

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUÍZA DOTTA SCARRONE

**ADIÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO ALTERNATIVA PARA A
ESTABILIZAÇÃO BETUMINOSA EM SOLOS ARGILOSOS**

**Alegrete
2023**

LUÍZA DOTTA SCARRONE

**ADIÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO ALTERNATIVA PARA A
ESTABILIZAÇÃO BETUMINOSA EM SOLOS ARGILOSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: D. Sc. Jaelson Budny

**Alegrete
2023**

LUIZA DOTTA SCARRONE

**ADIÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO ALTERNATIVA PARA A ESTABILIZAÇÃO
BETUMINOSA EM SOLOS ARGILOSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. JAELSON BUDNY - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. DIEGO ARTHUR HARTMANN - UNIPAMPA

Prof. Me. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **DIEGO ARTHUR HARTMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 18:46, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JAELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 22:55, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 16:23, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1047444** e o código CRC **922E529B**.

RESUMO

Localizado na região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, o município de Alegrete tem sua economia baseada no setor agropecuário, assim, a falta de qualidade das estradas vicinais interfere diretamente na economia local, visto que vias em situação de degradação consomem mais combustível, desgastam os veículos responsáveis pelo transporte das cargas e dificulta o fluxo dos produtos. Além disso, estradas não-pavimentadas e sem qualquer tipo de tratamento se encontram mais sujeitas a ação da água, vento e à passagem sucessiva de cargas. Dentre as alternativas para melhoria dessas vias, tem-se a estabilização betuminosa como uma opção atrativa, visto sua execução simplificada e bons resultados, podendo ser considerada uma "pavimentação" de baixo custo. Porém, a aplicação da técnica é limitada quando se trata sobre solos mais finos, pois apresenta dificuldades da homogeneização da mistura e posterior compactação em pista. Desse modo, a cinza da casca de arroz se apresenta como um aditivo para viabilizar a aplicação da estabilização betuminosa em solos argilosos, visto que esta tem a capacidade de reduzir a plasticidade de solo e colaborar com a trabalhabilidade da mistura, isto aliado ao fato da abundância do material na região, visto que é resíduo gerado pelas beneficiadoras de arroz, e não possui valor comercial. Os materiais utilizados foram: solo de características argilosas, classificado como CH e A-7-5, pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e Transportation Research Board (TRB), respectivamente, emulsão asfáltica de ruptura lenta e cinza da casca de arroz sem temperatura de queima controlada. Ao unir a cinza da casca de arroz à mistura de solo e emulsão asfáltica foi possível obter uma melhora significativa da trabalhabilidade da mistura, fato esse que se consolida como o maior ganho da presente pesquisa, além de um incremento de 23,3% na resistência à compressão simples em comparação ao solo estabilizado apenas com emulsão asfáltica. Em adição à isso, foi observado o ganho de resistência à ação da água dos corpos de prova de solo, emulsão asfáltica e cinza da casca de arroz frente às demais apresentações.

Palavras-chave: estabilização de solos; emulsão asfáltica; cinza da casca de arroz;

estradas vicinais; solo argiloso.

ABSTRACT

Located in the West Frontier region of Rio Grande do Sul, the city of Alegrete has its economy based on the farming sector, therefore, the lack of quality of the side roads directly interferes on the local economy, since roads in a degradation situation consume more fuel, wear out the vehicles responsible for transporting loads and interfere with the flow of products. In addition, unpaved roads without any type of treatment are more vulnerable to the action of water, wind and the successive passage of truckloads. Among the alternatives for improving these roads, bituminous stabilization is an interesting option, given its simplified execution and positive results, being considered a low-cost "paving". However, the application of the technique is limited when dealing with clayey soils, as it presents difficulties in homogenizing the mixture and subsequent compaction on the road. Thereby, rice husk ash is presented as an additive to enable the application of bituminous stabilization in clayey soils, since it has the capacity to reduce soil plasticity and collaborate with the malleability of the mixture, this combined with the fact that there is abundance of the material in the region, since it is a debris generated by rice mills, and has no commercial value. For the present work, the following were used: soil with clayey characteristics, classified as CH and A-7-5, by the Unified Soil Classification System (USCS) and Transportation Research Board (TRB), respectively, cationic asphalt emulsion and rice husk ash without controlled burning temperature. By adding rice husk ash to the mixture of soil and asphalt emulsion, it was possible to obtain a significant improvement in the malleability of the mixture, a fact that consolidates as the greatest gain of the present research, in addition to an increase of 23.3% on simple compressive strength compared to soil stabilized only with asphalt emulsion. In addition, it was observed a gain in resistance to water action of the soil, asphalt emulsion and rice husk ash specimens compared to the other presentations.

Keywords: soil stabilization; asphaltic emulsion; rice husk ash; roads; clayey soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de curvas granulométricas.	16
Figura 2 – Filme betuminoso sobre o solo (micrografia ampliada 200 vezes).	23
Figura 3 – Processo de ruptura da emulsão asfáltica.	24
Figura 4 – Fluxograma do programa experimental	27
Figura 5 – Local da coleta do solo	28
Figura 6 – Procedimento de coleta do solo	28
Figura 7 – Ensaio de sedimentação e peneiramento fino	30
Figura 8 – Análise granulométrica	31
Figura 9 – Ensaio de massa específica dos grãos	32
Figura 10 – Ensaio de limite de liquidez	32
Figura 11 – Mistura com solo e cinza da casca de arroz	33
Figura 12 – Preparação das amostras para armazenamento.	39
Figura 13 – Corpos de prova moldados	39
Figura 14 – Prensa para realização dos ensaios	41
Figura 15 – Curvas de compactação	42
Figura 16 – Mistura solo e emulsão asfáltica: (a) sem adição de CCA; (b) com adição de CCA.	44
Figura 17 – Resistência à compressão simples	45
Figura 18 – Amostras imersas por 24 horas: solo referência e solo+CCA	45
Figura 19 – Amostras imersas por 24 horas: solo+EA e solo+EA+CCA	46
Figura 20 – Módulo de elasticidade secante (E50)	47
Figura 21 – Curvas tensão x deformação	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos de plasticidade segundo diversas fontes	26
Tabela 2 – Caracterização do solo	29
Tabela 3 – Análise granulométrica	30
Tabela 4 – Fator de correção.	35
Tabela 5 – Aplicação do módulo de riqueza (k).	36
Tabela 6 – Dosagem de resíduo asfáltico	37
Tabela 7 – Moldagem dos corpos de prova	40
Tabela 8 – Umidade ótima	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM - *American Society for Testing and Materials*
CAP - cimento asfáltico de petróleo
CAUQ - concreto asfáltico usinado a quente
CBUQ – concreto betuminoso usinado a quente
CCA - cinza da casca de arroz
CBR - *California Bearing Ratio*
CP - corpo-de-prova
EA - emulsão asfáltica
IP - índice de plasticidade
LL - limite de liquidez
LP - limite de plasticidade
PET - politereftalato de etileno
PMFA - pré misturados a frio de granulometria aberta
PMQ - pré misturados a quente
RCS - resistência à compressão simples
RL-1C - emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta
RL - emulsão asfáltica de ruptura lenta
RM - emulsão asfáltica de ruptura média
RR - emulsão asfáltica de ruptura rápida
UCS - *unconfined compression test*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Estabilização de solos	14
2.1.1	Estabilização mecânica	15
2.1.2	Estabilização química	17
2.1.2.1	Estabilização com cinza da casca de arroz	18
2.1.2.2	Estabilização Betuminosa	19
2.1.2.2.1	Emulsão asfáltica	20
2.1.2.2.2	Mecanismos da estabilização betuminosa	22
2.1.2.2.3	Recomendação de pré-tratamento	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Solo	27
3.1.1	Análise granulométrica	29
3.1.2	Massa específica	31
3.1.3	Limites de Atterberg	31
3.1.4	Ensaio de compactação mini-Proctor	32
3.2	Emulsão asfáltica	33
3.3	Cinza da casca de arroz	33
3.4	Definição dos teores dos aditivos	34
3.5	Preparação das misturas e corpos de prova	37
3.6	Avaliação mecânica das misturas	40
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	42

4.1	Curvas de compactação	42
4.2	Trabalhabilidade	43
4.3	Resistência à compressão simples	44
4.4	Módulo de elasticidade	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

No que concerne à produção agrícola, é possível afirmar que a região Sul do Brasil ocupa posição de destaque, haja vista sua relevância em razão da expressiva quantidade de grãos produzidos. Segundo dados mais recentes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2020 a produção de arroz no país superou as 11 milhões de toneladas, sendo o estado do Rio Grande do Sul o maior produtor, responsável por quase 70% da produção nacional (IBGE, 2020).

Por se tratar de um dos principais subprodutos do grão, cerca de 20% de seu peso, a casca de arroz se torna uma preocupação para as indústrias beneficiadoras, que devem buscar um destino adequado para o resíduo. Dada a produção em larga escala na região, e ao não verem alternativa para o descarte destes volumes, as indústrias acabam acumulando-os em simples aterros, e que em virtude de sua lenta biodegradação, permanecem inalterados por grandes períodos, gerando problemas de poluição do solo, ar e rios próximos (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005; CONSTANTINO, 2018).

Isto posto, aliado às recorrentes crises energéticas no país e crescente interesse por fontes alternativas de energia renovável, a casca de arroz vem sendo utilizada para a geração de energia através de sua queima, visto seu alto poder calorífico (ZUQUINAL *et al.*, 2016).

Como resultado da queima das cascas do arroz nas usinas termelétricas, obtém-se a cinza da casca de arroz (CCA), correspondendo a cerca de 4% do peso do grão. Tal qual a casca de arroz, sua cinza também se apresenta em larga escala, tornando-se um incômodo para as empresas beneficiadoras. Assim, as pesquisas para encontrar um destino adequado para o resíduo tem se intensificado nos últimos anos, resultando em aplicações na construção civil, indústria refratária e melhoramento do solo, entre outros (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001; TASHIMA *et al.*, 2011).

Dentro do contexto do interior do Rio Grande do Sul, no município de Alegrete, responsável por cerca de 7% da produção de arroz no Estado, o escoamento da produção agrícola é um fator essencial para seu crescimento e desenvolvimento, e é

realizado majoritariamente pelo modal de transporte rodoviário (IBGE, 2022).

Além de afetar substancialmente o escoamento da produção agrícola, a baixa qualidade da infraestrutura das vias, da necessidade de reparos até a falta de revestimento asfáltico, que no estado já ultrapassa o valor de 4000 km não-pavimentados, atrasam o desenvolvimento dos municípios do interior, dificultando a integração entre campo e cidade, essencial na prática agrícola (CAIXETA FILHO, 2006; ROCHA, 2015; DAER, 2022).

Como alternativa para melhoria das vias de baixo volume de tráfego, a estabilização betuminosa proporciona uma pavimentação de execução simplificada em relação a pavimentação tradicional, reduzindo o uso de recursos com transporte de solo e aquecimento do ligante asfáltico, por exemplo. Através da adição de emulsão asfáltica ao solo, ela incorpora e melhora características como coesão, atrito e resistência frente aos efeitos da água. A técnica possibilita o uso em qualquer solo, porém é consenso entre os autores que melhores resultados são obtidos com solos onde o índice de plasticidade se limita a valores na casa dos 20%, por questões técnicas e econômicas, pois demandam teores menores de emulsão e apresentam boa trabalhabilidade da mistura (MICELI Jr., 2006; MOREIRA, 2011; PACHECO, 2011).

A literatura aponta sucesso da técnica solo-emulsão com areias, porém apresenta algumas limitações quando aplicada em solos argilosos. Contudo, estudos como os de Adhikary e Jana (2016), Kumar e Gupta (2016) e Silva *et al.* (2020), apresentam a melhora de propriedades de solos plásticos quando acrescentada a cinza da casca de arroz, sendo assim, a combinação deste resíduo pode tornar a estabilização betuminosa uma alternativa viável para as estradas vicinais do Município, que apresentam solos argilosos, cujas sofrem com a passagem de grandes cargas, oriundas principalmente do escoamento da safra agrícola.

