



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

ABRAÃO LINCON SILVA DE ALMEIDA

**UTILIZAÇÃO DE BRITA CALCÁRIA NA COMPOSIÇÃO DE ATERROS COM
SOLO DESTINADOS À CAMADAS DE PAVIMENTOS**

MOSSORÓ

2025

ABRAÃO LINCON SILVA DE ALMEIDA

**UTILIZAÇÃO DE BRITA CALCÁRIA NA COMPOSIÇÃO DE ATERROS COM
SOLO DESTINADOS À CAMADAS DE PAVIMENTOS**

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

Orientador: Francisco Alves da Silva Junior,
Prof. Dr.

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.

S448u Silva de Almeida, Abraão Lincon.
Utilização de brita calcária na composição de
aterros com solo destinados à camadas de
pavimentos / Abraão Lincon Silva de Almeida. -
2025.
60 f. : il.

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

1. geotecnia. 2. solo. 3. brita calcária. 4.
pavimentação. I. Alves da Silva Junior,
Francisco, 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.

ABRAÃO LINCON SILVA DE ALMEIDA

**UTILIZAÇÃO DE BRITA CALCÁRIA NA COMPOSIÇÃO DE ATERROS
COM SOLO DESTINADOS À CAMADAS DE PAVIMENTOS**

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

Defendida em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



FRANCISCO ALVES DA SILVA JUNIOR

Data: 22/12/2025 08:23:17-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Francisco Alves da Silva Junior, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente



JOAO PAULO MATOS XAVIER

Data: 22/12/2025 10:47:23-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

João Paulo Matos Xavier, Prof. Dr. (UFERSA)

Documento assinado digitalmente



GILMAR GUILHERME DA SILVA

Data: 22/12/2025 11:25:43-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gilmar Guilherme da Silva, Prof. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, a Ele toda honra, poder e glória. Foi pela Sua graça, misericórdia e direção que tive forças e sabedoria para trilhar e concluir esta jornada. Aos meus pais, meu eterno agradecimento pelo amor incondicional, apoio constante e por acreditarem em mim em cada passo do caminho. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

Aos amigos que estiveram ao meu lado nos momentos bons e difíceis, meu muito obrigado: Emerson Macedo, Vinicius Almeida, Antônio Avelino, Otávio Augusto, Natan Kirley e Hittalo Soares. O companheirismo e o suporte de vocês fizeram toda a diferença nessa caminhada.

Agradeço também, de forma especial, aos amigos que me fortaleceram espiritualmente, com orações, conselhos e amizade sincera: Eduardo Barreto, Natan Belo, Adnael Adley, Pedro Arthur, William Douglas, Vinicius Gonçalves, Ivar Martins e Isaque Hélder. Cada gesto e cada palavra foram fundamentais para que eu permanecesse firme até o fim.

Sou profundamente grato ao meu orientador, Professor Francisco Alves da Silva Junior, pela paciência, dedicação e valiosa orientação durante todo o desenvolvimento deste trabalho. E ao técnico de laboratório Augusto Sousa, pelo suporte técnico prestado com tanta boa vontade. A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta conquista, deixo aqui meu sincero agradecimento.

ÉPIGRAFE

“Mas em todas estas coisas somos mais do que vencedores, por aquele que nos amou. Porque estou certo de que, nem a morte, nem a vida, nem os anjos, nem os principados, nem as potestades, nem o presente, nem o porvir, nem a altura, nem a profundidade, nem alguma outra criatura nos poderá separar do amor de Deus, que está em Cristo Jesus nosso Senhor.”

Romanos 8.37-39

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre a estabilização granulométrica de um solo arenoso por meio da adição de brita calcária tipo 1, visando sua utilização em camadas de sub-base de pavimentos de baixo volume de tráfego, em atendimento aos critérios do DNIT ($\text{CBR} \geq 20\%$ e $\text{expansão} \leq 1\%$). O solo natural, composto por mais de 90% de fração arenosa e classificado como A-2-4 pelo sistema AASHTO, foi avaliado por meio de ensaios de caracterização geotécnica, compactação (NBR 7182) e Índice de Suporte Califórnia/expansão (NBR 9895), tanto em seu estado puro quanto em misturas contendo 5%, 10% e 15% de brita calcária. Os resultados indicaram que o solo sem adição apresentou CBR de 12,38%, inferior ao exigido para sub-bases, enquanto as misturas com 5%, 10% e 15% de brita atingiram valores de CBR de 16,47%, 21,24% e 28,07%, respectivamente, com expansões negativas em todos os casos (entre -0,011% e -0,131%), demonstrando elevada estabilidade volumétrica. Verificou-se que os teores de 10% e 15% atenderam simultaneamente aos requisitos normativos de capacidade de suporte e expansão, sendo o teor de 10% suficiente para conformidade às normas e o de 15% associado a uma maior margem de segurança, configurando a estabilização com brita calcária como alternativa técnica e economicamente viável para o aproveitamento de materiais locais em pavimentos de baixo tráfego.

Palavras-chave: geotecnia; solo; brita calcária; pavimentação.

ABSTRACT

This work presents an experimental study on the grain size stabilization of a sandy soil through the addition of limestone crushed stone (type 1), aimed at its utilization in sub-base layers of low-volume traffic pavements, in compliance with DNIT criteria ($\text{CBR} \geq 20\%$ and expansion $\leq 1\%$). The natural soil, composed of more than 90% sand fraction and classified as A-2-4 by the AASHTO system, was evaluated through geotechnical characterization tests, compaction (NBR 7182), and California Bearing Ratio/expansion (NBR 9895), both in its pure state and in mixtures containing 5%, 10%, and 15% limestone crushed stone. The results indicated that the soil without addition presented a CBR of 12.38%, below the requirement for sub-bases, while the mixtures with 5%, 10%, and 15% crushed stone achieved CBR values of 16.47%, 21.24%, and 28.07%, respectively, with negative expansions in all cases (ranging from -0.011% to -0.131%), demonstrating high volumetric stability. It was verified that the contents of 10% and 15% simultaneously met the regulatory requirements for bearing capacity and expansion, with the 10% content being sufficient for regulatory compliance and the 15% content associated with a greater safety margin, establishing limestone crushed stone stabilization as a technically and economically viable alternative for the utilization of local materials in low-volume traffic pavements.

Keywords: geotechnical engineering; soil; limestone crushed stone; pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas da seção transversal de um pavimento	17
Figura 2 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas	21
Figura 3 - Curvas de compactação	23
Figura 4 - Fases do solo.....	27
Figura 5 - Relação entre os limites de consistência e o estado do solo	28
Figura 6 - Extração do Solo.....	34
Figura 7 - Localização da coleta da amostra do solo.....	35
Figura 8 - Peneiras utilizadas na granulometria da brita	36
Figura 9 - Preparação da massa do agregado saturado com superfície seca	37
Figura 10 - Pesagem para determinar a massa em água da (ma).....	38
Figura 11 - Corpo de prova moldado.....	41
Figura 12 - Ensaio de expansão	42
Figura 13 - Ensaio de penetração	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	–	Classificação dos materiais empregados no pavimento	25
Quadro 2	–	Classificação dos solos (Transportation Research Board)	30
Quadro 3	–	Valores de ISC para a classificação TBR 23	31
Quadro 4	–	Classificação do solo – SUCS	32
Quadro 5	–	Valores aproximados de ISC para classificação SUCS	33
Quadro 6	–	Golpes por camadas	40
Quadro 7	–	Densidade e umidade ótima das misturas	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Intervalo do tamanho dos grãos	26
Tabela 2	– Símbolos utilizados pelo SUCS	32
Tabela 3	– Percentual granulométrico dos grãos	36
Tabela 4	– Resumo dos ensaios do solo.....	43
Tabela 5	– Massa mínima, por amostra de ensaio.....	45
Tabela 6	– Massas retidas e passantes nas peneiras.....	46
Tabela 7	– Dados das pesagens características do agregado	47
Tabela 8	– Valores característicos do agregado	47
Tabela 9	– Resultado do ensaio de expansão	50
Tabela 10	– Resultado do CBR	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNT	Confederação Nacional do Transporte
BGS	Brita Graduada Simples
ISC	Índice de Suporte Califórnia
CBR	California Bearing Ratio
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
CCP	Concreto de Cimento Portland
AASHTO	Associação Americana de Rodovias Estaduais e Autoridades de Transporte
TRB	Transportation Research Board
HRB	Highway Research Board
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LC	Limite de Contração
IP	Índice de Plasticidade
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
SUCS	Unificado de Classificação de Solos
d	Massa específica do agregado seco
ds	Massa específica do agregado saturado
da	Massa específica aparente
A	Absorção

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	INTRODUÇÃO A PAVIMENTAÇÃO.....	16
3.1.1	Subleito.....	18
3.1.2	Regularização do subleito	18
3.1.3	Reforço do subleito	18
3.1.4	Sub-Base.....	18
3.1.5	Base	18
3.1.6	Revestimento	18
3.2	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	19
3.2.1	Estabilização mecânica.....	19
3.2.2	Estabilização química.....	20
3.2.3	Estabilização Granulométrica.....	20
3.3	BASE E SUB-BASE ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE	21
3.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS PARA PAVIMENTAÇÃO	22
3.4.1	Compactação	22
3.4.2	Índice de Suporte Califórnia (ISC-CBR)	24
3.5	PROPRIEDADES DO SOLO	25
3.5.1	Textura do Solo	25
3.5.2	Índices físicos	26
3.5.3	Limites de consistência	28
3.5.4	Classificação dos solos.....	29
4	MÉTODOS E MATERIAIS.....	34
4.1	SOLO	34
4.2	BRITA CALCÁRIA	35
4.2.1	Granulometria do agregado	36
4.2.2	Caracterização da brita	37

4.3	COMPOSIÇÃO DA MISTURA	38
4.4	COMPACTAÇÃO	39
4.5	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFORNIA (ISC)	40
5	RESULTADOS E DISCURSÕES.....	43
5.1	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO.....	43
5.2	GRANULOMETRIA DO AGREGADO.....	46
5.3	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO.....	47
5.4	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	48
5.5	APLICAÇÃO DA BRITA CALCÁRIA TIPO 1	49
5.6	MECANISMOS FÍSICOS DE GANHO DE RESISTÊNCIA	52
5.7	LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	53
5.8	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	55
6	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

A pavimentação constitui um segmento estratégico da engenharia civil, uma vez que infraestruturas viárias adequadamente dimensionadas e construídas possibilitam a circulação eficiente de pessoas e bens entre regiões, dinamizando processos econômicos e promovendo integração social. Adicionalmente, sistemas viários em adequado estado de conservação e manutenção ampliam a acessibilidade a serviços de caráter essencial, tais como educação e assistência à saúde, configurando a pavimentação como ferramenta fundamental para a promoção do desenvolvimento socioeconômico regional.

Segundo Senço (2007), para que as estradas suportem cargas elevadas, resistam aos períodos de chuva e proporcionem deslocamento confortável e seguro, é imprescindível o desenvolvimento de estudos específicos voltados à identificação de novos materiais, métodos construtivos e tecnologias que promovam melhorias no desempenho e funcionalidade das vias.

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2024), apenas 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada (aproximadamente 213,5 mil quilômetros), sendo que 67% dessas rodovias apresentam classificação Regular, Ruim ou Péssima. Esse cenário reflete a ausência de manutenção preventiva, o uso de técnicas ultrapassadas, fragilidade nos processos de fiscalização e falhas executivas recorrentes, fatores que aceleram os processos de degradação do pavimento. Diante dessa realidade, emerge a necessidade de soluções técnica e economicamente viáveis para melhorar o desempenho de solos locais, reduzindo custos de materiais estabilizadores tradicionais, particularmente em regiões de recursos orçamentários limitados.

O estudo voltado à ampliação do conhecimento sobre as diferentes tipologias de materiais passíveis de utilização nas camadas estruturais do pavimento contribui significativamente para a otimização dos custos com insumos. A compreensão da variedade e disponibilidade de recursos naturais nas regiões onde as obras são executadas permite uma seleção mais eficiente e economicamente viável dos materiais, estratégia importante para o desenvolvimento da infraestrutura rodoviária nacional, especialmente diante de reduções orçamentárias.

Segundo Bernucci et al. (2008), a brita graduada simples (BGS) é amplamente utilizada no reforço de camadas de base e sub-base de pavimentos desde a década de 1960. Todavia, seu elevado custo de aquisição, especialmente quando associado à distância entre a obra e as pedreiras, pode comprometer a viabilidade econômica. Assim, a utilização de materiais

disponíveis na região da obra configura-se como solução tecnicamente viável, reduzindo custos sem comprometer qualidade e desempenho estrutural.

De acordo com Borré (2013), solos encontrados em abundância às margens das rodovias frequentemente não apresentam, de forma natural, as propriedades geotécnicas mínimas para aplicação em camadas de pavimento. Nesse contexto, técnicas de estabilização do solo, realizadas através da adição de agregados granulares, visam aumentar resistência, durabilidade e capacidade de suporte.

