



2024

Avaliação da substituição do cimento Portland por cinza de casca de arroz (CCA) em solos melhorados para utilização em camadas de base de pavimentos

Paula Lasalvia Schussler ^a; Daniel Anijar de Matos ^b

^a Aluna de Graduação em Engenharia Civil, paula.schussler@ufms.br

^b Professor Orientador, Doutor, daniel.matos@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

No início da década de 1940, o Brasil testemunhou um processo robusto de industrialização, impulsionado pelo declínio do transporte ferroviário e pelo crescimento da indústria automobilística. As malhas rodoviárias tornaram-se vitais para o transporte nacional, movimentando mais de 60% das cargas e 90% dos passageiros. No entanto, a condição inadequada dessas rodovias destaca a necessidade urgente de soluções eficazes e sustentáveis para sua manutenção, visando à preservação dos recursos naturais e à minimização dos impactos ambientais. Este estudo avaliou o desempenho de solos estabilizados com CCA para aplicação em camadas de base de pavimentos, comparando-os com solos estabilizados com cimento Portland, utilizando dosagens e condições equivalentes. A metodologia seguiu o método empírico das especificações do DNIT 142/2022-ES, com análise dos resultados conforme os limites normativos. Os resultados indicaram que a inclusão de cimento e CCA como estabilizadores de solo teve impactos significativos nas propriedades geotécnicas investigadas. O cimento melhorou a resistência mecânica do solo ao aumentar a coesão e resistência à compressão. Em contrapartida, os traços com CCA apresentaram aumento nos limites de liquidez e plasticidade, embora tenham reduzido a expansão do solo. Para validar a sustentabilidade e eficácia desses materiais em aplicações reais, são recomendadas investigações adicionais de longo prazo, considerando variáveis climáticas e de carga.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Pavimentação. Estabilização. Cinza da casca de arroz.

ABSTRACT

In the early 1940s, Brazil witnessed a significant industrialization process driven by the decline of railway transport and the growth of the automotive industry. Road networks became crucial for national transportation, handling over 60% of freight and 90% of passenger traffic. However, the inadequate condition of these highways underscores the urgent need for effective and sustainable solutions for their maintenance, aiming to preserve natural resources and minimize environmental impacts. This study evaluated the performance of soils stabilized with CCA for use in pavement base layers, comparing them to soils stabilized with Portland cement under equivalent dosages and conditions. The methodology adhered to the empirical method specified in DNIT 142/2022-ES, with results analyzed against regulatory limits. Findings indicated that incorporating both cement and CCA as soil stabilizers significantly impacted the investigated geotechnical properties. Cement enhanced soil mechanical strength by increasing cohesion and compression resistance. Conversely, CCA-treated soils showed higher liquid and plastic limits but reduced soil expansion. Long-term field studies are recommended to validate the sustainability and efficacy of these materials in real-world applications, accounting for climatic and loading variables.

Keywords: Sustainability. Pavement. Stabilization. Rice husk ash.

1. INTRODUÇÃO

No início da década de 1940, o Brasil experimentou um significativo processo de industrialização, que, aliado ao declínio do transporte ferroviário, contribuiu para a expansão da indústria automobilística. Esse fenômeno foi amplamente impulsionado durante o governo de Juscelino Kubitschek, por meio de sua política de crescimento conhecida como "50 anos em 5". Esta estratégia atraiu empresas do setor automobilístico para o país e, em contrapartida, houve um substancial investimento no meio de transporte rodoviário. Sob esse contexto, o transporte rodoviário adquiriu progressivamente forma, relevância e influência, emergindo como o meio preponderante em todo o território nacional (ROCHA, 2015).

Pessoni (2021) destaca que as malhas rodoviárias representam elementos fundamentais para o desenvolvimento nacional, dado que são responsáveis por mais de 60% do transporte de cargas e cerca de 90% do transporte de passageiros. No entanto, segundo os boletins de pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de 2014, a condição dessas rodovias tem sido ineficaz e insatisfatória.

Fochesato et al. (2017) apontam um inovador modelo de gestão e operação das rodovias federais e estaduais que tem sido implementado no Brasil desde o ano 2000, incorporando tecnologia e práticas de manutenção periódica. Esse modelo é conhecido como concessão, no qual a corresponsabilidade por novos investimentos no setor é transferida para a iniciativa privada. Os contratos de concessão frequentemente estipulam que, como contrapartida, a concessionária deve alocar recursos para melhorias nas vias, expansão da capacidade de tráfego, manutenção de pavimentos, sistemas de drenagem e construção de obras de arte.

Desse modo, visando a manutenção dos recursos naturais finitos como fonte de matérias-primas e, conseqüentemente, a minimização dos impactos ambientais, torna-se crucial o uso de resíduos sempre que viável (MOREIRA et al., 2019a). Diversas pesquisas têm sido conduzidas para explorar e investigar a viabilidade do aproveitamento destes insumos em projetos do ramo da Engenharia Civil, sendo sua aplicação na implantação de pavimentos uma das principais estratégias para reutilização de materiais reciclados em trabalhos geotécnicos em escala global (MOTTA, 2005; LUCENA et al., 2014; CARDOSO et al., 2016; MOREIRA et al., 2019b).

Em um empreendimento de pavimentação, seja ele para uma rodovia ou uma área urbana, é frequente que

os solos *in natura* disponíveis na região não apresentem propriedades adequadas ou mínimas para atender às especificações de projeto ou às normativas vigentes. Nesse sentido, uma opção viável é a estabilização do solo local, que pode ser alcançada por meio do aumento da energia de compactação ou pela incorporação de outros materiais, como cimento, cal e cinzas volantes (PRABAKAR, DENDORKAR e MORCHHALE, 2004; ALI, SABERIAN e LI, 2018).

Dentro deste contexto, merecem destaque as pesquisas que investigam a utilização de resíduos provenientes da produção agroindustrial, com especial atenção para a produção de arroz, considerando seus subprodutos e derivados, como a casca, a qual representa aproximadamente 23% do produto (DELLA, 2005). Segundo Viel (2012), a casca de arroz é um material fibroso com elevado teor de sílica e baixa degradabilidade, apresentando desafios quanto ao seu descarte final devido ao seu volume significativo. Além disso, suas características físico-químicas permanecem estáveis por longos períodos, acarretando impactos ambientais significativos.