Assim, o tema proposto busca apresentar uma alternativa de melhoria das condições das estradas vicinais do interior de Alegrete (RS), ao viabilizar o emprego da estabilização betuminosa de solos argilosos com a adição da cinza da casca de arroz, visando o incremento de condições de segurança e vida útil da via.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento de um solo predominantemente argiloso quando misturado à emulsão asfáltica e à cinza da casca de arroz.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar mecanicamente a influência da adição de cinza da casca de arroz e emulsão asfáltica ao solo estudado, a partir de ensaios de resistência à compressão simples (RCS);
- Avaliar a influência do efeito da água na resistência das amostras;
- Comparar, quanto à trabalhabilidade da mistura, a influência da adição de cinza da casca de arroz ao solo com emulsão asfáltica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No âmbito da engenharia civil, o conhecimento sobre o solo é imprescindível para o sucesso de um projeto. Seja para o cálculo de fundações de uma edificação, implementação de uma rodovia, execução de obras de contenção, o estudo prévio do terreno e a classificação de seu solo, através de ensaios como a elaboração da curva granulométrica, caracterização de propriedades mecânicas, bem como a análise desses resultados conferem dimensionamentos mais precisos e econômicos.

Porém, visto que nem sempre o terreno corresponde às características mínimas esperadas, Cristelo (2001) cita alternativas disponíveis para contornar essa situação desfavorável:

- Adequação do projeto às propriedades que o solo local oferece, o que pode tornar a obra inviável, por motivos de execução ou financeiros;
- Remoção do solo local e substituição deste por um material que corresponda aos requisitos necessários, de maneira parcial ou integralmente;
- Alteração das propriedades do solo local, objetivando um material que atinja às necessidades mínimas da obra.

Sendo a terceira opção conhecida como estabilização de solos. Através dela, de maneira geral, busca-se modificar propriedades relacionadas a capacidade de carga, compressibilidade e permeabilidade do solo, além de assegurar a durabilidade dessas modificações. É importante destacar que devido à grande diversidade de solos, climas e métodos de estabilização, o processo não se apresenta infalível em todos os casos, sendo indispensável a correta identificação das carências do terreno e qual o melhor tipo de estabilização para este (SHERWOOD, 1993; PINTO, 2002; CRISTELO, 2001).

2.1 Estabilização de solos

A estabilização dos solos pode ser definida como um método de melhoramento das propriedades do solo local, por meio de compactação e mistura com outros

materiais, visando melhorar condições como a capacidade de carga, resistência aos efeitos da água, variações de volume, entre outros, a fim de servir como base para estrutura viária, como a própria camada de rolamento ou outra necessidade pontual de obra (FIROOZI *et al.*, 2017).

De modo mais específico, Villibor *et al.* (1978) descreve a estabilização de solos como um tratamento por meio da adição de um material, chamado agente estabilizante, com o propósito de melhorar as propriedades geotécnicas do terreno e assegurar a durabilidade destas ao passar do tempo e à ação de carregamentos.

Além de atingir o aumento de resistência mecânica sob o efeito de ciclos de carregamento, visando suportar os efeitos causados pelo tráfego, deve-se buscar a permanência dessas melhorias durante a vida útil da obra (VILLIBOR *et al.*, 1978; REBELO *et al.*, 2009).

Dependendo do tipo de agente estabilizante a ser empregado, o processo de estabilização se classifica em dois grandes grupos: mecânica ou química. A primeira age através de mudanças puramente mecânicas, como o rearranjo dos grãos de solo e a correção da curva granulométrica, já a estabilização química envolve agentes estabilizadores que alteram o terreno natural pelas interações químicas e ações cimentantes.

2.1.1 Estabilização mecânica

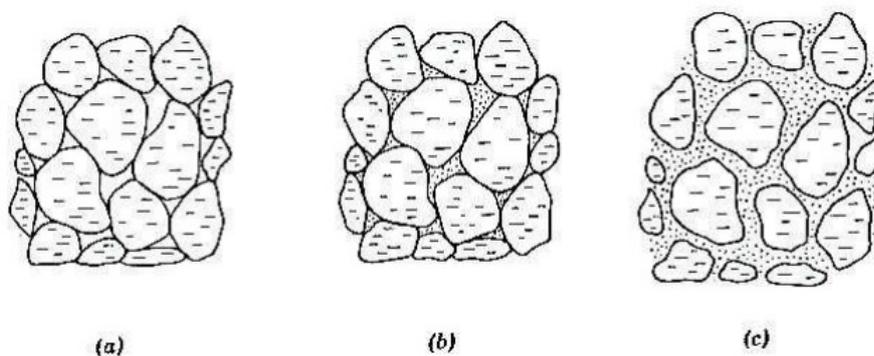
Senço (1997) expõe que a estabilização granulométrica surgiu como um dos primeiros métodos de melhoria dos leitos carroçáveis, em que a correção se baseava ao observar que, se os terrenos arenosos apresentavam bom desempenho durante períodos chuvosos mas ocasionavam poeira nas secas, e os terrenos com tendência mais argilosa, de maneira oposta, obtinham bom desempenho nas secas porém formavam lama excessiva nas chuvas, a correção desses problemas poderia ser obtida ao equilibrar as frações de areia e argila, de modo que a areia impedisse os problemas com lama, e a argila barrasse o levantamento de poeira. Empregando assim, o método que hoje é conhecido como correção granulométrica.

A correção granulométrica, como o nome sugere, busca corrigir a distribuição

granulométrica do solo, buscando uma curva densamente graduada, de modo que ele atinja os requisitos esperados para a aplicação em obra. Ao misturar dois ou mais solos de graduações diferentes, nas proporções corretas, é possível atingir bons resultados de densidade, plasticidade, e estabilidade num geral, limitando a quantidade de finos plásticos e proporcionando um arranjo de poucos vazios, visto que os grãos mais finos preenchem as lacunas entre os maiores (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Na Figura 1 estão exemplificadas as curvas granulométricas que podem ser encontradas. A Figura 1a representa uma amostra com curva de graduação aberta, em que os agregados se apresentam de maneira uniforme, quase do mesmo tamanho, formando um arranjo com muitos vazios, que possibilita a fácil percolação da água no seu interior. A amostra na Figura 1b possui uma graduação densa, que possui a proporção de finos suficiente para preencher os vazios entre os agregados maiores, conferindo maior densidade e barrando a percolação, se apresentando em um ponto de vista ideal de estabilidade. Por último, na Figura 1c, está representada uma amostra de graduação descontínua, com ausência de algumas dimensões de grão, formando “falhas” na distribuição granulométrica (BERNUCCI *et al.*, 2008; SILVA, 2016).

Figura 1 – Tipos de curvas granulométricas.



Fonte: Yoder e Witczak (1975).

Outro método de estabilização mecânica é a compactação, também chamada densificação do solo, é processo do aumento de sua massa específica, através do rearranjo das partículas, resultado de quando o solo é submetido a grandes esforços mecânicos, por meio de equipamentos como rolos compactadores ou até mesmo soquetes manuais. Esse processo ocasiona o aumento do contato entre os grãos e consequente redução dos vazios, visto que na compactação a quantidade de grãos de solo e de água permanecem intactas, a mudança se dá apenas pela eliminação do ar presente nos vazios (PINTO, 2002).

Além de se enquadrar como um tipo de estabilização por si só, ela se faz presente em todos os outros processos de estabilização, seja mecânico ou químico, a compactação é realizada para obter a máxima resistência inerente ao solo.

2.1.2 Estabilização química

São considerados métodos de estabilização química os casos em que ao adicionar um agente estabilizante no solo - produto ou aditivo químico - este reage com os grãos de solo e resulta no melhoramento e estabilidade das propriedades mecânicas e hidráulicas do terreno. Destacam-se como agentes estabilizantes o cimento, a cal e materiais betuminosos. O autor cita que independente do agente estabilizador químico a ser utilizado, geralmente a estabilização se dá pela aglutinação das partículas de solo, causadas pelas reações químicas entre o solo e o estabilizante (GONDIM, 2008).

Kézdi (1979) cita que as principais reações físicas que ocorrem são a mudança de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção. E as reações químicas são a troca iônica, precipitação, polimerização e oxidação.

De modo geral, quando aplicada em solos com tendência coesiva, de estrutura mais sensível à água, a técnica da estabilização química age proporcionando uma maior estabilidade desses solos frente às variações de umidade. Por outro lado, em solos não coesivos, a técnica melhora a resistência do solo ao cisalhamento, ao cimentar os pontos de contato entre os grãos, proporcionando certa coesão (SANTOS *et al.*, 2009).

2.1.2.1 Estabilização com cinza da casca de arroz

O emprego da cinza da casca de arroz como alternativa para a estabilização de solos tem sido tema de um número significativo de pesquisas nos últimos anos, seja combinado com cimento e cal, ou simplesmente a adição de CCA ao solo, a quantidade excessiva do resíduo sem destinação correta é motivo de preocupação, visto a grande produção de arroz no mundo.

A cinza da casca de arroz (CCA) é um resíduo agro-industrial, que devido a sua alta concentração de sílica, equivalente a mais de 90% de sua composição, e sua grande área superficial específica, é considerado um material de propriedades pozolânicas. Dito isso, quanto menor for a partícula de cinza, maior será sua área superficial e com isso maior será a atividade pozolânica. Esta atividade pozolânica é a principal responsável pela estabilização de solos com CCA, visto que as pozolanas, ao reagirem com o hidróxido de cálcio presente naturalmente nos solos, dão início à uma série de reações pozolânicas, que resultam na formação de compostos cimentícios com propriedades ligantes (KLAMT, 2012; ADHIKARY; JANA, 2016; CONSTANTINO, 2018; SILVA *et al.*, 2020).

A forma da sílica encontrada no processo de queima da casca de arroz depende da temperatura em que ela é exposta, devendo ocorrer de forma controlada para que atinja o máximo de reatividade. Todavia, as cinzas obtidas sem o controle de temperatura apresentam boa reatividade, alertando para o fato da queima controlada não ser uma restrição, e sim um ponto de referência (GUEDERT, 1989; SANTOS, 1997; DEL CARPIO, 2009).

Por se tratar da adição de um material de características pozolânicas ao solo, pode-se assumir para a estabilização solo-CCA um comportamento similar ao da técnica solo-cal (SILVA *et al.*, 2020).

Rodrigues *et al.* (2019), ao abordarem a viabilidade técnica do emprego da CCA na estabilização de solos para uso rodoviário, mostraram que o resíduo tende a aumentar valores de limites de liquidez e plasticidade, e a diminuir o seu índice de plasticidade. As amostras estabilizadas também tiveram seu Índice de Suporte

Califórnia (ISC) elevado, melhorando as condições de resistência para aplicação em obras rodoviárias.

De mesmo modo, Constantino (2018) também aponta a diminuição do IP, bem como a diminuição dos valores de expansão do solo. O autor destaca que apesar da redução da plasticidade, esta não foi suficiente para mudar a classificação do solo, mas se mostrou eficaz na melhora de sua trabalhabilidade.

Ao estudar a estabilização solo-cal com adição de CCA, com teores de aditivo variando entre 0% e 20%, Ali, Adnan e Choy (1992), Muntohar e Hantoro (2000), Katz (2007) e Silva *et al.* (2020) observaram a diminuição da densidade seca das misturas e o aumento do teor de umidade ótima, conforme o acréscimo de CCA, entretanto, os autores afirmam que apesar da variação desses valores, o ganho de resistência proporcionado pela adição da cinza da casca de arroz compensa ditas alterações.

