



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

OTAVIO AUGUSTO ALVES

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO SOLO POR BRITA GRANÍTICA TIPO 1 PARA
COMPOR ATERROS COMPACTADOS.**

MOSSORÓ

2025

OTAVIO AUGUSTO ALVES

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO SOLO POR BRITA GRANÍTICA 1 PARA
COMPOR ATERROS COMPACTADOS.**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: DCs. Francisco Alves da Silva Junior

MOSSORÓ

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A474s Alves, Otavio Augusto.
Substituição parcial do solo por brita granítica
tipo 1 para compor aterros compactados / Otavio
Augusto Alves. - 2025.
42 f. : il.

Orientador: Francisco Alves da Silva Junior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2025.

1. Pavimentação rodoviária. 2. Estabilização
granulométrica. 3. Agregados granulares. 4. Solo.
5. Compactação. I. Silva Junior, Francisco Alves
da, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

OTAVIO AUGUSTO ALVES

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO SOLO POR BRITA GRANÍTICA TIPO 1 PARA
COMPOR ATERROS COMPACTADOS.**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semiárido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: 27 de Março de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Francisco Alves da Silva Junior (UFERSA)
Presidente

(Raimundo Gomes de Amorim Neto)
Membro Examinador

(Joao Paulo Matos Xavier)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente por ter me guiado durante toda essa jornada acadêmica. A minha mãe Rosana Alves por sempre ter acreditado em mim e me dado apoio necessário para chegar até aqui e nunca ter deixado eu desistir ao longo desta caminhada. Aos meus amigos de longa data da irmã'dade, aos meus grandes amigos Luis Pedro, Bricio Carriel, Ciro Nóbrega, Nilton, Pedro Castelo Branco, Rasec Sotnas, Pablo, Thiago Ferreira, Wilson, Victor Pontes e também aos meus companheiros de jornada acadêmica por todo apoio Vinicius Almeida, Emerson, Abraão Lincon, Antônio Avelino, Natan kirley e Hitalo Soares.

Deixo aqui meu profundo agradecimento ao meu orientador Francisco Alves da Silva Junior, por toda sua dedicação, apoio e paciência ao longo deste projeto, sua orientação foi crucial para que eu conseguisse alcançar meus objetivos, e também ao técnico de laboratório Augusto Souza, por todo suporte, ajuda e dedicação; por sempre está solícito durante este ciclo. A todos o meu sincero agradecimento e obrigado por acreditarem.

RESUMO

Estudos recentes sobre a qualidade e resistência dos solos destacam a crescente necessidade de soluções técnicas e econômicas para estabilização aterros. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial do solo por brita granítica tipo 1 em aterros compactados com energia modificada, analisando suas influências nas propriedades mecânicas do solo e sua adequação às normas técnicas. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais padronizados no solo arenoso extraído nas dependências da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), que passou por processos de destorroamento, secagem e peneiramento com agitador mecânico. O solo foi caracterizado granulometricamente segundo as normas ABNT NBR 7181, NBR 6459 e NBR 7180, determinando-se sua classificação como arenoso não plástico pela metodologia HRB/AASHTO. Posteriormente, esse solo foi misturado à brita granítica tipo 1 (com granulometria variando de 9,5mm a 19mm), nas proporções de 5%, 10% e 15%, para a realização de ensaios mecânicos específicos, como a compactação com energia modificada (cinco camadas com 55 golpes cada) e o ensaio California Bearing Ratio (CBR), acompanhado pela avaliação diária da expansão durante sete dias sob condições saturadas. Os principais resultados demonstraram aumento significativo na resistência mecânica do solo com o incremento da brita, destacando-se um valor máximo de CBR igual a 111,13% com adição de 15% de brita, frente a apenas 27,69% obtido no solo natural. A expansão das misturas, avaliada diariamente por sete dias após submersão dos corpos de prova, permaneceu dentro dos limites aceitáveis pela norma ABNT NBR 9895, variando entre 0,048% no solo natural e até 0,382% na mistura com maior concentração de brita. Assim, concluiu-se que a utilização de brita granítica tipo 1 é tecnicamente viável para camadas estruturais de base e sub-base, proporcionando aumento expressivo na capacidade de suporte do solo, além de atender às exigências normativas vigentes.

Palavras-chave: Pavimentação rodoviária, estabilização granulométrica, agregados granulares, solo, compactação, resistência mecânica.

ABSTRACT

Recent studies highlight the increasing demand for technical and economical solutions for soil stabilization in landfill. Thus, this study aimed to evaluate the technical feasibility of partially substituting soil with type 1 granite crushed stone in embankments compacted with modified energy, analyzing its influence on the mechanical properties of the soil and compliance with technical standards. Standard laboratory tests were carried out on sandy soil collected from the premises of the Federal Rural University of the Semi-Arid Region (UFERSA), which underwent processes of clod-breaking, drying, and sieving with a mechanical shaker. The soil was granulometrically characterized following ABNT standards NBR 7181, NBR 6459, and NBR 7180. Subsequently, granite gravel type 1 (particle size ranging from 9.5 mm to 19 mm) was mixed with the soil in proportions of 5%, 10%, and 15% for specific mechanical tests, including modified energy compaction (five layers with 55 blows each) and the California Bearing Ratio (CBR) test, accompanied by an expansion evaluation. The expansion was measured daily for seven days after submerging the samples. Key results showed a substantial improvement in soil mechanical strength with increased gravel content, achieving a maximum CBR of 111.13% at 15% gravel addition, compared to only 27.69% for natural soil. Expansion values remained within acceptable limits defined by ABNT NBR 9895, varying between 0.048% for natural soil and up to 0.382% for mixtures. Thus, it is concluded that the partial substitution of soil with type 1 granitic gravel (9.5mm to 19mm) is technically viable for structural layers of base and sub-base in road paving, significantly enhancing soil bearing capacity and conforming to current regulatory standards.

Keywords: Road paving, granulometric stabilization, granular aggregates, sustainability in engineering, mechanical strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas comuns de pavimentos	15
Figura 2 - Fluxograma	20
Figura 3 – Local de retirada da amostra do solo.....	21
Figura 4 – Localização no Google Maps.....	21
Figura 5- Destorroamento do solo.....	21
Figura 6 – Peneiramento do solo com agitador mecânico.....	24
Figura 7 – Amostra de granulometria.....	24
Figura 8 – Peneiramento de brita em agitador mecânico.	25
Figura 9 – Aparelho CasaGrande.	27
Figura 10 - Amostra de solo.	27
Figura 11 – Número de golpes do ensaio CasaGrande.....	27
Figura 12 – Amostra de ensaio de limite de plasticidade.....	28
Figura 13 – Compactação do solo.	30
Figura 14 – Mistura solo-brita	30
Figura 15 – Corpo de prova.....	30
Figura 16 – Prensa de ensaio CBR.	31
Figura 17 – Leitura de expansão do solo.....	32
Figura 18 – Retirada do corpo de prova de submersão.....	32
Figura 19 – Análise granulométrica do solo.....	33
Figura 20 – Gráfico de compactação do solo.	34
Figura 21 – Análise granulométrica da brita.	34
Figura 22 – Dados Comparativos.	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Série de peneiras.....	24
Quadro 2 – Série de peneiras para agregados graúdos.	29
Quadro 3 – Classificação do solo	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa da granulometria da brita.	34
Tabela 2 – Resumo dos ensaios.....	36
Tabela 3 - Dados de expansão	36
Tabela 4 - Dados de CBR.....	36
Tabela 5 – Grafico CBR	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	GERAL.....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	A ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO	14
3.1.1	Camada de Subleito e reforço do Subleito	15
3.1.2	Camada de Base e Sub-base	16
3.1.3	Revestimento.....	16
3.2	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	17
3.2.1	Estabilização mecânica	17
3.2.2	Estabilização granulométrica	17
3.2.3	Estabilização química.....	18
3.3	UTILIZAÇÃO DE BRITA GRANÍTICA NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO	18
4	METODOLOGIA	20
4.1	ORIGEM E FABRICAÇÃO DA BRITA GRANÍTICA.	20
4.2	EXTRAÇÃO DO SOLO	21
4.3	GRANULOMETRIA DO SOLO E DA BRITA GRANÍTICA TIPO 1.....	22
4.3.1	Preparo do solo, destorroamento e peneiramento.....	22
4.3.2	Ensaio de Limite de Liquidez e Plasticidade.	26
4.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA DO SOLO	29
4.4.1	Ensaio de compactação	29
4.4.2	Ensaio de CBR.....	30
4.4.3	Ensaio de expansão.....	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1	CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICA DO SOLO.....	33
5.2	APLICAÇÃO DA BRITA GRANÍTICA TIPO 1 (9,5MM Á 19MM).....	35
6	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