Para mitigar essas limitações, utilizam-se materiais estabilizantes (agregados, cimento ou ligantes asfálticos). Entretanto, a indisponibilidade e os custos desses insumos em determinadas regiões constituem obstáculos relevantes à sua aplicação (Bernucci et al., 2008).

O Rio Grande do Norte apresenta significativas jazidas de calcário, fato que torna relevante a investigação do seu potencial como agente estabilizador em solos. Considerando que alguns solos se caracterizam pela reduzida capacidade de suporte e elevada suscetibilidade a deformações permanentes, a incorporação de agregado calcário emerge como alternativa tecnicamente viável e economicamente competitiva para estabilização desses materiais.

Assim, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de aprofundar o conhecimento acerca do comportamento mecânico do solo de Mossoró/RN quando submetidos à adição de brita calcária. Os resultados contribuem para elevar os padrões de qualidade de estruturas de pavimento, além de estimular o aproveitamento racional de recursos minerais locais, promovendo desenvolvimento econômico e ambiental regional.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a estabilização de um solo coletado em Mossoró/RN por meio da adição de brita calcária tipo 1, visando sua aplicação em camadas de sub-base de pavimentos de baixo volume de tráfego. O estudo restringe-se à caracterização geotécnica e à avaliação experimental em laboratório, utilizando ensaios de compactação (Proctor), Índice de Suporte Califórnia (CBR) e expansão, de acordo com os critérios do DNIT, em três proporções de mistura solo-brita calcária. Não são abordados dimensionamento estrutural de pavimentos, análises de comportamento em campo ou comparações com outras técnicas de estabilização.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O trabalho tem o objetivo de investigar e analisar a viabilidade técnica e influência da adição de brita calcária nas características mecânicas de um solo e a aplicação em projetos de pavimentação

2.2 Objetivos específicos

- Analisar a caracterização de um solo, feito por meio de ensaios laboratoriais conforme as normas técnicas vigentes;
- Realizar a mistura do solo com diferentes proporções de brita calcária, e analisar de forma comparativa;
- Realizar o ensaio Índice de Suporte Califórnia (CBR) nas amostras de solos com a brita calcária em diferentes proporções;
- Realizar o ensaio de compactação para a obtenção da umidade ótima;
- Comparar os resultados o ensaio Índice de Suporte Califórnia (CBR), e verificar se houve ganho de resistência no solo;

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda os conceitos fundamentais relacionados à pavimentação, com ênfase nas propriedades dos materiais necessárias para a seleção adequada de insumos nas diferentes camadas estruturais. Serão apresentadas as técnicas de estabilização de solos, particularmente a estabilização granulométrica, assim como as propriedades e ensaios que permitem avaliar a viabilidade técnica de sua aplicação em camadas de sub-base e base de pavimentos de baixo volume de tráfego.

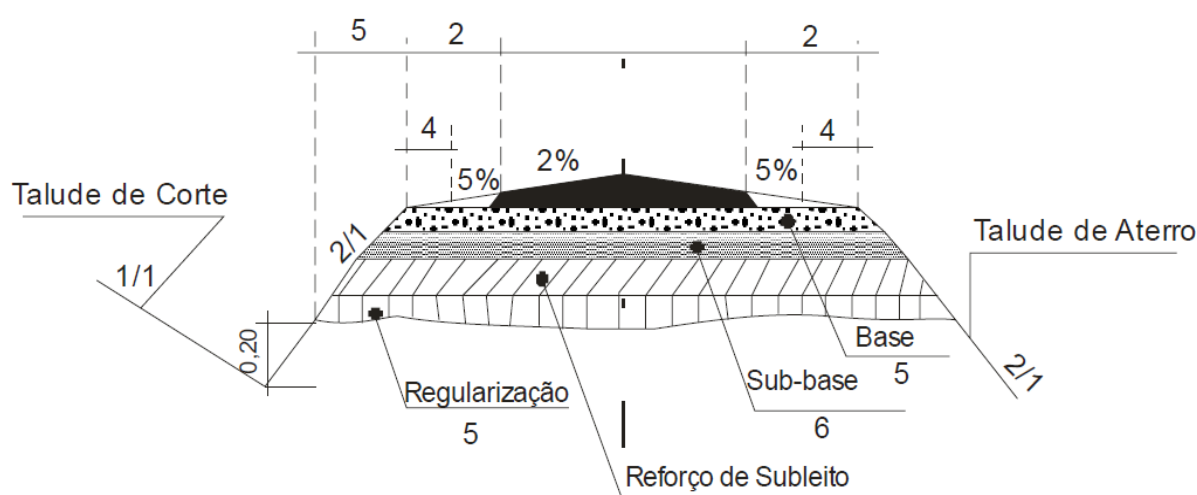
3.1 Introdução a pavimentação

Segundo Senço (2007), pavimento é um conjunto de camadas de espessuras finitas, assentado sobre o subleito, que funciona como fundação estrutural da via. O pavimento é projetado técnica e economicamente para resistir e distribuir os esforços verticais provenientes do tráfego, garantir conforto e segurança aos usuários e suportar os desgastes provocados por esforços horizontais ao longo de sua vida útil.

De acordo com Bernucci et al. (2008), o pavimento deve ser projetado de modo a apresentar resistência adequada tanto às solicitações impostas pelo tráfego quanto às variações climáticas, assegurando condições satisfatórias de segurança, conforto e economia durante o rolamento.

O dimensionamento estrutural de um pavimento tem como função principal receber e transmitir os esforços gerados pelo tráfego de forma que as tensões sejam progressivamente dissipadas até atingirem as camadas inferiores. Cada camada é dimensionada para operar dentro de limites de deformação compatíveis com as características dos materiais e respectiva capacidade de suporte, evitando rupturas ou danos prematuros (BALBO, 2007).

Figura 1 - Camadas da seção transversal de um pavimento



Fonte: DNIT (2006)

Os pavimentos podem ser classificados, em três tipos principais: flexíveis, semirrígidos e rígidos. Os pavimentos flexíveis são caracterizados pela presença de revestimento asfáltico assentado sobre camadas de base granular ou de solo estabilizado granulometricamente. Os pavimentos semirrígidos, por sua vez, possuem uma estrutura semelhante à dos flexíveis em relação ao possuir o revestimento asfáltico, no entanto, suas camadas de base e sub-base são compostas por materiais estabilizados com adição de cimento. Os pavimentos rígidos são constituídos por placas de concreto de cimento Portland, onde são apoiadas sobre uma camada de sub-base granular ou cimentada, oferecendo assim, uma alta capacidade de suporte das cargas e durabilidade (DNIT, 2006).

3.1.1 Subleito

Constitui o terreno de fundação do pavimento, tendo como função primária absorver e distribuir os esforços transmitidos pelas camadas superiores. Considera-se como subleito apenas a porção superficial do solo natural que efetivamente participa da interação estrutural com o pavimento (DNIT, 2006).

3.1.2 Regularização do subleito

Operação executada sobre o leito com o objetivo de ajustá-lo aos perfis transversal e longitudinal estabelecidos em projeto. Não constitui camada estrutural propriamente dita (DNIT, 2006).

3.1.3 Reforço do subleito

Camada de espessura constante inserida sobre a regularização por razões técnico-econômicas. Os materiais apresentam características geotécnicas superiores às do subleito, mas inferiores às das camadas superiores, complementando a capacidade de suporte da estrutura (DNIT, 2006).

3.1.4 Sub-Base

Camada suplementar da base, utilizada quando razões técnico-econômicas desaconselham construir a base diretamente sobre a regularização (DNIT, 2006).

3.1.5 Base

Camada responsável por resistir e distribuir os esforços do tráfego, sobre qual se constrói o revestimento. Pode ser constituída de solo estabilizado naturalmente, misturas de solo e agregado, solo estabilizado quimicamente, brita graduada, entre outros (BALBO, 2007).

3.1.6 Revestimento

Camada superior que suporta diretamente as ações do tráfego e as distribui para as camadas inferiores. Além da função resistiva, impermeabiliza as camadas inferiores e proporciona conforto e segurança durante o rolamento. Deve ser capaz de receber cargas sem sofrer deformações elásticas, plásticas, desagregação de componentes ou perda de compactação (BERNUCCI et al., 2008; BALBO, 2007).

3.2 Estabilização de solos

De acordo com Baptista (1979), estabilização de solos é um processo físico, químico, mecânico ou físico-químico, destinado a tornar o solo adequado às condições de utilização e às cargas externas. Os métodos abrangem tratamento do solo com ou sem aditivos para utilização em base, sub-base e camadas de reforço, permitindo que o pavimento revestido apresente melhor capacidade de suporte às cargas do tráfego.

Para Marques (2006), estabilizar um solo consiste em proporcionar resistência e suporte de cargas adequados aos esforços induzidos pelo tráfego, bem como às ações erosivas de agentes naturais. Esse processo abrange técnicas naturais ou artificiais que melhoram as propriedades mecânicas do solo e garantem que essas melhorias sejam mantidas ao longo da vida útil da obra.

Conforme Medina (1987 apud Soliz, 2007), quando engenheiros se deparam com solos que não apresentam as características necessárias para atender aos requisitos mínimos de resistência e estabilidade exigidos por norma, há alternativas a serem consideradas: desviar o projeto, remover ou substituir o solo, adequar o projeto às condições geotécnicas existentes, ou optar pela estabilização do solo in situ. Segundo Senço (2007), considerando as vantagens econômicas do aproveitamento de materiais locais, os estudos de identificação e caracterização de jazidas, bem como de materiais complementares para estabilização, configuram-se como etapas fundamentais no processo de projeto e execução de pavimentos.

De acordo com Marques (2006), na literatura especializada é possível identificar uma ampla gama de métodos de estabilização, sendo os convencionais divididos em três categorias: estabilização mecânica, física e química. Segundo Cristelo (2001) e Soliz (2007), a escolha do método mais adequado deve considerar fatores como tipo de solo, condições ambientais, disponibilidade de materiais e custos de execução, garantindo eficiência técnica e viabilidade econômica.

3.2.1 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica é um dos métodos mais antigos da construção de estradas, realizada por compactação, que altera o arranjo das partículas do solo, ou por correção granulométrica, que consiste na adição ou retirada de partículas (MEDINA et al., 2015).

De acordo com Santos (2012), a estabilização mecânica é o método no qual não há adição de materiais externos ao solo, sendo a melhoria obtida exclusivamente por meio da aplicação de energia. O processo tem como objetivo aumentar a densidade do solo, resultando em melhor resistência mecânica e durabilidade. Essa técnica promove redução do volume de vazios, adensamento das partículas e preenchimento dos poros, reduzindo significativamente a permeabilidade e minimizando os efeitos da percolação de água e erosão.

3.2.2 Estabilização química

De acordo com Santos (2010), a estabilização química consiste na aplicação de um agente químico (aditivo) no solo com o objetivo de modificar ou aprimorar suas propriedades. Os estabilizantes utilizados podem ser betumes, cimento Portland, cal, pozolanas e outros.

O cimento é o estabilizante químico mais utilizado em engenharia geotécnica e rodoviária. Sua ação se dá através de reação com a água, formando um gel coloidal cimentício insolúvel capaz de preencher os poros e endurecendo para formar uma matriz contínua de maior resistência que envolve as partículas de solo, proporcionando coesão (COOK e SPENCE, 1983, apud PINTO, 2008).

O solo-cal é uma mistura que, assim como as misturas com cimento, objetiva enrijecimento do solo, diminuição da expansibilidade e aumento da trabalhabilidade. Sua aplicação é bastante utilizada em solos argilosos e siltosos, sendo empregado na execução de camadas de pavimentação devido à melhoria significativa nas propriedades mecânicas e durabilidade (BERNUCCI et al., 2008).

3.2.3 Estabilização Granulométrica

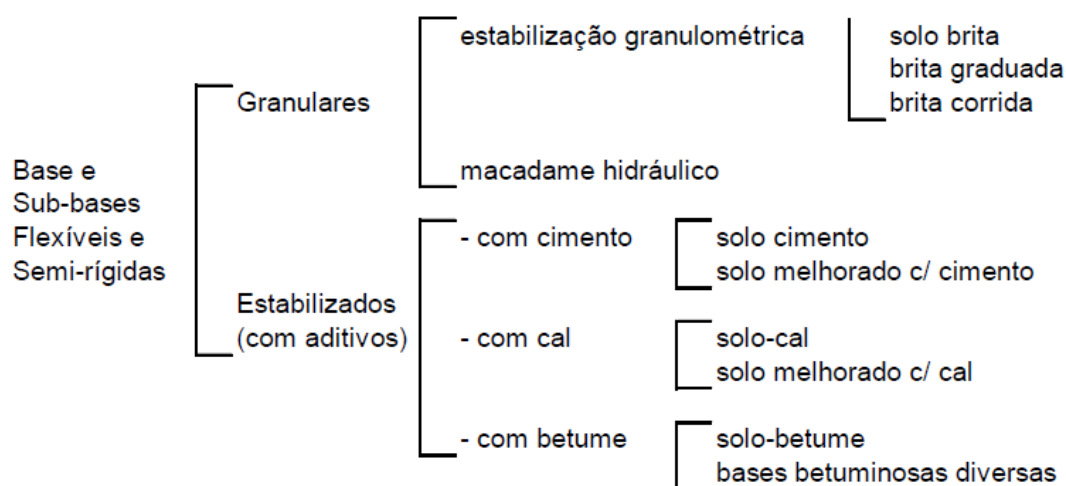
Segundo Villibor (1982), a estabilização granulométrica ocorre através da combinação de solos e agregados em proporções adequadas, obtendo-se um material com melhor distribuição granulométrica e maior estabilidade estrutural. A resistência do solo estabilizado é diretamente dependente do contato entre as partículas (grão a grão), sendo influenciado pela dimensão, forma e rugosidade, que determinam a eficiência na transmissão dos esforços e no travamento mecânico das partículas.