Segundo Pereira et al. (2015), cerca de 20% da massa total de arroz colhida é composta por cinzas provenientes da casca. Os autores também mencionam que, em 2014, estima-se que a produção de arroz tenha atingido aproximadamente 12.501.317 toneladas. Tanto a casca de arroz quanto as cinzas resultantes de sua queima representam fontes potenciais de poluição e contaminação, podendo causar impactos adversos no meio ambiente e na saúde pública, especialmente quando não são geridas de forma adequada.

Costa (2017) aponta que a cinza da casca de arroz (CCA) apresenta propriedades pozolânicas que têm a capacidade de reduzir a liberação de calor decorrente da hidratação do cimento, prevenir a ocorrência da reação álcali-agregado e aumentar a resistência a cloretos e sulfatos, conferindo uma maior durabilidade ao concreto. Behak (2007) ressalta que a incorporação de CCA nos solos proporciona benefícios, como a melhoria das propriedades físicas e mecânicas, contribuindo assim para sua aplicação em camadas granulares de pavimentos. Ainda, Bonfante (2015) indica que o aumento significativo do Índice de Suporte Califórnia (ISC) em solos arenosos é atribuído à ocorrência das reações pozolânicas entre a sílica presente na CCA e a cal, resultando em uma melhor capacidade de suporte para o solo estabilizado.

Considerando a necessidade de avançar nas pesquisas relacionadas à utilização de materiais alternativos,

com o objetivo de introduzir novas opções no mercado e, conseqüentemente, possibilitar a redução de custos, a preservação do meio ambiente e a economia de energia (DAVID, 2006), o presente estudo buscou avaliar o desempenho de solos melhorados com CCA destinados à aplicação em camadas de base de pavimentos, estabelecendo uma comparação com solos melhorados com cimento Portland, utilizando as mesmas dosagens e condições.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Pavimentação vs. Sustentabilidade

A história da pavimentação está entrelaçada com o desenvolvimento da humanidade, abrangendo uma variedade de aspectos, incluindo o processo de colonização e expansão territorial, o alargamento do comércio, questões culturais, religiosas, urbanísticas e o desenvolvimento em geral (SANTOS, 2021). Bernucci et al. (2008) indicam que uma das mais antigas estradas pavimentadas registradas foi concebida para facilitar a passagem de trenós transportadores de cargas.

No Brasil, no início da década de 1940, o país atravessava um processo significativo de industrialização, o qual, associado ao declínio do transporte ferroviário, contribuiu para a expansão da indústria automobilística (GANDOLFI e CARDOSO, 2013). Esse crescimento foi notavelmente impulsionado durante o governo de Juscelino Kubitschek, com sua política de desenvolvimento "50 anos em 5", que atraiu empresas do setor automobilístico e promoveu um forte investimento no modal de transporte rodoviário. A partir desse contexto, o transporte rodoviário foi gradualmente adquirindo forma, relevância e influência, tornando-se o principal modal de transporte utilizado no território nacional (ROCHA, 2015).

Conforme delineado no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), o pavimento de uma rodovia é concebido principalmente como um sistema destinado a proporcionar uma superfície de rolamento uniforme e desobstruída, com a finalidade de facilitar a circulação de veículos de forma confortável, segura e economicamente viável. No entanto, apesar dos consideráveis benefícios que proporcionam à sociedade, é importante reconhecer que também podem ser responsáveis pela degradação ambiental observada. Segundo Santos (2021), ao construir uma rodovia, são conduzidos diagnósticos com o intuito de identificar possíveis danos ao meio ambiente; contudo, muitos projetos carecem de medidas mitigatórias prévias à implementação do

empreendimento, que objetivem reduzir os efeitos dos impactos ambientais negativos resultantes dessa ação.

Gencer et al. (2012) aponta que a produção global de asfalto atingiu a marca de 1,6 bilhão de toneladas, utilizando aproximadamente 1,52 bilhão de toneladas de agregados naturais provenientes de atividades extrativas, juntamente com 80 milhões de toneladas de betume. Segundo as observações de Ribeiro et al. (2018), essa problemática também está associada aos impactos na qualidade do ar atmosférico, uma vez que os processos prolongados de destilação necessários para a produção do ligante asfáltico contribuem para tais efeitos. Ainda, com o intuito de otimizar o desempenho dos solos que compõem as camadas granulares de uma estrutura de pavimento, tem-se adotado a inclusão de frações de aglomerantes, tais como cal e cimento (LEON, 2015).

2.2. Estabilização de solos com cimento Portland

Os solos são produtos resultantes dos processos intemperísticos que atuam sobre as rochas, manifestando-se através de decomposição química ou desintegração física. No âmbito da pavimentação, os solos desempenham um papel fundamental na constituição das camadas granulares, abrangendo o subleito, a sub-base, a base e o revestimento primário (DNIT, 2006).

Em determinadas circunstâncias, os solos *in natura* podem não apresentar propriedades adequadas ou suficientes para atender às especificações de projeto. Nesses casos, a estabilização do solo surge como uma alternativa viável para melhorar e ajustar as características do material disponível, permitindo assim o cumprimento dos requisitos estabelecidos pelo projetista (NÚÑEZ, 1991). Esse processo de estabilização pode ser conduzido por meio de abordagens mecânicas, as quais englobam procedimentos como compactação e ajuste granulométrico, métodos físicos que empregam calor e eletricidade, e métodos químicos, que implicam na introdução de aditivos químicos ao solo (LEON, 2015).

Gandolfi e Cardoso (2013) conceituam a estabilização química como o processo de adição de um ou mais produtos químicos, também denominados agentes estabilizadores, os quais, ao reagirem ou solidificarem-se com as partículas do solo, promovem sua aglomeração, vedação dos poros ou tornam-no repelente à água. Os autores ressaltam que as reações químicas resultantes dependem do agente estabilizador utilizado, embora o resultado final esperado seja sempre a coesão das partículas do solo. Cristelo (2011) destaca que, em projetos de

pavimentação rodoviária, é habitualmente adotada a utilização de cimento, cal, materiais betuminosos, resinas e carbonatos.

Santos e Caldeira (2021) esclarecem que o solo estabilizado com cimento é constituído por três componentes primários, cujas proporções são previamente determinadas através de ensaios laboratoriais, com o intuito de alcançar distintos níveis de durabilidade e resistência: solo, cimento e água. Adicionalmente, Cristelo (2011) salienta que a eficácia estabilizadora do cimento varia de acordo com sua concentração na mistura, resultando em um aumento da resistência mecânica devido à ação aglutinante do aditivo, especialmente em concentrações mais elevadas. Em contrapartida, em concentrações mais baixas, o cimento exerce uma influência predominante na alteração da fração argilosa do solo, particularmente na redução da plasticidade, podendo ou não ser acompanhada por um incremento na resistência mecânica.