Um dos mais importantes papéis da engenharia geotécnica consiste na melhoria da infraestrutura rodoviária por meio da otimização de materiais utilizados na composição de aterros e camadas de pavimentos (Correi et al., 2016). No Brasil, onde o modal rodoviário é predominante e responde por cerca de 65% da movimentação de cargas (Confederação Nacional do Transporte - CNT, 2023), a necessidade de soluções eficazes e economicamente viáveis para a estabilização de solos torna-se cada vez mais urgente (Schussler; De Matos, 2024). O uso de materiais alternativos, como a brita granítica, na estabilização e reforço de solos em pavimentação tem sido amplamente estudado, dada sua elevada resistência mecânica e durabilidade (Singh *et al.*, 2016; Abdelkader *et al.*, 2022).

Ramírez-Vargas *et al.* (2024), destacam que a incorporação de agregados graúdos em misturas de solo pode melhorar significativamente sua capacidade de suporte e estabilidade volumétrica. Técnicas de estabilização mecânica e granulométrica têm sido aplicadas com sucesso em diversas regiões para diminuir problemas como expansibilidade e baixa resistência ao cisalhamento de solos finos. A adoção de técnicas de estabilização contribui para o aumento da vida útil das infraestruturas rodoviárias, reduzindo custos operacionais e de manutenção ao longo do tempo.

A brita granítica tipo 1 que sua granulometria varia de 9,5mm a 19mm, tem se mostrado uma alternativa viável para reforço de solos em pavimentação rodoviária (Sherwood, 2001; amulya *et al.*, 2021). A incorporação desse material em misturas estabilizadas pode melhorar a resistência ao cisalhamento e reduzir a plasticidade do solo, tornando-o mais adequado para aplicação em subleitos e camadas de base de pavimentos flexíveis (Andrade, 2017; Pereira, 2021).

O presente trabalho buscou analisar técnicas para melhorias de resistência e estabilidade de solos, através da adição de brita granítica tipo 1 em diferentes proporções. Analisando características granulométricas, resistência do solo e efeitos adversos da umidade excessiva.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial do solo por brita granítica tipo 1 em aterros compactados com energia modificada, analisando suas influências nas propriedades mecânicas do solo e sua adequação às normas técnicas para aterros e pavimentação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para avaliar a viabilidade técnica, foi elaborado as seguintes etapas:

- Caracterizar os materiais utilizados no estudo, incluindo a granulometria e as propriedades físico-mecânicas do solo natural e da brita granítica tipo 1, conforme normas técnicas aplicáveis.
- Elaborar misturas de solo e brita granítica em diferentes proporções, analisando a influência da substituição parcial do solo nas características dos aterros compactados.
- Realizar ensaios laboratoriais de resistência e comportamento mecânico, incluindo compactação com energia modificada, expansão e CBR, para avaliar o desempenho das misturas em comparação ao solo natural.
- Comparar os resultados obtidos entre as misturas e o solo natural, verificando sua adequação às exigências normativas e avaliando a viabilidade técnica da utilização da brita granítica tipo 1 em aterros compactados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo apresenta a revisão bibliográfica que fundamenta este trabalho. As referências utilizadas incluem normas técnicas do DNIT, bibliografias especializadas, como livros e manuais, bem como artigos científicos que abordam temas semelhantes ao proposto neste estudo.

Este capítulo está dividido em três partes. A primeira parte discute as classificações dos pavimentos, destacando as diferenças estruturais entre eles. Por sua vez, a segunda parte aborda a estabilização de solos, prática essencial para a construção dessas estruturas. Por fim, a terceira parte explora o uso da brita granítica na estabilização das camadas de pavimentos.

3.1 A ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO

Os pavimentos são projetados em múltiplas camadas, cada uma com uma espessura e rigidez definidas, de forma que o conjunto estrutural apresente a rigidez necessária para suportar as condições climáticas e geométricas da região, bem como o volume de tráfego ao longo de sua vida útil. Para Baldo (2007), tradicionalmente, os pavimentos são divididos em duas categorias principais: rígidos e flexíveis. Contudo, mais recentemente, tem-se adotado a terminologia pavimentos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, referindo-se ao tipo de revestimento empregado. No caso dos pavimentos asfálticos, há duas subdivisões: pavimentos flexíveis, onde as camadas abaixo da superfície asfáltica são compostas por materiais granulares, solos ou agregados; e pavimentos semirrígidos, nos quais a base ou sub-base, sob a camada asfáltica, é formada por materiais cimentados ou estabilizados com ligantes hidráulicos, capazes de resistir aos esforços de tração.

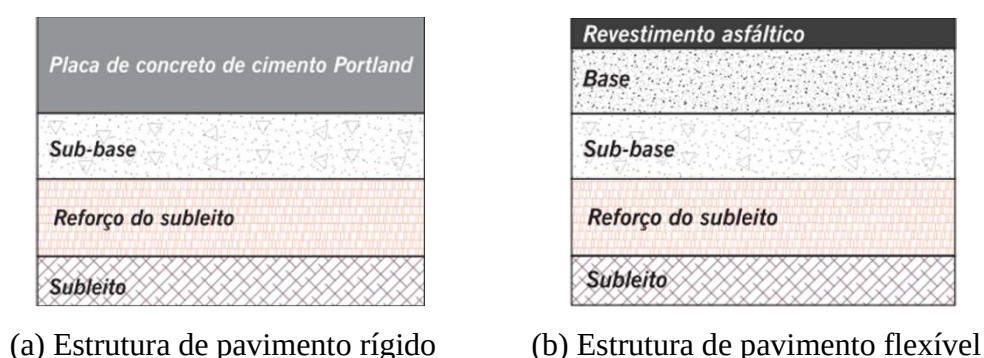
O estudo das camadas estruturais dessas estruturas é essencial para garantir a construção de pavimentos seguros, econômicos e duráveis. Esse conhecimento possibilita a projeção de vias que resistam às cargas de tráfego e intempéries, assegurando uma distribuição uniforme das tensões e aumentando a vida útil das estruturas.

A estrutura do pavimento é concebida, em seu sentido puramente estrutural, para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes, embora isso não seja tomado como regra geral. Para que funcione adequadamente, todas as peças que a compõem devem trabalhar deformações compatíveis com sua natureza e capacidade comportada, isto é, de modo que não ocorram

processos de ruptura ou danificação de forma prematura e inadvertida nos materiais que constituem as camadas do pavimento (BALDO, 2007).

Reforçando, segundo Bernucci *et al.* (2008), o pavimento como uma estrutura composta por múltiplas camadas de espessura finita, cuja função é resistir aos esforços do tráfego e ao clima, proporcionando boas condições de rolamento, conforto e segurança aos usuários. A Figura 1 apresenta um esquema de como essas camadas estão distribuídas em um pavimento.

Figura 1 – Camadas comuns de pavimentos



Fonte: Bernucci *et al* (2008)

3.1.1 Camada de Subleito e reforço do Subleito

O subleito corresponde à camada de solo natural que dá suporte às camadas superiores do pavimento rodoviário. Conforme descrito por Baldo (2007), os esforços impostos sobre sua superfície serão aliviados em sua profundidade. Tais esforços aplicados geralmente se dissipam nos primeiros metros da camada, o que torna essencial uma atenção especial aos seus estratos superiores, onde as solicitações são mais intensas. Pensando nisso, para garantir que essa camada seja capaz de suportar as cargas transmitidas, torna-se imprescindível que a compactação desses estrados superiores seja realizada de forma adequada. Além disso, a qualidade do subleito desempenha um papel decisivo no desempenho estrutural do pavimento.