Em concordância, Ali, Adnan e Choy (1992), Kumar e Gupta (2016), ensaiando amostras de solo argiloso com CCA, explicam que a redução dos valores de densidade se dá pela substituição parcial do solo da amostra por CCA, que por possuir valores de massa específica mais baixos em relação aos do solo natural, reduz a densidade da mistura. Outra explicação se dá pelo revestimento dos grãos de solo pela CCA, que resulta em partículas maiores e conseqüentemente vazios maiores, reduzindo sua densidade. O aumento do teor de umidade se justifica pela maior absorção de água que as cinzas acrescentadas apresentam.

Em relação à consistência das misturas solo-CCA, observou-se o aumento dos valores de limite de liquidez, que se explica pela formação dos compostos cimentícios, resultado da reação do solo natural misturado com a CCA. De maneira análoga, os valores de Índice de Plasticidade apresentaram uma redução com o aumento dos teores de CCA (ADHIKARY; JANA, 2016; SILVA *et al.*, 2020).

2.1.2.2 Estabilização Betuminosa

A estabilização betuminosa consiste no processo de adição de material betuminoso ao solo para o fortalecimento do terreno, seja para aeroportos, construção da estrutura de rodovias ou até mesmo pistas de rolamento, em que o terreno seja

capaz de suportar os carregamentos do tráfego em condições normais e também quando sujeito a variações de umidade. O intuito do betume nos solos coesivos é evitar a entrada de água no terreno, visto que esse tipo de solo geralmente tem boa capacidade de suporte em níveis baixos de umidade. Por outro lado, no caso de solos granulares não-coesivos, o betume age como agente cimentante, unindo as partículas (WINTERKORN, 1975).

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), os materiais betuminosos promovem a união dos agregados, são impermeabilizantes, duráveis e resistentes à maioria de agentes agressivos presentes no solo, como ácidos, álcalis e sais. Além disso, os materiais derivados do betume podem se apresentar de diversas maneiras: aquecido, emulsionado e com a possibilidade de uso de diversos aditivos.

2.1.2.2.1 Emulsão asfáltica

O derivado do petróleo utilizado para serviços de pavimentação no Brasil, o popular asfalto, é tecnicamente chamado CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo, e se caracteriza por ser impermeável a água e ter pouca reatividade, além de suas propriedades termoviscoplasticas, que permite que o ligante transite entre os estados líquido e sólido de maneira reversível. Quando em temperaturas mais baixas, se apresentam em estado semissólido, são imiscíveis em água e tem alta viscosidade, o que dificulta seu manuseio (BERNUCCI *et al.*, 2008; ABEDA, 2010; OLIVEIRA; ANDRADE; LAPERCHE, 2014).

Devido a essa alta viscosidade, para proporcionar o envolvimento dos agregados pelo asfalto, o CAP deve passar por um processo de aquecimento para a obter viscosidades de trabalho, porém esse aquecimento além de aumentar os custos da obra, envolve gastos energéticos e riscos ambientais, sendo assim, Bernucci *et al.* (2008) propõe dois processos como alternativas para a melhora da viscosidade: a adição de diluente volátil ao asfalto, chamado asfalto cutback, e o emulsionamento do asfalto.

Os asfaltos diluídos utilizam de solventes como a gasolina, nafta e querosene

para diluir o CAP e baixar sua viscosidade, para proporcionar o uso sem o aquecimento, e são mais utilizados em serviços de imprimação asfáltica e tratamentos superficiais, porém seu uso está sendo cada vez mais reduzido devido à problemas de segurança e poluição do meio ambiente (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A emulsificação do CAP começou a ser utilizada com mais frequência no meio técnico nos anos 1950, devido a sua boa trabalhabilidade em temperatura ambiente e sua versatilidade de aplicação (ABEDA, 2010).

Uma emulsão pode ser definida com a mistura de dois líquidos imiscíveis, que através de um agente emulsificador, permite que uma fase fique dispersa em outra. No caso das emulsões asfálticas, uma fase asfáltica, contendo teores de 50% a 70% de CAP, se apresenta dispersa em uma fase aquosa, onde estão presentes os estabilizantes e demais aditivos que controlam o tempo de ruptura e sua adesividade, por exemplo (CASTRO *et al.*, 2015; CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015).

O agente emulsificante é a substância que age reduzindo a tensão superficial, permitindo que os glóbulos de asfalto se mantenham em suspensão na fase aquosa por tempo determinado, evitando que essas partículas coalesçam. Esse tempo de estabilidade da mistura é o chamado tempo de ruptura, pois após isso, os glóbulos de asfalto se aproximam e coalescem, formando um aglomerado e permitindo a evaporação da fase aquosa e conseqüente enrijecimento do ligante asfáltico, configurando a ruptura do material, que pode ser observada pela mudança de sua coloração, que passa de marrom para preto. De acordo com este tempo de ruptura, as emulsões asfálticas se classificam em emulsões de ruptura rápida (RR), média (RM) ou lenta (RL) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Outra forma de classificação das emulsões asfálticas se refere ao caráter iônico do emulsificante, podendo ser uma emulsão catiônica ou aniônica, dependendo do domínio de cargas positivas ou negativas em sua constituição. Em geral, a emulsão asfáltica mais empregada é a do tipo catiônica, pois os glóbulos de asfalto nela contidos tem sua superfície carregada negativamente, portanto desenvolvem forte atração por agregados eletropositivos, como os quartzos e granitos, que se fazem presente na maioria dos materiais utilizados em serviços de pavimentação. Além disso, as

emulsões catiônicas reagem tanto com agregados ácidos quanto alcalinos, diferente das aniônicas, que se limitam a reações apenas com agregados de natureza alcalina (GONDIM, 2008; PACHECO, 2011; CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015).

2.1.2.2.2 Mecanismos da estabilização betuminosa

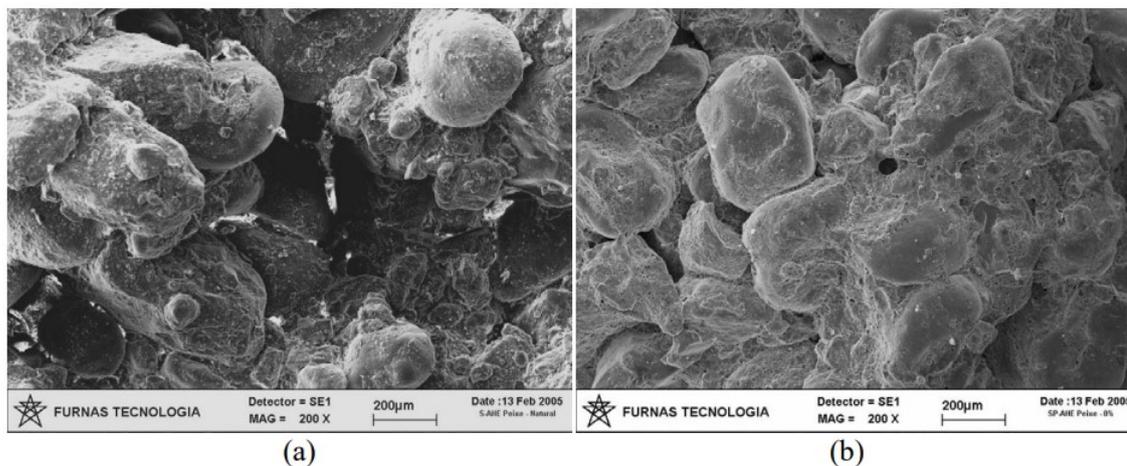
Os mecanismos envolvidos na estabilização com materiais betuminosos, que possibilitam a melhora das condições do terreno natural, se baseiam na criação de um filme betuminoso que ao envolver os grãos, confere coesão e evita a absorção de água. Além disso, o betume também evita a penetração de água no terreno, pelo simples bloqueio dos poros com o material e também o impermeabiliza, pois reduz a penetração de água no solo (INGLES; METCALF, 1972; GONDIM, 2008; JACINTHO, 2010; MICELI Jr.; VIEIRA; MOTTA, 2010).

Dependendo da granulometria do solo a ser estabilizado, tem-se um mecanismo destaque. Em solos granulares não-coesivos, como as areias, o efeito da aglutinação dos grãos através de um filme betuminoso e consequente aumento da coesão se sobressai (CRISTELO, 2001).

Nesse caso é descrita a teoria da mistura íntima, em que os autores explicam que os grãos, de maneira individual, são envolvidos por uma película betuminosa que através de uma reação cimentante mantém as partículas de solo unidas, conferindo coesão à mistura. Por terem uma área superficial relativamente pequena em relação à solos mais finos, os solos granulares necessitam de uma quantidade reduzida de betume para cobrir sua superfície e formar o filme betuminoso, o que é um ponto positivo na aplicação da técnica (MEDINA, s.d.; MOREIRA, 2011).

Abaixo são apresentadas micrografias realizadas por Jacintho (2005), ampliadas 200 vezes, onde a Figura 2a representa uma areia natural, e a Figura 2b representa uma areia misturada com 8% de emulsão, que ilustram a formação do filme betuminoso criado sobre os grãos de solo.

Figura 2 – Filme betuminoso sobre o solo (micrografia ampliada 200 vezes).

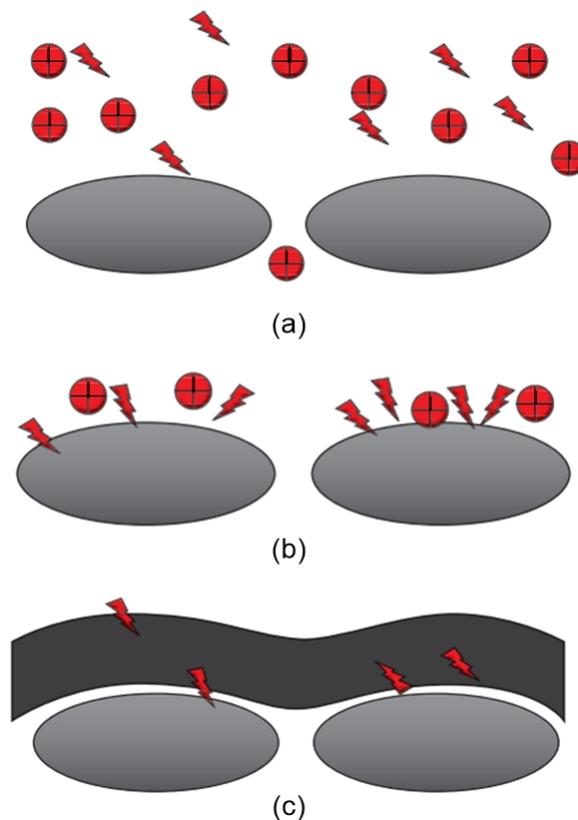


Fonte: Jacintho (2005).

Para solos argilosos coesivos não é conveniente assumir a teoria da mistura íntima, visto que não é possível considerar individualmente cada grão de solo, e mesmo se isso fosse possível, os grãos de argila possuem grande área superficial específica, o que exigiria uma quantidade maior de betume para cobri-los, tornando a teoria inviável prática e economicamente. Sendo assim, o mecanismo atuante principal é o da impermeabilização. Descreve-se para este caso a teoria da vedação mecânica, em que o betume tem por função principal vedar os vazios da massa de solo, protegendo a coesão existente e evitando que a água atinja os agrupamentos de partículas de solo (MEDINA, s.d.; MOREIRA, 2011).

