O ₅ | SO ₃ | Fe ₂ O ₃ | Outros |
|------------------|------------------|-------|------------------|--------------------------------|------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------|
| Fração (%) | 57,3 | 11,49 | 6,88 | 8,55 | 7,54 | 7,54 | 0,99 | 2,23 | 0,66 |

Fonte: Autorial Própria (2023)

Os resultados obtidos por meio da difratometria de Raio-X (DRX) são apresentados na Figura 8. O DRX foi executado com amplitude de 5° a 60° com uma velocidade de varredura de 2° por minuto em equipamento com cátodo de cobre.

Figura 8: Difração dos Raio-X da CBCA

Fonte: Autoria Própria (2023)

O resultado da análise química revelou que a CBCA é composta majoritariamente pelos altos teores de sílica (SiO_2) em sua composição e, também de óxidos de magnésio (MgO), potássio (K_2O), alumínio (Al_2O_3) e cálcio (CaO). A presença desses materiais é confirmada pelos picos de Quartzo, Dolomita, Muscovita, e Calcita, encontrados na DRX.

A composição química da CBCA apresenta teores de sílica amorfa em torno ou maiores que 60% (BAHURUDEEN et al., 2015; CORDEIRO et al., 2009; CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009; FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011; POGGIALI et al., 2012). Essa característica pode possibilitar o emprego desse rejeito como um material pozolânico (POGGIALI et al., 2012).

Diferentes autores comprovaram a viabilidade da CBCA como um agente estabilizador para diferentes tipos de solo (HASAN et al., 2016; MASUED, 2017; SHIMOLA, 2018; TALIB; NORIYUKI, 2017). De forma geral, os autores evidenciaram que a estabilização com o uso da CBCA não apenas melhora a resistência, como também facilita os processos inerentes à tramites ambientais por meio da redução de resíduos da indústria sucroalcooleira (BRUSCHI et al., 2022).

3.1.4 Solo

O solo (Figura 9) utilizado nesta pesquisa foi uma areia de natureza quartzosa e origem fluvial sendo passada na peneira #0,6 mm, visando eliminar sujeiras, eventuais materiais orgânicos e simular uma areia uniforme, como por exemplo: as areias de Natal e Osório. A areia quartzosa é formada, principalmente por grãos de quartzo com arredondamento e esfericidade variados, podendo conter diversas proporções de outros minerais, óxidos e silicatos que lhe confere uma variação na sua coloração (rosa, ocre, cinza, vermelha e branca).

Figura 9: Solo



Fonte: Autoria Própria (2023)

A areia industrial ou areia quartzosa é uma substância natural, coesiva e não plástica, oriunda da desagregação de rochas, com sua partícula variando de tamanho com valores entre 60 e 2000 μm e com alto teor de sílica ($\text{SiO}_2 > 90\%$), na forma de quartzo. Na composição das areias quanto maior o teor de SiO_2 , maior será sua pureza e, deste modo, maior seu valor agregado (SOUZA et al 2014). O que define a sua aplicação, são o tamanho das partículas e a pureza (composição química). Posteriormente a escolha do solo, utilizado neste estudo, este foi submetido aos ensaios de caracterização física e química, conforme, demonstrado no fluxograma da pesquisa (Figura 5).

3.1.4.1 Propriedades Físicas do Solo

O solo (areia) utilizado nesta pesquisa foi caracterizado por meio dos ensaios citados na Tabela 4.

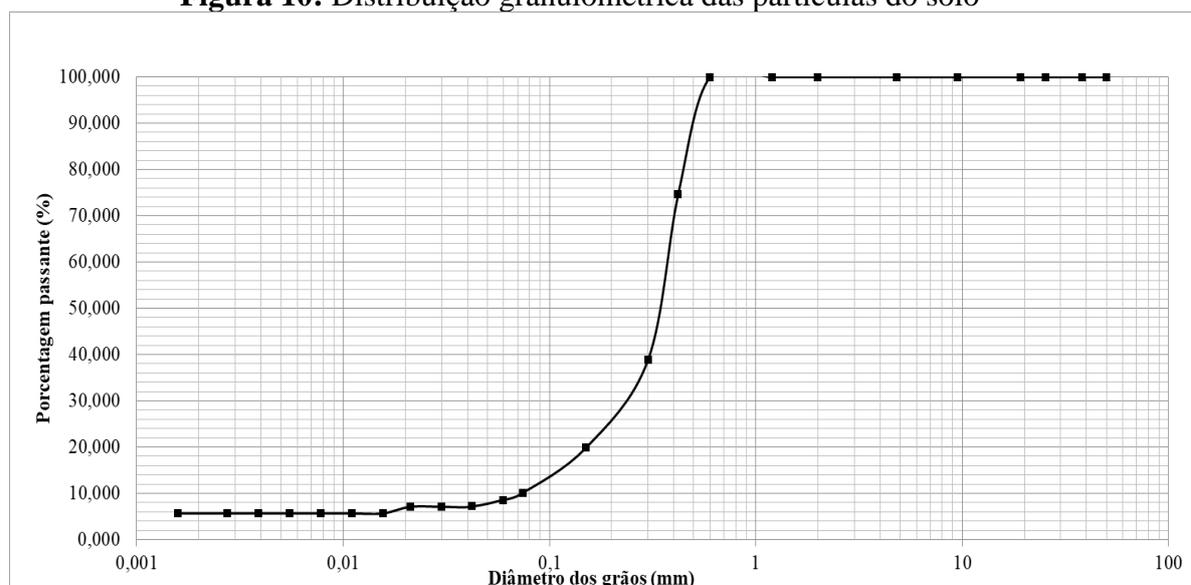
Tabela 4: Ensaios de caracterização do Solo

| Ensaio | Método |
|------------------------------------|--|
| Análise granulométrica | ABNT NBR 7181/2018a |
| Limites de Atterberg | ABNT NBR 6459/2017 ABNT NBR 7180/2016 |
| Fluorescência de Raios X | ABNT NBR 16137/2016 |
| Difração de Raios X | - |
| Ensaio de Compactação | ABNT NBR 7182/2016 |
| Massa específica dos grãos do solo | ABNT NBR 6458/2017 |

Fonte: Autoria Própria (2023)

Na Figura 10 é apresentada a curva granulométrica do solo por sedimentação e peneiramento e na Tabela 5 são apresentadas as propriedades físicas deste.

Figura 10: Distribuição granulométrica das partículas do solo



Fonte: Autoria Própria (2023)

Tabela 5: Propriedades Físicas do Solo

| Propriedades | Valores | Norma Técnica |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------|
| Limite de liquidez | NL | ABNT NBR 6459/2017 |
| Limite de plasticidade | - | ABNT NBR 7180/2016 |
| Índice de plasticidade | NP* | |
| Massa específica real dos grãos | 2,52 g/cm ³ | ABNT NBR 6458/2017 |
| Areia grossa (%) $0,6 \leq d < 2$ mm | 0,00 | |
| Areia média (%) $0,2 \leq d < 0,6$ mm | 25,28 | |
| Areia fina (%) $0,06 \leq d < 0,2$ mm | 64,60 | ABNT NBR 7181/2018a |
| Silte (%) $0,002 \leq d < 0,06$ mm | 4,41 | |
| Argila (%) $d < 0,002$ mm | 5,71 | |

| | | |
|------------------------------|-------|-------------------|
| D10 | 0,074 | |
| D60 | 0,38 | |
| Coefficiente de Uniformidade | 5,13 | |
| Coefficiente de Curvatura | 1,88 | |
| Classificação SUCS | SP-SM | ASTM D 2487/ 2017 |
| Classificação AASHTO | A3 | |

NP* – Não Plástico, SP-SM – Areia mal graduada, A3 – Areia fina
 Fonte: Autoria Própria (2023)

A massa específica dos grãos de solo, apresentada na Tabela 5, obtida para o solo natural apresentou um valor da ordem de 2,52 g/cm³, que segundo Schjønning; *et al.*, (2012) e Pinto (2006) é um valor considerado típico para solos arenosos ricos em quartzo.

Em termos de classificação dos solos pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), obteve-se, como apresentado na Tabela 5, que o solo natural é uma areia mal graduada (SP-SM), devido a este solo, além de ter uma granulometria predominante na fração areia, como também por este não apresentar plasticidade. E pelo sistema rodoviário (HRB/AASHTO) é classificado como A3 uma areia fina.

3.1.4.2 Análise Química do Solo

3.1.4.2.1 Difração de Raio-X e Espectrometria de Fluorescência de Raio-X

A Tabela 6 apresenta os principais elementos químicos encontrados na análise do solo por meio da espectrometria de Fluorescência de Raio-X (FRX). Os resultados obtidos por meio da difratometria de Raio-X (DRX) são apresentados na Figura 11.

Tabela 6: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X do Solo

| Elemento Químico | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | MgO | Fe ₂ O ₃ | CaO | Outros |
|------------------|------------------|--------------------------------|------------------|------|--------------------------------|------|--------|
| Fração (%) | 71,21 | 20,97 | 2,42 | 1,73 | 1,56 | 1,48 | 0,60 |

Fonte: Autoria Própria (2023)

- ✓ Processamento dos dados.

3.2.1. Coleta da CBCA

A coleta da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na indústria (Figura 12), foi realizada de uma única vez, buscando minimizar os efeitos das variáveis temporais, que de alguma forma pudessem interferir na qualidade do material, e em seguida, foi transportado para o Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), onde foi devidamente, armazenado e usado no desenvolvimento da presente pesquisa.

Figura 12: Cinza do bagaço da cana de açúcar no fundo da caldeira

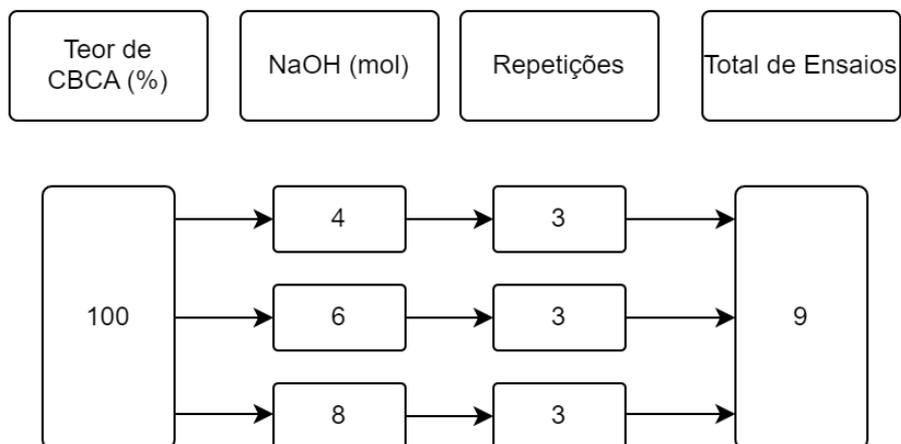


Fonte: Silva (2022)

3.2.2 Definição da Molaridade da Solução Ativadora (NaOH)

Inicialmente foram realizados ensaios de compressão simples (Figura 14), em corpos de prova do tipo A com altura de 100mm e diâmetro de 50 mm, curados por 07 dias, moldados estaticamente por meio de molde e de prensa (Figura 16), sendo compactado em 3 camadas com escarificação entre estas com o teor de 100% de CBCA para três molaridades de NaOH (4mol, 6mol e 8mol), com o objetivo de escolher a melhor molaridade a ser trabalhada. Esses valores foram predefinidos com base em pesquisas da literatura com finalidade semelhante (CAICEDO, 2020; MARTINATTO, 2021). Posteriormente, a partir dos testes realizados com o material em laboratório, definiu-se a molaridade da solução a ser utilizada na pesquisa. O programa experimental dos ensaios é apresentado na Figura 13. Ressalta-se que, os ensaios foram feitos em triplicata. O equipamento utilizado na ruptura dos corpos de prova foi uma prensa hidráulica *Shimadzu* com velocidade de carregamento de 1% por minuto.

Figura 13: Programa experimental dos ensaios de resistência à compressão simples para diferentes molaridades da solução de NaOH



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 14: Etapas do ensaio de compressão simples



Fonte: Autoria Própria (2023)

3.2.3 Planejamento Experimental

A Tabela 7 apresenta as variáveis controláveis do programa experimental. Os teores utilizados de CBCA foram predefinidos com base em pesquisas da literatura com finalidade semelhante (FERNANDES FILHO, 2012; SANTOS, 2018; MORAIS FILHO, 2019). Posteriormente, a partir de testes realizados com o material em laboratório, por meio, do ensaio mecânico de compactação da mistura com solo e CBCA, definiram-se 3 pontos de análise equidistantes (10%; 20% e 30%) de CBCA a serem usados na pesquisa.

Em seguida, baseando-se na curva de saturação do solo (Figura 17) e compactação do ensaio de Proctor com energia modificada, mostrada no item 3.2.7, Figura 18 e Tabela 10, foi definido o peso específico a ser trabalhado, como também a umidade ótima das misturas, as quais foram selecionadas, visando a exequibilidade dos corpos de prova com os diferentes teores de CBCA.

Para os ensaios de compressão simples, ciclos de gelo e degelo e módulo de resiliência, as variáveis controláveis estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Variáveis controláveis

| Variáveis | Unidade | Níveis |
|--------------|---------|-------------|
| Teor de CBCA | % | 10, 20 e 30 |

Fonte: Autoria Própria (2023)

A Tabela 8 apresenta as variáveis fixadas neste estudo. A umidade foi definida com base na curva de compactação.

Tabela 8: Variáveis fixadas

| Variáveis | Unidade | Níveis |
|---|-------------------|---|
| Tipo de Aditivo | - | Cinza do Bagaço de cana-de-açúcar |
| Tipo de solo | - | Areia |
| Solução ativadora (NaOH) | mol | 6 |
| Tempo de cura para ensaio de compressão simples, gelo e degelo, módulo de resiliência e ISC | dias | 28 |
| Peso específico seco aparente | kN/m ³ | 1 nível com base nas curvas Proctor modificada das misturas |
| Umidade | % | Baseada na curva Proctor modificada. |

Fonte: Autoria Própria (2023)

A Tabela 9 apresenta as variáveis de ruído e medidas mitigadoras empregadas. As variáveis de ruído não são controláveis. Para minimizar os efeitos destas foram aplicadas medidas mitigadoras.

Tabela 9: Variáveis de ruído

| Variáveis | Medidas de Controle |
|---------------------------------|---|
| Equipamento e operador | Utilização de único equipamento com único operador |
| Homogeneidade do resíduo (CBCA) | Uso de amostra única, colhida de uma única vez |
| Solução ativadora (NaOH) | Dissolução do NaOH em água destilada, horas antes da realização dos ensaios, solução realizada por um único operador |
| Homogeneidade da mistura | Mistura de CBCA com areia quartzosa passante na peneira #0,6 mm. |
| Homogeneidade da umidade. | A areia e a CBCA eram misturadas, logo após se adicionava a solução ativadora e em seguida era realizada a moldagem dos corpos de prova, e a mistura realizada por um único operador. |

Fonte: Autoria Própria (2023)

As variáveis resposta obtidas com os ensaios são: resistência à compressão simples, resistência do material submetido aos ciclos de gelo e degelo, módulo de resiliência e ISC. Essas variáveis são função das variáveis fixadas e controláveis. Por meio de testes foi possível verificar a influência das variáveis controláveis na variável resposta. Com o intuito de avaliar a capacidade da CBCA desenvolver reações pozolânicas, pelas interações causadas por meio da ativação alcalina utilizando hidróxido de sódio (NaOH).

3.2.4 Preparação das amostras

As amostras dos materiais utilizados neste estudo para os ensaios de caracterização e moldagem dos corpos de prova foram preparadas conforme normatizado pela (ABNT, 2016a).