Existem três categorias de misturas que apresentam variações em vários aspectos, incluindo o teor de cimento utilizado e as principais propriedades físicas: solo-cimento (SC), solo melhorado com cimento (SMC) e brita graduada tratada com cimento (BGTC). Pitta (1997) define o SC como a combinação de solo com uma quantidade apropriada de cimento para induzir seu endurecimento, sendo que o teor mínimo do agente estabilizador deve ser de 5% em massa. Geralmente, essa mistura é utilizada em situações que demandam maior resistência mecânica e é comumente aplicada em solos granulares. Além disso, o autor observa que o SMC apresenta características físicas e mecânicas inferiores em comparação com o SC, sendo que o teor de cimento deve variar entre 2% e 4% em massa. O aumento do teor de cimento aumenta o Índice de Suporte Califórnia (ISC), reduz a plasticidade e a variação volumétrica, potencializando seu empregado em projetos de pavimentação.

A estabilização do solo com cimento é a forma mais difundida de estabilização na atualidade, sendo apropriada para uma ampla variedade de tipos de solo, desde materiais granulares até materiais siltosos e argilosos (PEIXOTO, NUNES e AFFONSO, 2001; ZHANG e TAO, 2008; LEON, 2015). No entanto, apesar dos resultados positivos, Teixeira (2010) destaca as desvantagens ambientais associadas a essa prática, especialmente devido ao elevado consumo energético na produção da matéria-prima utilizada. Ainda, Maury e Blumenschein (2012) apontam que os principais impactos observados incluem a

contaminação do ar, água e solo, além da significativa emissão de materiais particulados.

Diante desse contexto, visando a preservação dos recursos naturais finitos como fonte de matéria-prima e, conseqüentemente, a redução dos impactos ambientais, diversas pesquisas têm sido conduzidas com o objetivo de explorar e avaliar a viabilidade da utilização de materiais alternativos na área da pavimentação (MOREIRA et al., 2019a; SILVA e SANTOS, 2021).

2.3. Estabilização de solos com CCA

O arroz se destaca como um dos cereais mais consumidos globalmente, com o Brasil ocupando a nona posição entre os maiores produtores mundiais, sendo que mais de 50% de sua produção está concentrada no estado do Rio Grande do Sul (LOPES et al., 2017). Como subproduto do processamento do arroz, destaca-se a casca do grão, cujo o volume corresponde a aproximadamente 20% do peso total do grão (WALTER, MARCHEZAN e AVILA, 2008). A incineração desse resíduo tem sido adotada como estratégia para reduzir seu volume e aproveitar sua capacidade energética, demonstrando-se uma opção atraente economicamente e viável tecnologicamente, além de gerar baixos impactos ambientais, pois o dióxido de carbono liberado durante a queima é reabsorvido pelo ciclo de carbono da biosfera terrestre (FOLLETTTO et al., 2005; LEON, 2015). Contudo, o processo de incineração resulta na formação de cinzas de casca de arroz (CCA), que representam outro subproduto residual (LEON, 2015). Dado o potencial pozolânico desse insumo, tem-se estudado sua viabilidade de aplicação na indústria cimenteira (LOPES et al., 2017).

Costa (2017) indica que a CCA possui a capacidade de mitigar a liberação de calor derivada da hidratação do cimento, prevenir a incidência da reação álcali-agregado e aprimorar a resistência aos cloretos e sulfatos, resultando em uma maior durabilidade do concreto. Ainda, Behak (2007) indica que a inclusão de CCA nos solos oferece vantagens, como aprimoramento das propriedades físicas e mecânicas, contribuindo assim para sua utilização em camadas granulares de pavimentação. Bonfante (2015) observa que o aumento do ISC em solos arenosos é notável devido à ocorrência das reações pozolânicas entre a sílica presente na CCA e a cal, resultando em uma capacidade de suporte aprimorada para o solo estabilizado.

Ali, Adnan e Choy (1992) destacam a possibilidade de reforçar as propriedades das misturas solo-cal com a adição de 6% a 12% de cinza da casca de arroz

(CCA). Os pesquisadores observaram um aumento significativo na resistência à compressão à medida que a quantidade de CCA aumenta, até atingir um ponto ótimo. Adicionalmente, apontaram que esse aumento está correlacionado com o incremento da temperatura de cura. Resultados semelhantes foram obtidos por Muntohar e Hantoro (2000), que evidenciaram um aumento na resistência ao estabilizar um solo argiloso com 10% de CCA e 10% de cal.

Rahman (1986) sugere que a inclusão exclusiva de CCA resulta em melhorias na resistência do solo principalmente devido aos efeitos de correção granulométrica, já que as reações pozolânicas não ocorrem devido à ausência de cal. Muntohar e Hantoro (2000) explicam que o aumento na resistência à compressão simples do solo é atribuído ao aumento do ângulo de atrito interno quando o solo é misturado com a CCA. Em contrapartida, Basha, Hashim e Muntohar (2003) constataram uma queda nos ISC nas misturas de solo silto-arenoso contendo CCA, o que implica que a CCA não é adequada como agente estabilizador isolado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

3.1.1. Solo

O solo coletado é proveniente do processo de implantação de um trecho na rodovia BR-419/MS, situado nos limites dos rios Verde e Negro, localizados no estado de Mato Grosso do Sul, conforme apresentado na Figura 1. Segundo a classificação de solos estabelecida pela Highway Research Board (HRB), utilizada em aplicações rodoviárias, verificou-se que o solo pertence à classe

A-4. Além disso, as demais características físicas do solo utilizado estão apresentadas na Tabela 1, acompanhadas das Normas empregadas durante o procedimento de caracterização, enquanto a Figura 2 apresenta a curva granulométrica correspondente.