Guarçoni, Mattos e Gonçalves (1988) descrevem o sistema solo-emulsão-água como sendo composto por solo, betume, água e solução aquosa da emulsão (água e solutos tenso-ativos, que mantém a emulsão estável). Ao entrarem em contato (Figura 3a), é iniciado o processo de ruptura da emulsão na interface dos grãos de solo com a solução aquosa. Este processo é resultado do desequilíbrio entre essas duas fases, onde o solo age como substância adsorvente e a solução como adsorvato, sendo assim, o solo adsorve parte dos solutos tenso-ativos (Figura 3b), deixando a solução menos concentrada e permitindo a evaporação da água. Em decorrência disso, inicia-se também o fenômeno de coalescência das partículas betuminosas, que se unem e resultam na formação do filme betuminoso (Figura 3c).

Figura 3 – Processo de ruptura da emulsão asfáltica.



Fonte: Adaptado de ABEDA, 2001.

A compactação da mistura solo-emulsão-água resulta em um novo sistema, dotado de uma estrutura de grãos de solo com adsorção superficial do soluto, unidos pelo filme betuminoso e de grumos de ligante. Estes grumos além de funcionarem como bloqueios para a penetração de água no solo, acabam por funcionar como rótulas que diminuem o contato entre os grãos e conseqüentemente reduzem a resistência dos solos ao cisalhamento. À vista disso, deve-se encontrar um teor ótimo que proporcione a maior resistência cisalhante sem perder sua impermeabilização (GUARÇONI; MATTOS; GONÇALVES, 1988).

2.1.2.2.3 Recomendação de pré-tratamento

Oluyemi-Ayibiowu (2019), ao ensaiar amostras de três solos diferentes - argila de baixa plasticidade, areia medianamente plástica e argila de alta plasticidade - estabilizadas com teores de emulsão asfáltica de ruptura lenta (RL-1C) entre 2% e 8%, através dos ensaios CBR (Índice de suporte Califórnia) e RCS (Ensaio de

resistência à compressão não confinada), aponta que a estabilização com emulsão asfáltica em solos de alta plasticidade não é a mais adequada, pois além da dificuldade na homogeneização da mistura, etapa que o autor descreve como essencial para obter resultados satisfatórios, a quantidade de emulsão necessária para alcançar as condições de permeabilidade desejadas é muito alta, tornando a técnica onerosa.

Apesar de concordar com a maior afinidade da técnica com solos de tendência arenosa, Miceli Jr. (2006) não descarta a estabilização betuminosa com solos mais finos, desde que avaliada criteriosamente cada situação, analisando se é válido o investimento em grandes quantidades de estabilizante para atingir um resultado aceitável, além das condições construtivas como a mistura e compactação, que se tornam complicadas pela baixa trabalhabilidade dos solos finos assim estabilizados. Caso não existam outros solos disponíveis, o autor recomenda a combinação de métodos para a melhora da trabalhabilidade, como a adição de cal ou cimento.

Yoder e Witczak (1975) mencionam que a aplicação do solo-emulsão com solos granulares apresentam bons resultados, porém em solos plásticos a aplicação da estabilização asfáltica é limitada pela dificuldade de mistura e construção. Em seu livro, Winterkorn (1975) recomenda que solos predominantemente argilosos recebam algum tipo de pré-tratamento, sugerindo a adição de no mínimo 2% de cal. Os autores explicam que a adição de betume em solos argilosos úmidos pode tornar a mistura extremamente pegajosa, a ponto de não ser possível a sua compactação em campo. Sendo assim, a adição de agentes estabilizadores que agem na diminuição da plasticidade, como o cimento e a cal, se destaca como um recurso para viabilizar a aplicação da emulsão nesses solos (YODER; WITCZAK, 1975; WINTERKORN, 1975).

Dado o consenso entre diversos autores sobre a necessidade de redução do índice de plasticidade dos solos coesivos-plásticos-argilosos para melhora da trabalhabilidade e conseqüente desempenho esperado, na Tabela 1 estão agrupadas alguns limites para os solos a serem estabilizados com emulsão asfáltica.

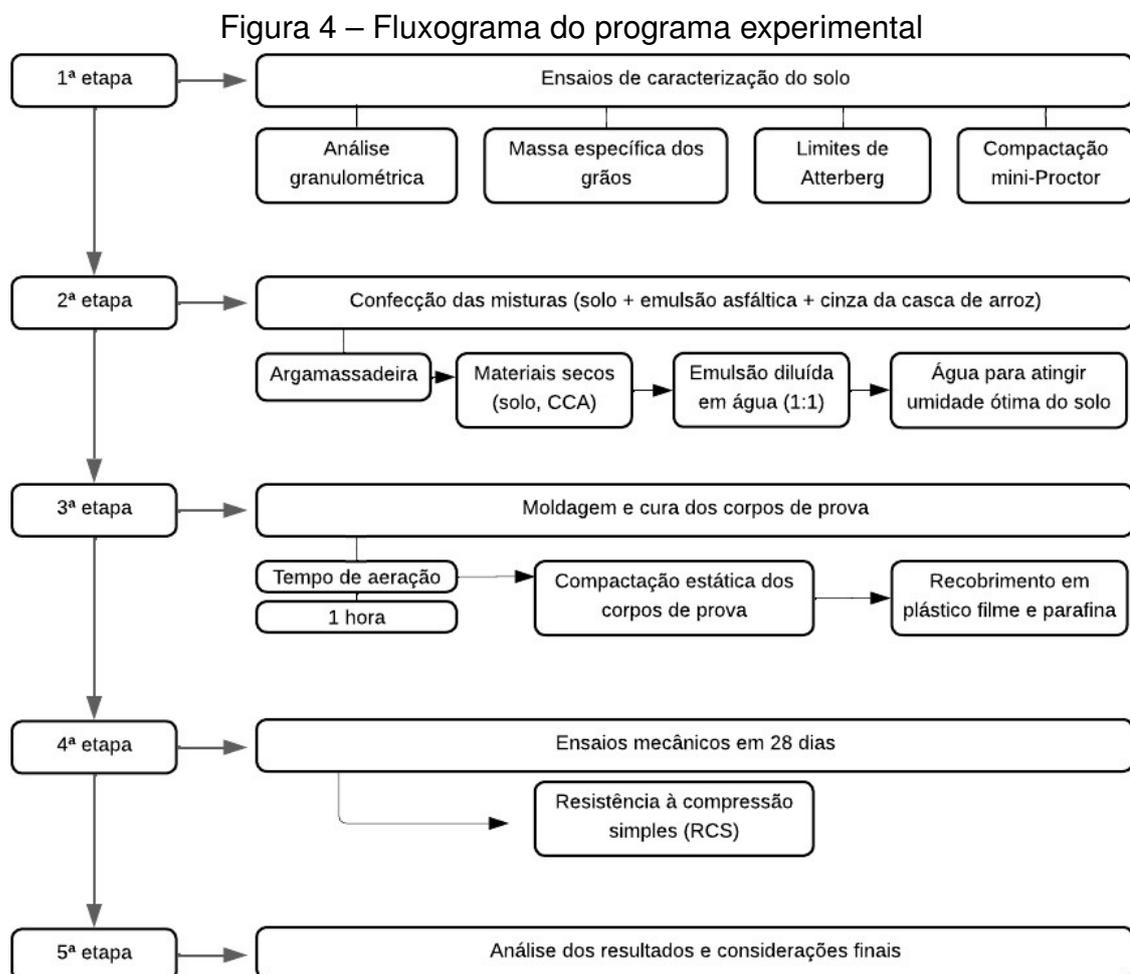
Tabela 1 – Requisitos de plasticidade segundo diversas fontes

Autor	Tipo de solo	Índice de Plasticidade
YODER e WITCZAK (1975)	Areias	IP <12%
	Pedregulhos e areias pedregulhosas	IP <12%
	Solos finos	IP <18%
KÉZDI (1979)	Solos em geral	IP <18%
VOGT (1971)	Solos em geral	IP <14%
DER (1988)	Solos argilosos	IP <6%
ABEDA (2001)	Solos em geral	IP <8%

Fonte: Adaptado de Miceli Jr. (2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os procedimentos utilizados durante a fase experimental desta pesquisa, os materiais e técnicas empregadas de modo a verificar a viabilidade técnica da estabilização de um solo argiloso com o uso de emulsão asfáltica e cinza da casca de arroz. Está apresentado na Figura 4 o fluxograma do programa experimental que foi desenvolvido.



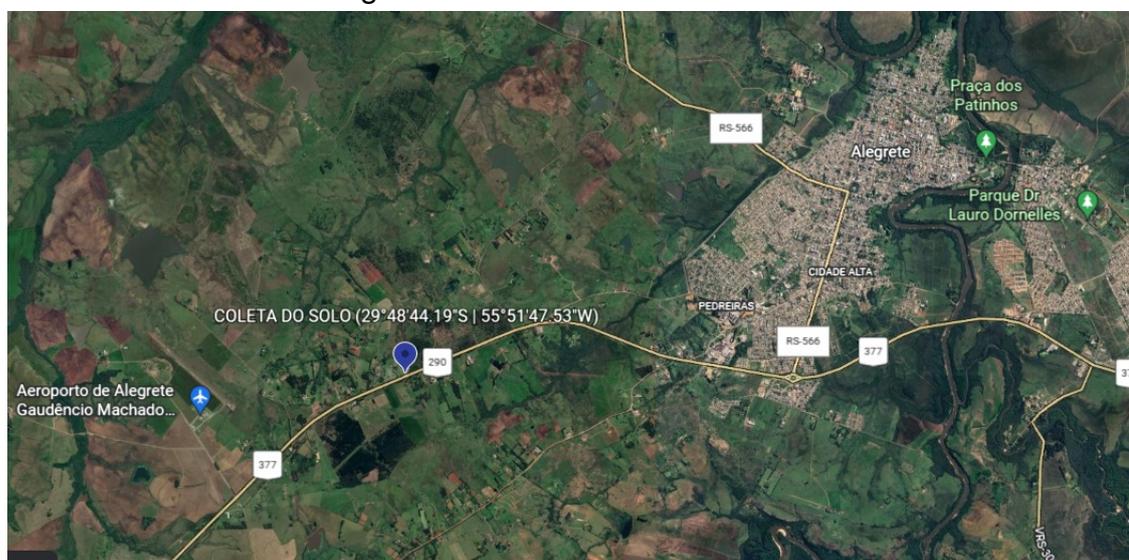
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Solo

Para o presente estudo utilizou-se um solo com características argilosas, coletado no interior do município de Alegrete (RS), nas proximidades do Aeroporto

Gaudêncio Machado Ramos, localizado junto à rodovia BR-290, indicado na Figura 5.

Figura 5 – Local da coleta do solo



Fonte: Adaptado de Google Earth (2022).

A Figura 6 ilustra a coleta do solo, que se sucedeu conforme instruções da NBR 9604/2016 - "Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo" (ABNT, 2016f).

Figura 6 – Procedimento de coleta do solo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Anteriormente à realização das misturas de solo com a emulsão asfáltica e a CCA, foram realizados ensaios de caracterização do solo, descritos nos subtópicos deste item, a fim de classificá-lo e estimar seu provável comportamento, além de poder comparar de maneira correta os resultados obtidos no presente trabalho com os resultados disponíveis na literatura.

Para tal, o solo foi devidamente destorroado e seco ao ar, conforme NBR 6457/2016 - “Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Caracterização” (ABNT, 2016a).

De acordo com as metodologias de classificação do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e *Transportation Research Board* (TRB) o solo se classifica, respectivamente, como CH (argila muito plástica com areia) e A-7-5 (argila plástica, com tendência de alta elasticidade e grande variação volumétrica), com um índice de grupo (IG) igual a 17.

Na Tabela 2 um resumo dos resultados encontrados nos itens 3.1.2 e 3.1.3 está apresentado.