A adição de agregados britados, particularmente brita calcária, em solos naturais de reduzida capacidade de suporte constitui método eficaz de estabilização. A brita, ao se interpenetrar com as partículas finas do solo, aumenta o intertravamento entre partículas, melhora a distribuição granulométrica e favorece o contato ponto a ponto, elevando significativamente a resistência e a durabilidade do conjunto. Este foi o método de estabilização do solo utilizado no presente estudo, mediante a mistura de um solo arenoso e agregado brita calcária.

3.3 Base e Sub-base estabilizadas granulometricamente

De acordo com a classificação do DNIT (2006), as camadas de base e sub-base estabilizadas granulometricamente, quando compostas exclusivamente por materiais granulares, são classificadas como pavimentos flexíveis.

Figura 2 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas



Fonte: DNIT (2006).

As camadas de base e sub-base podem ser constituídas por solos, materiais britados de rochas, escórias de alto-forno, misturas de solos, solos e agregados, ou diferentes tipos de agregados. No caso de misturas de solo com material britado, essas camadas são denominadas bases e sub-bases de solo-brita. Quando se utilizam apenas materiais de britagem, as camadas recebem o nome de bases e sub-bases de brita graduada ou brita corrida (DNIT, 2006).

A viabilidade econômica da utilização de solos estabilizados com agregados britados, particularmente com brita calcária, está associada à disponibilidade de ambos os materiais nas regiões onde as obras são executadas. Segundo Bernucci et al. (2008), a brita graduada simples

(BGS) é amplamente utilizada no reforço de camadas de base e sub-base desde a década de 1960. Todavia, seu elevado custo de aquisição, especialmente quando associado à distância entre a obra e as pedreiras fornecedoras, pode comprometer a viabilidade econômica. Assim, a utilização de solos locais estabilizados com agregados disponíveis na região configura-se como solução tecnicamente viável, reduzindo custos sem comprometer qualidade e desempenho estrutural.

3.4 Propriedades mecânicas para pavimentação

3.4.1 Compactação

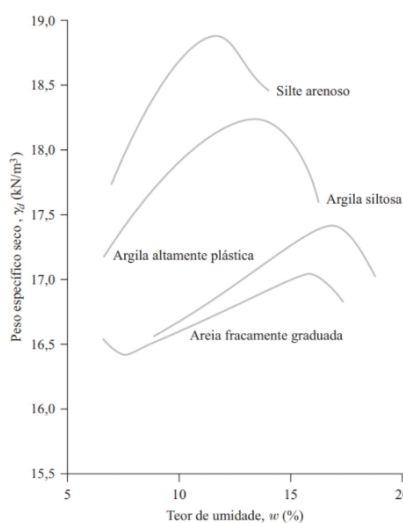
A compactação é considerada uma das etapas fundamentais na execução das camadas de pavimentação, exercendo influência direta sobre as propriedades mecânicas do solo, como resistência ao cisalhamento, módulo de resiliência, permeabilidade e deformabilidade (DAMINELI, 2018; DNIT, 2006). Estudos mostram que o grau de compactação dos agregados utilizados, seja em bases ou sub-bases, determina a estabilidade estrutural e a durabilidade do pavimento. O trabalho de Damineli (2018) ressalta que a compactação adequada fornece parâmetros essenciais para projetos e para o desempenho de resíduos de construção em camadas estruturais.

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a compactação é realizada com o objetivo de reduzir o volume de vazios e aumentar a massa específica aparente dos materiais, utilizando equipamentos como rolos vibratórios e pneumáticos. O procedimento garante que as camadas suportem tensões e minimize recalques. O controle do grau de compactação é realizado por meio de ensaios laboratoriais, como o Proctor, normatizado pela ABNT NBR 7182:2020.

O ensaio de compactação Proctor possui três variações de energia: normal, intermediária e modificada, diferenciando-se pelo tamanho do cilindro, peso do soquete, número de camadas e quantidade de golpes aplicados (ABNT, 2020). A curva resultante do ensaio de Proctor apresenta um ponto de máxima densidade seca, conhecido como umidade ótima de compactação. Quando o solo está abaixo da umidade ótima, a água facilita o rearranjo das partículas, reduzindo vazios e aumentando progressivamente a densidade. Acima da umidade ótima, o excesso de água separa os grãos, reduzindo a massa específica seca (MASSAD, 2010).

Diferentes tipos de solo (argilosos, arenosos, lateríticos) apresentam curvas de compactação distintas, determinadas pela granulometria, forma das partículas e composição mineralógica. Quanto maior a quantidade de argila, maior será a capacidade de retenção de água (CAPUTO, 2006; DAS, 2019). Figura 3 exemplifica diferentes formatos de curvas de compactação para tipos de solos diversos, evidenciando o impacto que as características geotécnicas e o histórico de compactação têm sobre o comportamento mecânico dos materiais utilizados nas camadas do pavimento.

Figura 3 - Curvas de compactação



Fonte: ASTM D-698, 2012 apud Das (2019)

O ensaio de compactação, segundo Nogueira (1995), tem por objetivo principal determinar a máxima massa específica aparente seca de um solo, a partir da variação do seu teor de umidade submetido a uma determinada energia de compactação, aplicada ao solo por meio de processos dinâmicos. Este procedimento é fundamental para o correto dimensionamento de aterros e camadas de pavimentação, definindo parâmetros essenciais para o controle tecnológico na obra (NOGUEIRA, 1995; ABNT, 2020).

A curva resultante do ensaio de Proctor é caracterizada por apresentar um ponto de máxima densidade seca, conhecido como umidade ótima de compactação. Quando o solo apresenta umidade abaixo da ótima, a água exercendo papel de lubrificante facilita o rearranjo das partículas, reduzindo os vazios e aumentando progressivamente a densidade. No entanto, quando se excede a umidade ótima, o excesso de água passa a separar os grãos do solo, ocupando o espaço que seria do material sólido, resultando assim em uma redução da massa específica seca (MASSAD, 2010; MASSAD, 2003).

Com a densidade máxima determinada em laboratório, é essencial realizar o controle da compactação dos solos em campo. O grau de compactação (GC) é definido como a razão entre

a massa específica seca do material compactado em campo ($\rho_{d,campo}$) e a massa específica máxima seca determinada em laboratório ($\rho_{d,laboratório}$):

$$GC(\%) = \frac{\rho_{d,campo}}{\rho_{d,laboratório}} \times 100 \quad (1)$$

Valores de GC entre 95% e 100% são geralmente requeridos em obras de terraplenagem e pavimentação, conforme especificado em normas técnicas (DNIT, 2006; ABNT, 2020). Esse controle é fundamental para garantir a estabilidade do solo compactado, minimizar recalques e assegurar a vida útil das infraestruturas rodoviárias.

3.4.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC-CBR)

O Índice de Suporte Califórnia (ISC), do inglês California Bearing Ratio (CBR), foi desenvolvido no final da década de 1920 com o objetivo de avaliar a capacidade de suporte de materiais empregados no subleito de rodovias. De acordo com Senço (2008), o ISC é um dos parâmetros mais aceitos para avaliar o comportamento mecânico de solos que atuam como fundação ou compõem camadas de pavimento.

O ensaio consiste em comparar a resistência à penetração de um pistão padronizado em uma amostra de solo compactado com a resistência apresentada por uma amostra de brita padrão, sob condições idênticas de umidade e compactação. O ISC é definido como a razão percentual entre a pressão necessária para o pistão penetrar 0,1 ou 0,2 polegadas no solo e aquela necessária para igual penetração em brita padrão:

$$ISC(\%) = \frac{\text{pressão calculada}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (2)$$

De acordo com o DNIT (2006), o ISC possibilita, por meio de equações empíricas, determinar as espessuras necessárias das diferentes camadas do pavimento de acordo com o volume de tráfego previsto. O método de ensaio está normatizado pela NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) (ABNT, 2017a) e pela DNIT 172: ME (DNIT, 2016).

Um parâmetro importante obtido nesse ensaio é o índice de expansão. Conforme indicado por Bernucci et al. (2008), valores significativos de expansão provocam grandes deformações volumétricas quando o solo é solicitado, podendo comprometer a estabilidade da

estrutura. O valor máximo admissível de expansão para o subleito é de 2%. Para valores superiores, recomenda-se a substituição do solo ou o tratamento com aditivos estabilizantes como cal ou cimento.

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER (1981) apresenta uma classificação dos materiais empregados nas camadas do pavimento conforme seus valores de ISC:

Quadro 1 - Classificação dos materiais empregados no pavimento

Camada do Pavimento	ISC	Expansão
Subleito	$\geq 2\%$	$\leq 2\%$
Reforço do Subleito	$> \text{ISC}_{\text{subleito}}$	$\leq 1\%$
Sub-base	$\geq 20\%$	$< 1\%$
Base	$\geq 80\%$	$\leq 0,5\%$

Fonte: DNIT (2008)

3.5 Propriedades do solo

O solo é formado por partículas sólidas originadas da desagregação e erosão de rochas, sendo que suas propriedades físicas dependem dos minerais constituintes da rocha de origem, bem como da forma e composição química dos grãos (DAS, 2007). Em termos geotécnicos, o solo é um meio trifásico, composto pela fase sólida (partículas minerais e, em alguns casos, matéria orgânica) e pelos vazios, os quais podem estar preenchidos por água, ar ou ambos (FIORI, 2015).

No contexto da engenharia rodoviária, considera-se como solo todo material orgânico ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente cimentado, encontrado na superfície da Terra e que possa ser escavado sem o uso de explosivos, englobando desde materiais finos até agregados grosseiros (DNIT, 2006).

3.5.1 Textura do Solo

Textura é a propriedade que descreve o tamanho e a distribuição das partículas sólidas que compõem o solo, sendo fundamental para compreender o comportamento mecânico e hidráulico dos materiais utilizados em pavimentação. Define-se textura como o conjunto de frações granulométricas presentes no solo (argila, silte, areias e pedregulhos), que influenciam

diretamente a compactação, permeabilidade, resistência ao cisalhamento e deformabilidade (LEÃO, 2018; DAS, 2007).

Do ponto de vista prático, a textura é quantificada por meio da análise granulométrica, que consiste em determinar a porcentagem em massa de cada fração de tamanho presente na amostra. Esse procedimento é essencial para enquadrar o material em classes granulométricas e verificar sua adequação para uso em subleitos, bases e sub-bases de pavimentos. Solos mais finos tendem a apresentar maior plasticidade e menor capacidade de suporte quando comparados a materiais granulares bem graduados (DAS, 2007; CAPUTO, 2008).

A NBR 6502: Rochas e solos estabelecem intervalos de tamanhos característicos para cada fração:

Tabela 1 - Intervalo do tamanho dos grãos

Fração	Intervalo
Bloco de rocha	> 1m
Matacão	200mm a 1 m
Pedra de mão	60 mm a 200 mm
Pedregulho	2,0 mm a 60 mm
Areia Grossa	0,6 mm a 2,0 mm
Areia média	0,2 mm a 0,6 mm
Areia fina	0,06 mm a 0,2 mm
Silte	0,002mm a 0,06mm
Argila	<0,002 mm

Fonte: NBR 6502 (ABNT, 1995)

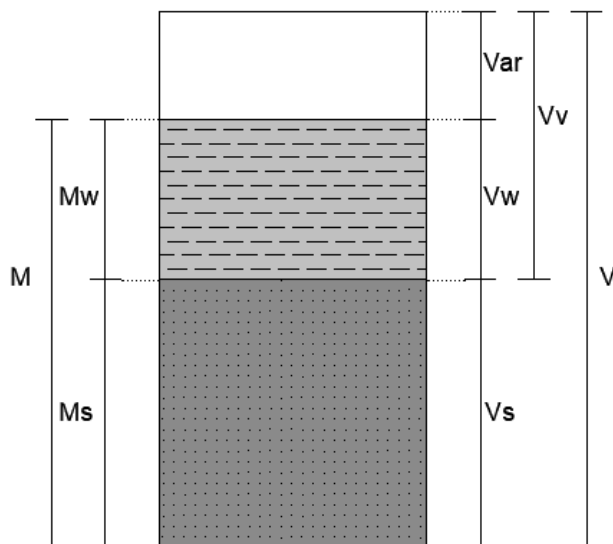
Em pavimentação, a combinação adequada da textura com outros parâmetros, como limites de consistência e índice de plasticidade, é determinante para o desempenho estrutural das camadas. Materiais com granulometria bem graduada apresentam melhor intertravamento entre partículas, menor índice de vazios e maior capacidade de suporte, enquanto solos muito finos ou mal graduados exigem algum tipo de melhoria ou estabilização (DNIT, 2006).