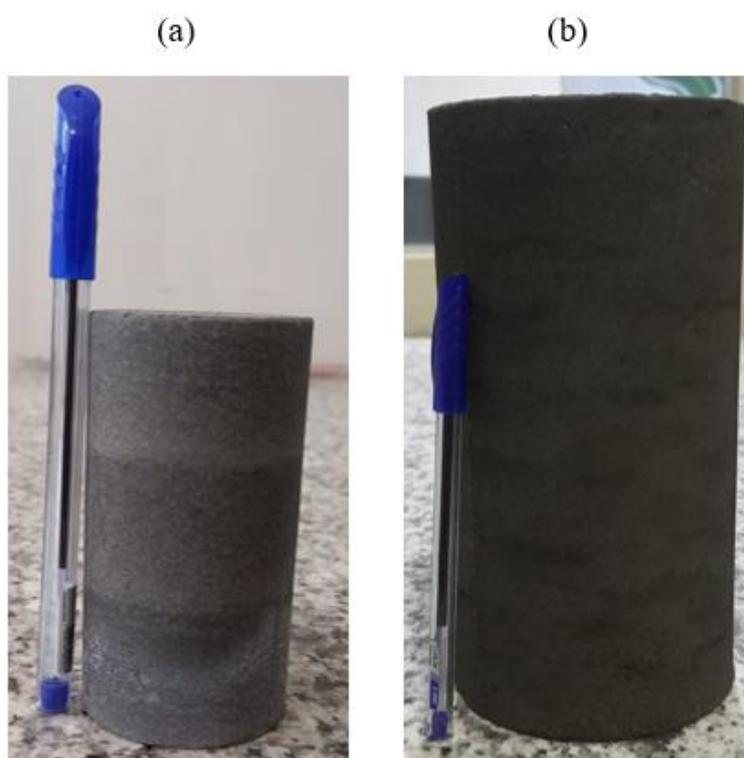
3.2.5 Determinação das curvas de compactação das misturas solo + CBCA

Posteriormente a caracterização dos materiais: solo (areia) e CBCA, deu-se continuidade ao planejamento experimental com a avaliação da influência da CBCA ativada alcalinamente com hidróxido de sódio (NaOH) sobre o solo puro caracterizado. Primeiramente, realizou-se de início os ensaios de compactação na energia do proctor modificada, por ser a energia comumente utilizada em projetos rodoviários. Neste ensaio, a areia e a CBCA eram misturadas, logo após se adicionava a solução ativadora e em seguida era realizado o referido ensaio, de modo, a definir os pesos específicos máximo e a umidade ótima de cada uma das misturas analisadas.

3.2.6 Moldagem e Cura dos Corpos de Provas

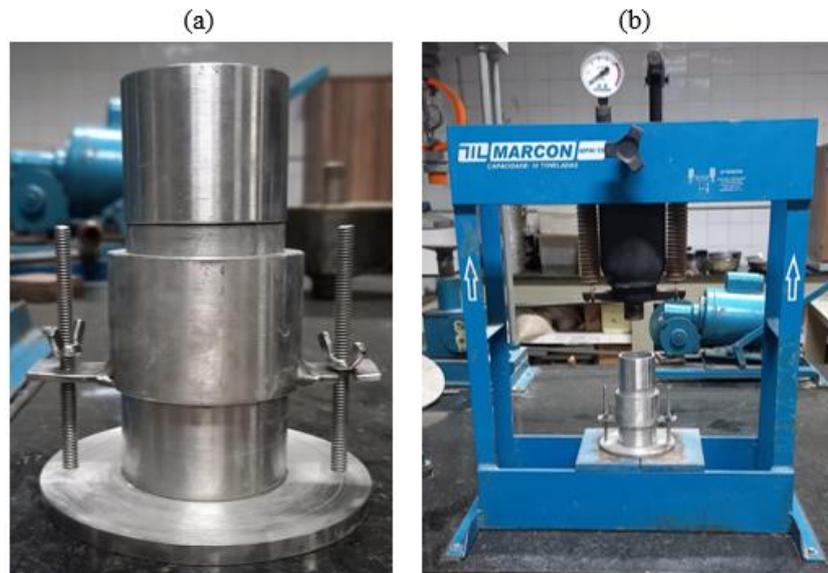
Para o desenvolvimento desta pesquisa foram moldados dois tipos de corpos de prova, designados por tipo A e B (Figura 15). Os corpos de prova do tipo A possuíam altura de 100mm e diâmetro de 50 mm e foram utilizados para os ensaios de resistência à compressão simples e ciclos de gelo e degelo. Os corpos de prova do tipo B possuíam altura de 200mm e diâmetro de 100 mm e foram utilizados no ensaio de módulo de resiliência. Para todos os corpos de provas moldados, inicialmente foram misturados os materiais secos (SOLO + CBCA) até total homogeneização. Em seguida, adicionou-se a solução ativadora (água destilada + NaOH), até a obtenção de uma mistura totalmente homogênea.

Figura 15: Corpos de prova - (a) Tipo A e (b) Tipo B



Fonte: Autoria Própria (2023)

Os corpos de prova do tipo A foram moldados estaticamente por meio de molde (Figura 16 (a)), e da prensa (Figura 16 (b)), sendo compactado em 3 camadas com escarificação entre estas. O procedimento de moldagem consistiu em montar o molde, inserir o solo no molde e por fim compactá-lo na prensa. O tipo B foi compactado em 10 camadas com escarificação entre as mesmas, na energia de compactação proctor modificada.

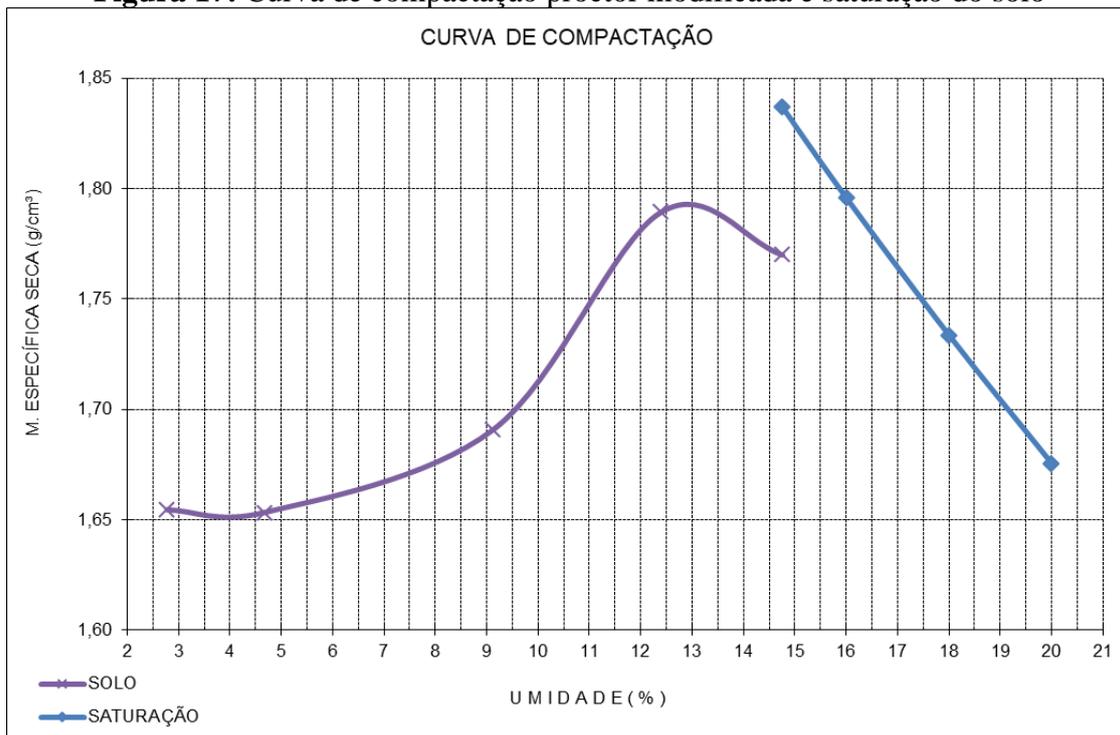
Figura 16: (a) Molde de prata (b) Prensa para moldagem

Fonte: Autoria Própria (2023)

Após a moldagem os corpos de prova que demandavam cura eram acondicionados em um saco plástico, etiquetados e guardados em caixa térmica.

3.2.7 Ensaio Resposta

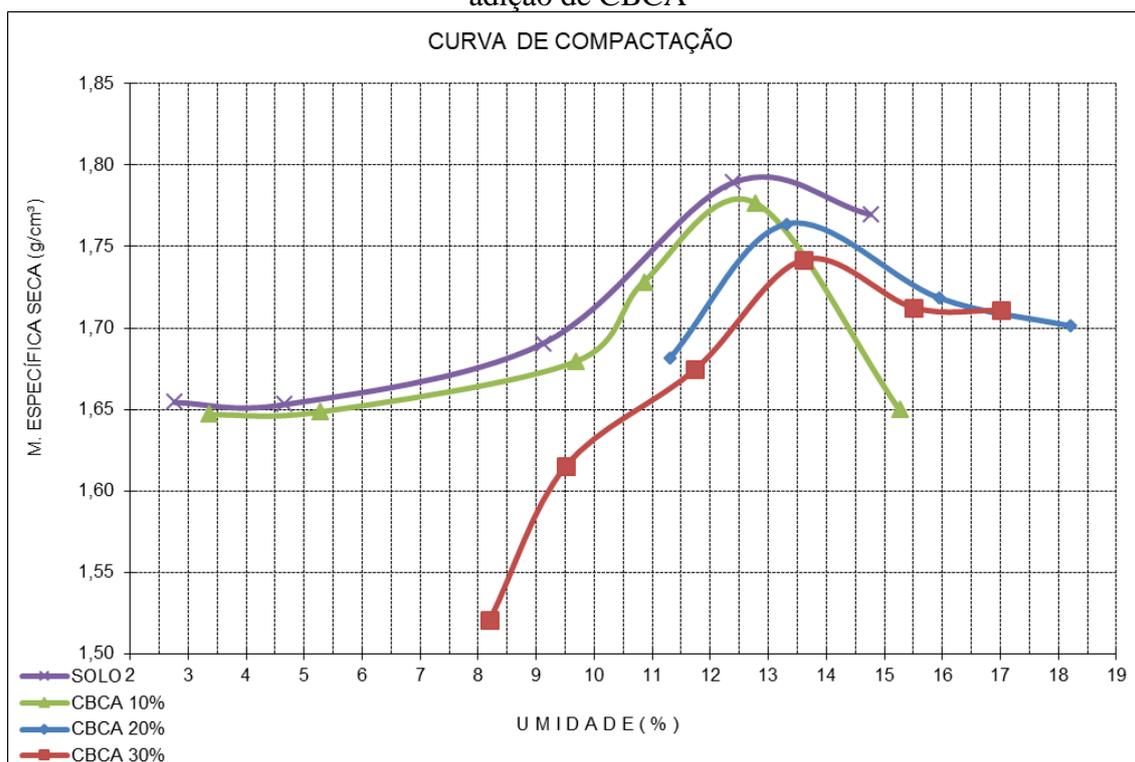
Primeiramente antes de iniciar os ensaios resposta foram definidas a massa específica seca máxima e a umidade ótima de compactação do solo e das misturas por meio do ensaio compactação. As Figuras 17 e 18 apresentam a curva de saturação do solo e as curvas de compactação na energia proctor modificada do solo e das misturas (Areia+CBCA+NaOH), respectivamente. Observa-se que à medida que se adiciona teores de CBCA ao solo há uma diminuição da massa específica seca máxima e um aumento da umidade ótima das misturas.

Figura 17: Curva de compactação proctor modificada e saturação do solo

Fonte: Autoria Própria (2023)

A curva de compactação obtida para o solo estudado é típica para solos sem coesão que apresentam picos com massa específica seca entre $1,55\text{g/cm}^3$ e $1,75\text{g/cm}^3$ e umidade ótima entre 10 e 15%, resultados semelhantes foram encontrados por Teixeira (2019) e Consoli et al. (2018).

Figura 18: Curvas de compactação proctor modificada do solo e das misturas com adição de CBCA



Fonte: Autoria Própria (2023)

Tabela 10: Pontos máximos das curvas de compactação na energia proctor modificada

| Curva | Massa específica seca | Umidade ótima |
|-----------------------|------------------------|---------------|
| Solo puro | 1,79 g/cm ³ | 12,39% |
| Solo + 10,00% de CBCA | 1,77g/cm ³ | 12,77% |
| Solo + 20,00% de CBCA | 1,76 g/cm ³ | 13,32% |
| Solo + 30,00% de CBCA | 1,74 g/cm ³ | 13,60% |

Fonte: Autoria Própria (2023)

Em estudos realizados por Dang, Khabbaz e Ni (2021) foi observado a diminuição do peso específico seco do solo com a adição de CBCA, os autores atribuem essas alterações a floculação do solo, originada pela troca catiônica e pelo menor peso específico real dos grãos da CBCA em relação ao solo.

Constatino (2018) ao estudar o impacto da cinza da casca de arroz (resíduo semelhante a CBCA) na expansividade do solo de Paulista-PE, constatou que, o incremento proporcional no teor de cinza aos solos causa um aumento contínuo na umidade ótima e uma diminuição do peso específico seco máximo das misturas.

O aumento da umidade ótima causado pelo acréscimo da CBCA está relacionado com a quantidade de finos presente no material, pois quanto mais grãos finos, logo terá maior área específica e adsorve uma maior quantidade de água.

Os ensaios utilizados para mensurar as variáveis resposta são apresentados na Tabela 11. Estes seguiram as normas da ABNT, DNIT e UNI EN.

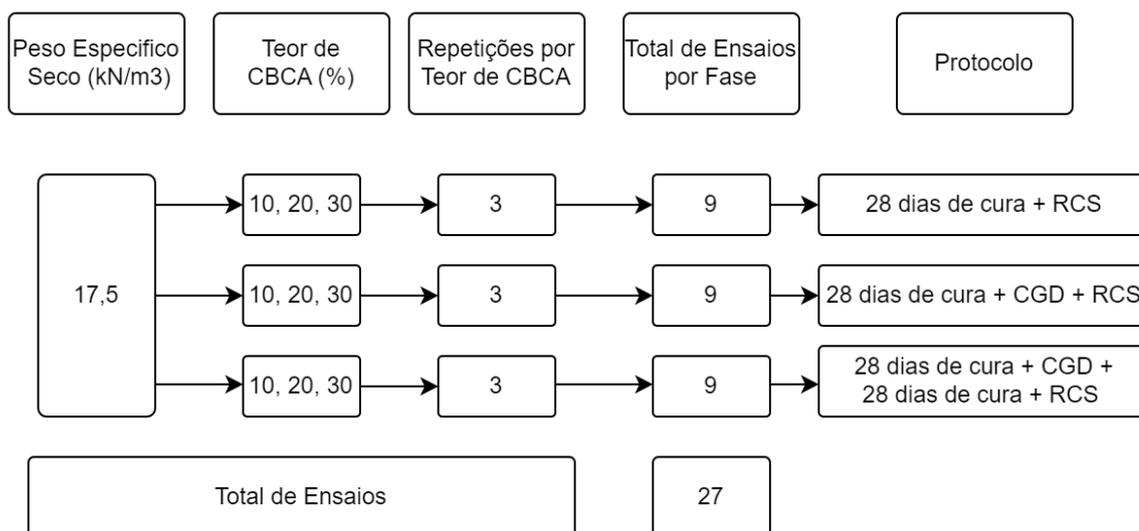
Tabela 11: Ensaios de resistência mecânica

| Ensaio | Método |
|----------------------------------|---------------------|
| Compressão Simples | ABNT NBR 12025/2012 |
| Ciclos de Gelo e Degelo | UNI EN 1367-1/2001 |
| Módulo de Resiliência | DNIT ME 134/2018 |
| Índice de Suporte Califórnia-ISC | DNIT ME 172/2016 |

Fonte: Autoria Própria (2023)

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O peso específico seco dos corpos de prova para todos os ensaios e teores foi de $17,5 \text{ kN/m}^3$ e umidade de 13,5%, justificando-se pelo fato dos pesos específicos e umidades ótimas das misturas terem ficados muito próximos, dentro do desvio padrão (Figura 18), dessa forma adotou-se um único peso específico e umidade. O programa experimental dos ensaios de ciclos de gelo e degelo é apresentado na Figura 19. Ressalta-se que, os ensaios foram feitos em triplicata.

Figura 19: Programa experimental dos ensaios de ciclos de gelo e degelo



*RCS: Resistência à compressão simples, CGD: Ciclos de Gelo e Degelo

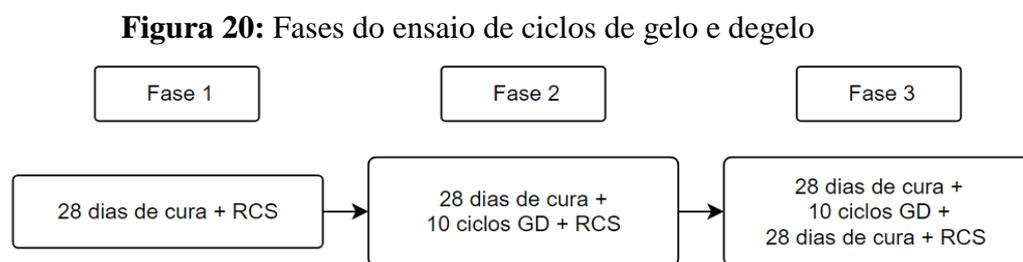
Fonte: Autoria Própria (2023)

Foram moldados 27 corpos de prova com peso específico seco de $17,5 \text{ kN/m}^3$ e na umidade ótima de compactação para os ensaios de ciclos de gelo e degelo, 9 para cada teor de CBCA (10%, 20%, 30%), onde posteriormente de acordo com o procedimento

adotado passaram por ensaios de compressão simples para medir a resistência destes. Para o módulo de resiliência o ensaio foi realizado para cada teor de CBCA (10%, 20%, 30%) e para o solo puro. E o ensaio de ISC foi realizado para o solo puro e para teor de CBCA de 30%, pois foi o teor que apresentou maior resistência à compressão simples, sendo o experimento realizado em três corpos de prova.