Quando o subleito apresenta uma baixa capacidade de suporte, pode ser necessária a inclusão de uma camada de reforço. Conforme Hilário (2016), essa medida é utilizada, normalmente, quando o CBR do subleito se encontra entre 2% e 20%. Tal reforço pode ser realizado utilizando materiais granulados ou estabilizantes químicos, como cal ou cimento, que ajudam a aumentar a resistência do solo, garantindo maior estabilidade e prevenindo recalques. Embora o uso de uma camada de reforço no subleito não seja obrigatório, pois

camadas superiores mais espessas poderiam reduzir as pressões sobre um subleito de baixa qualidade, ele é frequentemente aplicado por motivos econômicos. Isso ocorre porque subleitos com pouca resistência demandariam, em alguns tipos de pavimentos, especialmente os flexíveis, a utilização de camadas mais espessas de base e sub-base (BALDO, 2007).

3.1.2 Camada de Base e Sub-base

Para aliviar as pressões sobre as camadas de solo inferiores, surgem as camadas de base e sub-base. Estruturalmente, a camada de base é responsável por fornecer maior estabilidade ao pavimento, transmitindo as cargas do tráfego para as camadas inferiores. Para essa finalidade, materiais como brita, solo-cimento ou concreto asfáltico são comumente empregados nessa camada. De acordo com Baldo (2007), quando a camada de base exigida para distribuir os esforços para camadas inferiores adequadamente é muito espessa, procura-se, por razões de natureza construtiva e econômica, dividi-la em duas camadas, criando-se, assim, uma sub-base, geralmente de menor custo. De acordo com o DNIT (2010), a sub-base é uma camada complementar à base, desempenhando as mesmas funções, porém sendo utilizada quando há necessidade de reduzir a espessura da base por razões econômicas. Sua aplicação é recomendada em situações em que a execução direta da base sobre o leito regularizado ou sobre o reforço não seja tecnicamente ou economicamente viável.

Ademais, conforme Pinto e Preussler (2010), essas camadas podem também exercer uma função relevante na drenagem subsuperficial dos pavimentos, contribuindo para a durabilidade e desempenho estrutural do pavimento.

3.1.3 Revestimento

O revestimento, ou camada de rolamento, é a camada superficial do pavimento, em contato direto com o tráfego de veículos. Ela deve possuir características que garantam aderência, resistência à abrasão e baixa permeabilidade, além de proporcionar uma superfície confortável e segura para os veículos (Silva e Carmo, 2023). Segundo Baldo (2007), essa camada necessita ser composta de materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal, onde, dentre esses materiais, estão: paralelepípedos, blocos pré-moldados de concreto, placas de concreto, tratamentos superficiais betuminosos e misturas asfálticas em geral.

3.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Na construção de um pavimento, é bastante interessante, em aspectos econômicos e sustentáveis, o uso de solo local para composição das diferentes camadas que o compõem, reduzindo custos e otimizando o andamento da obra. No entanto, muitas vezes os solos presentes in loco não possuem as características adequadas para suportar as cargas previstas no projeto do pavimento. Por isso, torna-se necessário corrigir o esse solo local para que o mesmo satisfaça os requisitos de projeto. Esse processo de modificação das propriedades do solo é chamado de estabilização do solo (Makusa, 2013; Santos, 2012).

Conforme Senço (2001), estabilizar um solo significa garantir que ele adquira a capacidade de resistir a deformações e rupturas ao longo de sua vida útil. O autor ainda ressalta que um solo estabilizado deve apresentar resistência ao cisalhamento e à deformação, permitindo que o material suporte as tensões sem falhar.

Posto isso, a bibliografia especializada (MEDINA, 1987; VILLIBOR, 1982) cita três métodos principais de estabilização: mecânico, granulométrico e químico. O método realizado neste experimento foi o granulométrico.

3.2.1 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica é considerada o método mais utilizado e mais antigo na construção de estradas, baseando-se na melhoria do solo por meio de alterações no sistema trifásico, ajustando as proporções das fases sólida, líquida e gasosa. (Medina et al., 2005; Lima et al., 1993). Segundo Sartori (2015), esse tipo de estabilização consiste na correção da granulometria do solo, sendo a compactação um processo essencial para promover uma maior densificação do material e atingir a umidade ideal. Ademais, essa técnica é comumente aplicada durante a execução das diferentes camadas de pavimentos e pode ser combinada com outros métodos de estabilização.

3.2.2 Estabilização granulométrica

A correção granulométrica envolve a combinação e mistura de dois ou mais tipos de solos em proporções adequadas, visando obter um material bem graduado e homogêneo, com porcentagem controlada de partículas finas e posterior compactação. Este processo tem como objetivo garantir a estabilidade do solo e aumentar sua resistência mecânica, promovendo o contato entre as partículas maiores e o preenchimento dos vazios com as partículas mais finas (Villibor, 1982). Tal metodologia tem como objetivo alterar as

propriedades do solo até que ele se enquadre em uma faixa granulométrica específica, atendendo as normas técnicas estabelecidas (Sartori, 2015).

3.2.3 Estabilização química

A estabilização química envolve uma reação entre o aditivo e os minerais presentes no solo, especialmente na fração coloidal, ou ainda pelo preenchimento dos poros através da interação do aditivo com a água. No caso de misturas como solo-cimento e solo-cal, o processo inicial pode ser descrito como físico-químico, onde os íons Ca^{++} resultantes da hidratação do cimento reagem com a superfície dos minerais argilosos, alterando o pH da solução eletrolítica. Em seguida, a formação de produtos cimentantes, decorrente da reação pozolânica, contribui para o aumento da rigidez da mistura (Medina, 1987). Reforçando essa classificação, a estabilização química baseia-se na adição de uma substância específica no solo, com o intuito de gerar alterações que impactam suas propriedades mecânicas, como resistência, permeabilidade e deformabilidade, de modo a alcançar a estabilização desejada (Santos et al., 1995).

3.3 UTILIZAÇÃO DE BRITA GRANÍTICA NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO

Atualmente, a brita granítica é amplamente utilizada na construção civil, sendo um dos principais agregados empregados no setor. Esse material, de origem ígnea, é obtido por meio da britagem de rochas graníticas, conferindo-lhe características adequadas para diversas aplicações na engenharia civil. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2009), no Brasil, cerca de 85% da brita produzida tem como origem o granito, enquanto os 15% restantes provêm do calcário e do basalto. A ampla utilização da brita granítica está associada à sua elevada aceitação no mercado, decorrente de suas propriedades mecânicas e mineralógicas. Esse material se destaca por sua alta resistência e pela estabilidade de suas características mineralógicas, fatores que contribuem para sua confiabilidade e aplicação em diversas áreas da construção civil (Pinto, 2019).

No contexto da pavimentação, a brita granítica é expressivamente empregada com o intuito de melhorar as características físicas das camadas estruturais, destacando-se nas camadas de base e sub-base. Dentre as principais características desse agregado que contribuem para o desempenho dos pavimentos, destacam-se a elevada resistência mecânica, a baixa absorção de água e a granulometria controlada, fatores essenciais para a durabilidade e estabilidade das estruturas viárias. De acordo com Silva et al. (2024), a camada de

pavimentação composta por brita granítica é empregada em áreas com volume de tráfego classificado como médio, pesado ou muito pesado, bem como em regiões onde o solo apresenta baixa resistência.