3.5.2 Índices físicos

O solo, em mecânica dos solos, é conceituado como um conjunto de partículas sólidas com vazios que podem estar parciais ou totalmente preenchidos por água, apresentando-se como um sistema trifásico composto pelas fases sólida, líquida e gasosa (CAPUTO, 1998). Essa configuração trifásica é fundamental para a engenharia geotécnica, uma vez que o

comportamento físico e mecânico do solo depende da proporção entre sólidos, água e ar, refletida nos índices físicos.

Figura 4 - Fases do solo



Fonte: Adaptado de Das (2007)

Ao desconsiderar o peso do ar em relação ao peso total da amostra, admite-se que o peso total PP do solo é dado pela soma do peso dos sólidos (P_s) e do peso da água (P_w). Do ponto de vista volumétrico, o volume de vazios é composto pelo volume de água (V_w) e pelo volume de ar (V_{ar}), enquanto o volume total do solo corresponde à soma do volume de vazios (V_v) e do volume de sólidos (V_s). Essa representação é consistente com o modelo trifásico do solo adotado na mecânica dos solos e serve de base para a definição dos principais índices físicos utilizados em projetos geotécnicos.

Conforme apresentado por Pinto (2006), Caputo (2008) e Das (2007), o estado do solo é descrito por um conjunto de índices que relacionam massas e volumes das três fases (sólida, líquida e gasosa). Entre esses índices físicos, destacam-se:

- Umidade (w): relação entre a massa da água e a massa dos sólidos.
- Índice de vazios (e): relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos.
- Porosidade (n): relação entre o volume de vazios e o volume total.
- Grau de saturação (S_r): relação entre o volume de água e o volume de vazios.
- Peso específico dos sólidos (γ_s): relação entre o peso das partículas sólidas e o volume que elas ocupam.
- Peso específico natural (γ_{nat}): relação entre o peso total e o volume total do solo.
- Peso específico aparente seco (γ_d): relação entre o peso dos sólidos e o volume total do solo.

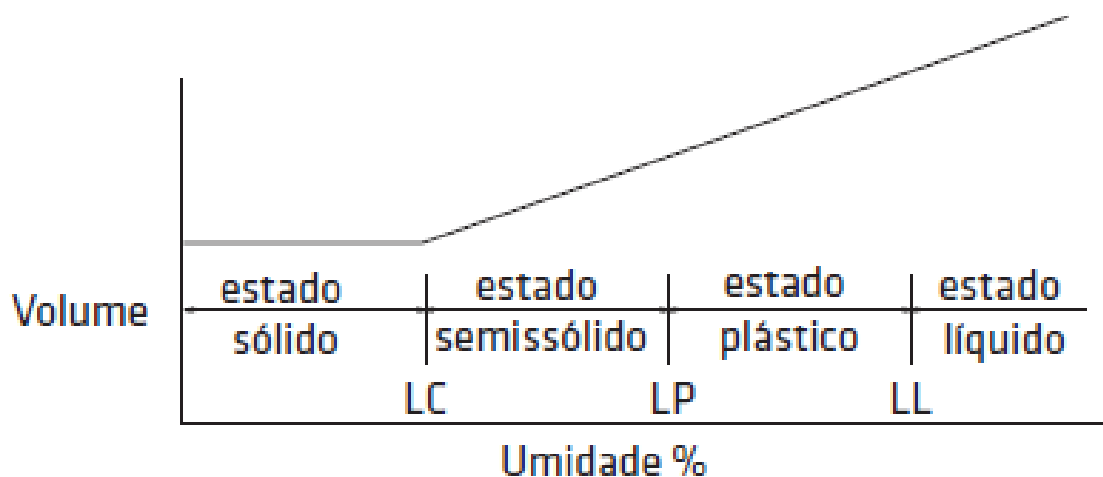
Esses índices são fundamentais em engenharia de pavimentos, pois permitem avaliar condições de compactação, saturação e estrutura interna do material, auxiliando na definição de parâmetros de projeto e no controle tecnológico de obras.

3.5.3 Limites de consistência

Os limites de consistência do solo, também conhecidos como limites de Atterberg, são parâmetros essenciais para descrever o comportamento de solos finos em função do teor de umidade, sendo fundamentais para a classificação geotécnica e para o projeto de pavimentação (PINTO, 2006; CAPUTO, 2008).

Como destaca Fiori (2015), os limites de consistência definem as transições de estado dos solos finos em função do teor de umidade: limite de contração (LC), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL). O limite de contração (LC) corresponde à transição entre os estados sólido e semissólido, o LP equivale à transição entre os estados semissólido e plástico, e o LL é o ponto que define o teor de umidade acima do qual o solo passa do estado plástico ao líquido, como exemplificado na Figura 5.

Figura 5 - Relação entre os limites de consistência e o estado do solo



Fonte: Fiori (2015)

O limite de liquidez (LL) é definido como o teor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico. A determinação do LL é realizada em laboratório por meio do aparelho de Casagrande, conforme norma técnica ABNT NBR 6459 (ABNT, 2016). Solos com LL elevado tendem a ser mais compressíveis e suscetíveis a variações de volume (DAS, 2007).

O limite de plasticidade (LP) é o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido. O LP é obtido por meio do ensaio de rolamento, conforme norma ABNT NBR 7180 (ABNT, 2016). A diferença entre LL e LP define o índice de plasticidade (IP), dado por $IP = LL - LP$, que indica o grau de plasticidade do solo e auxilia na sua classificação.

Solos com IP elevado tendem a apresentar maior compressibilidade e menor capacidade de suporte, enquanto solos com baixa plasticidade são preferidos para uso em bases e sub-bases, pois oferecem maior estabilidade e menor suscetibilidade a variações de umidade (BERNUCCI et al., 2008; DNIT, 2006).

3.5.4 Classificação dos solos

A classificação dos solos é um procedimento indispensável na engenharia de pavimentação, pois permite agrupar materiais com características físicas e mecânicas semelhantes, facilitando a previsão de seu comportamento quando empregados em camadas de subleito, sub-base e base (SENÇO, 2008; DAS, 2007). A classificação granulométrica, embora prática e de fácil aplicação, apresenta a limitação de não considerar a plasticidade do material, parâmetro fundamental para avaliar a adequação de solos finos em pavimentos flexíveis (CAPUTO, 2008; PINTO, 2006).

O sistema de classificação AASHTO (Transportation Research Board - TRB ou Highway Research Board - HRB) é amplamente adotado na prática rodoviária brasileira, pois integra de forma sistemática a granulometria, os limites de consistência e o índice de grupo. Na classificação TRB, os solos são divididos em sete grupos (A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 e A-7), sendo que os três primeiros correspondem a materiais granulares (com até 35% de finos) e os demais a solos siltosos e argilosos (com mais de 35% de finos), conforme detalhado pelo DNIT (2006).

O índice de grupo (IG) é utilizado para diferenciar solos dentro de um mesmo grupo, sendo calculado com base na percentagem de material que passa na peneira nº 200, no limite de liquidez e no índice de plasticidade. Quanto maior o IG, menor a qualidade do solo para fins rodoviários. Solos com $IG > 20$ são considerados inaptos para uso como subleito sem melhoramento (DNIT, 2006; PINTO, 2006).

Estudos recentes têm evidenciado que a classificação AASHTO, embora robusta, apresenta limitações quando aplicada a solos tropicais, especialmente lateríticos e saprolíticos, que apresentam comportamento mecânico diverso do previsto pelo sistema (NOGAMI;

VILLIBOR, 1995; MORAIS, 2021). A Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) foi desenvolvida especificamente para contornar essa deficiência, separando solos lateríticos (L) de não lateríticos (N) com base em ensaios de compactação e perda por imersão, demonstrando que solos finos lateríticos podem apresentar excelente desempenho em pavimentação, diferentemente do previsto pela classificação AASHTO (NOGAMI; VILLIBOR, 1995; BALBO, 2007).

Quadro 2 - Classificação dos solos (Transportation Research Board)

Classificação Geral	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira N° 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
Classificação em Grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria - % passando na peneira											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	30 máx.	51 máx.								
N° 200	15 máx.	15 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 máx.	36 máx.	36 máx.	36 máx.
Características da fração passando na peneira N° 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltoso ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: DNIT (2008)

O índice de grupo (IG), é utilizado para avaliar a qualidade do solo como material de subleito em função da porcentagem passante na peneira N°200 (F_{200}), LL e IP. O IG é determinado pela Equação 3.

$$IG = (F_{200} - 35) * [0,2 + 0,005 * (LL - 40)] + 0,01(F_{200} - 15)(IP - 10) \quad (3)$$

No quadro 3 é apresentado os valores estimados com a base nos grupos de solos obtidos através da classificação TRB

Quadro 3 - Valores de ISC para a classificação TBR

Solos	ISC
A-1-A	40 a mais de 80
A-1-B	20 mais de 60
A-2-4 e A-2-5	25 a mais de 60
A-2-6 e A-2-7	12 a 30
A-3	15 a 40
A-4	4 a 25
A-5	Menos de 2 a 10
A-6 e A-7	Menos de 2 a 15

Fonte: DNIT (2008)

Outro sistema de classificação amplamente difundido na geotecnia é o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), desenvolvido por Arthur Casagrande e baseado na identificação das características texturais e plásticas dos materiais (DAS, 2009; CAPUTO, 2008). Na classificação do SUCS são considerados parâmetros como: porcentagem de pedregulhos, areia e finos; forma da curva granulométrica do material; além da plasticidade e compressibilidade avaliadas por meio dos limites de consistência (DNIT, 2006).

O SUCS agrupa os solos de acordo com seus comportamentos quando empregados em estradas, aterros e fundações, classificando-os em dois amplos grupos: os solos com grãos grossos e os solos de grãos finos (DAS, 2009; DNIT, 2006). Solos de granulação grossa (designados por G ou S) são aqueles em que mais de 50% da massa fica retida na peneira nº 200, enquanto solos de granulação fina (M, C ou O) são aqueles em que mais de 50% da massa passa na referida peneira, sendo classificados quanto à plasticidade e compressibilidade (PINTO, 2006; BALBO, 2007).

Os solos com grãos grossos são naturalmente compostos por pedregulhos ou areias, com mais de 50% retidos na peneira nº 200. Esses materiais recebem os prefixos "G" (pedregulho) ou "S" (areia) no sistema SUCS, sendo classificados quanto à graduação e presença de finos (CAPUTO, 2008; DAS, 2009). A Tabela 2 apresenta o significado dos prefixos utilizados pelo SUCS para identificação das principais frações granulométricas.

Tabela 2 - Símbolos utilizados pelo SUCS

Prefixo	Descrição
G	Pedregulho

S	Areia
M	Silte
C	Argila
O	Solo orgânico
W	Bem graduado
P	Mal graduado
H	Alta Plasticidade
L	Baixa Plasticidade
Pt	Turfa

Fonte: DAS (2009)

Já os solos de grãos finos são constituídos por 50% ou mais dos grãos passantes na peneira nº 200, recebendo os prefixos "M" (silte), "C" (argila) ou "O" (orgânico), além do grupo especial "Pt", reservado para turfas e outros solos altamente orgânicos (PINTO, 2006; DNIT, 2006). A partir da caracterização de siltes e argilas, a plasticidade passa a ser empregada como critério fundamental para classificação dos solos, utilizando-se dos limites de consistência (LL e LP) e do índice de plasticidade (IP) para definir o comportamento do material (DAS, 2009; BERNUCCI et al., 2008).

Estudos recentes têm demonstrado que, embora o SUCS seja eficaz na classificação de solos de clima temperado, sua aplicação a solos tropicais, especialmente lateríticos, pode subestimar a capacidade de suporte desses materiais (NOGAMI; VILLIBOR, 1995; MORAIS, 2021). Nesse contexto, a Classificação MCT complementa o SUCS, identificando solos lateríticos (L) através de ensaios de compactação e perda por imersão, permitindo a utilização de solos finos de excelente desempenho que seriam indevidamente classificados como inadequados pelo SUCS (BALBO, 2007; APL ENGENHARIA, 2019). No Quadro 4 é apresentada os grupos de solos do SUCS

Quadro 4 - Classificação do solo - SUCS

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: Mais de 50% retido na peneira nº200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº4	Pedregulhos sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped. com pouco ou nenhum fino
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia de ped. com pouco ou nenhum fino
		Pedregulhos com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped. areia e silte
			GC	Pedregulhos argilosos, ou misturas de ped. areia e argila
	Areias: 50% ou mais da	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.

	fração gráuda passando na peneira n°4	Areias com finos	SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila
SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA: Mais de 50% retido na peneira n°200	Siltes e Argilas com LL < 50		ML	Siltes inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas ou argilosas
			CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas
			OL	Siltes orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade
	Siltes e Argilas com LL > 50		MH	Siltes - Areias finas ou siltes micáceos - Siltes elásticos.
			CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.
			OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade
	Solos Altamente Orgânicos		PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.