Tabela 2 – Caracterização do solo

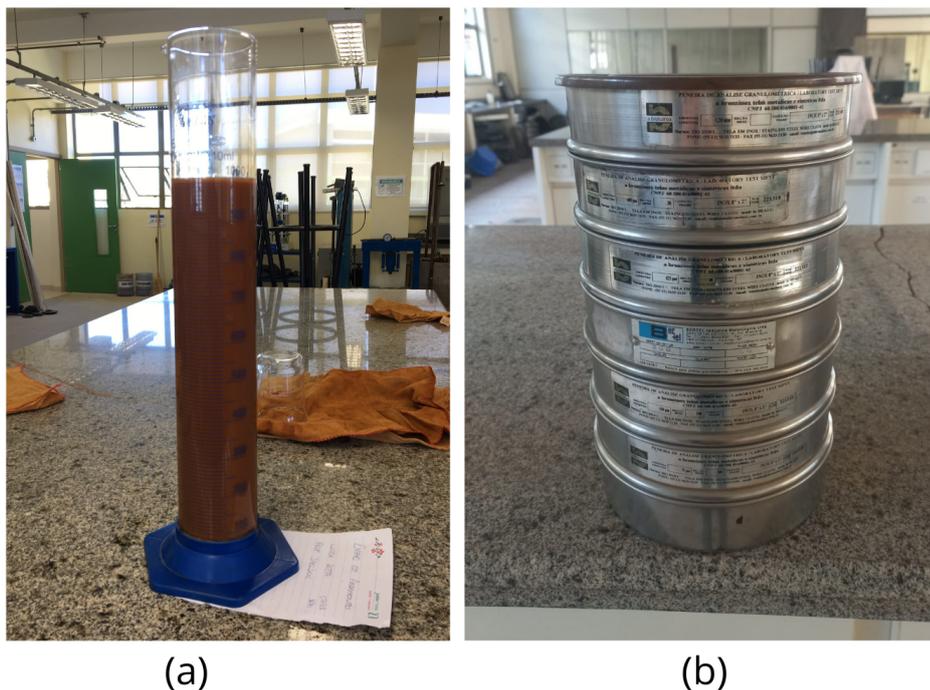
Parâmetros	Resultados
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,766
Limite de liquidez (%)	56
Limite de plasticidade (%)	30
Índice de plasticidade (%)	26

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1 Análise granulométrica

Foi realizada a análise da granulometria do solo, compreendendo o ensaio de sedimentação (Figura 7a), seguido de peneiramento fino para as partículas entre 2mm e 0,075mm (Figura 7b), ambos ensaios regidos pela NBR 7181/2016 – “Análise Granulométrica”. Visto que 100% do solo é passante na peneira 2mm, a realização do peneiramento grosso não foi necessária (ABNT, 2016e).

Figura 7 – Ensaio de sedimentação e peneiramento fino



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

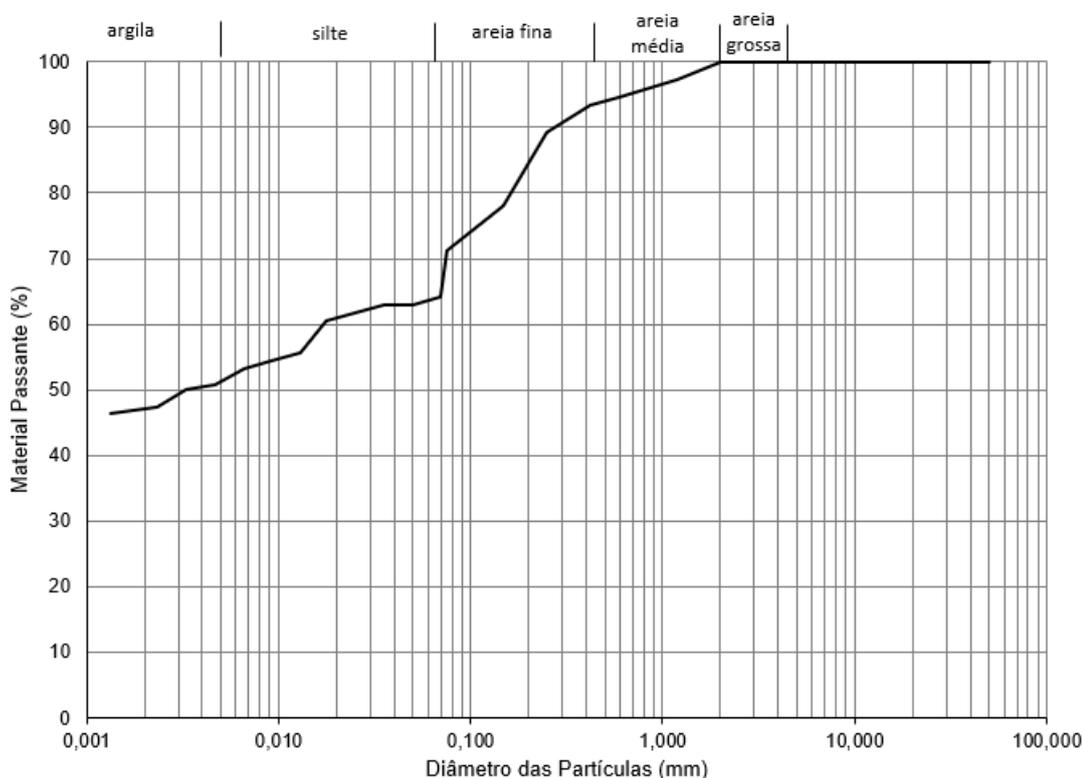
Na Tabela 3 está apresentada a análise granulométrica do solo, conforme classificação da ASTM (American Society for Testing and Materials) com mais de 50% do solo se enquadrando como argila. A curva granulométrica está exposta na Figura 8.

Tabela 3 – Análise granulométrica

Areia grossa (4,8 - 2,0mm)	Areia média (2,0 - 0,42mm)	Areia fina (0,42 - 0,075mm)	Silte (0,075 - 0,005mm)	Argila (<0,005mm)
0,00%	6,59%	22,29%	20,35%	50,77%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Análise granulométrica



Fonte: Elaborado pelo autor.

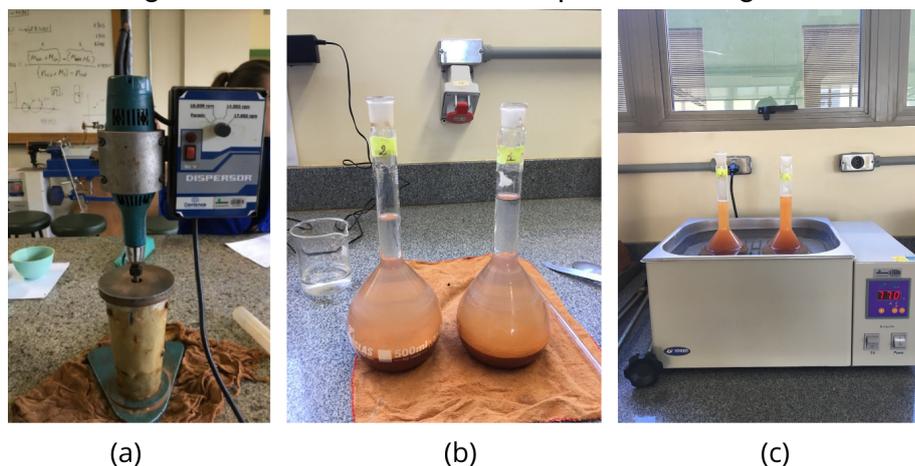
3.1.2 Massa específica

A massa específica da amostra de solo foi determinada conforme NBR6458/2016 - "Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água", ilustrada na Figura 9 (ABNT, 2016b).

3.1.3 Limites de Atterberg

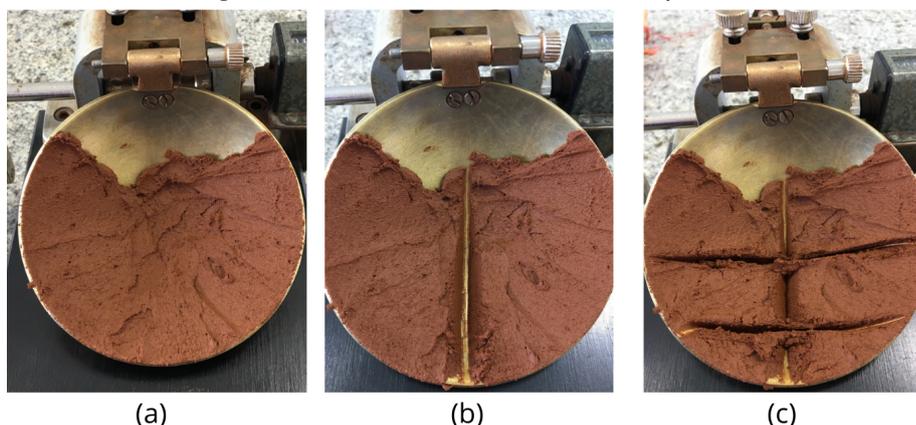
Para determinar os limites de consistência do solo em questão, também denominados limites de Atterberg, foram executados os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, normatizados pela NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016, respectivamente, e estão expostos nas Figuras 10 (ABNT, 2016c; ABNT, 2016d).

Figura 9 – Ensaio de massa específica dos grãos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 – Ensaio de limite de liquidez



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.4 Ensaio de compactação mini-Proctor

Visto que todo material é passante na peneira 2mm, foi possível a realização do ensaio de compactação em modo miniatura, método desenvolvido por Villibor *et al.* (1978) para auxiliar na classificação de solos tropicais lateríticos, e consiste na adaptação do ensaio de compactação Proctor para um molde cilíndrico de diâmetro e altura de 50mm. A compactação se sucedeu com o total de 5 golpes por face, utilizando soquete com energia padrão.

O procedimento laboratorial seguiu os requisitos da norma DNER ME 228/94 – “Solos - compactação em equipamento miniatura”, resultando em uma curva de compactação, que correlaciona o teor de umidade do solo e sua massa específica aparente seca (DNER, 1994).

3.2 Emulsão asfáltica

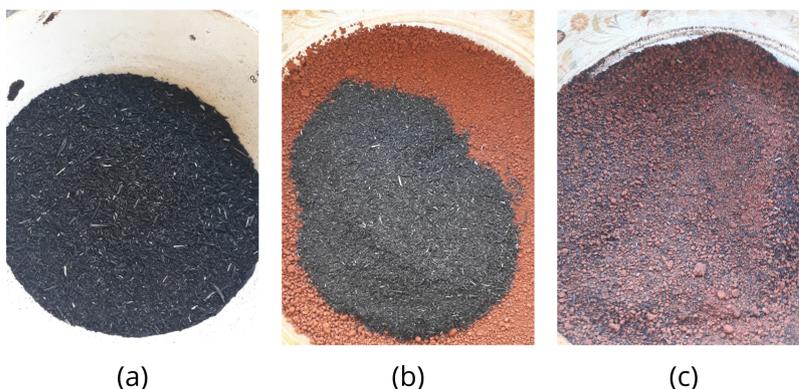
A emulsão asfáltica utilizada foi fornecida pela empresa “Construtora Alegretense”, no ano de 2022, do tipo catiônica de ruptura lenta (RL-1C), armazenada em frações menores em garrafas do tipo PET em local adequado no Laboratório de Solos e Pavimentação da UNIPAMPA – Campus Alegrete, para evitar rompimento precoce.

3.3 Cinza da casca de arroz

A cinza de casca de arroz empregada nesta pesquisa foi cedida pela Cooperativa Agroindustrial Alegrete Ltda. (CAAL), localizada no município de Alegrete, estado do Rio Grande do Sul. A cinza é resultado da queima da casca de arroz, utilizada no forno de secagem do arroz, e sua queima não é feita à temperatura controlada. Na Figura 11 está exposta a CCA e sua mistura com o solo.

A massa específica da cinza da casca de arroz seria determinada através da NBR 16605/2017, que normatiza a determinação da massa específica de cimento Portland e outros materiais em pó. Porém, ao entrar em contato com a água, a CCA permanece na superfície, sem submersão, impedindo a realização do ensaio de maneira correta (ABNT, 2017).