Atualmente, no âmbito acadêmico, diversos estudos analisam e comparam diferentes tipos de agregados que contribuem para a melhoria das propriedades das camadas dos pavimentos. Kleinert et al. (2017) constataram que a brita granítica apresentou desempenho superior em relação à resistência à água quando comparada a outros materiais, sendo recomendada para a restauração de pavimentos urbanos por meio da técnica de reciclagem profunda com adição de cimento. No que se refere à camada de base, Silva et al. (2024) classificou a brita granítica como a melhor alternativa para pavimentação de estradas sujeitas a tráfego intenso e condições favoráveis à percolação de água. Já para a camada de sub-base, Negreiros e Nascimento (2021) destacaram que a Brita Graduada Simples (BGS) contribui significativamente para a melhoria das propriedades estruturais, permitindo a adequada transmissão dos esforços do tráfego para as camadas inferiores.

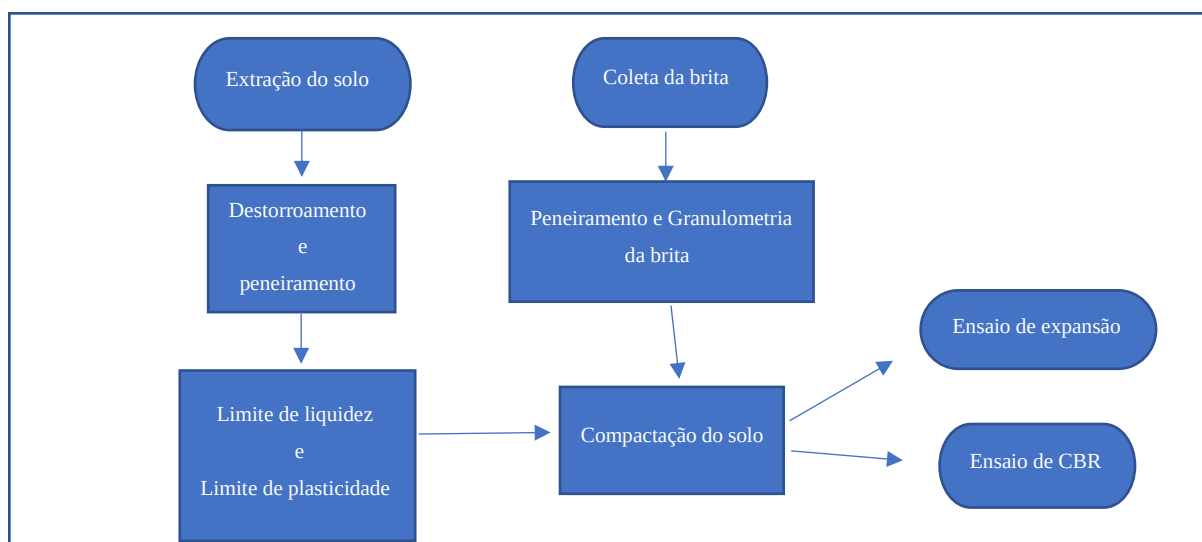
No Brasil, a maioria das normas que regulamentam a execução de camadas de base e sub-base de BGS estabelece critérios de qualidade do material, considerando suas características físicas, químicas e propriedades mecânicas. A avaliação da qualidade é realizada com base em parâmetros físicos, incluindo a forma dos agregados, conforme a norma DNER-ME 086/1994, o desgaste determinado pelo ensaio de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/1998), a equivalência de areia da fração fina (DNER-ME 054/1997) e a durabilidade em solução de sulfato de sódio (DNER-ME 089/1994).

4 METODOLOGIA

A pesquisa investigou as alterações nas propriedades mecânicas do solo estabilizado e sua adequação às exigências normativas para pavimentação. A substituição parcial visou explorar soluções que conciliem viabilidade técnica e econômica, minimizando impactos ambientais associados à extração de solos naturais.

Para assegurar a qualidade e a fidelidade aos modelos de pavimentos existentes, todos os ensaios laboratoriais seguiram as diretrizes normativas da NBR 6457/2016 o que permite uma simulação mais precisa das aplicações realizadas no pavimento. O ensaio segue as seguintes ordens apresentados no fluxograma da Figura 2 apresentada abaixo:

Figura 2 - Fluxograma



Fonte: Autoria própria. (2025)

4.1 ORIGEM E FABRICAÇÃO DA BRITA GRANÍTICA.

A brita granítica utilizada neste estudo é proveniente de uma jazida localizada em Upanema – Rio Grande do Norte. A brita é proveniente de rochas duras e maiores como granitoides, gnaiss, basalto e granito, que são extraídos por meio de explosões ou perfuração, que após essa extração bruta é realizado um processo de trituração conhecido como britagem e peneiramento industrial de seus fragmentos após sua detonação.

Segundo a norma NBR 7211:2022 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), as britas são classificadas de acordo com sua granulometria ou tamanhos dos grãos, sendo estes o pó de brita, brita 0, 1, 2, 3 e 4. Possuindo cada tipo uma função específica no ramo da construção civil. Neste experimento foi utilizado a brita granítica tipo 1 que varia

quanto sua granulometria entre 9,5 mm e 19 mm como nas camadas de bases ou sub-bases de pavimentos.

4.2 EXTRAÇÃO DO SOLO

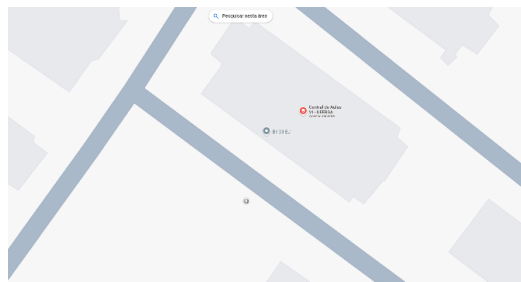
Para a realização deste estudo, foi realizado a extração de solo para análise e ensaios laboratoriais. Foram coletados aproximadamente 100 quilos de solo, quantidade adequada para assegurar que todos os testes necessários pudessem ser realizados de forma apropriada. A extração ocorreu nas dependências da UFERSA, apesar da disponibilidade do solo na área selecionada não ter sido em grande abundância, mas a quantidade necessária para realização deste estudo, apresentado na Figura 3 onde mostra o local da extração, e na Figura 4 sua localização através do Google Maps abaixo.

Figura 3 – Local de retirada da amostra do solo.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 4 - Localização no Google Maps.



Fonte: Imagem retirada do Google Maps.
(2025)

O objetivo foi escolher um solo que já possuísse características de estabilização que justificassem uma melhoria após ser implementado agregado graúdo a utilização de técnicas de estabilização, visando torna-lo mais adequado para o uso eficiente em projetos de aterros e pavimentação, em que a estabilização do solo é crucial para aprimorar suas propriedades mecânicas e assegurar que a estrutura tenha um bom desempenho.

Após sua extração, o solo foi armazenado em baldes fechados dentro do laboratório de misturas asfálticas, de forma que suas propriedades não fossem perdidas, segundo a norma para preparação de amostras para ensaio de caracterização, DNER/ME 041/94. Isto se faz necessário para controlar a umidade do solo, que por sua vez ocasionaria uma mudança significativa nos resultados, comprometendo a precisão dos ensaios, caso houvesse variação de suas propriedades. Desta forma, o armazenamento correto do solo, assegurou a preservação de suas características, garantindo condições ideais durante toda a pesquisa.

4.3 GRANULOMETRIA DO SOLO E DA BRITA GRANÍTICA TIPO 1.

4.3.1 Preparo do solo, destorroamento e peneiramento

Após a extração e transporte das amostras de solo para o laboratório de misturas asfálticas da Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, deu-se início a realização dos ensaios para determinar as características físicas do solo. Inicialmente, as amostras de solo coletados foram distribuídas em bandejas para que houvesse a secagem previa durante um período de 24 horas, de forma que toda a umidade excessiva seja removida, de forma a deixar o solo de forma adequada para realização dos ensaios.

O ensaio iniciará com a análise granulométrica segundo a norma ABNT NBR 7181, na qual será delimitado a distribuição do tamanho das partículas, em seguida será realizado o ensaio de limite de liquidez e plasticidade segundo a norma ABNT NBR 6459 e ABNT NBR 7180 respectivamente, na qual decorrerá como resultado o comportamento do solo mediante umidades variadas.

Logo em seguida foi realizado a preparação do solo e destorroamento, que consiste na fragmentação dos torrões da amostra de solo, e também a remoção de matéria orgânica que possa estar presente na amostra.