3.2.7.1 Ciclos de Gelo e Degelo

Os ensaios dos ciclos de gelo e degelo foram realizados em corpos de prova do tipo A, para os teores de CBCA de 10%, 20% e 30% ativados com NaOH, curados por 28 dias. O procedimento do teste foi organizado em três fases (Figura 20), são elas:



*RCS: Resistência à compressão simples, GD:Gelo e Degelo

Fonte: Autoria Própria (2023)

- Fase 1. Ensaios de compressão simples realizados em corpos de prova não submetidos aos ciclos de gelo e degelo, curados por 28 dias;
- Fase 2. Ensaios de compressão simples realizados em corpos de prova submetidos aos ciclos de gelo e degelo, curados por 28 dias;
- Fase 3. Ensaios de compressão simples em corpos de prova submetidos a um segundo tempo de cura (28 dias), após o condicionamento ao gelo e degelo.

Após a compactação no teor de umidade ótima, os corpos de prova de cada fase foram acondicionados em um saco plástico, etiquetados e guardados em caixa térmica até o momento planejado para realização do ensaio ou até o início dos ciclos de gelo e degelo.

Os condicionamentos de congelamento-descongelamento foram realizados em uma câmara climática de acordo com a UNI EN 1367-1/2001: temperatura alterando-a entre 20°C e -17.5°C, por 24 h (variação de temperatura dos corpos de prova a cada 12h) em um período de 10 dias. Este procedimento é utilizado para avaliar a resistência de corpos de prova de agregados, mas foi adotado para ter um protocolo padrão como referência.

O equipamento utilizado na ruptura dos corpos de prova foi uma prensa hidráulica *Shimadzu* com velocidade de carregamento de 1% por minuto.

3.2.7.2 Ensaio de Módulo de Resiliência

O método utilizado para realização do ensaio do MR foi o DNIT-ME 134/2018 que tem por objetivo determinar os valores do módulo de resiliência de solos para várias tensões aplicadas, utilizando o equipamento triaxial de carga repetida. O ensaio triaxial de carga repetida (Figura 21 (a) e (b)) é caracterizado pela aplicação da tensão desvio aplicada verticalmente no topo da amostra, de forma cíclica no sentido de compressão. Os ensaios foram realizados em corpos de prova do tipo B, para os teores de CBCA de 10%, 20% e 30%, curados por 28 dias (os corpos de prova foram acondicionados em um saco plástico, etiquetados e guardados em caixa térmica até o momento planejado para realização do ensaio). Todos os ensaios de MR foram executados com aplicações de carga cíclica na frequência de 1 Hz, sendo 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de descarregamento.

O ensaio foi constituído por duas fases, a primeira foi a de condicionamento, e, a segunda, a de obtenção do módulo de resiliência propriamente dito. A primeira etapa objetivou minimizar os efeitos de deformação plástica e do histórico de tensões. Nesta etapa foram aplicados três conjuntos de 500 golpes cada, em diferentes pares de tensões. Na segunda etapa, foi medida a deformação específica resiliente correspondente à aplicação dos pares de tensões confinante e desvio (DNIT-ME 134/2018; NORBACK, 2018). Os conjuntos de tensões aplicados na fase de condicionamento e do ensaio propriamente dito encontram-se descritos na Tabela 12.

Tabela 12: Tensões aplicadas nos corpos de prova para ensaio de módulo de resiliência

| Fase | Tensão Confiante (MPa) | Tensão Desvio (MPa) |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Condicionamento | 0,070 | 0,070 |
| | 0,070 | 0,210 |
| | 0,105 | 0,315 |
| Carregamento Efetivo | | 0,020 |
| | 0,020 | 0,040 |
| | | 0,060 |
| | | 0,035 |
| | 0,035 | 0,070 |

| | |
|-------|-------|
| | 0,105 |
| | 0,050 |
| 0,050 | 0,100 |
| | 0,150 |
| | 0,070 |
| 0,070 | 0,140 |
| | 0,210 |
| | 0,105 |
| 0,105 | 0,210 |
| | 0,315 |
| | 0,140 |
| 0,140 | 0,280 |
| | 0,420 |

Fonte: DNIT-ME 134/2018

Medina e Motta (2015) definem MR (módulo de resiliência) de um solo determinado pelo ensaio triaxial de cargas repetidas pela Equação 2:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

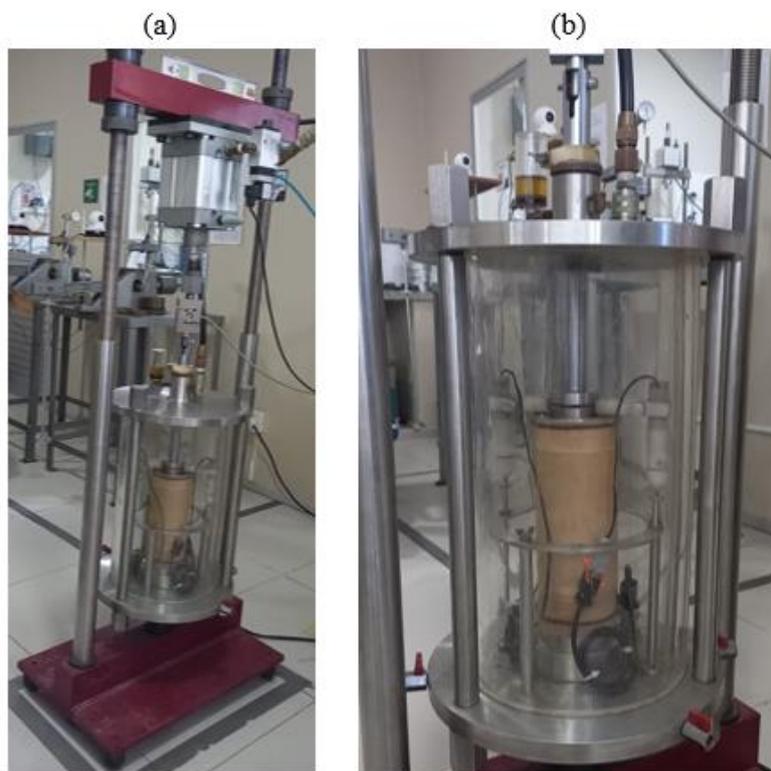
MR: Módulo de Resiliência (MPa);

σ_d : tensão desvio aplicada repetidamente (MPa);

ε_R : deformação específica axial resiliente (mm/mm).

De acordo com DNIT ME 134 (2018) o módulo de resiliência (MR) é a relação entre as tensões desvio (σ_d) aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical resiliente ou recuperável (ε_r).

Figura 21: Triaxial de carga repetida utilizado nos ensaios de módulo de resiliência -
(a) Visão total do equipamento e (b) visão aproximada da célula



Fonte: Autoria Própria (2023)

3.2.7.3 Índice de Suporte Califórnia – ISC

O ensaio foi realizado de acordo com a especificação DNIT 172/2016 - ME – Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. A referida norma apresenta os procedimentos para determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) de solos em laboratório utilizando-se amostras deformadas e não trabalhadas de material que passa na peneira de 19 mm. (DNIT 172/2016 - ME).

No referido ensaio, é medida a resistência à penetração de uma amostra compactada segundo o método de Proctor. Um pistão com seção transversal de 3 pol² penetra na amostra à uma velocidade de 1,27 mm/min (Figura 22). O valor da resistência à penetração é dado em porcentagem, sendo que o valor de 100% corresponde à penetração em uma amostra de brita graduada de elevada qualidade, cujo padrão de referência foi adotado. Para determinar o valor do ISC em porcentagem, utilizou-se a seguinte expressão 3:

$$\text{ISC}(\%) = \frac{\text{PRESSÃO LIDA OU PRESSÃO CORRIGIDA}}{\text{PRESSÃO PADRÃO}} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Para obtenção dos resultados foram moldados três corpos de prova para o teor de 30% de cinza, na energia modificada, curados por 28 dias e para o solo puro. A escolha desse teor para realização do ensaio, justifica-se pelos resultados obtidos com a realização do ensaio de resistência à compressão simples, onde o referido teor apresentou o maior ganho de resistência. Os corpos de prova ficaram submersos em água por um período de quatro dias (96 horas) para determinar sua expansão. A Figura 22 mostra o rompimento do corpo de prova.

Figura 22: Rompimento do corpo de prova



Fonte: Autoria Própria (2023)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, ciclos de gelo e degelo, módulo de resiliência e Índice de Suporte Califórnia (ISC).

4.1 Análise das Misturas

Neste tópico são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física das misturas.

4.1.1 Propriedades Físicas das Misturas

Na Figura 23 são apresentadas as curvas granulométricas das misturas por sedimentação e peneiramento e na Tabela 13 são apresentadas as propriedades físicas destas.

Figura 23: Distribuição granulométrica das partículas das misturas

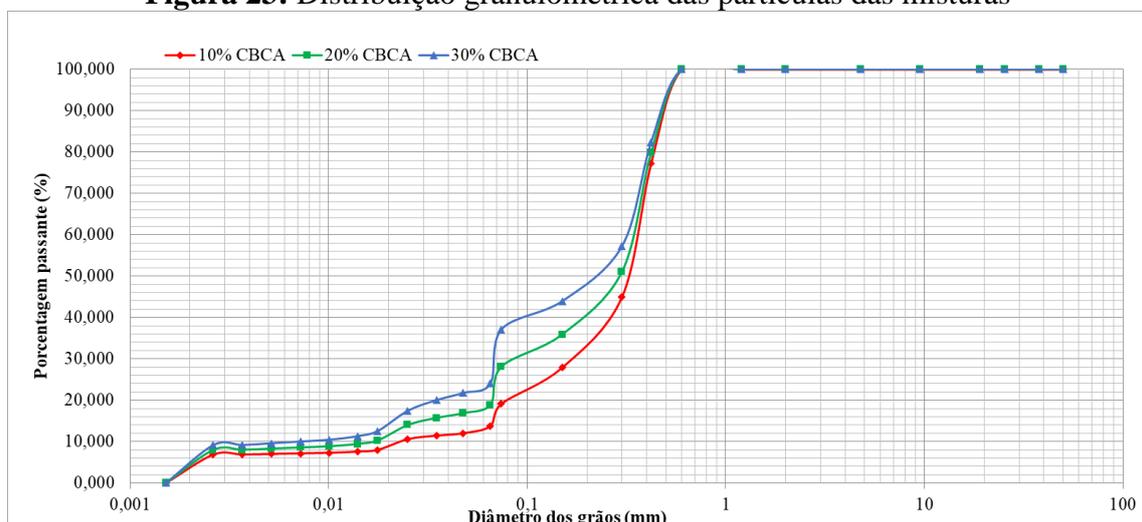


Tabela 13: Propriedades Físicas das Misturas

| Propriedades | Valores | | | Norma Técnica |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|---------------------|
| | CBCA 10% | CBCA 20% | CBCA 30% | |
| Limite de liquidez | NL | NL | NL | ABNT NBR 6459/2017 |
| Limite de plasticidade | - | - | - | ABNT NBR 7180/2016 |
| Índice de plasticidade | NP | NP | NP | |
| Massa específica real dos grãos | 2,50 | 2,47 | 2,45 | ABNT NBR 6458/2017 |
| Areia grossa (%) $0,6 \leq d < 2$ mm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| Areia média (%) $0,2 \leq d < 0,6$ mm | 22,75 | 20,22 | 17,70 | |
| Areia fina (%) $0,06 \leq d < 0,2$ mm | 58,14 | 51,68 | 45,22 | ABNT NBR 7181/2018a |
| Silte (%) $0,002 \leq d < 0,06$ mm | 11,82 | 19,24 | 26,66 | |
| Argila (%) $- d < 0,002$ mm | 7,29 | 8,86 | 10,43 | |
| Classificação SUCS | SM | SM | SM | ASTM D 2487/ 2017 |
| Classificação AASHTO | A-2-4 | A-2-4 | A-4 | |
| Índice de Grupo | 0 | 0 | 0 | |

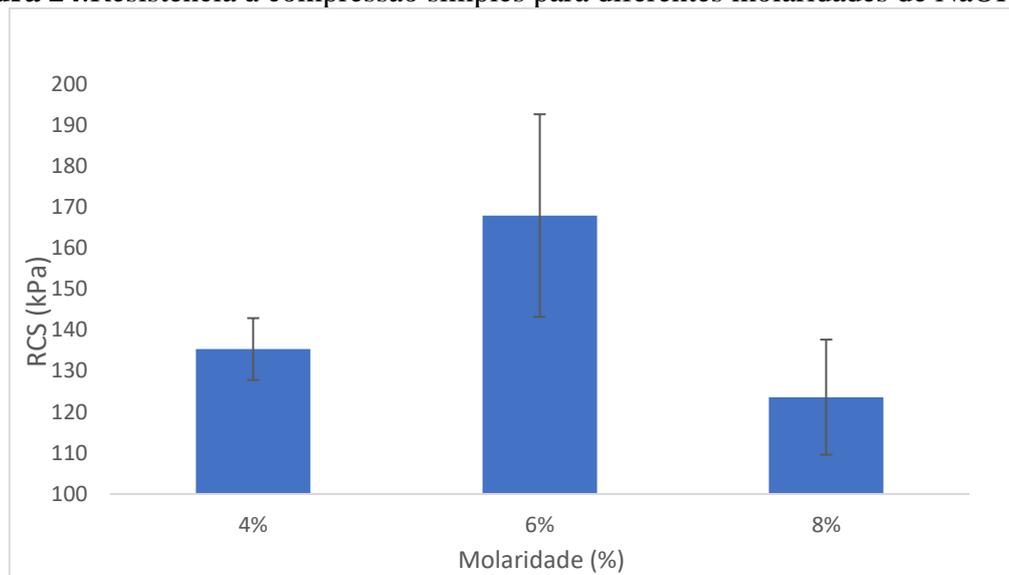
Fonte: Autoria Própria (2023)

Observa-se que para todas as misturas com adição da CBCA, é possível perceber a mudança na classificação quando comparadas ao solo puro passando de uma areia mal graduada (SP-SM) a ser classificada como uma areia siltosa (SM), aspecto que se associa ao aumento do teor de finos, observada na Tabela 13. Para a classificação AASTHO as misturas foram classificadas como A-2-4 (areia siltosa), A-2-4 (areia siltosa) e A-4 (solo siltoso) para os teores de 10%, 20% e 30%, respectivamente. De acordo com o índice de grupo que define a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento. Os valores obtidos para as misturas representam solos ótimos.

4.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Na Figura 24 são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de compressão simples realizados em corpos de prova com teor de 100% de CBCA e molaridades de 4 mol, 6mol e 8mol de NaOH. Nesta observa-se um acréscimo da resistência com o aumento da concentração molar até o ponto de 6mol e a partir desse marco a resistência decresce com o aumento da concentração do ativador. Esse comportamento está atrelado a saturação da solução, ou seja, esse teor de ativador não foi totalmente solúvel nessa concentração, não permitido que a reação entre ativador (NaOH) e precursor (CBCA) ocorresse de forma eficaz.

Em relação aos valores de RCS para as molaridades, a que obteve o melhor resultado foi a de 6mol alcançando uma resistência de 168KPa. Enquanto que as molaridades de 4mol e 8mol, apresentaram resistências da ordem de 135KPa e 123KPa, respectivamente. Vale salientar que esses valores foram obtidos a partir da média simples das amostras executadas em cada tratamento.

Figura 24: Resistência à compressão simples para diferentes molaridades de NaOH

Fonte: Autoria Própria (2023)

Bruschi et. al (2021) estudou a álcali-ativação na estabilização de rejeito de mineração de bauxita, encontrando para as misturas (90%CBCA + 10% CC) do ligante alcalí-ativado, nas concentrações de 4mol, 6mol e 8mol de NaOH, valores de RCS de 20,0KPa, 0,0 KPa e 0,0KPa, respectivamente.