Figura 11 – Mistura com solo e cinza da casca de arroz



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Definição dos teores dos aditivos

O teor de cinza da casca de arroz utilizado foi de 5% em relação ao peso do solo seco, visto que, Ali, Adnan e Choy (1992), Kumar e Gupta (2016), Adhikary e Jana (2016), Constantino (2018), Silva *et al.* (2020), ao utilizarem teores entre 5% e 20%, obtiveram ganhos consideráveis com o menor teor, assim, este foi adotado na presente pesquisa.

Para determinar o teor necessário de emulsão asfáltica para estabilizar o solo, usualmente são empregados métodos de dosagem para pré-misturados a frio (PMF), visto que a técnica solo-emulsão consiste na mistura a frio do solo com o aditivo, assim como processos de PMF. Assim, a literatura sugere o emprego da Equação de Duriez, inicialmente proposta por Santana (1993, apud Bernucci *et al.*, 2006), para determinar a superfície específica de uma amostra de agregados a partir da proporção da granulometria e obter a quantidade necessária de emulsão para recobrir os grãos de solo. Bernucci *et al.* (2008) propõe a Equação de Vogt, que consiste em uma adaptação da Equação de Duriez para as peneiras normatizadas no Brasil, descrita pela Equação 3.1.

$$100 \sum = 0,07P_4 + 0,14P_3 + 0,33P_2 + 0,81P_1 + 2,7S_3 + 9,15S_2 + 21,9S_1 + 135F \quad (3.1)$$

Onde:

\sum : superfície específica dos agregados (m²/kg);

P₄: material retido entre as peneiras 2- 1" (%);

P₃: material retido entre as peneiras 1- 1/2" (%);

P₂: material retido entre as peneiras 1/2" - n^o4 (%);

P₁: material retido entre as peneiras n^o4 - n^o10 (%);

S₃: material retido entre as peneiras n^o10 - n^o40 (%);

S₂: material retido entre as peneiras n^o40 - n^o80 (%);

S₁: material retido entre as peneiras n^o80 - n^o200 (%);

F: material passante na peneira n^o 200 (%).

Obtida a superfície específica dos grãos do solo, é necessário utilizar um fator de correção, vide Tabela 4, visto que a Equação foi desenvolvida considerando uma massa específica dos grãos igual a 2,65 g/cm³.

Tabela 4 – Fator de correção.

Massa específica (g/cm ³)	Fator Corretivo
2,35	1,13
2,45	1,08
2,55	1,02
2,65	1,00
2,75	0,97
2,85	0,93
2,95	0,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dando seguimento à Equação de Duriez, obtém-se a porcentagem de asfalto residual necessária para recobrir os grãos de solo (Equação 3.2) em que o módulo de riqueza (k) é dado em função da aplicação do solo, conforme Tabela 5.

$$P = k \cdot (\Sigma)^{0.2} \quad (3.2)$$

Onde:

P: % de asfalto residual em relação ao peso total dos agregados;

Σ : superfície específica do agregado (m²/kg);

k : coeficiente 'módulo de riqueza';

A respeito do valor de módulo de riqueza (k) a ser empregado, Sant'Ana (2009) explica que, para estabilização betuminosa em campo, valores abaixo de 2,5 seriam os mais próximos para vias de baixo tráfego, visto que estas possuem um valor a ser investido menor, e, assim, tem uma quantidade de emulsão disponível reduzida.

Tabela 5 – Aplicação do módulo de riqueza (*k*).

Mistura	<i>k</i>	Aplicação
CAUQ	3,5 a 4,0	Rodovia
CAUQ	3,8 a 4,2	Aeroporto
Sheet Asphalt	4,0 a 4,5	Capa
PMQsD	3,0 a 3,6	Capa
PMFA	2,5 a 3,5	Base
PMFA	2,8 a 4,0	Capa

Fonte: Elaborado pelo autor.

Kézdi (1979) também apresenta equação para a determinação da quantidade de betume para recobrir os grãos de solo, exposta na Equação 3.3:

$$P = 0,015a + 0,02 b + 0,03c + 0,09 d \quad (3.3)$$

Onde:

P: teor de betume a ser acrescentado (%);

a: material retido na peneira nº10 (%);

b: material passante na peneira nº10 e retido na peneira nº40 (%);

c: material passante na peneira nº40 e retido na peneira nº200 (%);

d: material passante na peneira nº200 (%).

O autor também apresenta uma simplificação, considerando a influência apenas da fração passante na peneira nº200 (0,075mm), conforme Equação 3.4:

$$P = 2,75 + 0,064d \quad (3.4)$$

Onde:

P: teor de betume a ser acrescentado (%);

d: material passante na peneira n.200 (%).

Quanto as Equações citadas neste item, é importante reforçar que foram consideradas apenas a granulometria e massa específica do solo, visto que a caracterização da CCA não foi efetuada, frente às dificuldades de execução pelos métodos normalmente utilizados.

O valor obtido nas equações supracitadas, descreve a quantidade de asfalto residual ideal, portanto, para obter o teor de emulsão asfáltica, é necessário levar em consideração a quantidade de água e estabilizantes presentes no aditivo. Também é possível observar que todas as equações citadas para encontrar o teor de ligante necessário só consideram partículas de diâmetro até 0,075mm, isso pode ser explicado pelo trabalho de Guarçoni, Mattos e Gonçalves (1988) que, ao considerar uma espessura mínima de betume na ordem de 3 μ , afirmou só ser possível recobrir partículas de um diâmetro mínimo de 0,075mm, sendo assim dispensável a consideração das partículas menores na obtenção do teor necessário de ligante.

A partir das equações apresentadas, obteve-se os teores de resíduo asfáltico necessários para estabilizar o solo em estudo e sua média, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dosagem de resíduo asfáltico

Fórmula	Resíduo asfáltico (%)	Média (%)
Vogt / Duriéz	6,80%	
Kézdi	6,91%	6,90%
Kézdi Simplificada	7,00%	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, considerando que a emulsão asfáltica utilizada tem 62,6% de resíduo asfáltico em sua composição (valor informado pelo fabricante), obtém-se um teor de emulsão asfáltica necessário para estabilizar o solo do estudo igual a 11,02%.

3.5 Preparação das misturas e corpos de prova

As misturas foram realizadas com o auxílio de uma argamassadeira, disponibilizada pelo Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da UNIPAMPA - Campus Alegrete, com tempo controlado, em dois ciclos de 1min30s - tempo definido após diferentes tentativas - visando homogeneizar ao máximo as misturas e padronizar os corpos de prova. Primeiramente foram adicionados os materiais secos, o solo e a cinza da casca de arroz, seguidos pela emulsão asfáltica diluída em água, em uma proporção de 1:1, e por fim a água necessária para atingir sua umidade ótima.

Definido o método de mistura, foram compactadas amostras cilíndricas de diâmetro 50mm e altura de 100mm, com tempo de aeração antes da compactação de 1h, tempo esse recomendado por Ingles e Metcalf (1972), que indicam o aumento da estabilidade e diminuição da absorção de água. Além disso, o intervalo entre a mistura e a compactação se aproxima com o procedimento de aplicação da técnica na prática, o que aproxima os resultados laboratoriais aos esperados em campo.

Miceli Jr. (2006) alerta que a perda de umidade das amostras deve ser evitada ao máximo, pois caso esta ocorra, os resultados de ganho de resistência da mistura esperados devido à ruptura da emulsão podem estar mascarados, devido à forças de sucção que aumentam com a variação de umidade nos corpos de prova. Assim, os corpos de prova foram envoltos em plástico filme e depois recobertos por parafina, conforme Figura 12 e Figura 13, para preservar seus teores de umidade até a data de ruptura, e obter a real influência da emulsão no incremento de resistência das amostras. O tempo de cura utilizado foi de 28 dias. Em adição, foi analisado o efeito da água nas amostras, onde metade dos corpos de prova foi imersa em água nas 24 horas anteriores ao ensaio.

A compactação das amostras para os ensaios de Resistência à Compressão Simples foi realizada de maneira estática, utilizando um macaco pneumático. Obtido o teor ótimo de umidade para atingir a massa específica aparente seca máxima foi possível calcular a quantidade de material a ser adicionado a fim de resultar no volume desejado do corpo de prova.

Figura 12 – Preparação das amostras para armazenamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Corpos de prova moldados



Fonte: Elaborado pelo autor.

A quantidade de corpos de prova moldados e suas finalidades estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7 – Moldagem dos corpos de prova

Resistência à compressão simples (RCS)	Imersão em água?	
	Sim	Não
Solo puro	3	3
Solo + CCA	3	3
Solo + emulsão asfáltica	3	3
Solo + CCA + emulsão asfáltica	3	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 Avaliação mecânica das misturas

Como método de avaliação mecânica das amostras moldadas, foi escolhido o ensaio de resistência à compressão simples, que se faz imprescindível quando se trata de um projeto relacionado à pavimentação, visto que em uma aplicação em camada de rolamento ou parte da estrutura de uma rodovia, as camadas sofrem compressão pela passagem dos veículos. Assim, desde que mantidos o tamanho dos corpos de prova e a ordem de execução do ensaio com misturas de solo com emulsão asfáltica e CCA, o ensaio poderá ser executado obedecendo às convenções da NBR 12025, que rege os ensaios de compressão simples de corpo de prova cilíndrico com solo-cimento, visto que não há normatização específica para misturas solo-emulsão e solo-cinza (PACHECO, 2011; ABNT, 2012).

Findado o tempo de cura de 28 dias, os corpos de prova - quantificados na Tabela 7 - foram submetidos à aplicação de uma carga compressiva uniaxial até a ruptura, com velocidade do carregamento de 1mm/min, em uma prensa da marca Shimadzu (Figura 14).

A partir do ensaio foi possível obter os valores de tensão de ruptura à compressão, que consistem na razão entre a força axial máxima que a amostra suportou pela área de sua base. Ainda foi possível traçar as curvas tensão x deformação para cada amostra, visto que o ensaio fornece os valores de deslocamento da prensa a

cada ponto.

Figura 14 – Prensa para realização dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor.

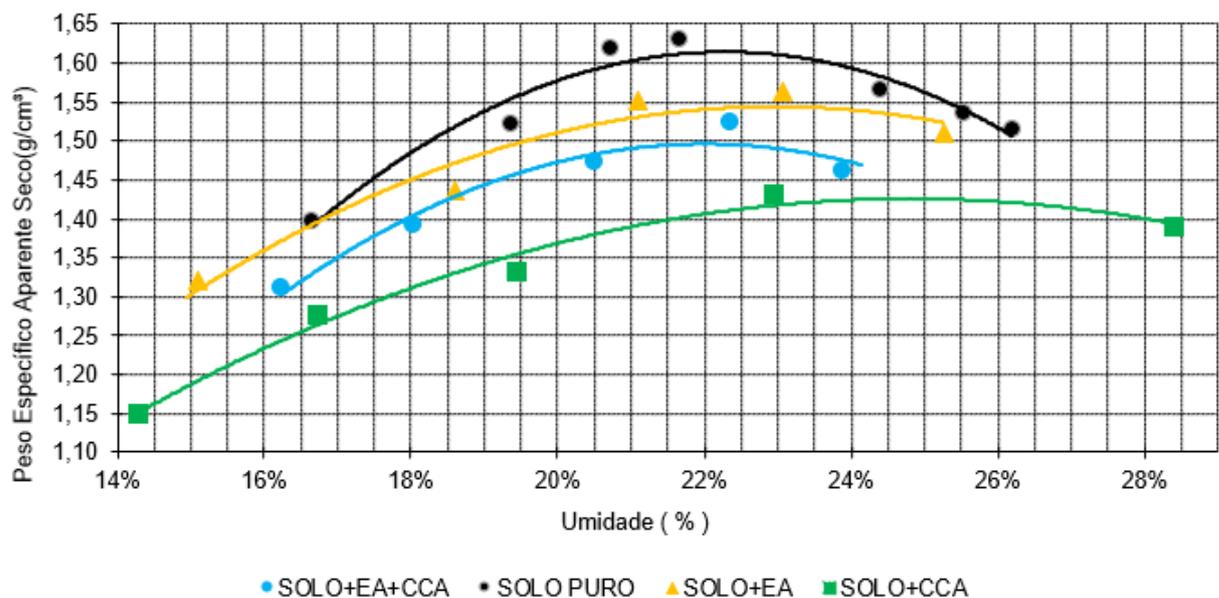
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Curvas de compactação

Através dos métodos descritos nas normas empregadas, citadas no item 3.1.4, foram realizadas as curvas para o solo puro e as três combinações possíveis com os aditivos (cinza da casca de arroz e emulsão asfáltica), apresentadas na Figura 15, as umidades ótimas para cada uma das misturas está exposta na Tabela 8.