Figura 1. Localização das amostras de solo



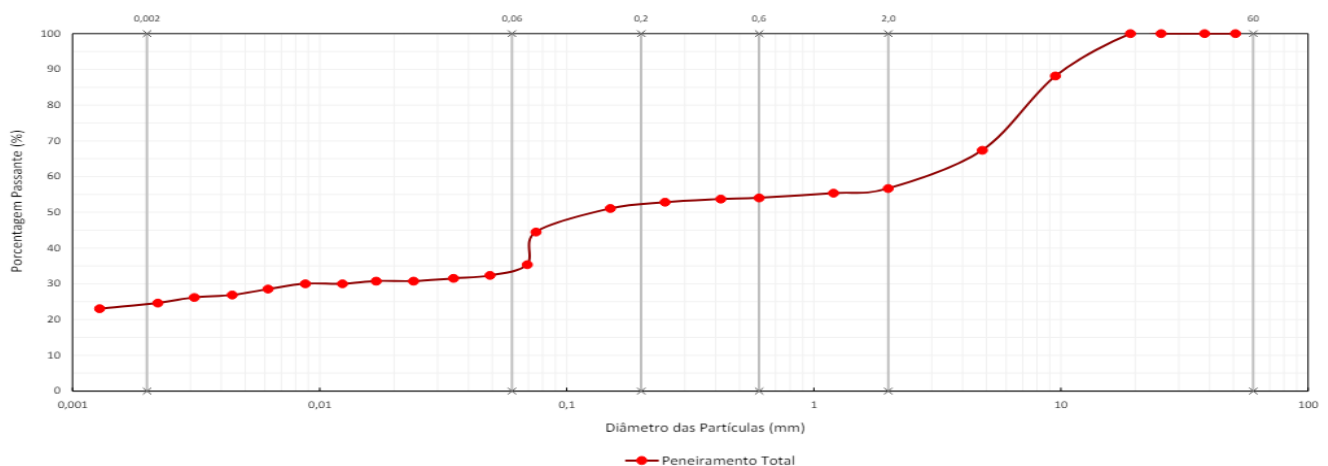
Fonte: Google Earth (2024)

Tabela 1. Características do solo

Característica	Norma	Resultado
Limite de liquidez	ABNT NBR 6459:2016	33%
Limite de plasticidade	ABNT NBR 7180:2016	26%
Índice de plasticidade	ABNT NBR 7180:2016	7%
Massa específica dos grãos do solo	ABNT NBR 6458:2017	2,771 g/cm ³
Classificação MCT	DNER-CLA 259/96	NA'

Fonte: Autor

Figura 2. Curva granulométrica do solo



Fonte: Autor

3.1.2. Cinza da casca de arroz (CCA)

A casca de arroz in natura foi fornecida pela empresa COTAG – Indústria e Comércio de Alimentos, situada em Sidrolândia, no estado de Mato Grosso do Sul. Após a coleta, os insumos foram submetidos a processos de combustão sem controle de temperatura, permanecendo nesse estado até a obtenção das cinzas. Posteriormente, essas cinzas foram submetidas ao processo de moagem com bolas metálicas, visando à redução do material a uma granulometria mais fina. Por fim, o material foi peneirado utilizando uma peneira de malha quadrada de tamanho N° 200 (0,075 mm), sendo separadas as porções passantes, correspondendo ao CCA a ser utilizado nas dosagens.

3.1.3. Cimento Portland

O cimento Portland utilizado é do tipo CP-II-F, caracterizado como quimicamente inerte devido à adição de fíler calcário. É relevante mencionar que as especificações do produto, conforme indicado pelo fabricante, satisfizeram os requisitos da Norma DNER-EM 036/95.

3.2. Métodos

A metodologia adotada seguiu o delineamento prescrito pela Norma DNIT 142/2022-ES, a qual estabelece diretrizes e critérios de aceitabilidade a serem seguidos na execução da camada de base de pavimento utilizando mistura de solo melhorado com cimento. Ainda, cumpre mencionar que este estudo adotou o método empírico de dimensionamento.

3.2.1. Traços e cura dos corpos de prova

Conforme as especificações do DNIT (2022), foram adotados os percentuais de 2% e 4% para a adição de cimento e CCA, em relação à massa total seca da mistura. Assim, os traços investigados compreenderam: (i) solo + 2% de cimento; (ii) solo + 4% de cimento; (iii) solo + 2% de CCA; e (iv) solo + 4% de CCA.

Os períodos de cura foram estabelecidos em 7 e 14 dias; no entanto, visando permitir uma comparação entre os resultados obtidos, foi conduzido um ensaio adicional para cada traço, sem aplicação do período de cura em câmara úmida. Ademais, para exemplificar, durante o período de cura de 7 dias, os corpos de prova foram inicialmente submetidos à câmara úmida por 3 dias. Posteriormente, seguindo as diretrizes da Norma DNIT 172/2016-ME, foram transferidos para tanques, onde permaneceram submersos por mais 4 dias, completando assim o tempo total de 7 dias de cura. Este procedimento está em conformidade com as diretrizes normativas, garantindo a adequada cura das amostras e as

condições ideais para o desenvolvimento das propriedades mecânicas necessárias.

3.2.2. Ensaio laboratoriais

3.2.2.1. Limites de Atterberg

a) Limite de liquidez

O limite de liquidez (LL) foi determinado conforme as diretrizes da ABNT NBR 6459:2016, cujo método preconizado envolve o aparelho de Casagrande. Acerca do procedimento, foram selecionados aproximadamente 200g de material passante da peneira N° 40, onde foram incorporadas pequenas porções de água destilada até alcançar uma massa plástica. Em seguida, essa mistura foi transferida para a concha de Casagrande, onde uma ranhura foi moldada em sua parte central. A sequência de golpes contra a base foi iniciada, sendo interrompida assim que as bordas inferiores da ranhura se uniram por cerca de 13 mm de extensão. Uma pequena porção foi retirada para a determinação da umidade higroscópica, conforme especificado na ABNT NBR 6457:2024. Após a validação dos pontos, traçou-se o gráfico semilogarítmico, no qual o eixo das ordenadas representou o número de golpes, enquanto o eixo das abscissas indicou os teores de umidade. O resultado final correspondeu à umidade associada ao número de golpes igual a 25.

Este estudo abrangeu a determinação do limite de liquidez para os quatro traços, conduzindo a avaliação de acordo com a normativa vigente, que prescreve um valor igual ou inferior a 25% (DNIT, 2022).

b) Limite de plasticidade

O ensaio de limite de plasticidade (LP) foi conduzido de acordo com a ABNT NBR 7180:2016. Para isso, aproximadamente 200g de material passante da peneira N° 40 foram selecionados e gradualmente misturados com pequenos incrementos de água destilada, visando alcançar uma pasta homogênea com consistência plástica. Posteriormente, uma pequena bola de aproximadamente 15g foi formada e, aplicando pressão adequada com a palma da mão, rolou-se a amostra sobre uma placa de vidro para adquirir uma forma cilíndrica. Para a obtenção dos teores de umidade individuais, retirou-se pequenas porções da amostra que alcançaram o diâmetro e comprimento especificados. O resultado final foi obtido pela média aritmética de três valores de umidade considerados satisfatórios.