Para a execução desta etapa foram necessários o gral e almofariz, ferramentas que auxiliaram na separação dos torrões de forma eficaz. O manuseio de tal ferramenta deve ser realizado com uma pressão de forma moderada, evitando bater ou pressionar demais evitando assim que as partículas fiquem danificadas, preservando suas características naturais. A remoção de matéria orgânica também se faz necessária, uma vez que tais elementos podem comprometer os resultados dos ensaios, como análise granulométrica e limites de consistência.

A etapa de destorroamento e limpeza, estão ilustrados na Figura 05 a seguir,

Figura 5 – Destorroamento do solo.



Fonte: Autoria própria. (2025)

Depois de destorroar a amostra, conforme a norma DNIT 041/2019 – ME, que explica como deve ser feito o peneiramento, foi utilizado um agitador de peneiras mecânico nesta fase. Após o peneiramento, é muito importante limpar as peneiras e verificar a massa que ficou retida em cada uma delas, lembrando que os grãos que ficam na parte interna são considerados retidos, enquanto os que estão na parte externa são os que passaram. Esses passos são fundamentais para assegurar que a análise granulométrica dos agregados seja precisa.

A sequência de peneiras utilizadas está indicada no quadro 1, e em seguida, na Figura 06, mostra a montagem das peneiras de acordo com a sequência das malhas no agitador.

Quadro 1 - Série de peneiras.

Série normal mm	Série normal polegada	Peneira n°
50,00	2	-
37,50	1 1/2	-
25,00	1	-
19,00	3/4	-
12,50	1/2	-
9,50	3/8	-
6,30	1/4	-
4,75	-	4
2,36	-	8
2,00	-	10
1,18	-	16
0,60	-	30
0,425	-	40
0,30	-	50
0,15	-	100
0,075	-	200

Fonte: Norma DNIT 412/2019 – ME
(2025)

Figura 6 - Peneiramento do solo com agitador mecânico.



Fonte: Autoria própria. (2025)

Após passar pelo agitador foi separadas amostras de cada malha e anotadas o peso da passante para granulometria dos finos e do grosso, correspondentes as malhas de 0,075mm e 2mm respectivamente, para a construção das tabelas, como apresentado nas Figura 7.

Figura 7 – Amostras de granulometria

Peneiramento Grosso(fração retida na peneira 2,0mm, de uma porção de cerca de 2000,1g - Mt, após quarteamento de 10kg de amostra do solo), após estufa							Massa úmida Mt (g)	2000,1
Peneira (mm)	Massa Retida (g)	Massa retida acumulada	Percentual Retido	Passante N (%)	Massa Passante Úmida	Massa Passante Seca	Massa de água (g)	8,653319226
50	0	0	0	100	2000,1	1991,446681	Massa total Seca Ms (g)	1991,446681
38	0	0	0	100	2000,1	1991,446681		
25	0	0	0	100	2000,1	1991,446681		
19	0	0	0	100	2000,1	1991,446681		
9,5	17,467	17,467	0,877101063	99,12289894	1982,557102	1973,979681		
4,8	26,418	43,885	2,203674365	97,79632563	1956,024309	1947,561681		
2	68,107	111,992	5,623650439	94,37634956	1887,621368	1879,454681		
Passante na 2mm								
Total (Mg)	111,992							
Linhas de Grade SecundáriasEixoHorizontal (Valor)								
Peneiramento Fino (massa total 120,009g)				Massa Úmida Mw(g)	120,009	Massa parcial Seca(g)	119,4564588	
Peneira (mm)	Massa retida(g)	Massa retida acumulada	Percentual Retido Parcial	Percentual Passante Parcial		Percentual Passante Total		
1,2	4,982	4,982	4,170557248	95,82944275		90,44032987		
0,6	17,568	22,55	18,87717101	81,12282899		76,56076467		
0,42	17,229	39,779	33,29999935	66,70000065		62,94902577		
0,25	24,601	64,38	53,89411394	46,10588606		43,5130522		
0,15	17,998	82,378	68,96069149	31,03930851		29,2937663		
0,075	15,567	97,945	81,99221792	18,00778208		16,99508736		
Passante na 0,075mm	0,823							
Total	98,768							

Fonte: Autoria própria. (2025)

Para a granulometria da brita tipo 1 foi realizado apenas o peneiramento da mesma, de acordo com a norma ABNT NBR 7225 materiais de pedra e agregados naturais. A sequência de peneiras está indicada no quadro 2.

Quadro 2 – Série de peneiras para agregados graúdos

Pedra brita numerada	Tamanho Nominal	
Número	Abertura de peneiras de malhas quadradas	
	Mínima	Máxima
1	4,8	12,5
2	12,5	25
3	25	50
4	50	76
5	76	100

Fonte: Norma ABNT NBR 7225

A granulometria da brita se faz necessária para identificar a classe à qual pertence a brita, no caso deste experimento é utilizada a brita 1, que possui uma variação de 9,5 mm a 19 mm. Após a determinação da abertura das peneiras, é realizado o processo de peneiramento através do agitador mecânico, e separação das amostras de acordo com as malhas como apresentado na Figura 8 e Figura 9 respectivamente; a quantidade da amostra utilizada foi em torno de 7,5kg.

Figura 8 – Peneiramento de brita em agitador mecânico



Fonte: Autoria própria. (2025)

Figura 9 – Separação das amostras



Fonte: Autoria própria (2025)

Após a separação do material passante em cada peneira, foi anotado o peso dos passantes para a construção da tabela granulométrica, como podemos observar na Tabela 1.

Tabela 1 – Massa da granulometria da brita.

Peneiramento Brita			
Peneira (mm)	Massa Retida (g)	Massa retida acumulada (g)	Percentual retido
25	0	0	0
19	457,5	457,5	5,9
12,5	6349,3	6806,8	87,6
9,5	843,3	7650,1	98,4
6,3	115,5	7765,6	99,9
4,75	6,6	7772,2	100,0
Massa total retida	7772,2		

Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.2 Ensaios de Limite de Liquidez e Plasticidade.

Em sequência ao peneiramento do solo e sua classificação segundo a norma rodoviária DNER-ME 051/94 “Solos – Análise granulométrica” foi realizado a umidade higroscópica, separando 120 gramas da amostra. De acordo com a mesma norma são recomendados 120 gramas para solos arenosos e 70 gramas para solos siltsos e argilosos.

Logo após a classificação, é essencial realizar o ensaio de limite de liquidez conforme a norma NBR 6459/2016 “Solo - Determinação do limite de liquidez”; o aparelho necessário para a execução deste ensaio é o aparelho de Casagrande apresentado na Figura 9, recomenda-se uma amostra de aproximadamente 70g, neste ensaio foi utilizado uma amostra de 100g com o apresentado na Figura 10.

Figura 9 – Aparelho Casagrande



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 10 – Amostra de solo



Fonte: Autoria própria. (2025)

O processo é descrito através da norma ABNT NBR 6459/2016, onde também demonstra quais aparelhos utilizarem e as técnicas, em que é determinado por uma curva através da relação do número de golpes correspondente a 25, ao teor de umidade. Devido ao solo ser de origem arenosa, o número máximo de golpes alcançados foi de 10 golpes, dando característica não plástica ao solo, apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Número de golpes ensaio Casagrande



Fonte: Autoria própria (2025)

Em sequência foi realizado o ensaio de plasticidade, que consiste na moldagem do solo umedecido sobre uma placa de vidro; onde a amostra deve possuir um formato cilíndrico com 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento como apresentado na Figura 12. Descritos através da norma NBR 7180. Este ensaio busca determinar o teor de umidade em que o solo passa do estado semi-sólido para o estado plástico.

Figura 12 – Amostra de ensaio de limite de plasticidade



Fonte: Autoria própria. (2025)

Após a realização de todos os ensaios de caracterização, foi possível classificar o solo utilizando a Classificação HRB (Highway Research Board), adotada pela AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Esta classificação foi desenvolvida especificamente para projetos de pavimentação e estradas, e é baseada nos resultados dos ensaios de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade, previamente discutidos neste trabalho. A Quadro 02, apresentada abaixo, mostra os parâmetros de classificação com base nos ensaios laboratoriais realizados.