Ao misturar o solo com os aditivos, foi possível notar a diminuição do peso específico aparente seco máximo. Essa redução é explicada pelo fato dos aditivos possuírem massa específica inferior à do solo puro (ALI; ADNAN; CHOY, 1992; BERNUCCI *et al.*, 2008; ZHANG; LASTRA; MALHOTRA, 1996).

Figura 15 – Curvas de compactação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Umidade ótima

Mistura	Faixa umidade ótima (%)
Solo puro	20 - 22
Solo + CCA	23 - 25
Solo + Emulsão asfáltica	21 - 23
Solo + CCA + Emulsão Asfáltica	22 - 24

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao tratar sobre a cinza da casca de arroz, Ali, Adnan e Choy (1992), Muntohar e Hantoro (2000) e Katz (2007), explicam que a grande diminuição no peso específico seco máximo em relação ao solo puro se justifica pela tendência da CCA de revestir os grãos de solo, resultando em partículas maiores e com isso, maior número de vazios na massa de solo, reduzindo a densidade do conjunto.

Nas misturas com CCA, também é possível observar um incremento nos valores do teor ótimo de umidade, devido à maior capacidade de absorção de água que o aditivo possui quando comparado ao solo puro.

4.2 Trabalhabilidade

Como é exposto na Figura 16, a mistura que inclui a cinza da casca de arroz (Figura 16b) resultou em menos grumos na massa final, contribuindo na distribuição mais homogênea da emulsão asfáltica e água no solo. Ademais, no momento da mistura na argamassadeira, foi possível observar uma aderência consideravelmente menor do solo nas paredes e pá misturadora, que pode indicar uma facilidade no momento da estabilização em campo, visto que a dificuldade na homogeneização da emulsão asfáltica com o solo é consenso entre Yoder e Witczak (1975) e Miceli Jr. (2006). Além da observação visual, se faz necessário uma análise da redução da plasticidade da mistura, para comparação com a literatura consultada. Porém, conforme a CCA é manipulada, ela se desintegra, impossibilitando assim a realização de ensaios usuais de caracterização que atestem a diminuição da plasticidade do solo, como os limites de Atterberg.

Figura 16 – Mistura solo e emulsão asfáltica: (a) sem adição de CCA; (b) com adição de CCA.

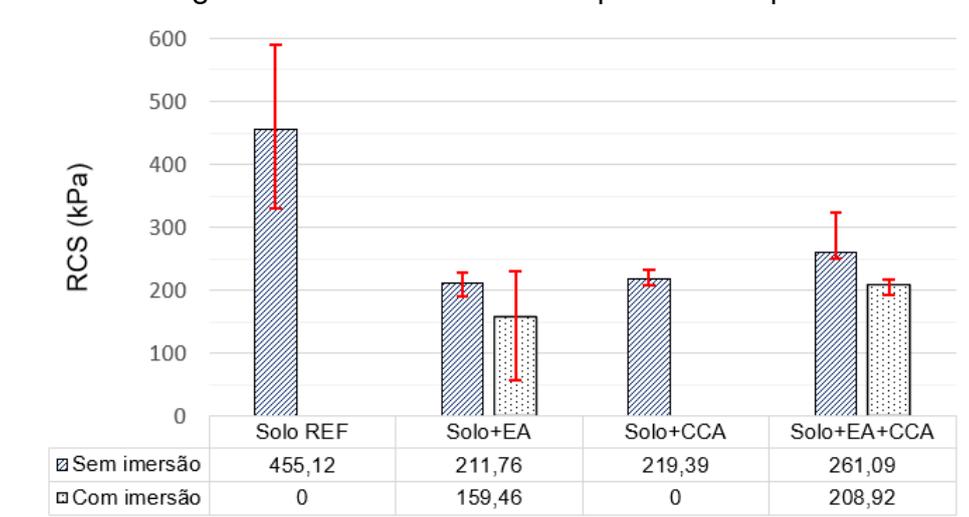


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Resistência à compressão simples

Conforme exposto no item 3.6, o ensaio foi regido pela NBR 12025, e os resultados estão apresentados na Figura 17, onde estão diferenciados os valores para amostras com e sem imersão nas 24 horas anteriores à ruptura. Para permitir a visualização da dispersão dos resultados, é apresentada uma barra de erros com máximos e mínimos valores encontrados.

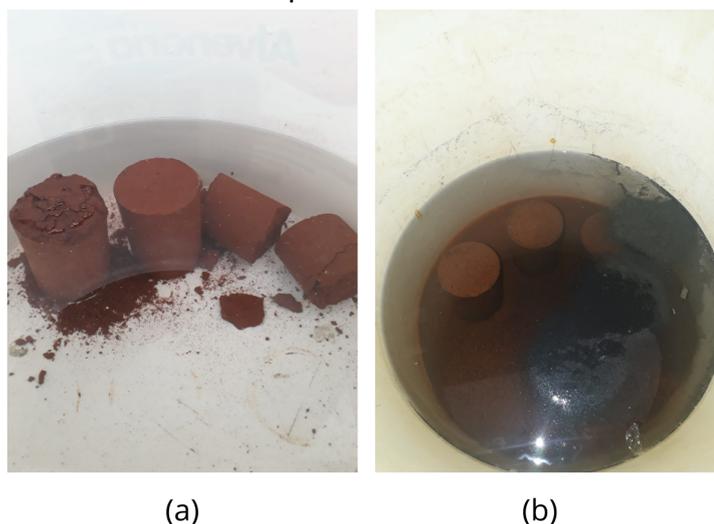
Figura 17 – Resistência à compressão simples



Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras de solo referência e solo+CCA (Figura 18a e 18b, respectivamente) apresentam valor igual a zero, pois se desintegraram após as 24 horas de imersão em água, sendo assim, não apresentam valores de RCS imerso. Nas amostras de solo+CCA, Figura 18b, é possível observar que a cinza emergiu até à superfície, completamente desintegrada do solo.

Figura 18 – Amostras imersas por 24 horas: solo referência e solo+CCA



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 19 apresenta os corpos de prova que resistiram à ação da água, as misturas solo+EA e solo+EA+CCA. Sendo assim, é notório o ganho que se obteve com estas misturas, visto que estas resistiram à ação da água. Neste contexto, a mistura

com emulsão asfáltica e CCA se destaca em relação a com apenas a emulsão, com um acréscimo de 31% nos valores de RCS.

Figura 19 – Amostras imersas por 24 horas: solo+EA e solo+EA+CCA



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que as amostras com solo referência obtiveram valores maiores que as amostras com aditivos. As amostras de solo+EA apresentaram um ganho reduzido de resistência em relação aos valores encontrados pelos autores consultados. Esses valores reduzidos podem ser justificados pelo fato das amostras não terem variação em sua umidade, e, segundo Guarçoni, Mattos e Gonçalves (1988), Moreira (2011), o principal mecanismo da estabilização betuminosa é justamente a perda de água, que resulta na coalescência das partículas de betume e formação da película betuminosa, e conseqüente incremento de resistência da massa de solo, através da coesão e impermeabilização conferidos à ela.

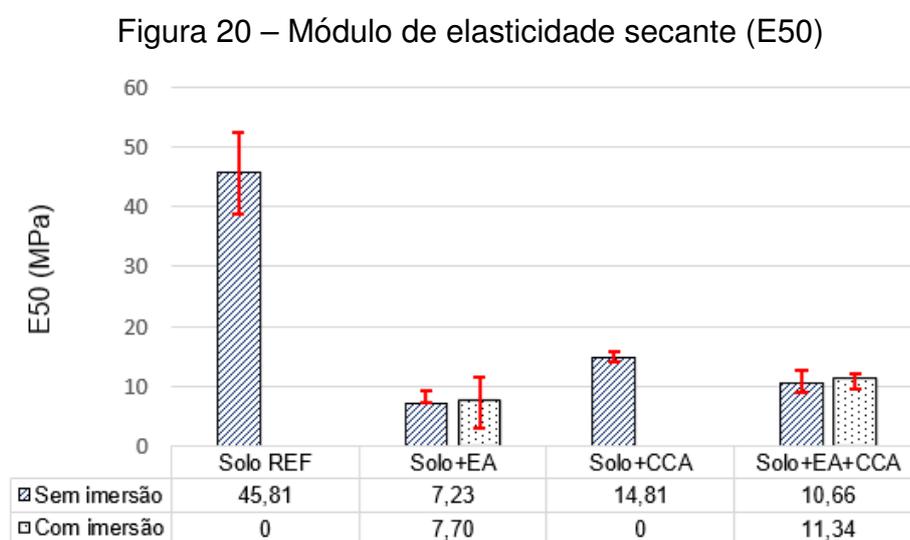
Fazendo um comparativo entre as misturas com aditivos, a mistura solo+EA+CCA obteve uma resistência 23,3% maior que a mistura apenas com emulsão, e 19% maior que a mistura apenas com CCA.

4.4 Módulo de elasticidade

A partir do ensaio de resistência à compressão simples (RCS) foi possível traçar curvas tensão x deformação para cada uma das amostras (Figura 21), e, assim obter os valores de módulo de elasticidade secante (E50).

Ao analisar a elasticidade de um material através da curva tensão x deformação, é comum o emprego do módulo secante, obtido através da inclinação de uma reta traçada entre a origem do gráfico até uma tensão especificada, no caso de análise de solos, geralmente toma-se como referência o ponto onde ocorre 50% da tensão desviadora de pico (TELES, 2013; MUNTOHAR *et al.*, 2013).

Porém, visto que na realização do ensaio não foi analisada diretamente a deformação do corpo de prova e sim o deslocamento da prensa, o trecho inicial não expressa resultados reais, pois relata o momento de ajustes de instrumentação, durante o primeiro contato da superfície da célula aplicadora de carga com a amostra. Assim, para obter o valor de módulo secante nos gráficos, de modo a desconsiderar o início da curva, considerou-se o trecho entre 20% e 50% da tensão desviadora de pico. Na Figura 20 estão apresentados os valores médios de módulo de elasticidade secante para cada mistura.