Este estudo compreendeu a determinação do limite de plasticidade para os quatro traços, conduzindo a avaliação conforme a normativa vigente, que não

define critérios de aceitabilidade para este parâmetro (DNIT, 2022).

c) Índice de plasticidade

Caputo (1987) define o índice de plasticidade como a quantidade de água requerida para que o solo transite do estado plástico ao líquido, indicando a zona em que a amostra se encontra no estado plástico. Este parâmetro é determinado pela diferença entre os limites de liquidez e plasticidade, conforme expresso na Equação 1.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

Onde:

IP = Índice de plasticidade

LL = Limite de liquidez

LP = Limite de plasticidade

Assim, para a determinação do índice de plasticidade dos traços, foram seguidas as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 7180:2016. Além disso, o critério de aceitabilidade, conforme estabelecido pelo DNIT 142/2022-ES, requer valores iguais ou inferiores a 6%.

3.2.2.2. Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O método para determinar o Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi concebido em 1929 pelo engenheiro O. J. Porter, então diretor da Divisão de Materiais do Departamento de Estradas da Califórnia, com o propósito inicial de avaliar a capacidade de suporte dos solos para aplicação em camadas granulares de pavimentação (CAPUTO, 1987). Em conformidade com as orientações estabelecidas pelo DNIT 172/2016-ME, o presente estudo empregou os corpos de prova preparados previamente no ensaio de compactação, os quais foram adaptados para a inserção do extensômetro e, posteriormente, submetidos aos procedimentos de cura conforme delineado na seção 3.2.1. Após o período de cura, esses corpos de prova foram removidos dos tanques e levados ao ensaio de penetração na prensa, onde as leituras foram registradas em relação à penetração do pistão no solo e ao tempo. Os dados coletados foram representados no mesmo gráfico da curva de compactação, com os valores de ISC e expansão sendo plotados em escala apropriada ao longo do eixo das ordenadas, sendo o resultado final determinado com base na umidade ótima correspondente.

O ensaio de compactação foi executado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela norma DNIT 164/2013-ES – Método C. Dentro desse contexto, foram preparados cinco sacos de amostra

para cada mistura, cada um com uma massa aproximada de 6kg. Essas amostras foram submetidas a incrementos graduais de água e devidamente envolvidas, garantindo a homogeneização do material. Após compactar os corpos de prova, os valores de umidade e massa específica aparente seca foram calculados e serviram de fundamento para criar o gráfico da curva de compactação, onde a umidade ótima e a massa específica aparente máxima são destacadas como os pontos máximos, respectivamente, no eixo das abscissas e das ordenadas.

4. RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os resultados dos limites de Atterberg, bem como seu respectivo índice de plasticidade.

Tabela 2. Resultados dos limites de Atterberg

Traço	LL	LP	IP
Solo + 2% de cimento	33%	27%	6%
Solo + 4% de cimento	33%	27%	6%
Solo + 2% de CCA	34%	29%	5%
Solo + 4% de CCA	35%	31%	4%

Fonte: Autor

Os resultados apresentados sugerem que a inclusão de cimento não impactou significativamente nos limites de Atterberg, resultando apenas em um incremento de 1% no LP para ambos os traços, comparando com o solo *in natura*. Entretanto, para os traços com CCA, observou-se um aumento em ambos os indicadores, levando a um IP mais baixo. De acordo com Alcântara et al. (2017), as alterações observadas no LL podem ser atribuídas à influência dos finos como agentes formadores de pasta, devido ao aumento da área superficial específica e da capacidade de troca catiônica. Além disso, os autores sugerem que o aumento do LP provavelmente se deve à introdução de material fino na mistura e ao incremento da coesão interna do solo, particularmente considerando que, nessas condições de umidade, o solo pode estar sujeito à influência das forças capilares, resultando em um aumento da sua tensão efetiva.

É importante ressaltar que, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela Norma DNIT 142/2022-ES, o solo *in natura* não atende aos critérios de

aceitabilidade, uma vez que o valor do LL deve ser igual ou inferior a 25% e o IP deve ser igual ou inferior a 6%. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a inclusão de cimento e CCA levou à redução dos valores de IP. No entanto, não foi observada a mesma tendência para os valores de LL, os quais apresentaram um aumento discreto. Portanto,

os traços obtidos não estão em conformidade com os limites estabelecidos pela Norma, sugerindo a necessidade de ajustes, possivelmente com a substituição do solo.

Os resultados do ensaio de compactação para cada traço estão apresentados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3. Resultados do ensaio de compactação

Parâmetros	Solo + 2% de cimento (sem cura)	Solo + 2% de cimento (7 dias de cura)	Solo + 2% de cimento (14 dias de cura)	Solo + 4% de cimento (sem cura)	Solo + 4% de cimento (7 dias de cura)	Solo + 4% de cimento (14 dias de cura)	Solo + 2% de CCA (sem cura)	Solo + 2% de CCA (7 dias de cura)	Solo + 2% de CCA (14 dias de cura)	Solo + 4% de CCA (sem cura)	Solo + 4% de CCA (7 dias de cura)	Solo + 4% de CCA (14 dias de cura)
Massa específica aparente seca máxima	1,263 g/cm ³	1,267 g/cm ³	1,258 g/cm ³	1,235 g/cm ³	1,228 g/cm ³	1,227 g/cm ³	1,261 g/cm ³	1,270 g/cm ³	1,264 g/cm ³	1,218 g/cm ³	1,211 g/cm ³	1,215 g/cm ³
Umidade ótima	15,4%	15,2%	15,6%	16,1%	16,3%	16,3%	15,4%	15,1%	15,3%	16,5%	16,6%	16,5%

Fonte: Autor

Com base nos resultados apresentados na Tabela 3, verificou-se que a umidade ótima dos traços de Solo + 4% de cimento e Solo + 4% de CCA, em todos os períodos de cura, foi maior em comparação aos demais traços. Essa característica pode ser atribuída à maior quantidade de aglutinante presente nesses traços, pois são materiais que possuem alta afinidade por água e uma capacidade de retenção elevada (ALCÂNTARA et al., 2017).