Caicedo et al (2021) em seus estudos sobre melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de cerâmica vermelha (RCV) e cal de carbureto (CC), encontrou resultados de RCS para seu ligante alcalí-ativado, curado por 7 dias para concentração de 6 mol de NaOH valores da ordem de 280KPa, 320 KPa, 1020 KPa e 770KPa, para misturas com teores de 100%RCV, 95%RCV+5%CC, 90%RCV+10%CC, 85%RCV+15%CC, respectivamente. Para as molaridades de 8mol e 10mol, as pastas alcalí-ativadas não conferiram resistência para moldagem dos corpos de prova.

Esses resultados encontrados pelos autores citados estão abaixo dos valores encontrados nesta pesquisa, comprovando assim, o efeito da álcali ativação da CBCA por meio do NaOH.

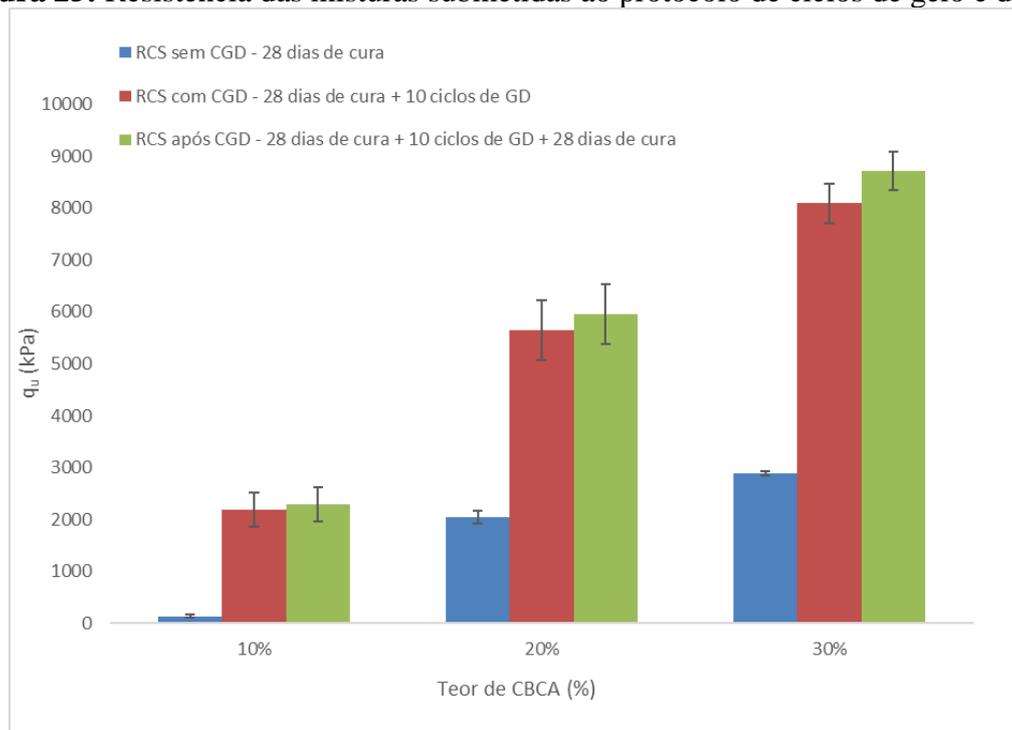
4.3 Ciclos de Gelo e Degelo

Os resultados dos ensaios dos ciclos de gelo-degelo, são apresentados na Figura 25, mediante o valor médio do índice de durabilidade (resistência sem ciclos/resistência com ciclos/ resistência após ciclos), para os teores de 10%, 20% e 30% de CBCA. De acordo com os valores obtidos observa-se que os teores de CBCA aumentam o índice de durabilidade, quanto maior o teor de CBCA, maiores são os valores encontrados para as

resistências, comportamento semelhante foi encontrado por Araujo et al. (2023) e Bruschi et al. (2021) utilizando ativação alcalina com CBCA, Cal e NaOH. O aumento de resistência à compressão simples com o aumento do teor de precursor (CBCA) é causado segundo Singhi et al. (2016) e Miraki et al. (2022), pela maior disponibilidade de aluminossilicatos para as reações de ativação alcalina.

A mistura com melhor desempenho, foi com o teor de 30% de CBCA, obtendo RCS de 8,7 MPa ao final do protocolo ao qual foi submetida. Outro resultado obtido no ensaio (Figura 25), mostra que com os ciclos de gelo e degelo houve um aumento na resistência para todos os teores estudados, esse fato pode ser explicado pela diminuição da fase amorfa do material após ativação alcalina, o que indica a geopolimerização, essa reação é discutida no item 4.4.1.2 por meio do ensaio de DRX que explica a reação ocorrida para que houvesse esse ganho de resistência. Os ciclos de gelo e degelo, em geral, provocam fissuração de materiais cimentados devido a expansão da água nos poros durante o processo de congelamento (TEBALDI et al., 2016, NGUIJEN et al., 2019 e BEHOOD et al., 2018). Entretanto as misturas estudadas nessa pesquisa apresentaram aumento da resistência com congelamento/degelo, pois segundo Ghadir et al. (2021) misturas álcali-ativadas apresentam melhor comportamento que misturas contendo cal e cimento perante os ciclos de gelo e degelo. Resultado semelhante foi encontrado por Maraki et al. (2022) para argila estabilizada com cinza vulcânica, escoria de alto forno e NaOH.

Após os ciclos de gelo e degelo houve ainda um pequeno aumento nas resistências que pode ser explicado pelo maior tempo de cura. A Tabela 14 e Figura 26 apresentam um resumo dos valores médios obtidos para as misturas nos seus respectivos estágios.

Figura 25: Resistência das misturas submetidas ao protocolo de ciclos de gelo e degelo

*RCS: Resistência à compressão simples, CGD: Ciclos de Gelo e Degelo
 Fonte: Autoria Própria (2023)

Tabela 14: Resistência à compressão simples: sem ciclos, com ciclos e após ciclos de gelo e degelo

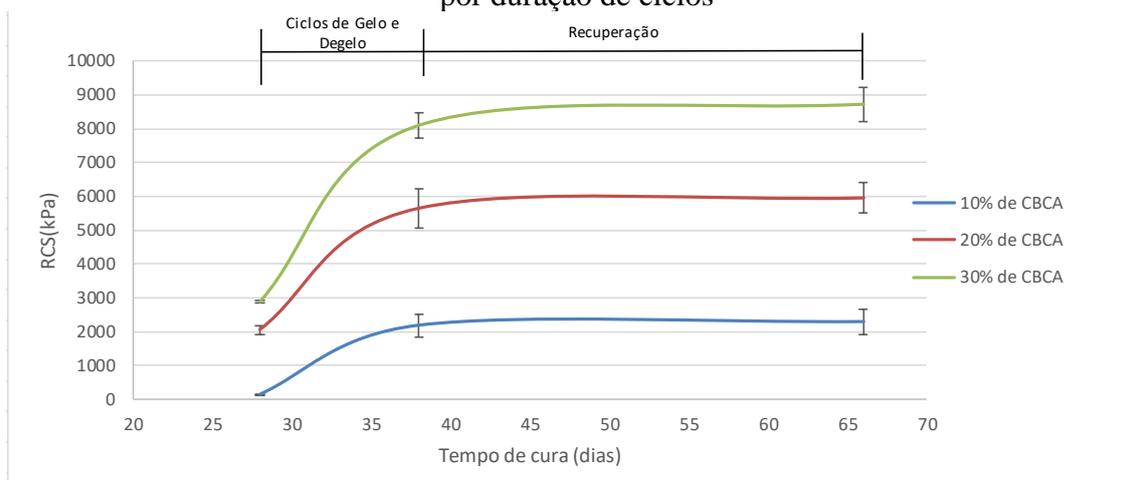
| Amostra | RCS sem CGD (KPa) | RCS com CGD (KPa) | RCS após CGD (KPa) |
|----------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 10% CBCA | 138 | 2182 | 2289 |
| 20% CBCA | 2046 | 5648 | 5953 |
| 30% CBCA | 2885 | 8087 | 8712 |

*RCS: Resistência à compressão simples, CGD: Ciclos de Gelo e Degelo
 Fonte: Autoria Própria (2023)

Ao comparar os resultados de RCS sem e após os ciclos de gelo e degelo constatou-se que houve um acréscimo em todos os teores analisados, porém, o maior foi obtido para o teor de 10% de CBCA, onde este, teve um aumento de aproximadamente 17 vezes do seu valor inicial.

Silva (2022) em seus estudos com estabilização de solo expansivo encontrou valores de RCS em média de 52kPa para corpos de prova com 25% de CBCA. Esses resultados estão abaixo dos valores encontrados nesta pesquisa, comprovando assim, o efeito da álcali ativação da CBCA por meio do NaOH.

Figura 26: Resistência das misturas submetidas ao protocolo de ciclos de gelo e degelo por duração de ciclos



Fonte: Autoria Própria (2023)

A Figura 26 mostra a duração dos ciclos em dias, antes, com ciclos de gelo e degelo e após os ciclos de modo a avaliar recuperação dos danos sofridos pelas amostras durante os ciclos de gelo e degelo que foram curadas por mais 28 dias. O aumento de resistência à compressão simples no período de recuperação foi de 4%, 5% e 7% para as amostras com 10%, 20% e 30% de CBCA álcali ativada, mostrando que o potencial de recuperação pós-dano por congelamento/degelo do material é baixo. Orazi et al. (2022) encontrou elevado potencial de recuperação em amostras de argilas estabilizadas somente com cal, devido a natureza lenta das reações pozolânicas, entretanto pesquisas avaliando recuperação pós ciclos de gelo e degelo de misturas álcali ativadas não foram encontradas.

Entre as misturas estudadas a que apresentou melhor comportamento foi a com 30% de CBCA álcali ativada alcançando resistência à compressão simples média de 2885 kPa após 28 dias de cura, 8087 kPa após os 10 ciclos de gelo e degelo e 8712 kPa após 28 dias de recuperação.

4.4 Análise Química das Misturas

4.4.1 Difração de Raio-X e Espectrometria de Fluorescência de Raio-X

4.4.1.1 Mistura sem tempo de cura

Os ensaios de FRX e DRX foram realizados para a caracterização química da mistura (30%CBCA+ SOLO + NaOH). O teor de cinza de 30% foi escolhido para realização do ensaio uma vez que foi o que obteve os maiores ganhos de resistência à compressão simples e visando validar a reação de ativação alcalina por meio dos produtos formados. O resultado do ensaio está apresentado na Tabela 15. De acordo com os dados a mistura apresenta 58,53 % de sílica, 7,11% de cálcio e 5,77 % de alumínio, elementos fundamentais para as reações de ativação alcalina.

Tabela 15: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X da Mistura com 30%, de CBCA sem cura, Solo e CBCA

| Material | Elemento Químico | SiO ₂ | MgO | K ₂ O | Al ₂ O ₃ | CaO | SO ₃ | Fe ₂ O ₃ | Outros |
|------------------------------|------------------|------------------|-------|------------------|--------------------------------|------|-----------------|--------------------------------|--------|
| Mistura 30% de CBCA sem cura | Fração (%) | 58,53 | 11,24 | 8,02 | 5,77 | 7,11 | 2,69 | 4,87 | 1,77 |
| Solo | Fração (%) | 71,21 | 1,73 | 2,42 | 20,97 | 1,48 | 0,13 | 1,56 | 0,60 |
| CBCA | Fração (%) | 57,3 | 11,49 | 6,88 | 8,55 | 7,54 | 7,54 | 2,23 | 0,66 |

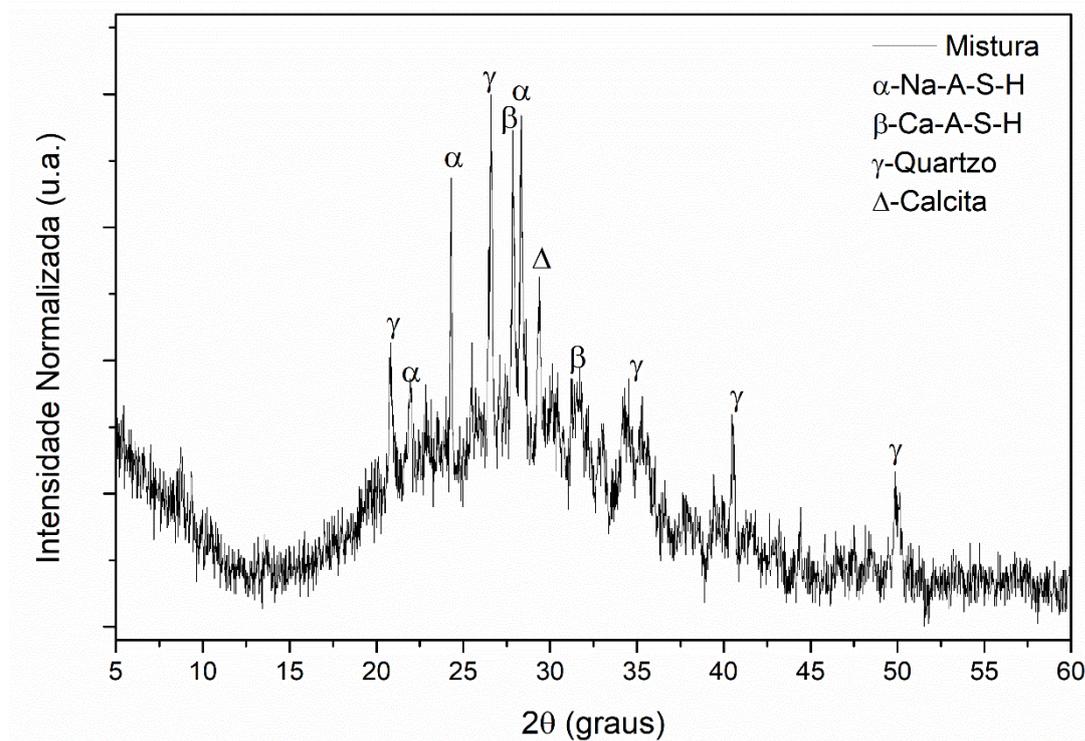
Fonte: Autoria Própria (2023)

Ao comparar os resultados obtidos para a FRX do solo e da mistura, observa-se que as frações correspondentes a sílica e óxidos de alumínio foram reduzidas, e as frações dos óxidos de magnésio, potássio e cálcio aumentaram. Este fato sendo explicado pela adição da CBCA e NaOH presente na solução ativadora. Os óxidos de magnésio e cálcio são importantes para as reações de álcali ativação, fornecendo Ca⁺⁺ e Mg⁺⁺ para a constituição dos materiais cimentantes originados da reação.

O DRX foi executado com amplitude de 5° a 60° com uma velocidade de varredura de 2° por minuto em equipamento com cátodo de cobre e seu resultado, mostrado na Figura 27. Os resultados dos ensaios de DRX da mistura apresentaram quartzo, componente encontrado no solo e na CBCA e de difícil ataque químico, calcita, proveniente da CBCA, e um halo amorfo entre os ângulos de difração 15°-32° (2θ), atribuído as estruturas desordenadas e conteúdos altamente amorfos (produtos de reação como os géis C-A-S-H e N-A-S-H.), formados durante os processos de ativação alcalina, quando cátions de Ca²⁺, advindos da CBCA, e Na⁺ estão tomando parte nas reações (ZAILANI *et al.*, 2020). Esses compostos foram encontrados em misturas álcali ativadas

de diferentes cinzas por Chowdhury et al. (2023), Araujo et al. (2023) e Cristelo et al. (2018) e são estruturas tridimensionais que quando endurecidas são responsáveis pela cimentação dos grãos, logo aumento da resistência mecânica e durabilidade. Destaca-se que devido a necessidade de secagem da amostra e processamento em laboratório houve um período de 7 dias entre a mistura dos elementos e a realização do ensaio de difração de raios X.

Figura 27: Difração dos Raio-X da mistura



Fonte: Autoria Própria (2023)

4.4.1.2 Mistura após ciclos de gelo e degelo

Os ensaios de FRX e DRX (Figura 28) foram realizados para a caracterização química da mistura (30%CBCA+ SOLO + NaOH). O resultado do ensaio de FRX da mistura e após dos ciclos de gelo e degelo estão apresentados na Tabela 16.