Fonte: DNIT (2006)

O Quadro 5 apresenta valores estimados de Índice de Suporte Califórnia (ISC) associados aos diferentes grupos de solos definidos pela classificação SUCS, permitindo relacionar a designação geotécnica do material com sua capacidade de suporte típica para uso em pavimentação.

Quadro 5 - Valores aproximados de ISC para classificação SUCS

Solos	ISC
GW	40 a mais de 80
GP	30 a mais de 60
GM	20 a mais de 60
GC e SW	20 a 40
SP e SM	10 a 40
SC	5 a 20
ML, CL e CH	menos de 2 a 15
MH	menos de 2 a 10
OL e OH	Menos de 2 a 5

Fonte: DINT (2006)

Quando o solo disponível apresenta ISC abaixo dos valores recomendados para a função estrutural desejada, torna-se necessário adotar técnicas de estabilização, como adição de cimento, cal, pó de brita ou outros aditivos, de forma a elevar a capacidade de suporte e enquadrar o material nos parâmetros especificados para as camadas do pavimento.

4 Métodos e Materiais

Os materiais empregados e os procedimentos experimentais utilizados na avaliação da estabilização granulométrica de um solo por meio da incorporação de brita calcária em diferentes teores. Nessa etapa, são detalhados a caracterização geotécnica do solo, os ensaios de limites de consistência, de expansibilidade e o Índice de Suporte Califórnia (ISC), adotados para quantificar a influência da adição de brita nas propriedades do material.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Mossoró. Os procedimentos seguiram as diretrizes normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), garantindo a reprodutibilidade dos ensaios e a validade técnica dos resultados para aplicações em pavimentação.

4.1 Solo

O solo objeto deste estudo foi coletado no campus da UFERSA, em Mossoró/RN. A seleção do local de coleta baseou-se na representatividade do material em relação aos solos de ocorrência comum na região e na disponibilidade de volume para a realização dos ensaios. Trata-se de um solo com predominância de fração areia, típico de subleitos locais que demandam melhoria para fins rodoviários. A extração foi realizada manualmente, com remoção da camada vegetal superficial para evitar contaminação por matéria orgânica. A extração do material está documentada na Figura 6.

Figura 6 - Extração do Solo



Fonte: MACENA (2024)

A localização exata do ponto de coleta pode ser visualizada na Figura 7, por meio de imagem de satélite do Google Maps.

Figura 7 - Localização da coleta da amostra do solo



Fonte: Google Maps (2025)

Após a coleta, o material foi transportado ao laboratório, seco ao ar e preparado conforme a norma DNER-ME 041/94. O armazenamento ocorreu em recipientes plásticos vedados para preservação de suas características naturais e da umidade higroscópica até o momento da utilização. Os ensaios de caracterização geotécnica utilizados neste trabalho foram aqueles já executados no TCC do aluno Emerson Alves Macêdo Macena, no qual o autor participou ativamente da fase experimental. Os ensaios específicos para esta pesquisa foram realizados posteriormente, complementando a base de dados já existente.

4.2 Brita Calcária

A brita calcária utilizada no estudo foi adquirida por meio de fornecedor comercial e estava previamente armazenada no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFERSA, acondicionada em recipiente plástico protegido da ação de intempéries. De acordo com a NBR 7211:2022, os agregados graúdos são classificados conforme sua distribuição granulométrica, dividindo-se em categorias que vão desde o pó de brita até as britas 0, 1, 2, 3 e 4, cada uma com aplicação específica na construção civil. Neste experimento, foi empregada a brita calcária tipo 1, caracterizada por granulometria entre 9,5 mm e 19 mm, faixa comumente especificada para uso em camadas de bases e sub-bases de pavimentos flexíveis.

4.2.1 Granulometria do agregado

A caracterização granulométrica da brita é fundamental para enquadrá-la na classe adequada conforme as especificações normativas. Neste estudo, utilizou-se a brita tipo 1, cuja faixa granulométrica está compreendida entre 9,5 mm e 19 mm. Após a definição da sequência de peneiras, foi realizado o ensaio de peneiramento, com separação das frações retidas em cada malha, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Peneiras utilizadas na granulometria da brita



Fonte: Autoria Própria

A massa total de amostra utilizada no ensaio foi de 7 kg, atendendo aos requisitos estabelecidos pela NBR NM 248:2003 para agregados graúdos, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Massa mínima, por amostra de ensaio

Dimensão máx nominal do agregado	Massa min da amostra de ensaio
< 4,75	0,3*
9,5	125
12,5	10
19,0	15
25,0	20
37,5	35
50	60
63	100
75	150
90	300
100	0,3*
125	125

Fonte: NBR NM 248 (2003)

Após a separação do material retido em cada peneira, determinou-se a massa de cada fração para a elaboração da curva granulométrica.

4.2.2 Caracterização da brita

Um aspecto relevante na caracterização da brita é a determinação de seu comportamento em relação à umidade, especialmente para os ensaios de compactação e ISC, uma vez que a taxa de absorção do agregado pode alterar o teor de umidade da mistura solo-brita. Segundo a NBR NM 53:2009 – Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, esse procedimento permite quantificar a capacidade de absorção do material e suas massas específicas, parâmetros essenciais para o correto controle da umidade nas misturas e para a interpretação dos resultados dos ensaios mecânicos.

O primeiro passo consistiu em submergir uma amostra de 7 kg de brita tipo 1 em água à temperatura ambiente por um período de 24 horas. Após esse tempo, o material foi retirado e colocado sobre um pano absorvente até a eliminação de toda a água superficial visível. Em seguida, a amostra foi pesada em balança de precisão, obtendo-se assim a massa do agregado saturado com superfície seca (ms). Na Figura 9, é mostrado o processo de secagem com o pano absorvente.

Figura 9 - Preparação da massa do agregado saturado com superfície seca



Fonte: Autoria Própria

Na segunda etapa, realizou-se a pesagem hidrostática, na qual o material foi colocado em um cesto metálico submerso e suspenso em balança. A balança foi previamente tarada com o peso do cesto, de modo a registrar apenas a massa da amostra imersa, obtendo-se a massa em água (ma).

Figura 10 - Pesagem para determinar a massa em água da (ma)



Fonte: Autoria Própria

Por fim, a amostra de brita foi levada ao forno a uma temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até atingir massa constante. Após o resfriamento até temperatura que permitisse a manipulação segura, procedeu-se à pesagem final para determinação da massa do agregado seco (m), conforme especificado pela NBR NM 53:2009.

Com esses valores definidos, é calculado a massa específica do agregado seco, pela Equação 4.

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (4)$$

A Equação 5 define a massa específica do agregado saturado (d_s).

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (5)$$

Na Equação 6 é calculado a massa específica aparente (d_a).

$$d_a = \frac{m}{m - m_a} \quad (6)$$

A absorção do agregado é determinada pela Equação 7. Esse parâmetro é fundamental para a correção do teor de umidade nas misturas utilizadas nos ensaios subsequentes de compactação e ISC, uma vez que a brita absorve parte da água adicionada, alterando a umidade efetiva do solo.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (7)$$

4.3 Composição da mistura

Para avaliar o comportamento mecânico da estabilização granulométrica, foram definidas quatro composições experimentais:

- Solo Puro (0%): Referência para análise do comportamento natural.
- Solo + 5% de Brita: Teor inicial para verificar sensibilidade da mistura.
- Solo + 10% de Brita: Teor intermediário.
- Solo + 15% de Brita: Teor máximo avaliado.

As proporções foram definidas em relação à massa de solo seco. A escolha desses percentuais baseia-se na literatura técnica sobre estabilização granulométrica, que busca obter melhoria de propriedades mecânicas (travamento e densificação) com o menor consumo possível de agregado nobre, garantindo viabilidade econômica para rodovias de baixo volume de tráfego. Cabe ressaltar que as massas utilizadas para a composição das misturas foram calculadas considerando o solo seco ao ar, ou seja, com teor de umidade higroscópica estabilizado.

4.4 Compactação

O ensaio de compactação das misturas solo–brita foi executado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7182:2020 – Solo: Ensaio de compactação, utilizando molde cilíndrico padronizado, soquete apropriado e controle de umidade em laboratório. Inicialmente, o molde foi rigidamente fixado à sua base metálica e equipado com o colarinho de extensão. No fundo do conjunto, posicionou-se um disco de papel-filtro, com a finalidade de evitar aderência do solo às paredes e à base após a moldagem. As amostras de solo (ou solo–brita) foram previamente preparadas conforme a ABNT NBR 6457, garantindo destorroamento, homogeneização e umidade próxima à condição de solo seco ao ar.

Para cada ponto da curva de compactação, adicionou-se água destilada de forma gradual à amostra, até atingir um teor de umidade estimado cerca de 5% abaixo da umidade ótima presumida. A mistura foi continuamente revolvida até obter distribuição homogênea da umidade em todo o volume de material.

Em seguida, procedeu-se à moldagem no molde cilíndrico, distribuindo o material em camadas de espessura aproximadamente uniforme, compactadas com o soquete padronizado. O número de camadas e de golpes por camada foi adotado conforme a energia de compactação definida (normal, intermediária ou modificada), em conformidade com a Quadro 6. Adotou-se a Energia Normal de compactação, justificada pelo escopo do trabalho voltado a pavimentos de baixo volume de tráfego, onde as solicitações de carga e os requisitos de densificação em campo

são compatíveis com esse nível de energia. Os parâmetros utilizados são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Golpes por camadas

Cilindro	Características de cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediar	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de Camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de Camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: NBR 7182 (2020)

Concluída a compactação, o excesso de solo foi removido, nivelando-se a superfície do corpo de prova. Em seguida, determinou-se a massa úmida do conjunto (molde + solo), e retirou-se uma amostra representativa do interior do corpo de prova para determinação do teor de umidade em estufa.

O procedimento foi repetido com teores de umidade progressivamente maiores, até a obtenção de, no mínimo, cinco pontos na curva de compactação, contemplando dois pontos no ramo seco, um ponto próximo à umidade ótima e dois pontos no ramo úmido da curva, conforme recomendação da NBR 7182:2020. Para garantir a representatividade dos resultados, foram moldados três corpos de prova para cada teor de umidade, permitindo o cálculo de valores médios e reduzindo a variabilidade dos dados experimentais. As porções já moldadas e rompidas foram descartadas, não havendo reuso de material entre moldagens, em atendimento às diretrizes normativas. Esse ensaio foi realizado para o Solo puro, e as misturas de 5%, 10% e 15%, para garantir que no ensaio de CBR, as misturas estivessem na umidade correta.

4.5 Índice de Suporte California (ISC)

O ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e da expansão foi realizado conforme as diretrizes da ABNT NBR 9895:2016 – Solo: Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. O procedimento compreende três etapas principais: compactação dos corpos de prova, ensaio de expansibilidade por imersão e ensaio de penetração.

Cabe ressaltar que o CBR é um método de natureza essencialmente **empírica**. Embora amplamente difundido e consagrado pela prática rodoviária nacional, o ensaio fornece um índice comparativo de resistência à penetração, não medindo diretamente propriedades

fundamentais do material, como o módulo de resiliência ou parâmetros de tensão-deformação puros (coesão e ângulo de atrito). Suas limitações teóricas incluem a dependência das condições de contorno do molde rígido e a incapacidade de simular perfeitamente as tensões cíclicas reais do tráfego. No entanto, para fins de pavimentação de baixo volume de tráfego e controle tecnológico corrente, o método permanece como referência normativa válida e suficiente para a classificação de materiais de base e sub-base.

Para a modelagem do corpo de prova utilizaram-se amostras de solo preparadas conforme a NBR 6457, com teor de umidade ajustado para a umidade ótima obtida no ensaio de compactação (Proctor). O material foi compactado em molde cilíndrico específico para CBR (diâmetro de aproximadamente 155 mm e altura de 127 mm), utilizando o disco espaçador no fundo do molde para garantir a altura final correta do corpo de prova. A compactação seguiu a energia normal, aplicando-se os golpes com o soquete padronizado e escarificando-se a superfície entre camadas para garantir aderência. A Figura 11 mostra o corpo de prova moldado, com o solo compactado.

Figura 11 - Corpo de prova moldado



Fonte: Autoria Própria.

Após a compactação e remoção do disco espaçador, inverteu-se o corpo de prova e colocou-se sobre sua superfície o prato perfurado com haste ajustável, acrescido de sobrecargas anelares de chumbo (mínimo de 4,5 kg) para simular o peso das camadas de pavimento sobrejacentes. O conjunto (molde + corpo de prova + sobrecarga) foi imerso em tanque com água por um período de 96 horas (4 dias). Um extensômetro (relógio comparador) foi montado no topo do molde para monitorar a variação de altura do corpo de prova. Foram realizadas leituras a cada 24 horas para calcular a porcentagem de expansão total em relação à altura inicial da amostra.