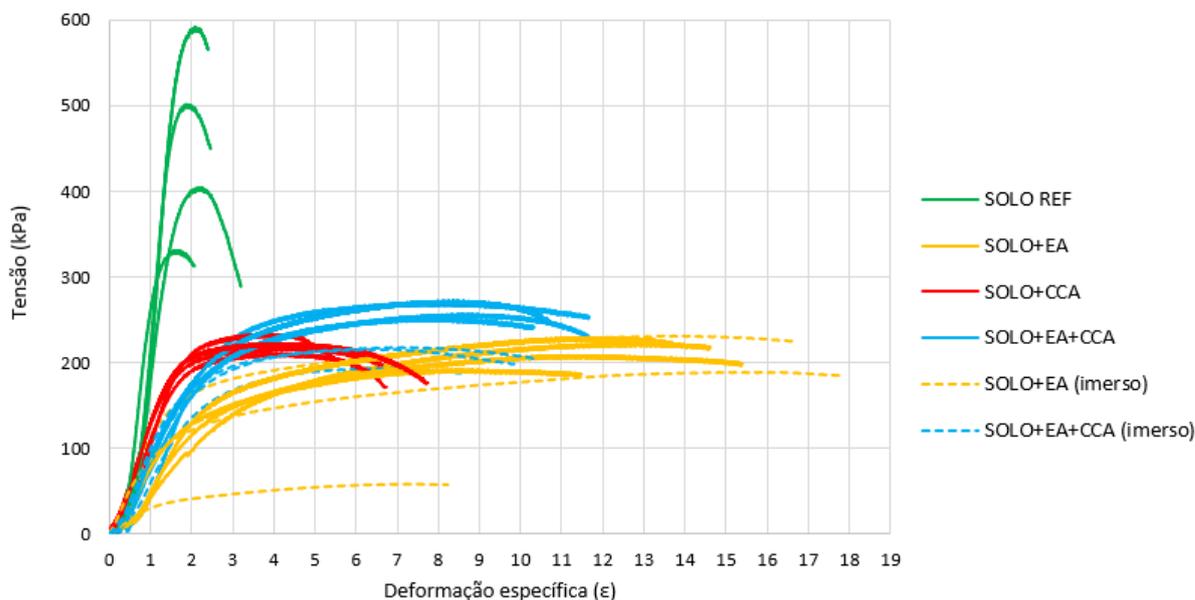


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao tratar sobre o módulo de elasticidade, valores elevados indicam que menor será a deformação do material quando submetido à uma certa tensão. De forma complementar, é necessário analisar o comportamento do material a partir das curvas tensão x deformação, quando o material sofre uma deformação muito baixa até a ruptura, pode-se denominar como frágil. De maneira análoga, um material dúctil é aquele que se deforma significativamente quando submetido ao carregamento

(CALLISTER, 2019).

Figura 21 – Curvas tensão x deformação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando as curvas, conforme a Figura 21, percebe-se que as amostras de referência apresentaram um comportamento semelhante ao frágil, chegando à falha com pouca deformação, com queda abrupta da tensão suportada, visto que o material falhou. Nas misturas com os aditivos, é possível observar que após atingirem a tensão de pico, as amostras continuaram a suportar o carregamento, com o aumento da deformação, apresentando comportamento semelhante ao dúctil.

O comportamento das curvas das misturas estabilizadas, seja com emulsão asfáltica e/ou cinza da casca de arroz, pode ser interpretada como um ponto positivo quando observado do ponto de vista estrutural global. Como é possível observar na Figura 21, as curvas solo+EA, solo+CCA e solo+EA+CCA, após atingirem o pico de tensão, permanecem deformando e resistindo à sollicitação sem queda brusca como o solo puro. Quando aplicadas em obras rodoviárias, na situação de uma estrutura apresentar indícios de um possível colapso, o uso dos aditivos forneceria tempo para tomar alguma medida de reparo ou contenção, evitando a perda total desta.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao fim deste trabalho, obteve-se como principal ganho a melhora da trabalhabilidade de um solo de características argilosas, estabilizado com emulsão asfáltica, a partir da adição da cinza da casca de arroz..

A adição da cinza da casca de arroz melhorou muito a trabalhabilidade da mistura, ficando ainda mais evidente na mistura com a emulsão asfáltica, fato observado visualmente com a redução significativa na formação de grumos e diminuição da aderência da mistura na argamassadeira. Além disso, apesar de reduzir a massa específica da mistura, conferiu um aumento de 23,3% nos valores de RCS em relação ao solo estabilizado apenas com emulsão, atingindo valor médio igual a 261,09kPa.

Quanto à ação da água, considerando os ensaios em amostras imersas em água por 24 horas, a adição de emulsão asfáltica proporcionou ganhos significativos, visto que as amostras resistiram à imersão, diferente das amostras de solo puro e solo+CCA, que se desintegraram e não puderam ser ensaiadas. Nesse contexto, as amostras de solo+EA+CCA se destacaram frente às de solo+EA, com um acréscimo no valores de RCS de 31%, obtendo valor médio de 208,92kPa.

Através das curvas de tensão x deformação foi possível observar uma redução nos valores de módulo de elasticidade secante nas misturas com a adição dos estabilizantes, se comparadas ao solo puro. A imersão das amostras em água, solo+EA e solo+EA+CCA, não resultou em mudanças significativas na rigidez das misturas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto a relevância dos resultados obtidos, destacam-se como sugestões para complementar a pesquisa apresentada:

- Caracterizar a cinza da casca de arroz através de ensaios mais refinados, como a difração de raios-X e microscopia eletrônica, a fim de prever seu comportamento e identificar quais fatores influenciam na estabilização do solo, bem como sua interação com a emulsão asfáltica.
- Testar diferentes teores de aditivos, a fim de buscar um teor ótimo que atinja melhores desempenhos.
- Avaliar o comportamento do solo estabilizado através de ensaios mecânicos como resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência.

REFERÊNCIAS

ABEDA. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. **NBR 12025**: Solo-cimento - ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6459**: Solo - determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7180**: Solo - determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181**: Solo - análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16605**: Cimento portland e outros materiais em pó-determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2017.

ADHIKARY, S.; JANA, K. Potentials of rice husk ash as a soil stabilizer. **International Journal of Latest Research in Engineering and Technology**, v. 2, n. 2, p. 40–42, 2016.

ALI, F. H.; ADNAN, A.; CHOY, C. K. Geotechnical properties of a chemically stabilized soil from malaysia with rice husk ash as an additive. **Geotechnical & Geological Engineering**, Springer, v. 10, n. 2, p. 117–134, 1992.

BERNUCCI, L. L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, Rio de Janeiro, p. 504, 2008.

CAIXETA FILHO, J. V. **A logística do escoamento da safra brasileira**. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - Universidade de São Paulo, 2006.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia dos materiais**. [S.l.]: Reverté, 2019.

CASTRO, R. M. L. d. *et al.* **Emulsão: uma revisão bibliográfica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação: guia técnico**. Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, Rio de Janeiro, 2015.

CONSTANTINO, C. d. S. **Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

CRISTELO, N. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Tese (Doutorado) — Universidade do Minho, Braga, 2001.

DAER. **Sistema Rodoviário Estadual**. DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM, 2022. Disponível em: <https://www.daer.rs.gov.br/sistema-rodoviario-estadual>. Acesso em: 21 jul. 2022.

DEL CARPIO, J. **Estudo da influência da adição da cinza de casca de arroz nas propriedades do CCR (Concreto Compactado com Rolo) para seu uso em pavimentos compostos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química nova**, SciELO Brasil, v. 24, p. 778–782, 2001.

_____. Reciclagem de resíduos agro-industriais: Cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica. **Cerâmica Industrial**, v. 10, n. 2, p. 22–25, 2005.

DNER. **DNER ME 228/94**: Solos - compactação em equipamento miniatura. Departamento Nacional de Rodagem, Brasília, 1994.

FIROOZI, A. A. *et al.* Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, Springer, v. 8, n. 1, p. 1–16, 2017.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo Jaguaribe/Estado do Ceará 213 f. 213 p.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

GUARÇONI, D.; MATTOS, A.; GONÇALVES, N. Estabilização de solos com betume-técnicas de execução. **Reunião Anual de Pavimentação**, v. 23, 1988.

GUEDERT, L. **Estudo da Viabilidade Técnica e Econômica do Aproveitamento da Cinza de Casca de Arroz como Material Pozolânico. 1989**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina, 1989.

IBGE. **Produção agrícola por localidade**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/alegrete/pesquisa/14/10193?localidade1=43>. Acesso em: 21 jul. 2022.

_____. **Produção de arroz: valor de produção**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/arroz/rs>. Acesso em: 20 jul. 2022.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization principles and practice**. 1972.

JACINTHO, E. C. **Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens**. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Brasília, 2005.

JACINTHO, E. C. **Estudo de propriedades e comportamentos de misturas solo-emulsão aplicado a barragens**. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Brasília, 2010.

KATZ, L. B. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KÉZDI, A. **Stabilized earth roads**. Elsevier, 1979.

KLAMT, R. A. **Utilização da cal e da cinza da casca de arroz no melhoramento das propriedades geotécnicas de solos**. TCC (Graduação) - Universidade Federal do Pampa, 2012.

KUMAR, A.; GUPTA, D. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash–soil mixtures. **Geotextiles and Geomembranes**, Elsevier, v. 44, n. 3, p. 466–474, 2016.

MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solo**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, s.d.

MICELI Jr., G. **Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

MICELI Jr., G.; VIEIRA, Á.; MOTTA, L. M. G. da. **Comportamento resiliente de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica**. Rio de Janeiro, 2010.

MOREIRA, E. D. **Desempenho de dois trechos de solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

MUNTOHAR, A. S.; HANTORO, G. Influence of rice husk ash and lime on engineering properties of a clayey subgrade. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 5, n. 2000, p. 1–13, 2000.

MUNTOHAR, A. S. *et al.* Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber. **Journal of materials in civil engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 25, n. 9, p. 1260–1270, 2013.

OLIVEIRA, D. D. d.; ANDRADE, G. S. d.; LAPERCHE, L. A. **Estudo Comparativo de Concreto Betuminoso Usinado a Quente com Diferentes Tipos de Ligante na Região Metropolitana de Goiânia**. TCC (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

OLUYEMI-AYIBIOWU, B. Stabilization of lateritic soils with asphalt-emulsion. **Nigerian Journal of Technology**, v. 38, n. 3, p. 603–608, 2019.

PACHECO, L. M. **Solos estabilizados com emulsão asfáltica para uso em pavimentação: estudo laboratorial**. TCC (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PINTO, C. d. S. **Curso básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

REBELO, E. d. P. *et al.* **Estudo de mistura solo-emulsão para a região de Urucu (Coari-AM)**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

ROCHA, C. F. **O Transporte de Cargas no Brasil e sua Importância para a Economia**. TCC (Graduação) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2015.

RODRIGUES, W. F. *et al.* Aproveitamento dos resíduos sólidos da cinza de casca de arroz para estabilização de solos. **XIX Jornada de Iniciação Científica**, ULBRA - TO. Palmas, v. 19, p. 579–583, 2019.

SANT'ANA, W. C. **Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o Estado do Maranhão**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

SANTOS, W. J. *et al.* **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1997.

SHERWOOD, P. **Soil stabilization with cement and lime**. 1993.

SILVA, J. A. *et al.* Comportamento geotécnico de um solo expansivo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal hidratada. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 2, p. 232–256, 2020.

SILVA, M. R. d. **Utilização de material fresado com adições de cimento Portland e pó de pedra em camadas de base e sub-base de pavimentos**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

TASHIMA, M. M. *et al.* Reaproveitamento da cinza de casca de arroz na construção civil. **Holos Environment**, v. 11, n. 1, p. 81–89, 2011.

TELES, G. L. V. Estudo sobre os parâmetros de resistência e deformabilidade da areia de hokksund. **Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro**, 2013.

VILLIBOR, D. F. *et al.* **Estabilização granulométrica ou mecânica**. EESC/USP, 1978.

WINTERKORN, H. F. **Foundation engineering handbook**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1975.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. Hoboken: John Wiley & Sons, 1975.

ZHANG, M.; LASTRA, R.; MALHOTRA, V. Rice-husk ash paste and concrete: Some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 6, p. 963–977, 1996.

ZUQUINAL, R. *et al.* **Utilização da Casca de Arroz na Produção de Energia Para uma Indústria de Beneficiamento de Arroz Sul Catarinense**. TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.