Ainda, observou-se uma relação inversa entre as duas grandezas analisadas, isto é, os traços com umidade ótima mais alta apresentaram uma massa específica aparente seca máxima mais baixa. Fochesato (2017) e Lovato (2004) observaram a mesma tendência em suas pesquisas, atribuindo essa relação à floculação das partículas do solo devido à adição do aglutinante. Essa estrutura floculada resulta em maior resistência durante a compactação, reduzindo a massa específica aparente. Quanto ao aumento da umidade ótima, os autores indicam que o principal fator é o maior índice de vazios, que exige uma quantidade maior de água para preenchê-los.

Analisando conjuntamente os resultados dos limites de Atterberg e os ensaios de compactação, Tabelas 2 e 3, constatou-se que a adição de CCA resultou em aumento do LL e do LP, assim como aumento da umidade ótima e redução da massa específica, sendo esses efeitos mais evidentes nos traços de Solo + 4% de CCA. Alcântara et al. (2017) sugerem que esses fenômenos podem ser atribuídos a processos de natureza físico-química, como a floculação do solo devido à intervenção na sua dupla camada difusa, a coesão do solo influenciada por ações capilares, ou ainda à formação de pasta devido aos solos finos e à subsequente absorção de água.

Por fim, os resultados do ensaio DNIT 172/2016-ME revelaram um aumento significativo nos valores do ISC com o aumento do tempo de cura, especialmente para os traços curados por 14 dias, que mostraram melhor desempenho. Além das reações de hidratação do aglutinante, o tempo de cura permite processos naturais de secagem e compactação do solo, melhorando sua resistência. Essa combinação resulta em um solo aprimorado, com propriedades mecânicas superiores à medida que o tempo de cura é estendido (BASHA, HASHIM e MUNTOHAR, 2003). Logo

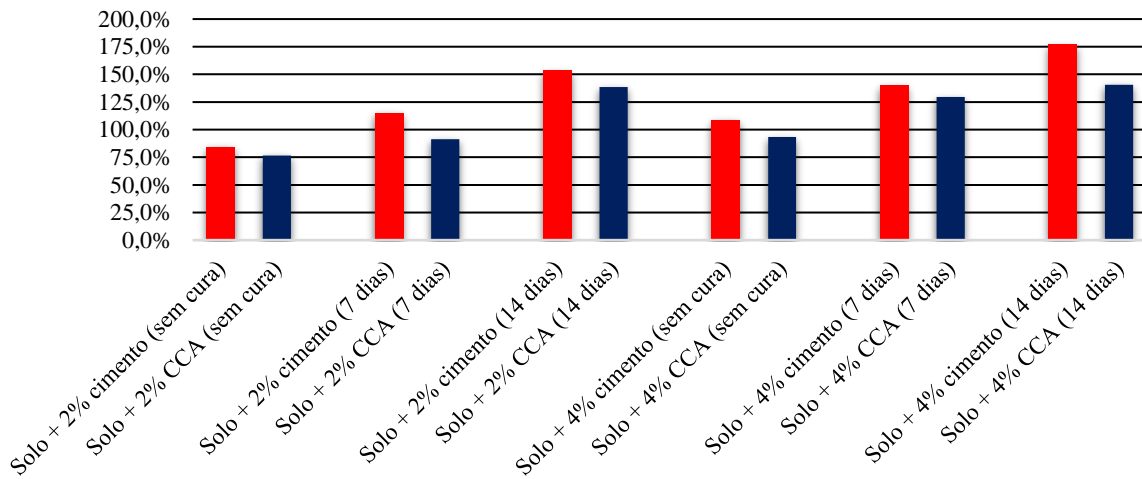
abaixo, a Tabela 4 oferece uma apresentação detalhada dos resultados, enquanto as Figuras 3 e 4 proporcionam representações visuais dos mesmos.

Tabela 4. Resultados de ISC e expansão

Parâmetros	Solo + 2% de cimento (sem cura)	Solo + 2% de cimento (7 dias de cura)	Solo + 2% de cimento (14 dias de cura)	Solo + 4% de cimento (sem cura)	Solo + 4% de cimento (7 dias de cura)	Solo + 4% de cimento (14 dias de cura)	Solo + 2% de CCA (sem cura)	Solo + 2% de CCA (7 dias de cura)	Solo + 2% de CCA (14 dias de cura)	Solo + 4% de CCA (sem cura)	Solo + 4% de CCA (7 dias de cura)	Solo + 4% de CCA (14 dias de cura)
ISC (%)	84,2	114,9	153,3	108,7	139,8	176,8	76,5	91,4	138,6	93,4	129,5	140,6
Expansão (%)	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4