Figura 12 - Ensaio de expansão



Fonte: Autoria Própria.

Após o período de imersão, o corpo de prova foi retirado do tanque e deixado drenar por 15 minutos. Em seguida, foi levado à prensa de ensaio, mantendo-se as sobrecargas anelares sobre a superfície. A Figura 13 apresenta o extensômetro durante o ensaio de penetração.

Figura 13 - Ensaio de penetração



Fonte: Autoria Própria.

Após o período de imersão e a execução do ensaio de penetração, os valores registrados no anel dinamométrico permitem determinar a pressão aplicada pelo pistão em cada estágio de penetração. Com esses dados, calcula-se o Índice de Suporte Califórnia (CBR), comparando a pressão lida na amostra com a pressão padrão estabelecida para a brita de referência. O valor do CBR, expresso em porcentagem, é obtido pela Equação 8:

$$ISC(\%) = \frac{\text{Pressão lida na amostra}}{\text{Pressão padrão}} \times 100 \quad (8)$$

5 Resultados e Discursões

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos nos ensaios laboratoriais. Inicialmente, expõem-se os dados referentes à caracterização física e geotécnica do solo natural e do agregado (brita tipo 1). Em seguida, procede-se à análise do comportamento mecânico das misturas solo-brita, avaliando a influência da adição de material granular nas propriedades de resistência, compactação e expansibilidade, com o objetivo de verificar a viabilidade técnica do uso desse resíduo como agente estabilizador para fins de pavimentação.

5.1 Classificação do Solo

Com os dados obtidos nos ensaios, foi possível analisar as características do solo e avaliar suas propriedades, determinando sua adequação ao processo de estabilização granulométrica. A análise granulométrica foi realizada por meio do processo de peneiramento, conforme metodologia da norma técnica. Na Tabela 4 é apresentado o percentual granulométrico dos grãos, obtido a partir da caracterização do solo.

Tabela 4 - Percentual granulométrico dos grãos

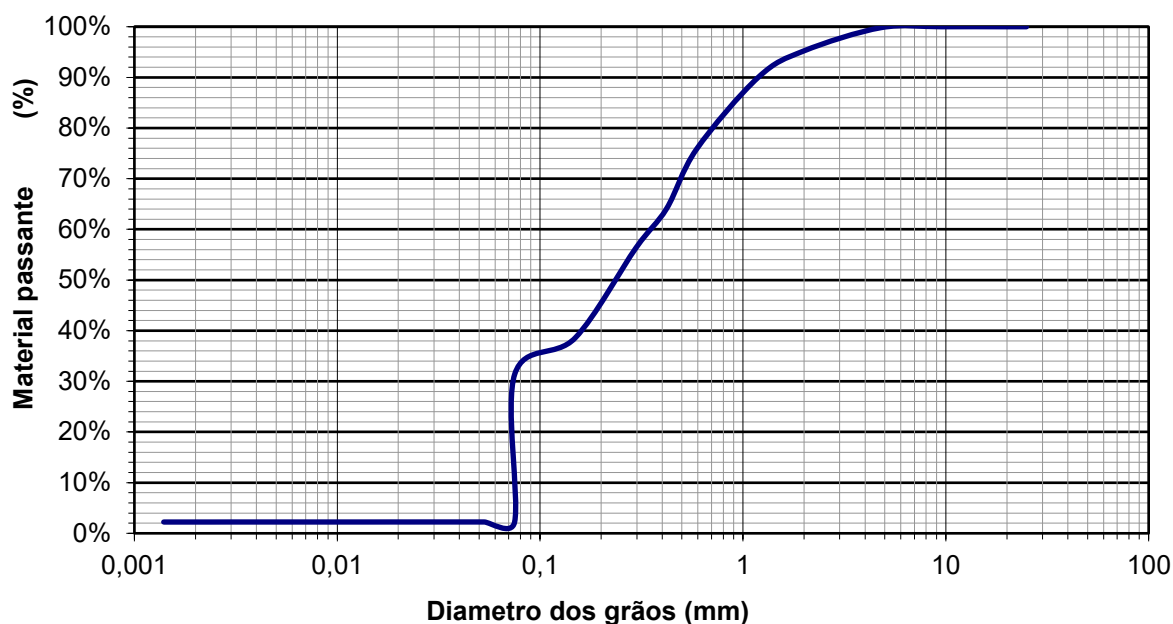
Argila e argila coloidal	Silte	Areia fina	Areia grossa	Pedregulhos e pedras
2,23%	0,01%	93,00%	4,59%	0,17%

Fonte: MACENA (2024)

O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica do solo estudado, representando a porcentagem de material passante em função do diâmetro das partículas em escala logarítmica. Observa-se que o solo é constituído predominantemente por areias finas e médias, com pequena fração de partículas extremamente finas (silte e argila), evidenciado pelo trecho inicial praticamente horizontal na região de menores diâmetros. A partir de aproximadamente 0,1 mm, verifica-se incremento acentuado do percentual passante, indicando maior concentração de grãos nessa faixa granulométrica. Em sequência, a curva assume caráter contínuo até atingir aproximadamente 100% de material passante, revelando uma distribuição relativamente ampla de tamanhos de partículas, porém com concentração preferencial em intervalo granulométrico específico.

Essa distribuição granulométrica é determinante para o comportamento geotécnico do material, uma vez que influencia diretamente parâmetros como densidade máxima de compactação, índice de vazios, permeabilidade e resistência ao cisalhamento, que constituem a base para a análise do desempenho mecânico do solo e das misturas solo-brita apresentadas nas seções subsequentes.

Gráfico 1 - Granulometria do solo



Fonte: MACENA (2024)

A Tabela 5 sintetiza os parâmetros geotécnicos obtidos a partir dos ensaios de caracterização do solo natural, contemplando propriedades como distribuição granulométrica, índices de consistência, massa específica dos sólidos e enquadramento classificatório. Com base nesses resultados, o material foi identificado como pertencente ao grupo A-2-4 da classificação AASHTO, que corresponde a solos de natureza granular com teor moderado de partículas finas (silte e argila) e comportamento intermediário quanto à capacidade de suporte. Embora esse grupo seja reconhecido como adequado para uso em camadas estruturais de pavimento, a confirmação de sua viabilidade técnica exige a realização de ensaios mecânicos adicionais, como compactação Proctor e determinação do ISC para quantificar sua resistência e deformabilidade sob carregamento. Os dados de caracterização constituíram a base técnica para a etapa subsequente do estudo, que consistiu na adição controlada de brita calcária em diferentes proporções, visando à estabilização granulométrica e ao aprimoramento das propriedades mecânicas do solo para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.

Tabela 5 - Resumo dos ensaios do solo

Tabela resumo	
Classificação do Solo: A-2-4	
Limite de liquidez	20,37%
Limite de plasticidade	12,49%
Umidade higroscopia	0,881%
Densidade real	2,64
Umidade Ótima	9,98%
ρd máx	2,49

Fonte: MACENA (2024)

A granulometria dominada por 93% de areia (diâmetros entre 0,06 mm e 2,0 mm) caracteriza este como solo arenoso típico de regiões semiáridas. A virtual ausência de finos (silte < 0,1%) confere ao material comportamento essencialmente granular, com implicações importantes para sua aplicação em pavimentação:

- **Pouca Coesão:** Um solo com apenas 2,23% de argila desenvolve coesão praticamente nula sob as tensões normais de carregamento em pavimentos. Essa característica explica sua inadequação para uso direto em camadas estruturais sem prévia estabilização, uma vez que a resistência é dependente apenas do atrito entre partículas.
- **Baixa Plasticidade:** O índice de plasticidade (IP) de 7,88%, classificado como "baixo", indica que o solo não sofre grandes variações volumétricas com mudanças de umidade, aspecto favorável para a estabilidade dimensional em campo. Contudo, essa mesma baixa plasticidade impede o desenvolvimento de coesão por secagem, limitando as possibilidades de estabilização mediante aditivos químicos tradicionais.
- **Densidade Natural Moderada:** A massa específica aparente seca máxima (ρd,máx) de 2,49 g/cm³, obtida no ensaio Proctor Normal, é típica para areias puras, confirmando a representatividade do material estudado como solo aluvionar/coluvionar característico da região de Mossoró.

Classificação Normativa: A classificação TRB/AASHTO A-2-4 situa o solo no limiar entre materiais "granulares com finos moderados" e "siltosos". De acordo com o DNIT (2006), solos A-2-4 podem ser utilizados em reforço do subleito, porém sua adequação para uso em sub-base é questionável sem estabilização prévia, particularmente quando o CBR natural (12,38%) fica aquém do mínimo normativo de 20%.

5.2 Granulometria do agregado

A análise granulométrica da brita tipo 1 foi realizada com o objetivo de verificar o enquadramento do material nas faixas especificadas para uso em pavimentação e conhecer a distribuição dos tamanhos de seus grãos. A Tabela 6 apresenta os percentuais retidos e passantes em cada peneira da série normal, enquanto o Gráfico 2 mostra a curva granulométrica obtida. Os resultados confirmam que o agregado utilizado atende às especificações normativas para a faixa correspondente à brita 1, apresentando uma distribuição de partículas que favorece o imbricamento mecânico quando incorporada à matriz do solo.

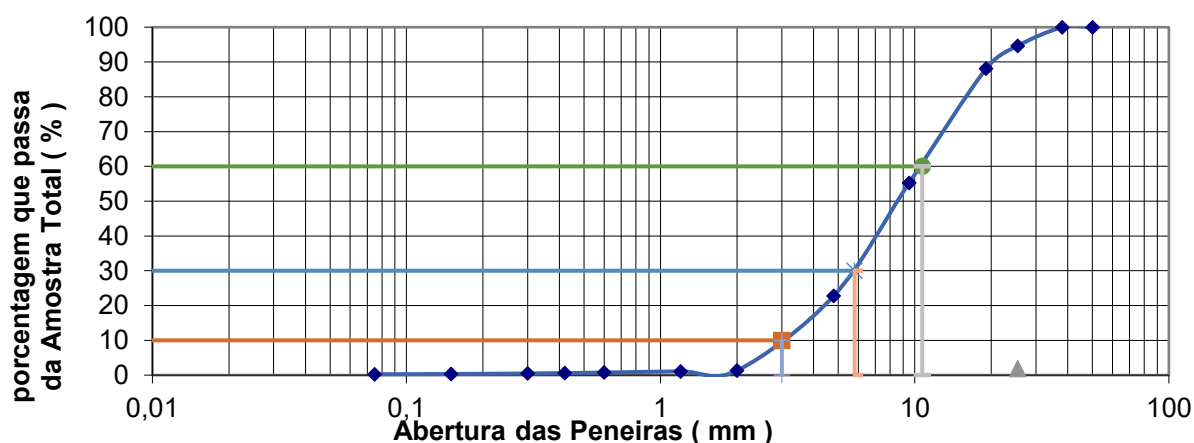
Tabela 6 - Massas retidas e passantes nas peneiras

Peneira		Porcentagem (%)			
ABNT	ABNT	Massa retida	Retida	Retida	Passante
n°	(mm)	(g)	(%)	Acumulada	Am. Total
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	3866,60	55,59	55,59	44,41
3/8"	9,5	3055,10	43,92	99,52	0,48
1/4"	6,5	31,70	0,46	99,97	0,03
4	4,8	1,90	0,03	100,00	0,00

Fonte: Autoria Própria

A caracterização da brita calcária tipo 1 revelou propriedades favoráveis à sua utilização como material estabilizador. A granulometria apresenta distribuição equilibrada entre as peneiras 19 mm e 9,5 mm, conforme ilustrado no Gráfico 2, oferecendo excelente potencial de intertravamento mecânico quando incorporada à matriz arenosa do solo.

Gráfico 2 - Curva granulométrica da brita



Fonte: Autoria Própria

5.3 Caracterização do agregado

A caracterização da brita utilizada como material estabilizador constitui etapa fundamental para a compreensão de seu comportamento nas misturas e para a correta dosagem dos compósitos. Neste tópico, são apresentados os resultados dos ensaios físicos realizados com a brita tipo 1, contemplando a determinação de sua granulometria, massa específica (real e aparente) e taxa de absorção de água. Esses parâmetros permitem avaliar a qualidade do agregado e sua conformidade com as normas técnicas vigentes, além de fornecerem os subsídios necessários para os cálculos de correção de umidade e massa seca nas etapas subsequentes de compactação e análise mecânica. A Tabela 7 apresenta os dados de pesagens utilizados para a determinação das características físicas da brita calcária empregada neste estudo. Observa-se que a massa do agregado saturado com superfície seca (M_s), enquanto a massa do agregado imerso em água (M_a), e a massa do agregado seco em estufa (M). Esses valores servem de base para o cálculo da absorção de água e da massa específica do agregado graúdo, parâmetros fundamentais para a avaliação do comportamento do material em misturas e na interação com a matriz cimentícia ou com o solo, conforme discutido nas análises subsequentes.