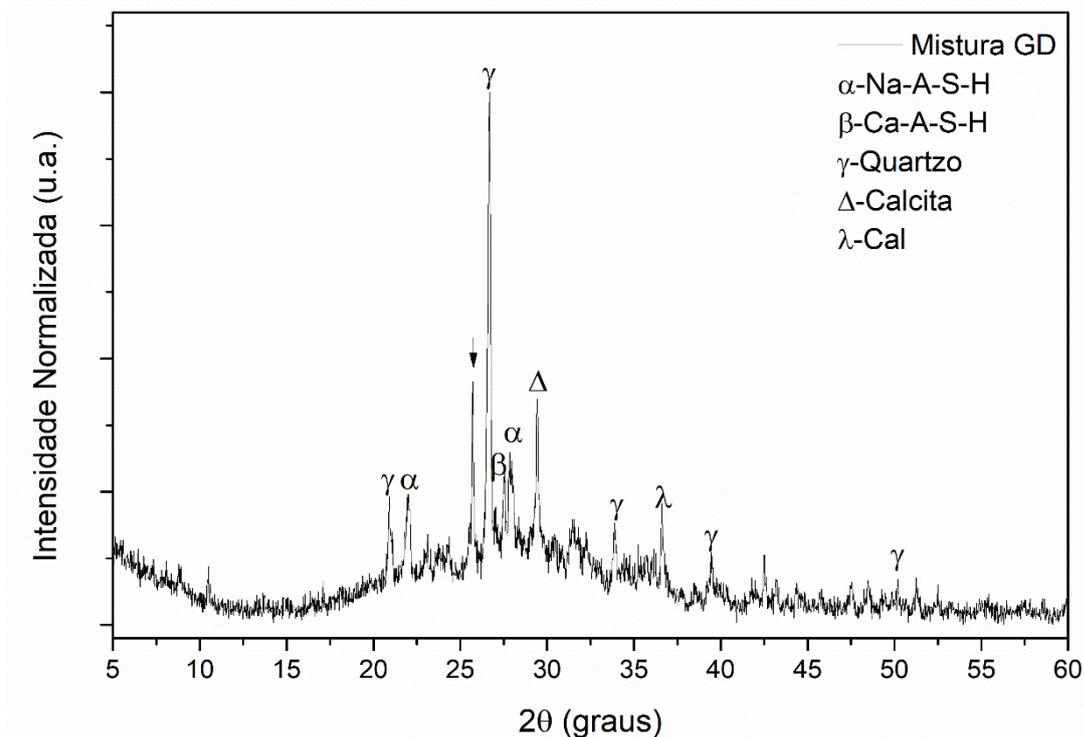
Tabela 16: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X da Mistura após ciclos de gelo e degelo e sem cura

| Material | Elemento Químico | SiO ₂ | Na ₂ O | MgO | Al ₂ O ₃ | CaO | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Fe ₂ O ₃ | Outros |
|---------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------|--------------------------------|------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------|
| Mistura com 30% de CBCA após GD | Fração (%) | 46,05 | 25,67 | 8,89 | 5,57 | 4,56 | 4,41 | 2,59 | 1,32 | 0,902 |
| Mistura 30%de CBCA sem cura | Fração (%) | 58,53 | | 11,24 | 5,77 | 7,11 | 8,02 | 4,871 | 4,87 | 1,77 |

Fonte: Autoria Própria (2023)

Ao comparar os resultados obtidos para a FRX da mistura e após os ciclos de gelo e degelo, observa-se que a principal diferença entre estas, é observada na fração de Na_2O presente após os ciclos. Este fato é explicado pelas reações de álcali ativação causada pelo NaOH presente na solução ativadora, responsáveis pelo aumento da resistência à compressão simples durante os ciclos de gelo e degelo.

Figura 28: Difração dos Raio-X da mistura após ciclos de gelo e degelo



Fonte: Autoria Própria (2023)

A comparação da Figura 27 com a Figura 28 permite verificar que houve uma diminuição do halo amorfo existente entre os ângulos de difração 15° - 32° (2θ), atribuído as estruturas desordenadas e conteúdos altamente amorfos (produtos de reação como os géis C-A-S-H e N-A-S-H.), indicando uma diminuição na quantidade da fase amorfa, provavelmente devido a sua geopolimerização, este fato relaciona-se com o aumento da resistência a compressão simples encontrado após os ciclos de gelo e degelo. Resultados semelhantes foram encontrados por Araújo et al. (2023) e Miraki et al. (2022), porém para o aumento de resistência de mistura álcali inativadas devido ao aumento do tempo ou temperatura de cura.

A baixa quantidade de material amorfo encontrada nas amostras após os ciclos de gelo e degelo justifica o pequeno aumento de resistência encontrado durante a

recuperação das amostras, pois é na fração amorfa que ocorrem as reações de álcali ativação.

4.5 Módulo de Resiliência – MR

A realização desse ensaio teve como objetivo avaliar o comportamento de um solo puro e estabilizado analisando o seu comportamento em termos de resiliência, considerando-se a influência, nesta variável, do teor de CBCA+NaOH utilizado. A justificativa desses estudos dá-se pela maior representatividade deste procedimento para a análise em relação aos estudos utilizando o ISC e RCS na previsão do comportamento mecânico real das estruturas dos pavimentos quando considerado apenas as energias externas provenientes de carregamentos repetidos.

Nesta pesquisa foram utilizados modelos matemáticos clássicos que relacionam o Módulo de Resiliência com a tensão de confinamento (σ_3) e a tensão desvio (σ_d), conforme descritos nas Equações 4 e 5, respectivamente.

$$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} \quad \text{Equação 4}$$

$$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

MR: Módulo de Resiliência;

σ_d : tensão desvio;

σ_3 : tensão de confinamento;

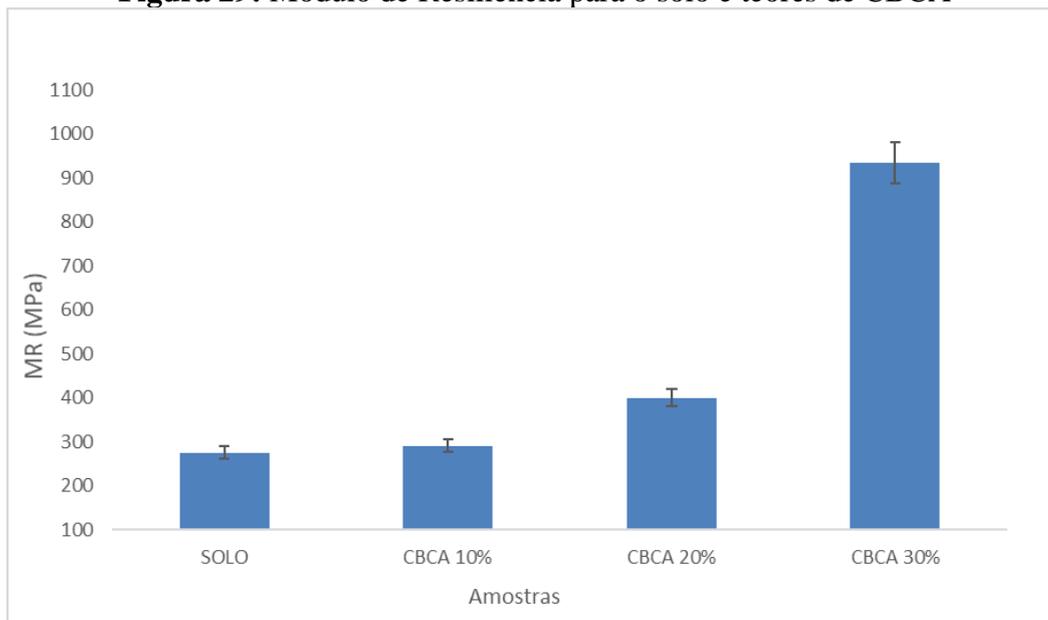
k: parâmetros de modelagem que definem numericamente cada modelo.

Ainda foi utilizado um terceiro modelo relacionando as tensões de confinamento e de desvio com MR, gerando assim um Modelo Composto. A Equação 6 representa o Modelo Composto utilizado neste estudo.

$$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3} \quad \text{Equação 6}$$

Os gráficos dos modelos clássicos e composto do solo puro e estabilizado estão ilustrados nos sub tópicos deste item.

Na Figura 29 são apresentados os resultados obtidos para ensaio de Módulo de Resiliência. Para realizar a avaliação dos parâmetros do comportamento do solo puro e estabilizado e para fins de comparação de seus resultados com outros estudos, o Módulo de Resiliência de cada amostra, dado pelo modelo composto, foi o resultante da aplicação do último par de tensões do ensaio triaxial dinâmico, que representa o nível de tensões mais severo do ensaio - $\sigma_d = 0,420$ MPa e $\sigma_3 = 0,140$ MPa.

Figura 29: Módulo de Resiliência para o solo e teores de CBCA

Fonte: Autoria Própria (2023)

A Tabela 17 a seguir apresenta os parâmetros de modelagem e os coeficientes de determinação obtidos para os três modelos utilizados nesta pesquisa para o solo puro e estabilizado.

Tabela 17: Valores dos coeficientes de regressão para o solo puro e estabilizado

| Amostra | MR= k1*σ ₃ ^{k2} | | | MR=k1*σ _d ^{k2} | | | MR= k1*σ ₃ ^{k2} *σ _d ^{k3} | | | |
|----------|-------------------------------------|------|----------------|------------------------------------|------|----------------|---|------|-------|----------------|
| | k1 | k2 | R ² | k1 | k2 | R ² | k1 | k2 | k3 | R ² |
| SOLO | 535,07 | 0,24 | 0,7425 | 351,93 | 0,12 | 0,2941 | 569,92 | 0,34 | -0,11 | 0,82 |
| 10% CBCA | 851,55 | 0,39 | 0,7687 | 416,59 | 0,18 | 0,2271 | 1080,08 | 0,68 | -0,26 | 0,94 |
| 20% CBCA | 1272,4 | 0,42 | 0,8247 | 676,06 | 0,25 | 0,4417 | 1448,70 | 0,52 | -0,07 | 0,84 |
| 30% CBCA | 1735,4 | 0,22 | 0,7039 | 1134,4 | 0,09 | 0,1936 | 1880,42 | 0,37 | -0,15 | 0,88 |

Fonte: Autoria Própria (2023)

Os resultados obtidos indicam um aumento no Módulo de Resiliência para todos os teores de CBCA estudados quando comparados ao solo puro. A adição de 30% da CBCA resultou em um aumento aproximado de 340% no MR quando comparado ao solo puro.

Esses resultados podem ser explicados pelas reações de álcali ativação entre os aluminossilicatos da CBCA e o NaOH, que geram estruturas amorfas tridimensionais,

como N-A-S-H gel, responsável pela cimentação dos componentes da mistura (MIRANDA et al., 2022).

Teixeira (2019) realizou ensaios de módulo resiliente em um solo siltoso-arenoso com adições de 3%, 5%, 7% e 9% de cal, na energia modificada e 90 dias de cura, e obteve valores para o MR da ordem de 252MPa, 558MPa, 744MPa e 800MPa, respectivamente. Ou seja, valores menores do que os encontrados nessa pesquisa.

Com relação aos coeficientes obtidos para os modelos estudados foi observado um aumento no coeficiente k_1 em todos os modelos conforme a adição do teor de CBCA, causado pelo acréscimo do Módulo de Resiliência.

Analisando os valores de R^2 apresentados para o Modelo Composto, observa-se uma maior relação entre as variáveis em relação aos modelos clássicos, chegando a valores na ordem de 0,94.

De acordo com Medina (1997) os modelos matemáticos que melhor representam a dependência do Módulo de Resiliência ao estado de tensões atuante para os materiais granulares são definidos principalmente em função das tensões confinantes (σ_3) ou da soma das tensões principais ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$).

4.5.1 Modelos de Regressão

O Módulo de Resiliência dos solos é a relação entre as tensões aplicadas e as deformações reversíveis provocadas por estas, sob condições específicas de carregamento e temperatura. Este é um parâmetro utilizado em dimensionamento de pavimentos pela metodologia mecanística-empírica. Com o modelo, pode-se estimar o valor do MR durante toda vida útil do pavimento. A escolha do modelo deve ser de tal forma que descreva com a maior fidelidade possível o comportamento resiliente de um solo a fim de avaliar corretamente a deformabilidade deste material.

A seguir são apresentadas as figuras dos três modelos estudados nesta pesquisa.

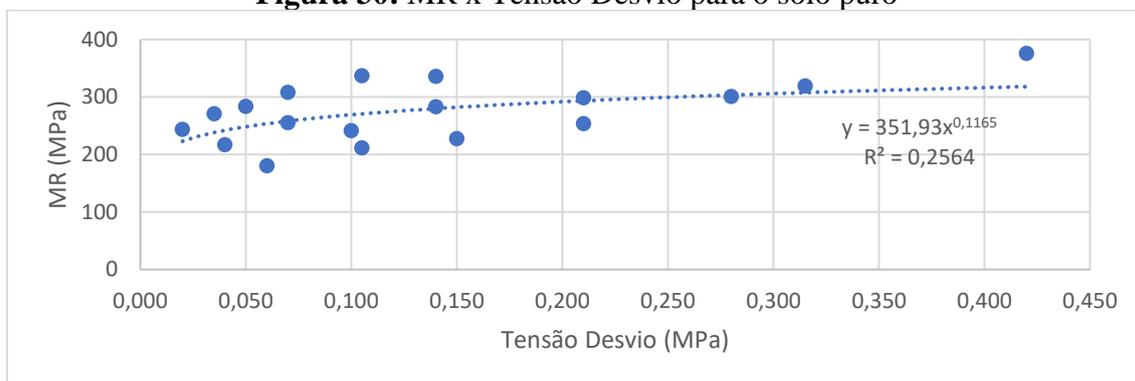
4.5.1.1 Modelo σ_d – MR x Tensão Desvio

As figuras 30, 31, 32 e 33 apresentadas a seguir mostram o comportamento resiliente do solo puro e estabilizado com os teores de 10%, 20% e 30% de CBCA, respectivamente, para o modelo do MR em função da Tensão Desvio. Observa-se nas Figuras que com o aumento do teor de CBCA houve um aumento no valor do MR para todos os teores quando comparados com o solo puro.

Analisando os parâmetros do presente modelo, verificou-se que os coeficientes de correlação relativos ao modelo em função da tensão desvio não encontraram grande representatividade para nenhuma das amostras, ou seja, nem para o solo puro e nem para as misturas quando comparados com os demais modelos estudados nesta pesquisa.

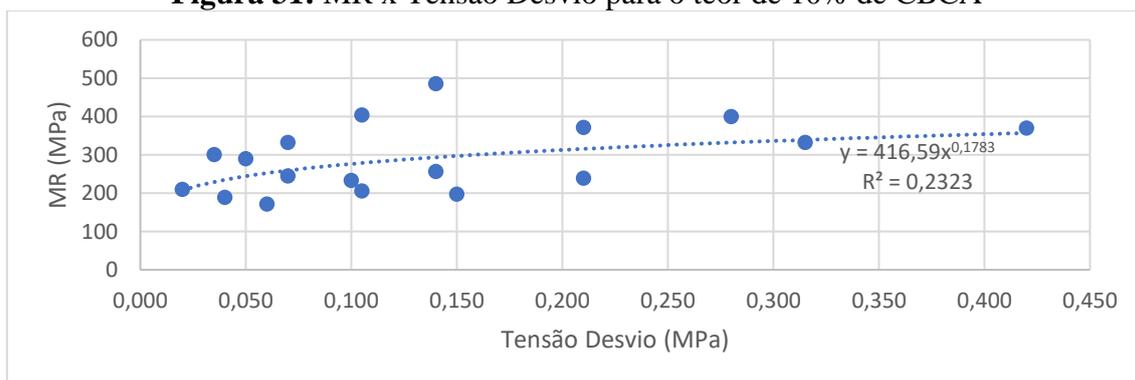
O módulo de resiliência é afetado pelas condições de carregamento, o estado de tensão, a natureza do solo e a natureza das misturas estabilizadas quimicamente. Dessa forma, os modelos clássicos podem não ser os mais indicados para representar misturas de solo com resíduos, onde as forças de interação química e mineralógica apresentam papel fundamental no comportamento das misturas (LUCENA, 2010). Este fato explica os valores baixos de R^2 encontrados neste modelo.