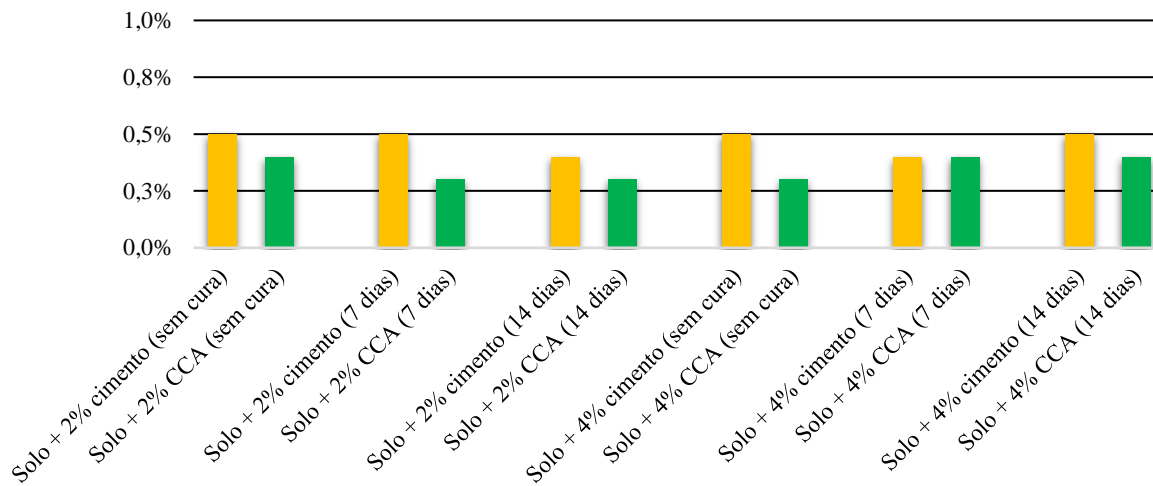
Fonte: Autor

Figura 3. Gráfico comparativo dos resultados de ISC



Fonte: Autor

Figura 4. Gráfico comparativo dos resultados de expansão



Fonte: Autor

Com base no comparativo apresentado na Figura 3, é evidente que todos os traços que incorporaram cimento demonstraram valores de ISC superiores em relação aos traços que utilizaram CCA como agente estabilizador. Essa observação sugere que o cimento foi mais eficaz na melhoria das propriedades mecânicas do solo estudado, possivelmente devido à sua capacidade de promover uma maior coesão e resistência à compressão (ÂLCANTARA et al., 2017). Esses resultados estão alinhados com a literatura existente, que frequentemente destaca o cimento como um agente estabilizador eficaz para solos, especialmente em aplicações geotécnicas e de engenharia civil (PRABAKAR, DENDORKAR e MORCHHALE, 2004; JAINES e ARNS, 2016). No entanto, é importante considerar que outros fatores, como a dosagem e o tipo de solo utilizado, também podem influenciar significativamente os resultados obtidos (MOTTA, 2005). Portanto, análises adicionais são necessárias para compreender completamente o impacto desses materiais na estabilização do solo e sua aplicabilidade em diferentes contextos.

Com base nos resultados apresentados sobre a expansão do solo, observou-se uma variabilidade significativa nos valores, oscilando entre 0,3% e 0,5%. Os traços estabilizados com CCA demonstraram resultados levemente inferiores em comparação aos traços com cimento, corroborando achados anteriores de Jaines e Arns (2016), que também encontraram expansões menores que 1%. Além disso, Silva, Bello e Ferreira (2020) investigaram o comportamento geotécnico de solos expansivos estabilizados com CCA e cal hidratada, concluindo que altos teores de CCA, cerca de 14%, são eficazes na redução da expansão do solo para valores próximos a 1,5%.

No que diz respeito à conformidade com os critérios estabelecidos pelo DNIT 172/2016-ME, é fundamental destacar que todos os parâmetros foram observados dentro dos limites prescritos, com especial ênfase nos resultados da expansão, os quais se aproximaram do limite máximo permitido de 0,5%.

5. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo revelam que a inclusão de cimento e CCA como estabilizadores de solo tem implicações significativas nas propriedades geotécnicas investigadas. O cimento demonstrou ser eficaz na melhoria da resistência mecânica do solo, atribuída à sua capacidade de aumentar a coesão e resistência à compressão. Em contraste, observou-se um aumento notável nos limites de liquidez e plasticidade nos traços com CCA. Além disso, o uso de CCA resultou em uma redução da expansão do solo, indicando resultados promissores para essa aplicação. Essas descobertas estão alinhadas com pesquisas anteriores que enfatizam o papel predominante do cimento como estabilizador, enquanto a CCA emerge como uma alternativa viável para mitigar impactos ambientais, considerando sua origem residual e potencial para reutilização em projetos de infraestrutura sustentável.

A aplicação prática desses resultados requer considerações cuidadosas sobre dosagem e tipo de solo, especialmente para garantir que os traços resultantes atendam aos padrões normativos estabelecidos, como aqueles definidos pela Norma DNIT 142/2022-ES. A necessidade de ajustes nas formulações de solo, possivelmente com a substituição ou combinação de materiais, é evidente para alcançar desempenho geotécnico ideal em diferentes condições de projeto. Além disso,

investigações adicionais são recomendadas para avaliar o comportamento a longo prazo desses materiais em campo, considerando variáveis climáticas e de carga, a fim de validar sua sustentabilidade e eficácia em aplicações reais.

6. REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, M. A. M.; SANTOS, L. P.; SOUZA, A.; LIMA, D. C. **Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-cal.** Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, 2017.
- ALI, F. H; ADNAN, A.; CHOY, C. K. **Geotechnical Properties of a Chemically Stabilized Soil from Malaysia Witch Rice Husk Ash as an Additive.** Geotechnical and Geological Engineering, Amsterdam, v. 10, n. 2, p. 117-134, 1992.
- ALI, M.; SABERIAN, M.; LI, J. **Transportation Geotechnics Soil stabilization with nonconventional eco-friendly agricultural waste material: An experimental study.** Transportation Geotechnics, v. 14, p. 52-60, 2018.
- BASHA, E. A.; HASHIM, R.; MUNTOHAR, A. S. **Effect of the Cement - Rice Husk Ash on the Plasticity and Compaction of Soil.** Electronic Journal of Geotechnical Engineering, p. 11, 2003.
- BEHAK, L. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal.** Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 2007.
- BEHAK, L. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal.** Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 2007.
- BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros.** ABEDA, Petrobras, Rio de Janeiro, 2008.
- BONFANTE, M. **Estabilização de um solo arenoso com cinza de casca de arroz e cal para a utilização de camadas de pavimento.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.
- BONFANTE, M. **Estabilização de um solo arenoso com cinza de casca de arroz e cal para a utilização de camadas de pavimento.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 6 ed., p. 219, 1987.
- CARDOSO, R.; SILVA, R. V.; de BRITO, J.; DHIR, R. **Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review.** Waste Management, vol. 49, p. 131-145, 2016.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE (CNT). **Anuário CNT do Transporte.** 2014. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br>>.
- COSTA, L. F. **Estudo do bagaço da cana de açúcar como material para construção civil no estado de Pernambuco: sistema ternário com metacaulim e cal hidratada.** Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2017.
- COSTA, L. F. **Estudo do bagaço da cana de açúcar como material para construção civil no estado de Pernambuco: sistema ternário com metacaulim e cal hidratada.** Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2017.
- CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) - Universidade de Minho, Portugal, 2011.
- DAVID, D. **Misturas Asfálticas Recicladas a Frio: Estudo em Laboratório Utilizando Emulsão e Agente de Reciclagem Emulsionado.** 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- DELLA, V.P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. **Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica.** Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Cerâmica industrial, p. 22-25, 2005.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER-EM 036: Cimento Portland – Recebimento e aceitação.** Rio de Janeiro, 1995.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO.** 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT-142/2022-ES: Pavimentação – Base de solo**

melhorado com cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2022.

_____. DNIT 164: **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

_____. DNIT 172: **Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459: **Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 7180: **Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2006.

FOCHESATO, E. D.; de CARVALHO, L. E. F.; PADILHA, V. Z.; VANINI, R.; SANTOS, S. **COMPORTAMENTO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM CCA, CAL E CIMENTO VISANDO APLICAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, Belém, 2017.