Tabela 7 - Dados das pesagens características do agregado

Dados	Valores
M_s	7097,9 g
M_a	4884,82 g
M	6819,61 g

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos nas etapas de caracterização do agregado, incluindo as massas saturada superfície seca, imersa e seca, bem como a absorção calculada conforme a NBR NM 53:2009.

Tabela 8 - Valores característicos do agregado

Dados	Valores
D	3,08 g/cm ³
D_s	3,21 g/cm ³
D_a	3,52 g/cm ³
A (%)	4,08%

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 8 apresenta os valores característicos obtidos para a brita calcária a partir dos ensaios de determinação de massas específicas, conforme a NBR NM 53:2009. A massa específica aparente seca (ρ_d) foi de 3,08 g/cm³, enquanto a massa específica seca em relação ao volume do agregado em condição saturada e superfície seca (ρ_{sat}) atingiu 3,21 g/cm³, e a massa específica real ou absoluta do material (ρ_s) resultou em 3,52 g/cm³.

A absorção de água (A) do agregado foi determinada em 4,08%, valor que indica capacidade moderada de absorção de umidade. Esse parâmetro é crítico no controle da relação água/agregado e na dosagem de misturas solo-brita, uma vez que influencia diretamente tanto a trabalhabilidade quanto o desempenho mecânico dos compósitos em que o material é empregado. Os valores obtidos confirmam a qualidade do agregado, mantendo-se dentro das faixas especificadas para britas destinadas a camadas de bases e sub-bases de pavimentos, conforme estabelecido pela NBR 7211:2022 e pelas normas técnicas do DNIT (2006)

5.4 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi executado com o objetivo de determinar os parâmetros de referência para a moldagem dos corpos de prova, especificamente a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima, essenciais para assegurar a estabilidade e a resistência das camadas pavimentadas. O estudo contemplou a análise do solo natural e das misturas estabilizadas com adições de 5%, 10% e 15% de brita calcária.

A partir dos dados experimentais, foram traçadas as curvas de compactação para cada composição, relacionando a variação da densidade seca em função do teor de umidade. Os resultados obtidos permitem avaliar o impacto da incorporação do agregado na densificação da matriz terrosa, indicando tendências de aumento ou redução na densidade máxima e deslocamentos no ponto de umidade ideal de compactação. No Quadro 7, é mostrado os resultados obtidos no ensaio de compactação.

Quadro 7 - Densidade e umidade ótima das misturas

	Solo Puro	Solo + 5%	Solo + 10%	Solo + 15%
W ÓTIMO	9,98%	12,10%	10,79%	11,02%
ρ_d MÁX	2,49	2,53	2,55	2,528

Fonte: Autoria Própria

A análise da umidade ótima das misturas solo-brita indicou comportamento não monotônico ao longo dos teores de agregado avaliados. O solo natural apresentou umidade

ótima de 9,98%, valor que se elevou para 12,10% com a incorporação de 5% de brita, representando um acréscimo de 2,12 pontos percentuais. Para o traço com 10% de brita, a umidade ótima reduziu para 10,79%, voltando a aumentar levemente para 11,02% na mistura com 15% de brita.

Esse comportamento não linear pode ser associado a diferentes mecanismos físicos. Um dos fatores relevantes é a absorção de água pela brita calcária, cuja absorção foi determinada em 4,08% em relação à massa seca do agregado. Considerando, por exemplo, uma mistura de 50 kg com 10% de brita (5 kg), cerca de 0,204 kg de água são retidos pelo agregado, diminuindo a fração de água efetivamente disponível para lubrificar e acomodar as partículas do solo na matriz compactada. Essa redistribuição de água entre solo e agregado tende a modificar a umidade ótima de forma não proporcional ao teor de brita.

Além disso, o ensaio de compactação Proctor, mesmo padronizado pela NBR 7182:2020, está sujeito a variabilidade experimental típica da ordem de $\pm 0,5$ a 1,0 ponto percentual na determinação da umidade ótima, devido à heterogeneidade inerente do material e às pequenas variações no procedimento de moldagem e energia aplicada entre golpes e camadas. Essa faixa de variação pode contribuir para as diferenças observadas, sobretudo na comparação entre os traços intermediários (10% e 15% de brita).

5.5 Aplicação da Brita Calcária tipo 1

Na literatura especializada em pavimentação, diversos estudos têm avaliado a eficácia de diferentes materiais estabilizadores quanto ao controle da expansão de solos problemáticos. Pesquisas realizadas por Moraes (2021) com misturas de solo tratado com cal demonstraram redução significativa da expansibilidade, com valores finais inferiores a 2%, adequados para uso em subleitos. Braga (2023) investigou a estabilização de solos lateríticos com cinzas volantes, obtendo expansões na faixa de 0,5% a 1,8%, confirmando a viabilidade técnica desses resíduos industriais. Por sua vez, estudos com cimento Portland evidenciaram redução da expansão para valores próximos a zero ou mesmo negativos, especialmente em solos de elevada plasticidade.

Após a caracterização inicial dos materiais, procedeu-se à incorporação da brita calcária ao solo nas proporções de 5%, 10% e 15%, permitindo uma avaliação detalhada de seu desempenho como agente estabilizador. Os resultados dos ensaios de expansibilidade,

apresentados na Tabela 9, demonstram que todas as misturas apresentaram valores de expansão inferiores a 1%, oscilando entre -0,011% e -0,131%.

Tabela 9 - Resultado do ensaio de expansão

Expansão do solo-brita	
Solo Puro	-0,011%
Solo + 5%	-0,106%
Solo + 10%	-0,131%
Solo + 15%	-0,057%

Fonte: Autoria Própria

Os valores obtidos no ensaio de expansibilidade indicam comportamento favorável quanto à estabilidade dimensional do compósito solo-brita quando submetido à compactação na energia modificada. Nessa perspectiva, a incorporação de brita calcária tipo 1 demonstra-se eficaz no controle das variações volumétricas do solo, caracterizando-se como alternativa tecnicamente adequada para emprego em camadas de sub-base de estruturas pavimentadas.

A avaliação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) constitui procedimento fundamental na pavimentação para aferir a capacidade de suporte de carga dos materiais e sua aptidão para as diferentes camadas da estrutura. No presente estudo, a adição de brita calcária às misturas solo-agregado produziu resultados expressivamente positivos. O solo em seu estado natural apresentou um CBR de 12,38%, valor que se mostrou inferior ao mínimo de 20% exigido pela normativa do DNIT (2006) para uso em camadas de sub-base, revelando uma inadequação técnica do material para essa aplicação sem prévio tratamento. Simultaneamente, o solo puro manifestou fenômeno de retração (colapso) durante a fase de imersão, conforme constatado pelos resultados de expansão dispostos na Tabela 9. Entretanto, a introdução de brita calcária nas proporções de 10% e 15% condicionou a obtenção de valores de CBR superiores ao limite normativo mínimo em todos os traços estudados, validando a técnica de estabilização granulométrica como método eficiente de otimização das propriedades mecânicas da matriz.

Os dados experimentais evidenciam que o agregado graúdo não somente incrementa a capacidade resistente do material, mas igualmente potencializa sua estabilidade dimensional, configurando-se as misturas como soluções técnicas e economicamente viáveis para incorporação em camadas estruturais de pavimentos com baixo volume de tráfego.

Tabela 10 - Resultado do CBR

Solo + Brita Calcaria					
Teor de Brita	CBR (%)	Incremento Absoluto (%)	Incremento Relativo (%)	Categoria de Material (DNIT)	Viabilidade para Sub-base
0%	12,38%	-	-	Reforço de Subleito	Não Atende
5%	16,47%	+4,09	+33,0%	Reforço de Subleito	Não Atende
10%	21,24%	+8,86	+71,6%	Sub-Base	Atende
15%	28,07%	+15,69	+126,8%	Sub-Base	Atende

Fonte: Autoria Própria

No solo natural, o valor de 12,38% situa-se significativamente abaixo do mínimo de 20% exigido pelo DNIT (2006) para materiais destinados a camadas de sub-base, confirmando a necessidade técnica de estabilização. Conforme as tabelas de classificação normativas, este solo poderia ser aproveitado apenas como reforço do subleito natural em circunstâncias muito particulares, limitado a pavimentos com tráfego praticamente residual ou nulo. Esse resultado inicial válida a premissa do estudo e demonstra de forma categórica que o solo arenoso em sua forma natural não é adequado para aplicação estrutural sem tratamento prévio.

A incorporação de 5% de brita resultou em acréscimo de 33% no valor de CBR em relação ao solo puro, indicando que o sistema é responsivo à presença do agregado graúdo. No entanto, o valor resultante de 16,47% permanece abaixo do limiar normativo de 20%, caracterizando este teor como tecnicamente insuficiente para atendimento aos critérios de sub-base. Esse resultado sugere a existência de um limiar crítico de brita necessária para alcançar conformidade normativa, situado entre 5% e 10% de agregado, indicando que a estabilização granulométrica requer proporção mínima para ser eficaz.

Com a adição de 10% de brita, o valor de CBR cruza o limiar normativo, atingindo 21,24% e atendendo formalmente aos requisitos do DNIT para sub-bases de pavimentos de baixo volume de tráfego. O incremento relativo de 71,6% em relação ao solo natural é substancial e reflete a efetividade da estabilização granulométrica nessa proporção. Do ponto de vista de viabilidade técnica e economia, este teor representa o mínimo recomendado em projetos com restrições orçamentárias, uma vez que satisfaz aos requisitos normativos com a menor quantidade de material estabilizador adicionado, otimizando assim a relação custo-benefício da intervenção.

Com a adição de 15% de brita, é atingido o valor de 28,07% proporciona uma margem de segurança confortável de 40% acima do limite normativo mínimo de 20%, oferecendo benefícios operacionais relevantes. Em primeiro lugar, essa margem compensa a variabilidade experimental inerente a ensaios geotécnicos, cuja dispersão típica situa-se entre 5% e 10%. Em segundo lugar, fornece contingência contra a heterogeneidade das misturas em campo, onde é impossível alcançar uniformidade perfeita na distribuição do agregado durante a execução. Em terceiro lugar, permite absorver variações de umidade e grau de compactação durante a construção, que inevitavelmente ocorrem em obra em menor ou maior magnitude.

5.6 Mecanismos físicos de ganho de resistência

O incremento substancial de CBR observado com a incorporação de brita calcária resulta da atuação sinérgica de múltiplos mecanismos mecânicos que operam complementarmente sobre a estrutura do compósito, transformando as propriedades de resistência e rigidez da mistura.

Formação do Esqueleto Granular e Intertravamento Estrutural: A brita calcária, com granulometria compreendida entre 9,5 mm e 19 mm, funciona como "estrutura suportante" ou "esqueleto granular" dentro da matriz arenosa, estabelecendo uma rede tridimensional de transferência de cargas. Sob as solicitações de compressão do ensaio de CBR, as partículas de agregado desenvolvem contatos ponto-a-ponto que transferem forças de forma mais direta e eficiente que a matriz de areia pura. A fração arenosa preenche os vazios intersticiais entre as partículas maiores de brita, impedindo seu deslocamento relativo e conferindo travamento mecânico ao sistema. Essa configuração estrutural oferece rigidez significativamente superior à areia não estabilizada. Análise do índice de vazios demonstra redução de aproximadamente 0,061 (solo natural) para cerca de 0,035 (mistura com 10% de brita), representando diminuição de aproximadamente 43% do volume poroso. Esse fechamento da estrutura de vazios traduz-se diretamente em aumento da densidade relativa e na maior resistência à penetração da sonda de CBR, explicando parcialmente o elevado valor de CBR observado.

Aumento do Ângulo de Atrito Interno e Resistência ao Cisalhamento: A presença de partículas graúdas e angulares eleva o ângulo de atrito interno (ϕ) da mistura de forma substancial. Solos arenosos não estabilizados apresentam tipicamente ϕ na faixa de 30° a 35°, enquanto a incorporação de brita calcária elevou este parâmetro mediante dois efeitos complementares: (i) a geometria angular das partículas de agregado britado acrescenta

resistência ao rolamento e deslizamento relativo entre grãos; (ii) o empacotamento mais denso resultante reduz significativamente a mobilidade das partículas durante cisalhamento. O resultado combinado é incremento do ângulo de atrito efetivo para valores próximos a 36° a 40° . Embora essa variação aparente ser modesta em termos absolutos, ela se traduz em aumento exponencial da capacidade de carga do material, conforme estabelecido pelas teorias clássicas de capacidade de carga de Terzaghi e Meyerhof. Esse mecanismo explica por que ganhos relativamente pequenos no ângulo de atrito resultam em aumentos desproporcionais na resistência à penetração do CBR.