Quadro 3 - Classificação do solo.

CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS: Sugestão do Highway Research Board-HRB adotada pela AASHTO

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 / A-7-6
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)	6 máx.		NP	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

Fonte: Manual de técnicas de pavimentação.

4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DO SOLO

4.4.1 Ensaio de compactação

Após o ensaio de limite de liquidez e plasticidade, foi realizado o ensaio de compactação como apresentado na Figura 13, segundo a norma ABNT NBR 7182/2016 “Solo – Ensaio de compactação”, para a determinação do umidade ótima a ser utilizada e só assim realizar o ensaio de expansão do solo e CBR segundo a norma NBR 9895/2016 “Solos – Determinação do índice de suporte Califórnia”, vale ressaltar que para o ensaio de compactação foi realizado com energia modificada, que consiste em um corpo de prova com 5 camadas e cada camada foi realizado 55 golpes. A média para cada mistura realizada foi em torno de 5 a 6 corpos de prova, para que a curva traçada refletisse de melhor maneira a umidade ótima.

Figura 13 – Compactação do solo



Fonte: Autoria própria. (2025)

4.4.2 Ensaio de CBR

Posteriormente, a realização da compactação do solo puro, e das misturas solo-brita em 5%, 10% e 15% apresentados nas Figuras 14 e 15 e com o resultado da umidade ótima, deu início ao ensaio de CBR e expansão segundo a norma ABNT NBR 9895:2016, no qual foram realizados de 5 a 6 corpos de provas para ensaio de compactação e 2 corpos de provas para o ensaio de CBR, no solo puro e em cada porcentagem da mistura solo-brita.

Figura 14 – Mistura de solo – brita



Fonte: Autoria própria. (2025)

Figura 15 – Corpo de prova



Fonte: Autoria própria. (2025)

Através da norma ABNT NBR 7895:2016, para análise de CBR (California Bearing Ratio), foram evidenciadas as características de resistência e expansão do solo puro. Logo após foi adicionado a brita tipo 1, nas seguintes proporções de 5%, 10% e 15%, objetivando

uma ascensão das propriedades físicas e mecânicas através destas novas misturas apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Prensa de ensaio de CBR



Fonte: Autoria própria. (2025)

4.4.3 Ensaio de expansão

Inicialmente foi realizado a leitura de expansão do solo, tais como das misturas adicionadas, que consiste no processo de submersão do corpo de prova, simulando assim as condições de saturação do solo, o que viabiliza avaliar o comportamento de sua expansão durante um período de tempo. As medições de expansão foram realizadas diariamente durante um período de sete dias, garantindo consistência e precisão dos dados; a Figura 17 demonstra o procedimento de submersão tal como a leitura de sua expansão.

Figura 17 – Leitura de expansão do solo



Fonte: Autoria própria. (2025)

Em sequência as leituras dos corpos de prova durante os 7 dias avaliando a expansão, o corpo de prova foi retirado da submersão, retirou-se o excesso de água que o cobria e deixou secar por aproximadamente 15 minutos, como apresentado na Figura 18, tempo este necessário para drenar o excesso de umidade que ficava na superfície, de forma que não modificasse as condições internas, antes de ser condicionado a prensa para avaliar sua resistência.

Figura 18 – Retirada de corpo de prova da submersão.



Fonte: Autoria própria. (2025)

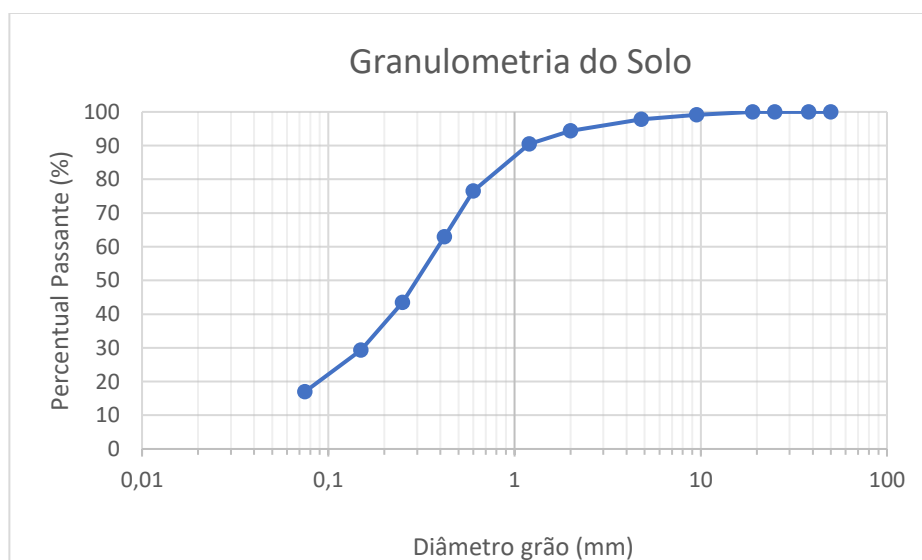
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão expostos e analisados os resultados dos ensaios realizados em laboratório durante este estudo. Para começar serão mostrados os resultados dos testes de caracterização física, além de uma análise mecânica do solo e consequente da mistura da brita tipo 1, avaliando sua viabilidade como material estabilizador de solo.

5.1 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERISTICA DO SOLO

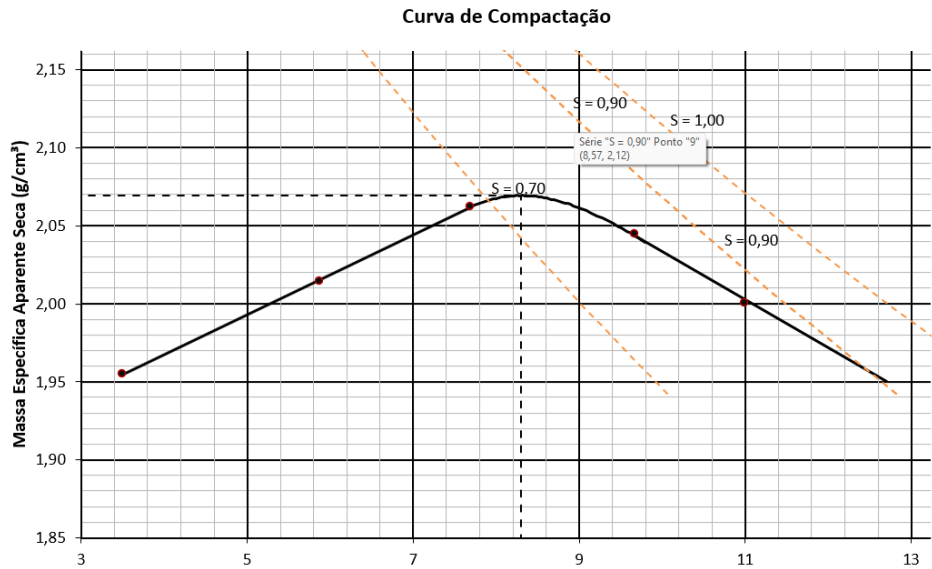
Foi realizado uma análise detalhada das características do solo para avaliar suas propriedades físicas e mecânicas e comportamento mediante a estabilização do solo, como granulometria, plasticidade e classificação, como apresentados nas Figuras 19 e 20, e na tabela 2 respectivamente. De mesmo modo foi realizado a análise granulométrica da brita, apresentado na Figura 21.