Figura 30: MR x Tensão Desvio para o solo puro

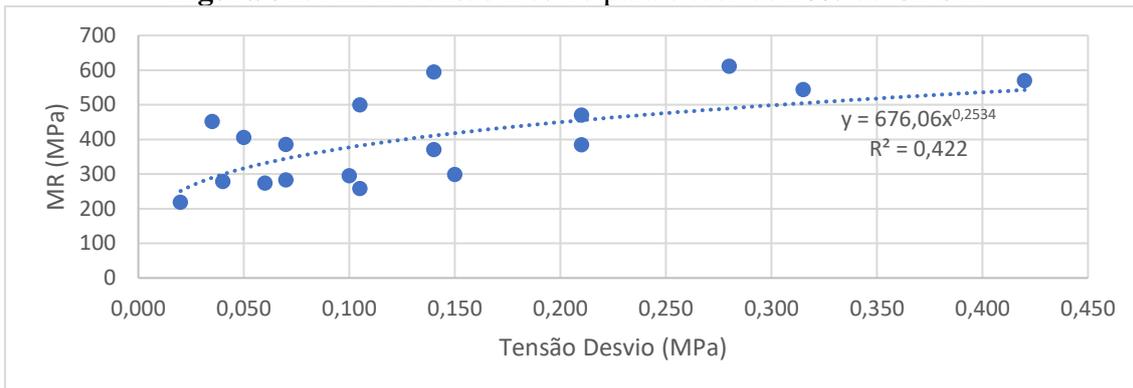


Fonte: Autoria Própria (2023)

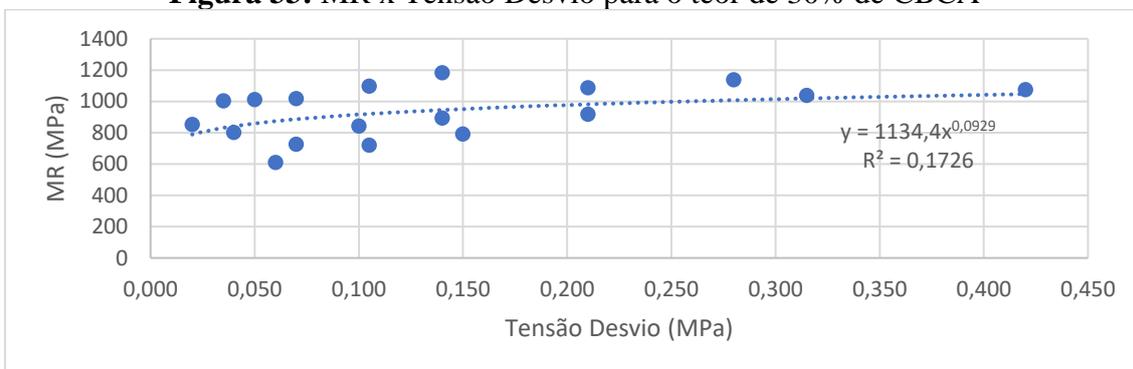
Figura 31: MR x Tensão Desvio para o teor de 10% de CBCA



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 32: MR x Tensão Desvio para o teor de 20% de CBCA

Fonte: Autoria Própria (2023)

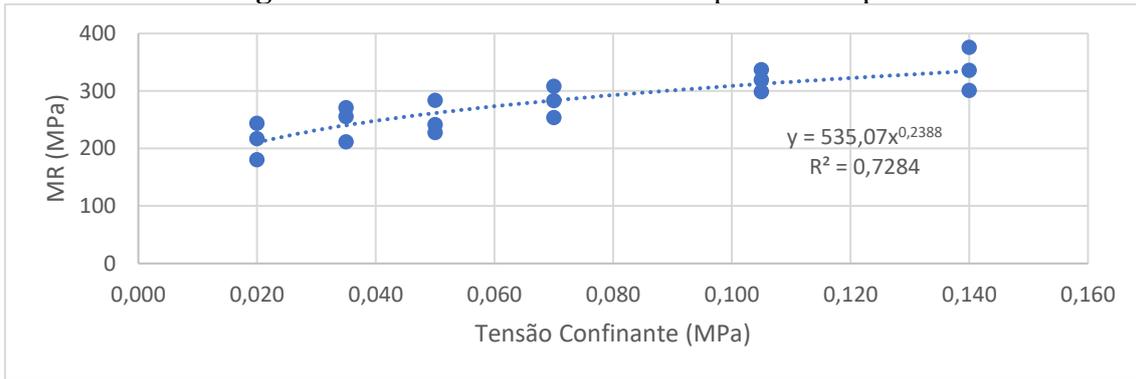
Figura 33: MR x Tensão Desvio para o teor de 30% de CBCA

Fonte: Autoria Própria (2023)

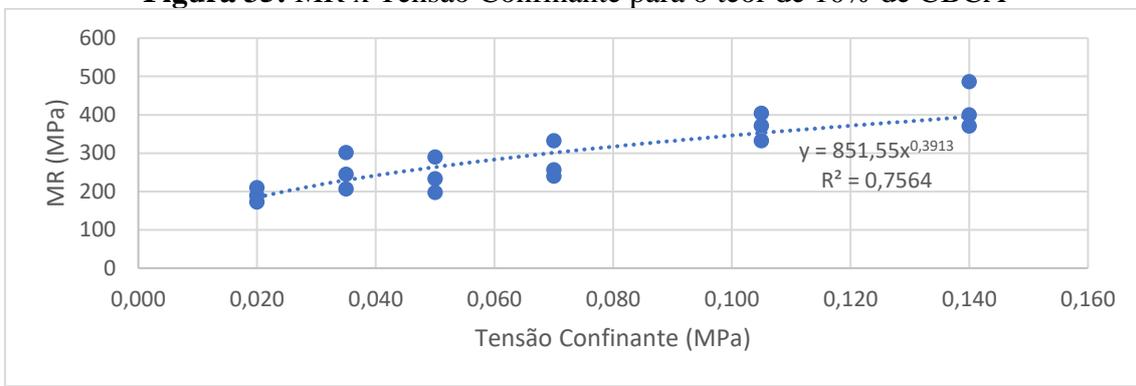
4.5.1.2 Modelo σ_3 – MR x Tensão Confinante

As Figuras 34,35,36 e 37 apresentadas a seguir mostram o comportamento resiliente do solo puro e estabilizado com os teores de 10%, 20% e 30% de CBCA, respectivamente, para o modelo do MR em função da Tensão Confinante. Observa-se nas Figuras que com o aumento do teor de CBCA houve um incremento no valor do MR para todos os teores quando comparados com o solo puro.

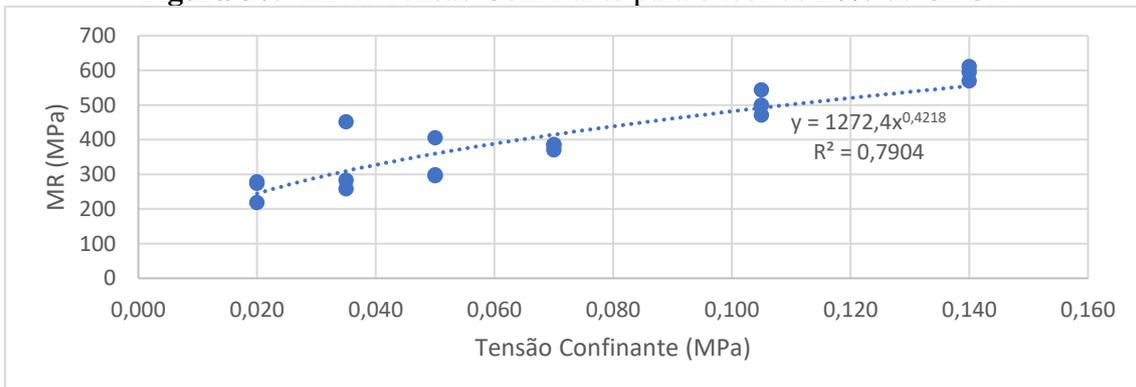
Pela análise deste modelo observa-se que o módulo de resiliência do solo e das misturas apresentaram melhor correlação com os valores de tensão confinante, onde se observou valores de R^2 acima de 0,65. Contudo, é evidente a influência, também, da tensão desvio, que será analisada em conjunto através do modelo composto a seguir. O presente modelo condicionado a tensão de confinamento apresentou resultados satisfatórios.

Figura 34: MR x Tensão Confinante para o solo puro

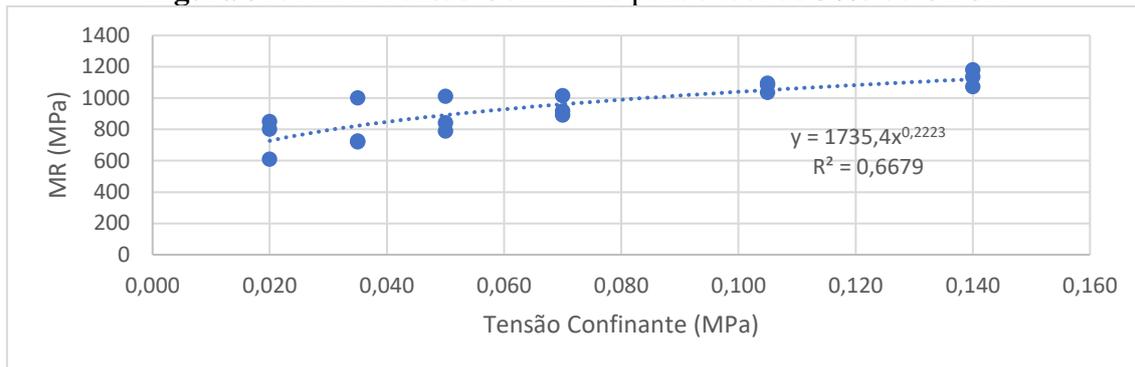
Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 35: MR x Tensão Confinante para o teor de 10% de CBCA

Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 36: MR x Tensão Confinante para o teor de 20% de CBCA

Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 37: MR x Tensão Confinante para o teor de 30% de CBCA

Fonte: Autoria Própria (2023)

4.5.1.3 Modelo Composto

As Figuras 38,39,40 e 41 apresentadas mostram o comportamento resiliente do solo puro e estabilizado com os teores de 10%, 20% e 30% de CBCA, respectivamente, para o modelo do MR em função da Tensão Confinante e Tensão Desvio. Observa-se nas Figuras que com o aumento do teor de CBCA houve um aumento no valor do MR para todos os teores quando comparados com o solo puro.

Pela análise do modelo observa-se que o MR do solo e das misturas sofrem maior influência da tensão confinante do que da tensão desvio. Os resultados de K_2 apresentaram valores decrescentes com acréscimo do teor de CBCA, contudo todos foram maiores que o valor do solo puro. Isso mostra que quanto maior o teor de CBCA menor a influência da tensão confinante no valor do MR. Todos os valores de K_3 foram negativos, evidenciando que o aumento da tensão desvio proporciona menores valores para o módulo de resiliência.

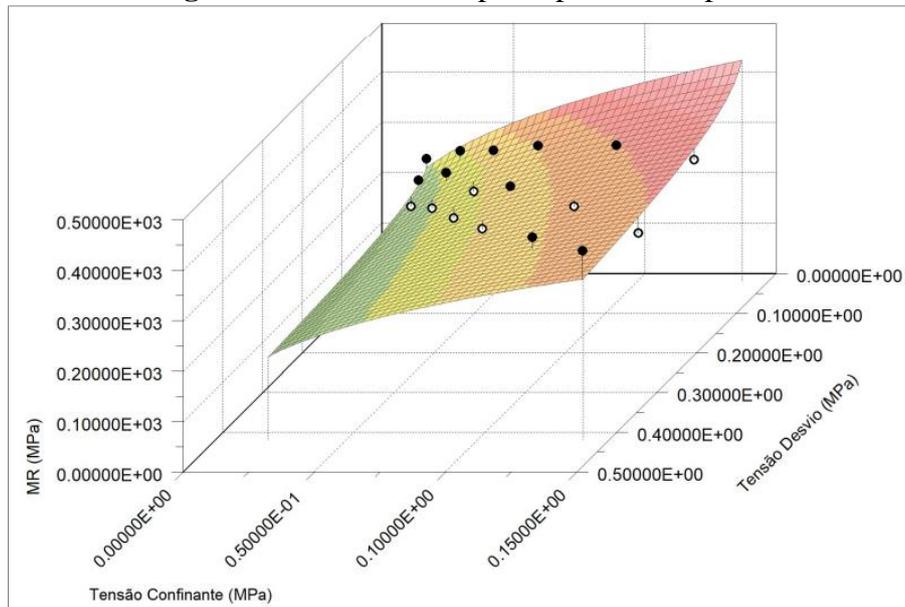
De todos os modelos investigados, o que melhor representou o comportamento resiliente do solo e das misturas foi o modelo composto chegando a valores de R^2 da ordem de 0,94, mostrando uma melhor correlação entre as variáveis, entretanto o modelo condicionado a tensão de confinamento também apresentou resultados satisfatórios.

Com os resultados de MR obtidos para esse modelo pode-se afirmar que as misturas vão apresentar boas respostas elásticas quanto às tensões sofridas. Ou seja, o solo estabilizado vai absorver maiores cargas sem sofrer deformações permanentes ou afundamento da trilha da roda no pavimento que poderá ser empregado.

Medrado (2009) explicou o comportamento não linear do comportamento elástico, das misturas dos solos no modelo composto. Segundo o autor, a irregularidade da superfície definida pelos valores de módulos está relacionada a sua natureza particulada,

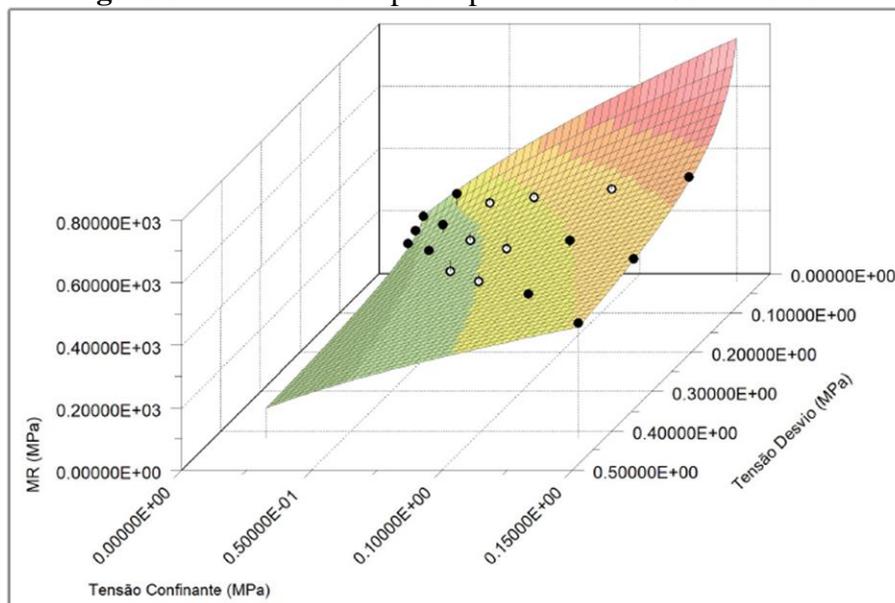
o que permite a variação do arranjo das partículas para condições diferentes de umidade, compactação e estado de tensões.

Figura 38: Modelo Composto para o solo puro

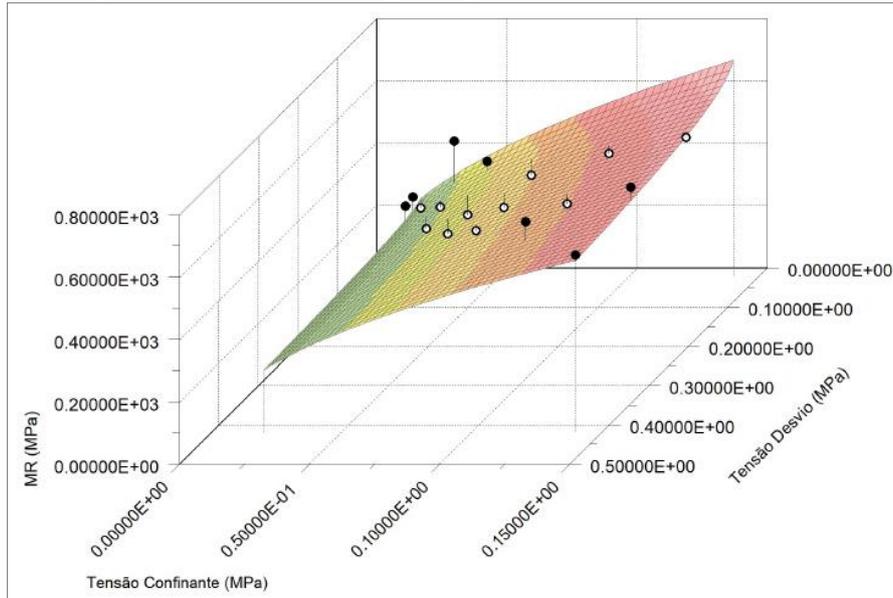


Fonte: Autoria Própria (2023)

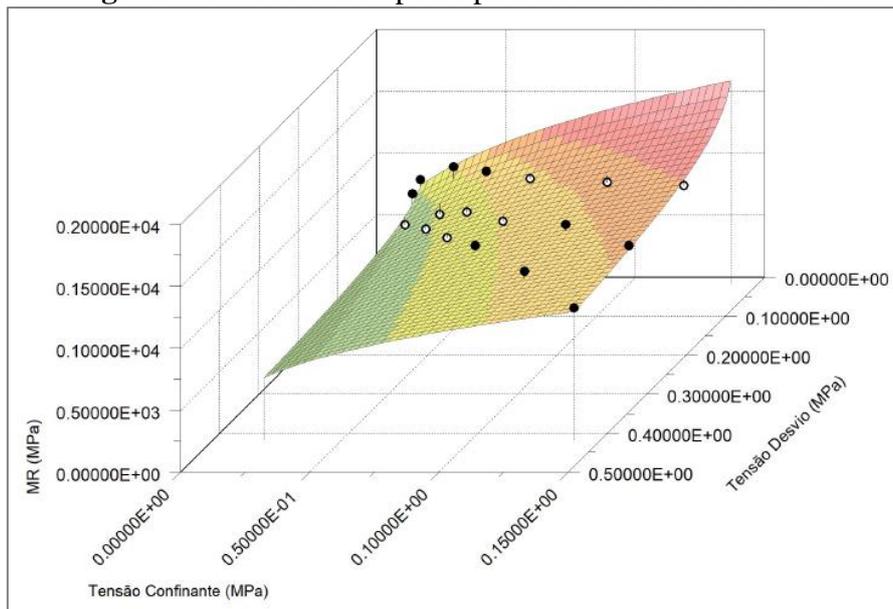
Figura 39: Modelo Composto para o teor de 10% de CBCA



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 40: Modelo Composto para o teor de 20% de CBCA

Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 41: Modelo Composto para o teor de 30% de CBCA

Fonte: Autoria Própria (2023)

4.6 Índice de Suporte Califórnia-ISC

Para o ensaio de ISC com as misturas, foi adotado o teor de 30% de CBCA, aos 28 dias de cura, justificado pelo fato de ser o teor que apresentou melhores resultados quando submetido aos ensaios de resistência à compressão simples, o ensaio foi realizado em triplicata. Com base nos ensaios de ISC, foi possível determinar os resultados apresentados na Figura 42 para solo puro e 30% de CBCA.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que a adição do teor de 30% de CBCA, no solo estudado, acarretou um aumento no valor do ISC. Esta adição no solo apresentou resultado 9 vezes maior do que a amostra de solo puro.