Confinamento Lateral e Pré-Tensionamento da Matriz Arenosa: Além da redução do índice de vazios, a brita proporciona confinamento lateral superior àquele que a areia pura pode oferecer. As partículas angulares de brita, uma vez compactadas, travam-se mecanicamente entre si, formando uma rede tridimensional de contatos que se comporta como um "molde rígido" envolvendo a fração arenosa. A areia circundante fica sujeita a um pré-confinamento exercido pelos contatos entre as britas, o que reduz drasticamente a mobilidade e o potencial de deslocamento das partículas menores durante a compressão. Esse efeito de confinamento progressivo é particularmente crítico para o desenvolvimento de maior resistência ao cisalhamento em solos granulares e explica por que a adição de proporções modestas de agregado graúdo (10% a 15%) resulta em ganhos substanciais e não-proporcionais de CBR.

Sinergia Mecânica e Comportamento Não-Linear: A atuação coordenada desses três mecanismos, intertravamento estrutural, aumento do ângulo de atrito e confinamento lateral progressivo, justifica o comportamento não-linear observado, onde o CBR aumentou de 12,38% para 28,07%, representando ganho total de 126%. Esse incremento supera significativamente as expectativas baseadas em simples diluição volumétrica ou interpolação linear dos componentes, refletindo a natureza sinérgica da interação solo-brita. A predominância de um mecanismo sobre outro varia com o teor de brita: em baixas proporções (5%), o efeito é moderado; em teores intermediários (10%), o intertravamento e o confinamento atingem efetividade máxima; em teores superiores (15%), a melhoria adicional torna-se mais gradual, sugerindo um limite de efetividade marginal do agregado.

5.7 Limitações do estudo

A integridade científica de um trabalho experimental exige o reconhecimento explícito de suas limitações, essencial tanto para a correta interpretação dos resultados quanto para orientar adequadamente pesquisas complementares e aplicações práticas dos achados.

Limitações Quanto à Escala e Transposição para Condições de Campo: Os ensaios de CBR foram conduzidos em cilindros rígidos padronizados (diâmetro 155 mm, altura 177,8 mm) com compactação executada manualmente por soquete com massa e altura de queda controláveis. Em situações de campo, a compactação é realizada com rolos compactadores vibratórios operando sob regime de carregamento dinâmico, e a uniformidade de mistura é significativamente mais difícil de ser alcançada e mantida ao longo de extensas faixas de pavimento. Estudos comparativos na literatura indicam que materiais compactados mecanicamente em campo frequentemente apresentam CBRs de 5% a 15% inferiores aos valores laboratoriais obtidos sob condições padronizadas, sugerindo que os valores aqui determinados representam um "limite superior" de desempenho, não necessariamente reproduzível em obra.

Limitações Quanto à Variabilidade Estatística e Representatividade: Foram moldados três corpos de prova por teor de brita avaliado, constituindo o número mínimo normativamente aceitável conforme a ABNT NBR 9895, porém insuficiente para uma análise estatística robusta. Com apenas três replicadas, não é possível determinar parâmetros de dispersão como desvio padrão, coeficiente de variação ou intervalos de confiança que forneceriam incerteza quantificada para cada resultado. Adicionalmente, sem múltiplas medições, é impossível verificar se os dados seguem distribuição normal ou se contêm outliers que comprometam a representatividade. Consequentemente, os valores de CBR apresentados devem ser interpretados como "valores pontuais" sem indicação de incerteza estatística, reduzindo o rigor na tomada de decisões de projeto baseadas nesses dados.

Limitações Quanto à Durabilidade e Degradação em Condições Climáticas Reais: Os corpos de prova foram submetidos a uma única imersão em água por 96 horas antes do ensaio de penetração, conforme prescrito pela norma NBR 9895:2016. Em campo, o pavimento e suas camadas estruturais sofrem múltiplos ciclos alternados de molhagem (durante períodos chuvosos) e secagem (sob radiação solar), que podem degradar progressivamente as ligações capilares entre agregado e solo, comprometendo a coesão e a resistência da mistura. Adicionalmente, ações intempéricas, como alterações químicas (lixiviação de cátions, oxidação de minerais), processos biológicos (colonização por fungos, raízes) e variações térmicas cíclicas, não são simuladas em laboratório, mas ocorrem continuamente em serviço. Essas degradações ambientais podem reduzir significativamente o CBR e a vida útil do pavimento comparado aos valores determinados em condições de laboratório controlado.

5.8 Recomendações para Estudos Futuros

Aumentar Rigor Estatístico: Realizar no mínimo 5 corpos de prova por teor de agregado, permitindo cálculo de desvio padrão, coeficiente de variação e intervalos de confiança (95%) para cada resultado de CBR e expansão.

Incorporar Análise de Fadiga: Utilizar equipamento de fadiga triaxial dinâmica ou simulador de tráfego para avaliar comportamento da mistura sob carregamento cíclico, quantificando deformações permanentes e número de ciclos até ruptura.

Validação Experimental em Campo: Construir seção experimental de pavimento com dimensões e técnicas construtivas reais, instrumentar com células de pressão e extensômetros, e monitorar desempenho ao longo de pelo menos dois ciclos climáticos (dois anos).

Análise Microscópica da Estrutura: Empregar microscopia eletrônica de varredura (MEV) para visualizar diretamente os mecanismos de contato entre partículas, padrões de intertravamento e possíveis descontinuidades na matriz, validando experimentalmente os mecanismos propostos neste trabalho.

Otimização de Dosagens: Investigar teores intermediários não explorados neste estudo (por exemplo, 7%, 8%, 12%, 13%) para refinar a identificação do ponto ótimo de brita e definir com maior precisão o limite entre conformidade e não-conformidade normativa.

Avaliação de Durabilidade Acelerada: Submeter corpos de prova moldados a ciclos acelerados de molhagem-secagem ou alterações térmicas, seguido de reensaio de CBR, a fim de quantificar degradação das propriedades mecânicas.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa avaliou a viabilidade técnica da estabilização granulométrica de um solo arenoso da região de Mossoró/RN através da incorporação de brita calcária, visando sua aplicação em pavimentos de baixo volume de tráfego. Com base na análise experimental e nos critérios normativos vigentes, apresentam-se as conclusões finais.

O solo estudado, classificado como A-2-4 (AASHTO), apresentou em seu estado natural um CBR de 12,38%, valor insuficiente para camadas de sub-base (mínimo de 20% conforme DNIT (2006)), confirmando que o material, sem tratamento, é inapto para funções estruturais no pavimento. A incorporação de brita calcária promoveu incrementos substanciais e progressivos na capacidade de suporte. O teor de 10% de brita elevou o CBR para 21,24% (incremento de 71,6%), superando o limiar normativo com margem mínima, enquanto o teor

de 15% atingiu 28,07% (incremento de 126%), consolidando a eficácia técnica da estabilização granulométrica.

A melhoria no desempenho não se deve a reações químicas, mas sim a mecanismos físicos fundamentais: intertravamento granular, aumento do ângulo de atrito interno e melhoria do confinamento lateral. A brita formou um esqueleto rígido dentro da matriz arenosa, enquanto a compactação reduziu o índice de vazios em aproximadamente 43%, resultando em uma estrutura mais densa e confinada, capaz de dissipar melhor as tensões de compressão. Todas as misturas apresentaram expansão negativa (colapso controlado) inferior a 0,15%, atendendo com ampla margem ao limite máximo de 1,0% especificado pelo DNIT (2006), demonstrando que a estabilização granulométrica é eficaz em manter a estabilidade volumétrica sem introduzir riscos de expansibilidade.

Com base no binômio desempenho técnico e viabilidade econômica, a mistura com 10% de brita é recomendada como teor ótimo econômico, representando o mínimo necessário para atender aos requisitos técnicos de sub-base, adequada para cenários de orçamento restrito e rigoroso controle de execução. A mistura com 15% de brita oferece uma margem de segurança de 40% acima do mínimo normativo, recomendada para obras com maior variabilidade executiva ou onde se deseja maximizar a vida útil do pavimento. Os resultados validam o uso das misturas com teor superior a 10% especificamente para camadas de sub-base em pavimentos flexíveis de baixo volume de tráfego, em regiões de clima semiárido como o Nordeste brasileiro, onde a drenagem é naturalmente favorecida e o risco de saturação permanente é menor.

Contudo, é fundamental reconhecer que os resultados obtidos em laboratório representam condições ideais de homogeneização e compactação, dificilmente replicáveis integralmente em campo. A energia de compactação manual (Proctor) difere significativamente da dinâmica dos rolos compactadores vibratórios, podendo resultar em densidades de campo 5-15% inferiores e CBRs mais conservadores. O estudo não avaliou a degradação por ciclos repetidos de molhagem-secagem ou alterações químicas de lixiviação que podem reduzir progressivamente a eficácia do travamento granular ao longo do tempo. O ensaio CBR é monotônico e não simula a fadiga por repetição de cargas, fator crítico para o comportamento a longo prazo em pavimentos. Adicionalmente, o número reduzido de replicadas não permite quantificar incerteza estatística, limitando a representatividade dos resultados.

Para avançar na validação dessa técnica, recomendam-se estudos complementares incluindo análise econômica comparativa entre solo estabilizado e solo selecionado em jazidas, caracterização mecanista via ensaios triaxiais dinâmicos para obtenção do Módulo de

Resiliência, execução de trechos experimentais em escala real com monitoramento sob tráfego, avaliação de durabilidade mediante ciclos acelerados de molhagem-secagem, e estudos de variabilidade em campo para quantificar dispersão de resultados. Em síntese, a estabilização granulométrica com brita calcária provou ser uma solução técnica robusta, ambientalmente sustentável e regionalmente viável, transformando um solo local inadequado em um material apto para infraestrutura rodoviária de baixo tráfego no semiárido nordestino.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Solo – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995. Disponível em: <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/02/abntnbr06502-1995-rochasesolos-terminologia.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

APL ENGENHARIA. Entenda sobre a classificação dos solos: tipos, granulometria e limites de consistência. 2019. Disponível em: <https://blog.apl.eng.br/entenda-sobre-a-classificacao-dos-solos-tipos-granulometria-e-limites-de-consistencia>. Acesso em: 27 nov. 2025.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BAPTISTA, C. N. **Dimensionamento de pavimentos**. 2. ed. São Paulo: Globo, 1979.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

BIODPI. Ensaio CBR ou Índice de Suporte Califórnia. 2023. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-cbr-indice-suporte-california>. Acesso em: 26 nov. 2025.

BORRÉ, S. L. **Estudo da viabilidade de estabilização de solos de baixa capacidade de suporte com agregados**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BRAGA, M. E. **Estudo da viabilidade técnica na utilização de solos lateríticos em obras de pavimentação**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de Rodovias 2024: 27ª edição. Brasília, 2024.

COOK, J. R.; SPENCE, R. D. **Soil stabilization with admixtures**. In: YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. (Ed.). Principles of pavement design. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1983. p. 432-465.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/150>. Acesso em: 3 set. 2025.

DAMINELI, Bruno Luiz. **Avaliação da influência do grau de compactação nas propriedades mecânicas de resíduos de construção civil para aplicação em pavimentação**. 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2007.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. DNER-ME 041/94: Solos – Preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 1981.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Manual de Pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006. (Publicação IPR-719).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. DNIT 172/2016-ME: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 3. ed. Curitiba: Editora UFPR, 2015.

JAWORSKI, Tadeo. Apostila de equipamentos de construção civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

KLEIN, R. **Estudo de propriedades mecânicas de solos compactados em diferentes energias**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2014.

LEÃO, I. S. **Solos: estudo e aplicações**. Campina Grande: CTRN/UFCG, 2018.

LEHNEN, Carlos Ricardo. **Efeito da temperatura de compactação nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas**. 2017. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2017.

MACENA, Emerson Alves de Macêdo. **Utilização de pó de vidro para incremento de características mecânicas de solos argilosos na pavimentação**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2024.

MAGALHÃES JUNIOR, Francisco Lopes de et al. **Importância do controle tecnológico em obras rodoviárias**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Pavimentação: Notas de aula da disciplina TRN 32**. Versão 06.2. Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2006.

MASSAD, Faïçal. **Compactação dos solos: conceitos e aplicações**. São Paulo: Pini, 2003.

MASSAD, Faïçal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MORAIS, T. B. G. de. **Estudo da estabilização de solos para aplicação em pavimentação rodoviária**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2021.

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995.

NOGUEIRA, João Baptista. **Mecânica dos solos: ensaios de laboratório**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, A. R. A. G. **Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.12096>. Acesso em: 7 nov. 2025.

ROSSOT ENGENHARIA. **Limites de Atterberg** (LL e LP). 2023. Disponível em: <https://rossot.com.br/limites-de-atterberg-ll-e-lp>. Acesso em: 28 nov. 2025.

SANTOS, Monique Nascimento. **Análise do efeito de estabilização mecânica em matrizes de terra**. 2012. Relatório Final de Iniciação Científica – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, R. M. **Estabilização química de solos: perspectivas e inovações**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SENÇO, Wlastermiller de. **Estradas de rodagem: projeto geométrico**. São Paulo: Pini, 2008.

SOLIZ, Verônica Viana. **Estudo da viabilidade de utilização de solo tropical estabilizado com cimento em camadas de pavimentos de vias de baixo volume de tráfego**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

VILLIBOR, Douglas Fadul. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. 1982. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.