Figura 19 – Análise granulométrica do solo



Fonte: Autoria própria. (2025)

Figura 20 – Gráfico de compactação do solo



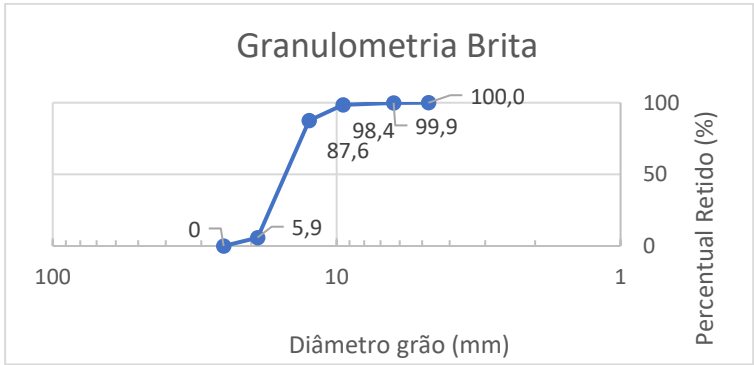
Fonte: Autoria própria

Tabela 2 - Resumo dos ensaios.

Tabela resumo	
Classificação do Solo: Não Plástico	
Limite de liquidez	Não Plástico
Limite de plasticidade	Não Plástico
Umidade higroscópica	0,448%
Umidade Ótima	7,894%
CBR Solo	27,69%
Massa específica seca máxima	2,067 g/cm^3

Fonte: Autoria própria. (2025)

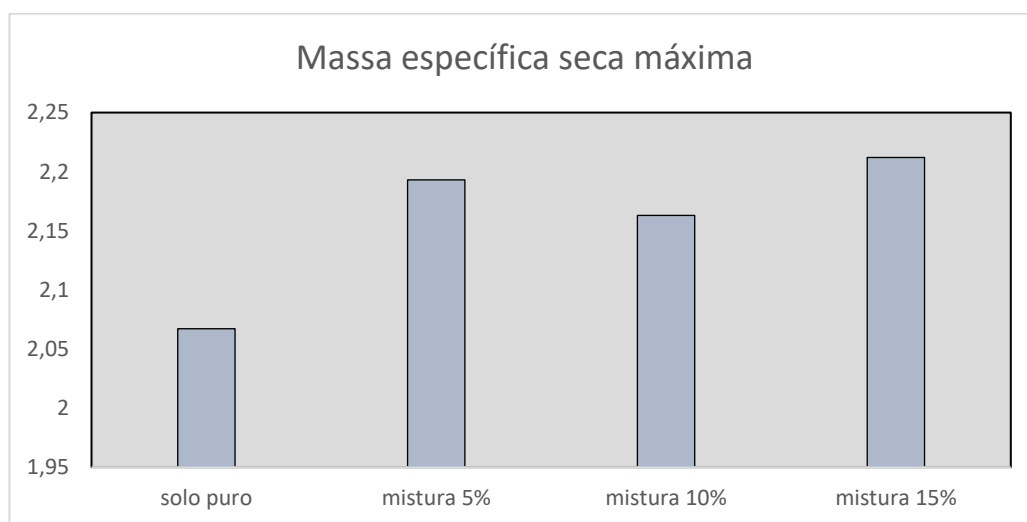
Figura 21 – Análise granulométrica da brita.



Fonte: Autoria própria. (2025)

Por ser um solo não plástico, ele possui uma boa utilização em camadas estruturais, devido a sua menor suscetibilidade a umidade; mas torna-se necessário realizar ensaios para avaliar mais a fundo suas propriedades além dos ensaios de caracterização acima. Esses dados tornaram-se fundamentais para a aplicação da brita granítica tipo 1 como material estabilizador, observando na Figura 22 onde compara os resultados da massa específica aparente seca máxima.

Figura 22 – Dados comparativos



Fonte: Autoria própria.

5.2 APLICAÇÃO DA BRITA GRANÍTICA TIPO 1 (9,5MM Á 19MM)

Posteriormente a caracterização, foi adicionado a brita granítica ao solo, nas proporções de 5%, 10% e 15%, podendo ser elaborada uma análise mais detalhada do seu comportamento como material estabilizador. Os testes para expansão apresentados na tabela 3, apresenta que a adição da brita apresentou valores inferiores à 1%, variando entre 0,048% e 0,382%, o que resulta em um bom desempenho para estabilidade, tornando a brita granítica tipo 1 uma boa alternativa na construção de camadas de bases e sub-bases de aterros compactados com energia modificada.

Tabela 3 - Dados para expansão

Expansão do solo brita	
Solo puro	0,048%
Solo 95% Brita (tipo 1) 5%	0,059%
Solo 90% Brita (tipo 1) 10%	0,362%
Solo 85% Brita (tipo 1) 15%	0,382%

Fonte: Autoria própria.

Para o ensaio de CBR (California Bearing Ratio), utilizado para estimar a capacidade de carga do solo, mediante a adição da brita granítica tipo 1 (9,5mm a 19mm), apresentou resultados satisfatórios. O solo puro inicialmente possuiu um resultado de 27,60%, dando a ele características de solo de qualidade moderada que variam entre 20% a 80% segundo a norma ABNT NBR 9895, a qualidade do solo também é justificada na caracterização do mesmo, indicado na tabela 1 citada anteriormente. Com a adição da brita granítica nas proporções de 5%, 10% e 15%, apresentaram resultados acima da amostra contendo apenas solo puro, demonstrando a eficácia deste método. Considerando um valor de $N \leq 5 \times 10^6$ (Repetições de carga), que consiste em um padrão de dimensionamento, em que o limite para $CBR \geq 80\%$ e para expansão inferior a 0,3% segundo a norma ABNT NBR 9895, demonstra resultados satisfatórios para esta camada estrutural, apesar dos dados de expansão terem se sobressaído 0,062% acima do valor adotado. Mas exigisse uma análise mais detalhada do ISC, todavia o ensaio de CBR comprova a eficácia da mistura com o agregado ser alta, sendo superior aos 100% na mistura solo-brita 15%, resultados estes apresentados na tabela 4 e tabela 5 abaixo.

Tabela 4 – Dados de CBR

CBR Solo brita			
Solo puro	Solo 95% Brita (tipo 1) 5%	Solo 90% Brita (tipo 1) 10%	Solo 85% Brita (tipo 1) 15%
27,69%	36,17%	53,085%	111,13%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Gráfico CBR



Fonte: Autoria própria

Segundo a mesma NBR ABNT 9895, para camadas de base com energia modificada o $\text{CBR} \geq 60\%$ e $\text{expansão} \leq 0,5\%$, garantindo a resistência adequada para suportar cargas minimizando as deformações. Deste modo podemos definir os parâmetros adequados para a aplicação da mistura solo-brita na camada estrutural de base e sub-base para aterros, pois a combinação de materiais oferece resistência e durabilidade, atendendo as exigências das normas citadas anteriormente, promovendo uma solução eficiente e viável.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos durante nos ensaios realizados ao longo do trabalho, permitiu uma compreensão abrangente das características do solo. As adições em sua composição, especialmente em relação a sua massa específica seca aparente máxima, comportamento de expansão e capacidade de suporte, avaliados através do ensaio de CBR. A análise da massa específica seca máxima resultou em um aumento de acordo com a incorporação da brita tipo 1; havendo ganho a medida em que se aumentava a proporção da mistura brita-solo. Obtendo um resultado inicial do solo puro em $2,067 \text{ g/cm}^3$, chegando ao ganho final na mistura de 15% em $2,212 \text{ g/cm}^3$ o que resulta em um solo mais denso, com uma capacidade de suporte maior e estável.

Além disto os ensaios de expansão demonstraram que houve uma pequena variação entre as misturas, mas todos ficaram abaixo de 1%, variando de 0,048% a 0,382%, o fato de o solo ter apresentado uma expansão tão baixa implica que ele tende a manter sua estabilidade sob a variação de umidade, resultando em um menor risco de deformações volumétricas graves.