O aumento de 9 vezes alcançado no ISC do material em estudo é justificado pelas reações de álcali ativação entre os aluminossilicatos da CBCA e o NaOH, que geram estruturas amorfas tridimensionais, como N-A-S-H gel, responsável pela cimentação dos componentes da mistura (MIRANDA et al., 2022).

Patricio (2015) ao estudar solos modificados por adição de polímeros para uso em pavimentos rodoviários, observou em seus resultados que a adição de 6,4% do polímero gerou um aumento 9 vezes maior do ISC, do que as amostras de solo puro.

Analisando-se os resultados de ISC de acordo com a sua aplicação em camada de pavimentos rodoviários, verificou-se que a Norma DNIT ES 143/2010 estabelece critérios para utilização de base solo-cimento, onde o pavimento deverá suportar as solicitações impostas a ele durante sua vida de serviço.

Os solos empregados na execução de base de solo-cimento devem ser os provenientes de ocorrências de materiais, devendo apresentar as seguintes características quando submetidos aos ensaios DNERME 080/94, DNER-ME 082/94 e DNER-ME 122/94, conforme Tabela 18:

Tabela 18: Características do Solo

| Peneiras | Porcentagem | | Tolerância |
|------------------------|-------------|---------------|------------|
| | Norma | Solo Pesquisa | |
| 2½" | 100% | 100% | - |
| Nº 4 | 50 a 100% | 100% | ± 5% |
| Nº 40 | 15 a 100% | 100% | ± 2% |
| Nº 200 | 5 a 35% | 10,12% | ± 2% |
| Limite de liquidez | máximo 40% | 0% | |
| Índice de plasticidade | máximo 18% | 0% | |

Fonte: Autoria Própria (2023); DNIT (2010)

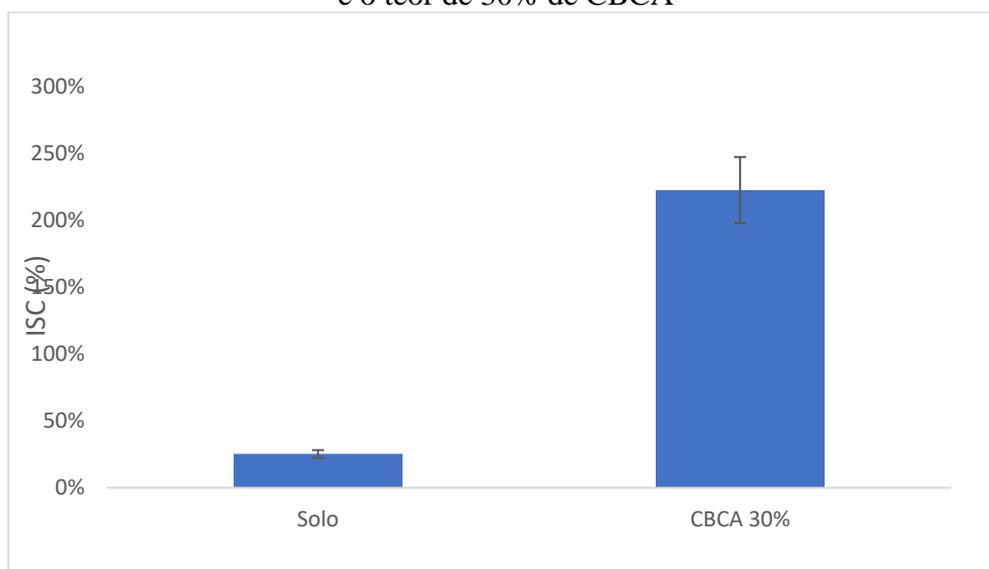
De acordo com os valores apresentados na Tabela 18 e especificações do DNIT o solo desta pesquisa se enquadra para utilização em base de solo cimento, pois atende todos os requisitos normatizados.

Segundo a referida normativa a mistura de solo-cimento deve apresentar o valor mínimo de 21 kg/cm², ou 2,1 MPa para a resistência à compressão aos 7 (sete) dias (DNER-ME 201/94).

O material estudado nesta pesquisa atingiu resistência à compressão de 2,9 MPa aos 28 dias de cura para o teor de 30% de CBCA. Podendo desta forma e nestas condições ser utilizado como material para base solo cimento.

As amostras foram testadas com 28 dias de cura pois as reações de álcali ativação em sistemas de baixo teor de cálcio são lentas a temperatura ambiente (CAICEDO, 2020; AZEREDO et al., 2019). Esse tempo de cura foi utilizado por Corrêa-Silva et al. (2022) na álcali ativação de escoria de alto forno; Miranda et al. (2020) em estudo em escala real de sub-base estabilizada com cinza volante alcalí ativada; Cristelo et al. (2013) no estudo da possibilidade de uso de cinza volante álcali ativada em jet-grouting, e Luo et al. (2022) na avaliação da resistência ao ataque de sulfato de solo estabilizado com uma cinza volante e escoria álcali ativada. Destaca-se que em todos os estudos citados o ativador alcalino utilizado foi hidróxido de sódio (NaOH), em sistemas de baixo teor de cálcio, mesmo ativador e sistema utilizados nesta pesquisa.

Figura 42: Resultados obtidos no ensaio de ISC – Proctor modificado, para o solo puro e o teor de 30% de CBCA



Fonte: Autoria Própria (2023)

Em relação aos resultados de expansão tanto o solo puro como o estabilizado não apresentaram expansão de nenhuma magnitude. De acordo com as especificações do DNIT, os valores de expansão para sub-leito, reforço de sub-leito e sub-base e base devem ser inferiores a 2%, 1% e 0,5%, respectivamente. Desse modo o solo puro e estabilizado com 30% de CBCA atendem as especificações do DNIT, pois apresentaram valores de expansão menores que as preconizadas, possibilitando o uso destes para qualquer uma das camadas do pavimento. A adição de CBCA não teve efeito quando comparado com o solo puro em termos de valores de expansão.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste tópico são apresentadas as principais conclusões e sugestões para novas pesquisas, que resultaram dos questionamentos surgidos ao término da execução do programa de investigação experimental desta pesquisa.

5.1 Conclusões

Com base nos ensaios realizados, as seguintes considerações finais foram aferidas:

A elevação do teor de precursor, cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) nas misturas ampliou a disponibilidade de aluminossilicatos para as reações de ativação alcalina que geraram estruturas amorfas tridimensionais, como N-A-S-H e C-A-S-H gel, responsável pela cimentação dos componentes da mistura. O aumento do teor de CBCA álcali ativada de 10% para 20% gerou um aumento de 15 vezes na resistência à compressão simples aos 28 dias, e aproximadamente 3 vezes na resistência à compressão simples após os ciclos de gelo e degelo. A comparação entre as misturas álcali ativadas com 20% e 30% de CBCA mostra um aumento de 1,4 vezes na resistência à compressão simples aos 28 dias de cura e após os ciclos de gelo e degelo. O aumento do teor entre as misturas álcali ativadas com 10% e 30% de CBCA mostra um aumento de 21 vezes na resistência à compressão simples aos 28 dias de cura e aproximadamente 4 vezes após os ciclos de gelo e degelo. O aumento na concentração do ativador alcalino, Hidróxido de sódio (NaOH), mostrou um ganho na resistência à compressão simples quando a concentração foi elevada de 4 mols/kg, para 6 mols/kg. Entretanto a concentração de 8 mols/kg gerou resistências inferiores a concentração de 6 mols/kg, sendo este último o teor ideal para o precursor estudado.

Em relação à influência do teor de CBCA álcali ativada nos resultados de resistência à compressão simples observou-se um incremento na resistência conforme aumento dos teores de CBCA. A adição de 30% da CBCA álcali ativada elevou os parâmetros de resistência mecânica em termos de 340% no Módulo de Resiliência (MR) e 9 vezes maior no valor do Índice de Suporte Califórnia (ISC) quando comparados ao solo puro.

As misturas estudadas apresentaram elevada durabilidade aos ciclos de gelo e degelo, pois, para todas as porcentagens de CBCA álcali ativada estudadas houve aumento da resistência à compressão simples nas amostras submetidas a este protocolo. Com a análise da recuperação mecânica do solo estabilizado com CBCA álcali-ativada

sujeito aos ciclos de gelo e degelo, verificou-se um pequeno incremento nos valores de resistência a compressão simples ao final do período de 28 dias de recuperação, possivelmente devido aos aluminossilicatos amorfos terem sido consumidos, ocorrendo a completa geopolimerização.

Os resultados das análises químicas mostraram a formação de N-A-S-H e C-A-S-H, produtos da reação de álcali ativação, responsáveis pela cimentação das misturas e conseqüentemente do aumento da resistência mecânica. A cura por 28 dias seguida pelos ciclos de gelo e degelo, gerou uma diminuição do halo amorfo entre os ângulos, de difração 15° - 32° (2θ), ligada a diminuição da fase amorfa devido ao seu consumo nas reações de álcali ativação anteriores. A baixa oferta de material amorfo justifica a baixa recuperação da resistência a compressão simples encontrada no período de cura pós ciclos de gelo e degelo. Logo, a análise da microestrutura das misturas permitiu a validação a técnica de álcali-ativação para estabilização de solos.

Os resultados possibilitam concluir que, para o solo estudado, a adição da CBCA álcali ativada é eficaz para ser utilizada como material estabilizante de camadas de pavimentos rodoviários. Os maiores valores de resistência mecânica foram evidenciados para as misturas compostas por 70% de solo e 30% de CBCA.

5.2 Sugestões

A partir dos resultados e conclusões obtidas e aqui discutidos segue abaixo algumas sugestões para futuros trabalhos:

Avaliar a possibilidade de uso da CBCA sem beneficiamento na ativação alcalina;

Investigar a durabilidade dos ciclos de molhagem e secagem de solo estabilizados com CBCA álcali ativadas;

Analisar o uso CBCA álcali ativada na estabilização de um solo argiloso;

Estudar a resistência à deformação permanente, resistência à tração e vida de fadiga de base estabilizadas com CBCA álcali ativada;

Realizar análise do ciclo de vida das misturas álcali ativadas;

Realizar ensaio de lixiviação nas misturas para avaliar a possibilidade de carreamento de contaminantes;

Simular uma estrutura de pavimento padrão para Paraíba dimensionada pelo Método MEDINA utilizando a mistura com o teor de 30% de CBCA álcali ativada como base de pavimento;

Construir um trecho experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**, Rio de Janeiro, 9 p., 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025 - Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio**, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16137: Ensaios não destrutivos – Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Determinação da massa específica de grãos de solos que passam na peneira de abertura 4,8mm**. Rio De Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2020.

ADHIKARI, S. **Mechanical Properties of Soil-RAP-Geopolymer for the Stabilization of Road Base/Sub-base**. 2017. 13f. Dissertação de mestrado - University of Louisiana at Lafayette, Summer, 2017.

ALAM, S.; DAS, S. K.; RAO, B. H. Strength and durability characteristic of alkali activated GGBS stabilized red mud as geo-material. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 932-942, 2019.

ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2252–2261, 2021.

ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; MENDES, P. C. D. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 82, p. 31-38, 2015.

ALMEIDA, G. B. de O. **Avaliação da Resistência à Compressão Simples de Misturas de**.pdf. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016.

ARAÚJO, M. T.; FERRAZZO, S. T.; CHAVES, H. M.; ROCHA, C. G.; CONSOLI, N. C. Mechanical behavior, mineralogy, and Microstructure of alkali-activated waster-based binder for a clayey soil stabilization. **Construction and Building Materials**. v. 362. e-129757. 2023.

AKARS, P. K.; GANESH, G.O.; MARATHE, S.; RAI, R. Incorporation of Sugarcane Bagasse Ash to investigate the mechanical behavior of Stone Mastic Asphalt, **Construction and Building Materials**, Volume 353, 2022, 129089, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129089>. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822027441>)

ASSI, L. N.; EDDIE DEEVER, E.; ZIEHL, P. Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 167, p. 372-380, 2018.

AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K.; ARAÚJO JR, A. G.; SILVA, C. A. Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na₂O e Na₂SiO₃. **Cerâmica** **63** (2017) 143-151.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2007.

BEAHLK, L. **Análise estrutural de pavimentos de baixo volume de tráfego revestidos com solo modificado com cal considerando ensaios laboratoriais e monitoramento de trechos experimentais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 2013.

BENAHMED, N. Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique: application aux phénomènes de liquéfaction et de mobilité cyclique. 2001. 351 f. École Nationale des Ponts et Chaussées, 2001.

BERNUCCI, L.B; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda. 2022.

BITTAR MARÍN, E. J.; CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. Effect of mellowing and coal fly ash addition on behavior of sulfate-rich Dispersive clay after lime stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 31, n. 6. 2018.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. **Pavimentos Rodoviários**. Almedina. Coimbra, Portugal. 2006.

BRUSCHI, G. J.; DOS SANTOS, C. P.; LEVANDOSKI, W. M. K.; FERRAZZO, S. T.; KORF, E. P.; SALDANHA, R. B.; CONSOLI, N. C. Leaching assessment of cemented bauxite tailings through wetting and drying cycles of durability test. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 59247-59262, 2022.

BRUSCHI, G.J. **Estabilização de rejeitos de mineração de bauxita por meio de um sistema ligante álcali-ativado de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e cal de carbureto**. 2020. 184 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

BRUSCHI, G. J.; SANTOS, C. P.; ARAUJO, M. T.; FERRAZZO, S. T.; MARQUES, S.; CONSOLI, N. C. Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical Study on Alkali-Activated Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, p. 06021007, 2021.

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: 28 de fev. 2022.

CAI, L. et al. Effect of binding materials on carbide slag based high utilization solid-wastes autoclaved aerated concrete (HUS-AAC): Slurry, physic-mechanical property and hydration products. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 188, p. 221 236, 2018.

CAICEDO, A. M. L.; MONCALEANO ACOSTA, C. J. ; CONSOLI, N. C. . Alkali-activated red ceramic wastes-carbide lime blend: An alternative alkaline cement manufactured at room temperature. **Journal of building engineering**, v. 65, p. 105663, 2023.

CASTALDELLI, V. N. **Estudo de geopolímeros utilizando cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. 87f. 2013.

CHAND, S. K.; SUBBARAO, C. Strength and Slake Durability of Lime Stabilized Pond Ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 19, n. 7, p. 601 608, 2007.

CHEN, C H et al. Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 3, p. 449–456, 2006. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/j.cemconres. 2005.12.010.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, Disponível em:>> <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/graos>>>, acessado em dezembro de 2022.

CONSOLI, N; VENDRUSCULO, M A; PRIETTO, P D M. Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 129, p. 96–101, 2013.