FOLLETO, E. L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R. S.; PORTUGAL Jr., U. L.; JAHN, S. L. **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz.** Quim Nova, Santa Maria, v. 28, n. 6, p. 1055-1060, 2005.

GANDOLFI, G. G.; CARDOSO, L. S. **Estudo da estabilização química do tipo solo-emulsão em solo tropical laterítico granular utilizado em obras de pavimentação.** Monografia (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

GENCER, M. N.; GENCER, S. E.; KARAPAHIN, M.; MEMIS, M.; KUNDURACIODLU, G. **A new method for hot recycling of asphalt.** In: 5TH EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, Istanbul, Turquia, 2012.

JAINES, L; ARNS, P. **Estabilização de um solo com cinza da casca de arroz para a utilização em camadas de pavimento.** Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, p. 19, 2016.

LEON, H. B. **Estabilização de solos lateríticos: Uma alternativa para os resíduos de cinza da casca de arroz.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

LOPES, E. R., MEDINA, A. L., RIBEIRO A. S., BRANDALISE, J. N., NUNES, A. M. **Caracterização elementar da casca de arroz e suas cinzas por MIP OES após decomposição ácida com sistema de refluxo.** Quim. Nova, Rio Grande do Sul, v. 40, n. 9, p. 1009-1017, 2017.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.** 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LUCENA, L. C. de F. L.; JUCA, J. F. T.; SOARES, J. B.; MARINHO FILHO; P. G. T. **Use of wastewater sludge for base and subbase of road pavements.** Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 33, p. 210-219, 2014.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente.** Sustentabilidade em Debate, Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, 2012.

MOREIRA, E. B.; BALDOVINO, J. de J. A.; IZZO, R. L. dos S.; de ALMEIDA, J. L.; MOREIRA, F. E. B.; BORDIGNON, V. R.; TEIXEIRA, W.; PERRETTO, F. **Influência da adição de cal e cinza de casca de arroz nas propriedades físicas de um solo silto-arenoso sedimentar.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 5, n. 12, p. 31107-31115, 2019b.

MOREIRA, E. B.; BALDOVINO, J. de J. A.; IZZO, R. L. dos S.; ROSE, J. L. **Impact of Sustainable Granular Materials on the Behavior Sedimentary Silt for Road Application.** Geotechnical and Geological Engineering, p. 1-17, 2019a.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MUNTOHAR, A. S.; HANTORO, G. **Influence of Rice Husk Ash and Lime on Engineering Properties of a Clayey Subgrade.** Electronic Journal of Geotechnical Engineering, p. 12, 2000.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

PEIXOTO, R. A. F.; NUNES, F. P.; AFFONSO, H. M. M. **Estudo da influência do teor de cimento na**

- resistência mecânica de misturas em solo-cimento aditivado.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30. 2001, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: Conbea, 2001.
- PEREIRA, A. M.; SILVA, C. A. R.; QUEIROZ, D. C. A.; MORAES, M. J. B.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. **Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz.** Revista Matéria, v. 20, n. 1, p. 227-238, 2015.
- PESSONI, H. R. **Utilização de material fresado na composição de camadas granulares de pavimentos flexíveis.** 2021. Tese – Engenharia de Transportes da Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás, Aparecida de Goiânia, 2021.
- PITTA, M. R. **Dimensionamento de pavimentos com camadas estabilizadas com cimento.** São Paulo: Associação Brasileira Cimento Portland – ABCP, ed. 4, São Paulo, 1997.
- PRABAKAR, J.; DENDORKAR, N.; MORCHHALE, R. K. **Influence of fly ash on strength behavior of typical soils.** Construction and Building Materials, v. 18, n. 4, p. 263-267, 2004.
- RAHMAN, M. A. **EFFECTS OF CEMENT-RICE HUSK ASH MIXTURES ON GEOTECHNICAL PROPERTIES OF LATERITIC SOILS.** Soils And Foundations: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 27, n. 2, p. 61-65, 1987.
- RIBEIRO, J. P.; BARBOSA, L. M.; BRANCO, V. T. F.; CAVALCANTE, R. M. **Avaliação da emissão de poluentes atmosféricos durante os processos de usinagem, transporte e aplicação de misturas asfálticas em ambiente urbano.** In: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado, Rio Grande do Sul, p. 12, 2018.
- ROCHA, C. F. **O Transporte de Cargas no Brasil e sua importância para a economia.** Monografia (Graduação) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2015.
- ROCHA, C. **O TRANSPORTE DE CARGAS NO BRASIL E SUA IMPORTÂNCIA PARA A ECONOMIA.** Monografia (Ciências Econômicas) – Universidade Regional do Estado do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, p. 71, 2015.
- SANTOS, C. C. S. V. **Sustentabilidade na pavimentação rodoviária.** Trabalho de conclusão de curso – Centro Universitário UNIRB, Arapiraca, Alagoas, 2021.
- SANTOS, D. S. C. dos; CALDEIRA, P. C. **Estabilização de solo - Cimento para base de pavimento de rodovia em São Luís - MA.** Revista de Engenharia e Tecnologia, Ponta Grossa, v. 13, n. 1, 2021.
- SILVA, J. A.; BELLO, M. I. M. C.; FERREIRA, S. R. M. **Comportamento geotécnico de um solo expansivo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal hidratada.** Journal of Environmental Analysis and Progress, V. 05, N. 02, p. 232-256, Pernambuco, 2020.
- SILVA, M. V. D. da; SANTOS, R. O. G. **Uso de materiais alternativos em camadas de pavimentos asfálticos: uma análise bibliográfica.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, ed. 05, v. 06, p. 67-82, 2021.
- TEIXEIRA, C. C. R. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE LIGANTES À BASE DE SÓDIO E CINZAS VOLANTES NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS - COMPARAÇÃO COM SOLUÇÕES TRADICIONAIS.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2010.
- VIEL, W. B. **Uso de cinza de casca de arroz e de eucalipto na composição de um vidro cru.** Trabalho de Conclusão de Estágio (Curso de Tecnologia em Cerâmica e Vidro) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2012.
- WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. D. **Arroz: composição e características nutricionais.** Ciência Rural Ciência Rural, Santa Maria, Rio Grande do Sul, v. 38, n. 4, 2008.
- ZHANG, Z.; TAO, M. **Durability of Cement Stabilized Low Plasticity Soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p. 203-213, 2008.