Por fim os resultados do CBR mostraram que houve um grande aumento do CBR com a adição da brita granítica tipo 1. Com o valor inicial de 27,69% do solo natural para 111,13%; esse aumento progressivo de valores para o CBR significa que a capacidade do solo de suportar cargas e resistir a variações aumenta com a adição da brita granítica tipo 1. Pode-se afirmar que a utilização da brita granítica tipo 1 (9,5mm a 19mm) pode ser implementada em camadas estruturais de base e sub-base de aterros; respeitando os padrões e normas descritos na NBR ABNT 9895 que exige um Índice de Suporte California (CBR) maior ou igual a 60% e uma expansão máxima de 1%. Atendendo esses parâmetros pode-se afirmar que é seguro e confiável a utilização de brita granítica tipo 1 (9,5mm a 19mm) em camadas de sub-base e base. Apesar de ser uma movimentação um pouco mais agressiva ao solo, ainda assim torna-se uma solução viável para resolver os problemas de estabilidade. Nota-se também que a incorporação deste agregado pode ser realizada em outros tipos de solo, mas que para isso deve ser realizado pesquisas mais aprofundadas, mediante a isto deve-se dar continuidade de pesquisas nesta área para otimizar os métodos de aplicação em diferentes solos e também diferentes tipos de agregados, como a brita tipo 0 e o pó de brita, contribuindo assim para uma solução eficiente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Solos – Preparação de amostras.** Rio de Janeiro, p.01.2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto.** Rio de Janeiro, p. 10.2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, p. 01.2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, p.04.2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, p.03.2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225: Materiais de pedra e agregados naturais.** Rio de Janeiro p, 06.1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solos – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, p.02.2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: Solo – Índice de suporte da Califórnia (ISC).** Rio de Janeiro, p. 10.2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
ARAÚJO, R. B. **Estudo de as concreções later ticas de Tocantins como agregado graúdo na fabricação de concreto de cimento Portland destinado a pavimentação rodoviária.** 2009. 111f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba, 2009. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4043>. Acesso em 09 fev. 2025.

ABDELKADER, Hassan AM et al. An experimental study on geotechnical properties and micro-structure of expansive soil stabilized with waste granite dust. **Sustainability**, v. 14, n. 10, p. 6218, 2022.

AMULYA, Gudla; MOGHAL, Arif Ali Baig; ALMAJED, Abdullah. A state-of-the-art review on suitability of granite dust as a sustainable additive for geotechnical applications. **Crystals**, v. 11, n. 12, p. 1526, 2021.

ANDRADE, Lucas Rodrigues de. **Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado.** 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

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

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Petrobras – ABEDA: Rio de Janeiro, 2008. Central Intelligence Agency (CIA). Brazil. The World Factbook, 2024. Disponível em: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/brazil/#transportation>. Acesso em: 05 fev. 2025.

Confederação Nacional do Transporte (CNT). **Evolução da malha rodoviária por ano segundo o tipo de jurisdição - 2001 – 2022**. Anuário CNT do transporte 2022, 7 ed, 2022. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/Rodoviario/1-3-1-1-1-/Malha-rodovi%C3%A1ria-total>. Acesso em: 05 fev. 2025.

Confederação Nacional do Transporte (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2023 reforça a importância de maior investimento na malha rodoviária**. Agência CNT Transporte Atual, Brasília – DF, 2023. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/pesquisa-cnt-de-rodovias-2023-refora-a-importancia-de-maior-investimento-na-malha-rodoviria>. Acesso em: 05 fev. 2025.

Confederação Nacional do Transporte (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2023**. Disponível em: https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/pesquisa-cnt-de-rodovias-2023-refora-a-importancia-de-maior-investimento-na-malha-rodoviria?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 10 fev. 2025.

CORREIA, A. Gomes; WINTER, M. G.; PUPPALA, A. J. A review of sustainable approaches in transport infrastructure geotechnics. **Transportation Geotechnics**, v. 7, p. 21-28, 2016.

DA SILVEIRA, Leonardo Ramos; BORGES, Rafael De Assis. Uso de materiais alternativos para melhoria de solo na pavimentação de vias. **E&S Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 73-82, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 035/1998: Ensaio de abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 054/1997: Determinação da equivalência de areia**. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 086/1994: Determinação da forma dos agregados**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 089/1994: Determinação da durabilidade por sulfato de sódio**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **NORMA DNIT 139/2010 – ES: Estabilização de camadas de pavimento com adição de cimento – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010.

FOGLIATTI, M. C.; FILIPPO, S.; GOUDARD, B. **Avaliação De Impactos Ambientais: Aplicação aos Sistemas de Transporte**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004.

HILÁRIO, R. Q. **Uso de pavimento reciclado adicionado com cimento para uso como reforço de base para rodovias – estudo de caso.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

KLEINERT, T. R.; FEDRIGO, W.; NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; MALABARBA, L. M.; SCHREINERT, G. G.; SILVA, M. C. C.; MATUELLA, M. F. **Reciclagem Com Cimento, Uma Opção Técnica, Econômica e Sustentável Para Restauração de Pavimentos Urbanos.** 20ª RPU – Reunião de Pavimentação Urbana, Florianópolis, SC, 2017.

LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização dos Solos II: Técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa.** Viçosa: Imprensa Universitária – Universidade Federal de Viçosa, 1993.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review.** Sweden: Lulea University of Technology, 2013. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A997144&dswid=-7963>. Acesso em 09 fev. 2025.

MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos** – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1987.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** Kendall/Hunt Publishing Company. 2 ed. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2005.

Ministério de Minas e Energia – MME; Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM; Banco Mundial; Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD. **Projeto ESTAL – Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia.** Produto 22: Agregados para construção civil. Relatório Técnico 30: Perfil de brita para construção civil. Agosto de 2009. Disponível em https://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construcao_civil.pdf. Acesso em 09 fev. 2025.

NEGREIROS, F. H. S. N.; NASCIMENTO, V. C. **Execução e controle de qualidade de base e sub-base de Brita Graduada Simples (BGS) em pavimentos de rodovias.** 2021.

OLIVEIRA, A. R. da S.; SALOMÃO, M. A.; BARBOSA, M. T. Análise da Qualidade da Mobilidade e Acessibilidade Urbana do Transporte Coletivo na Cidade de Juiz de Fora-MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 03, p. 1447-1462, 2022.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos.** ed. 3, 353 p. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, G. F. S. **Análise comparativa dos agregados graúdos, britas calcária e granítica, para utilização em concreto.** 2019.

PINTO, L. L. C. A. **O Desempenho De Pavimentos Permeáveis Como Medida Mitigadora Da Impermeabilização Do Solo Urbano.** 256 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Pavimentação Rodoviária - Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Editora Interciência. ed. 10, 2010.

PEREIRA, LA de F. **Análise comparativa de estruturas de pavimentos utilizando RCD e dimensionadas a partir de parâmetros distintos**. Natal, 2021. 188f. 2021. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

RAMÍREZ-VARGAS, Jaime R. et al. A Review of Sustainable Pavement Aggregates. **Applied Sciences**, v. 14, n. 16, p. 7113, 2024.

REBELO, Frank Hudson de Souza. **Caracterização tecnológica de agregados graúdos de algumas regiões do estado do Amazonas, para aplicação em pavimentos rodoviários**. 2019. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

SCHUSSLER, Paula Lasalvia; MATOS, Daniel Anijar de. **Avaliação da substituição do cimento Portland por cinza de casca de arroz (CCA) em solos melhorados para utilização em camadas de base de pavimentos**. Campo Grande: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/retrieve/a18ec697-945b-4a64-8e11-c65669f55c73/13492.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2025.

SHERWOOD, Philip Thomas. **Alternative materials in road construction: A guide to the use of recycled and secondary aggregates**. Thomas Telford, 2001.

SINGH, Sarbjeet; NAGAR, Ravindra; AGRAWAL, Vinay. A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. **Journal of cleaner production**, v. 126, p. 74-87, 2016.

SANTOS, M. N. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra**. PUC – Relatório de iniciação científica, Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, M.; LIMA, D.; BUENO, B. Estabilização dos solos com cal e betume. In: **6º Reunião de Pavimentação Urbana**, pp.74-97, Santos: São Paulo, 1995.

SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Editora Pini. 2. ed. São Paulo, 2008.

SILVA, A. O. dos S.; CARMO, J. C. dos S. Estudo da pavimentação de rodovias. **PARAMÉTRICA**, v. 15, n. 2, 2023.