CONSOLI, N.C.; WINTER, D. LEON, H.B.; SCHEUERMANN FILHO, H.C. Durability, Strength, and Stiffness of Green Stabilized Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 144(9), p. 1-10, 2018.

CONSOLI, N. C. et al. Circular-Plate Load Tests on Bounded Cemented Layers above Weak Cohesive-Frictional Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental**

Engineering, v. 145, n. 10, p. 1–8, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002144.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, F; FONINI, A. Plate Load Tests on Cemented Soil Layers Overlaying Weaker Soil. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, p. 1846–1856, 2009b.

CONSOLI, N. C.; SILVANO, L. W.; LOTERO, A. SCHEUERMAN FILHO, H. C.; MONCALEANO, J.; CRISTELO, N. Key parameters establishg alkali activation effects on stabilized rammed Earth. **Construction on the Building Materials**. 345, e-128299. 2022.

CONSTANTINO, C. de S. **Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz**. 2018. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

CONSTANTINO, V. R. L. et al. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 490–498, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422002000300024&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>

CORDEIRO, G. C. et al. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement & Concrete Composites**, [s. l.], n. 30, p. 410–418, 9 jun. 2008.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of Calcination Temperature on the Pozzolanic Activity of Sugarcane Bagasse Ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 3301–3303, 2009a.

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. **Química Nova**, v. 32, n. 1, p. 1–14, 2009b.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of Mechanical Processing on Sugarcane Bagasse Ash Pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p. 41–49, 2017.

CORDEIRO, G. C.; ANDREÃO, P. V.; TAVARES, L. M. Pozzolanic Properties of Ultrafine Sugarcane Bagasse Ash Produced by Controlled Burning. *Heliyon*, v. 5, p. 1–6, 2019.

CORRÊA-SILVA, M. et al. Geomechanical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, p. 1–12, 2020. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122017.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal. 2011.

CRISTELO, N. et al. Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 48, p. 925–933, 2013. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.063.

DAASSI-GLI, C. A. P. **Estabilização de um solo granular com misturas de pó de vidro – cal de carbureto – hidróxido de sódio (NaOH)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 2020.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DANG, L. C.; KHABBAZ, H.; NI, B. J. Improving engineering characteristics of expansive soils using industry waste as a sustainable application for reuse of bagasse ash. **Transportation Geotechnics**, [S.L.], v. 31, p. 100637, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100637>.

DAVIDOVITS, J. Method for obtaining a geopolymeric binder allowing to stabilize, solidify and consolidate toxic or waste materials, 5349118, 1994.

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 134: Pavimentação – solo – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010a, 11 p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. ES 143: Pavimentação – Base de solo-cimento. Rio de Janeiro, 2010a, 10 p.

DRUMOND, M.A.M. **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**. 2019. 65 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 2917 2933, 2007.

FARIAS, E. R. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC/UFSC. Florianópolis, 2015.

FARO, V. P. **Carregamento lateral em fundações profundas associadas a solos tratados: concepção, provas de carga e diretrizes de projeto**. 2014. 349f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

FERREIRA, S. R. M.; PAIVA, S. C.; MORAIS, J. J. O.; VIANA, R. B.; Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. **Revista Matéria**, 2017.

FERREIRA, F. A.; DESIR, J. M.; LIMA, G. E. S. ; PEDROTI, L. G. ; CARVALHO, J. M. F. ; CAICEDO, A. M. L. ; CONSOLI, N. C. Evaluation of mechanical and microstructural properties of eggshell lime/rice husk ash alkali-activated cement. **Construction and building materials**, v. 364, p. 129931, 2023.

FERNANDES FILHO, P.; TORRES, S. M.; ANJOS JÚNIOR, R. H.; PORTO, A. A. V.; BARBOSA, N. P. Solubility of Silicate from Sugarcane Bagasse Ash in Alkaline Solutions. *Trans Tech Publication*, v. 517, p. 477-483, 2012.

FERNANDES, W. D. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e o método da AASTHO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2016.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SisPav**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ. 2007.

FRANCO, F. A. C. de P.; MOTTA, L. M. G. da. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecânico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: manual para utilização do método mecânico empírico Medina. [S.l.]: [DNIT], 2020. 78 p.

FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 490 496, 2011. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946511000266>>

GUO, X.; SHI, H.; DICK, W. A. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 142 147, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003>>

HASAN, H. et al. Remediation of Expansive Soils Using Agricultural Waste Bagasse Ash. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 143, p. 1368 1375, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816306087>>

HORPIBULSUK, S.; KAMPALA, A.; PHETCHUAY, C.; UDOMCHAI, A.; AND ARULRAJAH, A. Calcium carbide residue: A cementing agent for sustainable soil stabilization. **Geotech. Eng. J. SEAGS AGSSEA**, 46(1), 22–27, 2015.

HOY, M. et al. Recycled asphalt pavement fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 573, p. 19 26, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.078>

HUAT, B. K. et al. Utilization of Alkali-Activated Olivine in Soil Stabilization and the Effect of Carbonation on Unconfined Compressive Strength and Microstructure. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 1–11, 2017.

HUGHES, P.; GLENDINNING, S. Deep dry mix ground improvement of a soft peaty clay using blast furnace slag and red gypsum. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 205 216, 2004. D

HUGHES, P. N. et al. Use of red gypsum in soil mixing engineering applications. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - **Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 164, n. 3, p. 223 234, 2011.

IEA – INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, Disponível em:>>
<http://www.iaea.agricultura.sp.gov.br/out/index.php>>> acessado em janeiro de 2023.

JEGANDAN, S. et al. Sustainable binders for soil stabilisation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - **Ground Improvement**, [s. l.], v. 163, n. 1, p. 5361, 2010.

KARTHIK, A.; SUDALAIMANI, K.; VIJAYA KUMAR, C. T. Investigation on mechanical properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self curing bio-geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 149, p. 338 349, 2017.

KUA, T.-A. et al. Strength assessment of spent coffee grounds-geopolymer cement utilizing slag and fly ash precursors. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 115, p. 565575, 2016.

KUMAR, R.; KUMAR, S.; MEHROTRA, S. P. Towards sustainable solutions for fly ash through mechanical activation. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 52, n. 2, p. 157 179, 2007.

LA ROCHELLE, P. et al. Observational Approach to Membrane and Area Corrections in Triaxial Tests. **Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock**, p. 715–731, 2009. DOI: 10.1520/stp29110s.

LOMBARDI, J. H. C. **Desenvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Agregado Miúdo por Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar**. Universidade Tecnológica do Paraná. Apucarana, 2019.

LARROSA, C.; CAICEDO, A. M. L.; BASTOS, C. A. B.; SERVI, S. ; CONSOLI, N. C. Stabilisation of dredging material from Rio Grande Harbour with alkali-activated cements for the production of masonry elements. **Journal of materials in civil engineering**, v. 35, p. 04023018, 2023.

LI, Y. et al. Preparation of red mud-based geopolymer materials from MSWI fly ash and red mud by mechanical activation. **Waste Management**, [s. l.], v. 83, p. 202 208, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.019>>

LUZ, A. B. LINS, F. F. CETEM (2008) 107, disponível em <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2005-106-00.pdf>, acessado em 16/06/2022.

MARTINATTO, C. S. **Comportamento de um solo arenoso estabilizado com álcali ativação visando a pavimentação**. 2021. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de

Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

MASUED, G. G. Effect of sugar cane bagasse ash on the physical properties of subgrade layer. **Journal of Engineering and Sustainable Development**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 146 158, 2017.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3° ed. Editora Interciência. Rio de Janeiro – RJ. 2015.

MEDRADO, A.W., **Caracterização Geotécnica de Solo da Região Norte de Minas Gerais para Aplicação em Obras Rodoviárias**. Dissertação de Mestrado Profissional. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro preto, 2009.

MELLO, L. C. A.; ANJOS, M. A. S.; SÁ, M. V. V. A; SOUZA, N. S. L.; FARIAS, E. C. Effect of High Temperatures on Self-Compacting Concrete with High Levels of Sugarcane Bagasse Ash and Metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 1-17, 2020.

MENDES, M. e. et al. **A importância da qualidade da água reagente no laboratório clínico**. J Bras Patol Med Lab. v. 47. n. 3. p. 217-223. 2011.

MESQUITA, E. **Importância da água no laboratório**. Técnicas de aquecimento. Operações unitárias no laboratório. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/edsonmesquita/quimica-experimental-e-analitica/tipos-de-agua-em-laboratorio>. Acesso em: janeiro de 2023.

MIRANDA, T.; LEITAO, D.; OLIVEIRA, J.; CORREA-SILVA, M.; ARAÚJO, N.; COELHO, J.; FERNADEZ-JIMENEZ, A.; CRISTELO, N. Application of alkali-activated industrial wastes for the stabilisation of a full-scale (sub)base layer. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, 2020. ISSN 09596526. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118427.

MORAES FILHO, A. A. de. Análise do potencial da cinza de cana-de-açúcar em substituição parcial ao Cimento *Portland* para produção de placas cimentícias sustentáveis. Dissertação (mestrado) – UNICESUMAR - Centro Universitário de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas, 2019.

MORSY, M. S. et al. Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Binder. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 4333 4339, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s13369-014-1093-8>>

NICHOLSON, P. Soil Improvement and Ground Modification Methods. Oxford: Elsevier, 2015.

PACHECO-TORGAL, F. et al. Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes. [s.l.] : Elsevier, 2015.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Properties of tungsten mine waste geopolymetric binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 1201-1211, 2008.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 8, p. 1323-1329, 1999.

PAIVA, S. C. de; LIMA, M. A. de A.; FERREIRA, M. da G. de V. X.; FERREIRA, S. R. de M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. *Matéria* (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 21, n. 2, p. 437-449, jun. 2016.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. **Pavement Design and Materials**. New Jersey: John Wiley e Sons. 2007.

PARVEEN et al. Mechanical and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete incorporating alccofine at ambient curing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 180, n. 2018, p. 298-307, 2018.

PATRICIO, J. D. **Estudo de solos modificados por adição de polímeros para uso em pavimentos rodoviários**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2015.

PHANIKUMAR, B. R.. 2016. "Swell-consolidation characteristics of fibre-reinforced expansive soils." **Soils Foundations**. 56 (1): 138-143.

PHUMMIPHAN, I. et al. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash based geopolymer. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 877-891, 2016. Disponível em:
<<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2015.1132632>>

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª ed. São Paulo: Ed. Oficina de Texto, 2006.

POGGIALI, F. S. J. et al. Caracterização da cinza de bagaço de cana de açúcar contaminada com quartzo proveniente da lavoura. In: 20o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS 2012, Joinville, Brazil. Anais... Joinville, Brazil.

POURAKBAR, S. et al. Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement. **Transportation Geotechnics**, v. 3, p. 24-25, 2015.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Materials and Structures**, [s. l.], v. 47, n. 1-2, p. 11-25, 2014.

PUPPALA, A. J. Advances in ground modification with chemical additives: From theory to practice. **Transportation Geotechnics**, v. 9, p. 123-138, 2016.

RIOS, S et al. Structural performance of alkali-activated soil ash versus soil cement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 2, p. 1–30, 2016. ISSN 08991561. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001398.

RIBAS, J. **Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e sua aplicação em uma análise de custo/benefício**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2014.

ROZA, A. E. D. **Contribuição para projeto mecanístico – empírico de pavimentos asfálticos na região Norte do estado do Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 2018.

SALDANHA, R B; SCHEUERMANN FILHO, H C; MALLMANN, J E C; CONSOLI, N C; REDDY, K R. Physical–Mineralogical–Chemical Characterization of Carbide Lime: an environment-friendly chemical additive for soil stabilization. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 30, n. 6, p. 06018004, jun. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002283](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002283).

SANTIAGO, C. C. O Solo como Material de Construção. [s.l: s.n.]. 2001.

SANTAQUITERIA, C. R.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; SHIBSTED, J.; PALOMO, A. Clay reactivity: production of alkali activated cements. **Applied Clay Science**. v. 73, p. 11-16. 2013.

SANTOS, C. P. **Estabilização de Rejeito de Mineração de Ouro por Meio da AlcaliAtivação de Cal de Carbureto e Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SANTOS, C. P.; BRUSCHI, G. J.; MATOS, J. R. G.; CONSOLI, N. C. Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash. **Transportation geotechnics**, v. 32, p. 100704, 2022.

SARIDE, S.; AVIRNENI, D.; CHALLAPALLI, S. Micro-mechanical interaction of activated fly ash mortar and reclaimed asphalt pavement materials. **Construction and Building Materials**. 123 (2016) 424–435

SAUSSAYE, L. (2012). Traitement des sols aux liants hydrauliques: aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification. PhD thesis- Université de Caen.

SECO, A. et al. Sulfate soils stabilization with magnesium-based binders. **Applied Clay Science**, v. 135, p. 457–464, 2017.

SECCO, M. P. **Estudo da utilização de um cimento alcalino híbrido para estabilização de base de fundações superficiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 2020.

SHARMA, R. S.; PHANIKUMAR, B. R.; RAO, B. V. Engineering Behavior of a Remolded Expansive Clay Blended with Lime, Calcium Chloride, and Rice-Husk Ash. **Journal Of Materials in Civil Engineering**, [S.L.], v. 20, n. 8, p. 509-515, ago. 2008. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2008\)20:8\(509\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:8(509)).

SHEHAB, H. K.; EISA, A. S.; WAHBA, A. M. Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 126, p. 560 565, 2016.

SHEKHAWAT, P.; SHARMA, G.; SINGH, R. M. Strength behavior of alkaline activated eggshell powder and flyash geopolymer cured at ambient temperature. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 223, p. 1112 1122, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.325>

SINGH, N. B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of Bagasse Ash-Blended Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, v. 30 (9), p. 1485-1488, 2000.

SHIMOLA, K. A Study on Soil Stabilization using Sugarcane Bagasse Ash. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 2- S, p. 292295, 2018.

SILVA, J. C. **Estabilização de solos expansivos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2022.

SILVANI, C.; IBRAIM, E.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; FESTUGATO, L.; DIAMBRA, A.; CONSOLI, N. C. Sand-Fly Ash-Lime Blends: Mechanical Behavior under Multiaxial Stress Condition. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, p. 04022059, 2022. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004199](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004199).

SOUZA, A. J. **Avaliação da Adição de Polietileno Tereftalato (pet) no Controle da Expansão dos Solos**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2021.

SOUZA, M. T.; CESCNETO, F. R.; ARCARO S.; RAUPP-PEREIRA F.; NOVAIS DE OLIVEIRA, A. P. Caracterização de areias de quartzo do estado de Mato Grosso do Sul para aplicações industriais. **Cerâmica**, v. 60, p. 569-574, 2014.

SUKMAK, P.; HORPIBULSUK, S.; SHEN, S.-L. Strength development in clay fly ash geopolymer. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 40, p. 566 574, 2013. a. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812008264>>

TALIB, M. K. A.; NORIYUKI, Y. Highly organic soil stabilization by using sugarcane bagasse ssh (SCBA). **ISCEE**, [s. l.], v. 103, p. 1 8, 2017.

TEIXEIRA, W. **Comportamento mecânico de misturas solo, cal e RCD para uso em pavimentos** - Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2019.

THOMÉ, A et al. Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 42, p. 1569–1584, 2005.

TORRES-CARRASCO, M. **Reutilización de residuos vítreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos alcalinos. Activación, comportamiento y durabilidad**. Memória para optar al título de Doctor. Instituto de Ciências de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC). Madrid, 2017.

TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers, **Revista Ingeniería de Construcción**. Santiago, v.32, n. 2, pp 5-12, Aug. 2017. Access on 14 jan. 2023. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001>.

TRAN, V. D. Etudes de l'amélioration des sols par traitement à la chaux. Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master en Ingénieur Civil des Constructions, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2013.

VASCONCELOS, M. C. A. **Avaliação da Atividade Pozolânica da Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar Utilizando Métodos Físicos**. 2013. Tese (Mestrado em Engenharia) – Centro de Tecnologia e Geociência da Universidade Federal de Pernambuco.

WERKMEISTER, S.; DAWSON, A.R.; WELLNER, F. Permanent Deformation Behaviour of Granular Materials. **Road Materials and Pavement Design**, v. 6, n. 1, p. 31–51, 2005.

YADAV, A. L.; SAIRAM, V.; SRINIVASAN, K.; MURUGANANDAM, L. Synthesis and characterization of geopolymer from metakaolin and sugarcane bagasse ash, **Construction and Building Materials**, Volume 258, 2020, 119231, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119231>.

YANG, K.-H., JUNG, Y.-B., CHO, M.-S., TAE, S.-H. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO2 emissions from concrete. **J. Clean. Prod.** 2014.

ZHANG, M. et al. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 47, p. 1468 1478, 2013.

ZHANG, H. et al. Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 160, p. 707713, 2018.