



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

LUCAS QUERINO DA COSTA BORGES

**CARACTERIZAÇÃO DO SUBLEITO PARA PASSAGEM DE VEÍCULOS PESADOS:
ESTUDO DE CASO TRECHO DA BR-104, ENTRE OS MUNICÍPIOS DE CERRO
CORÁ/RN E CURRAIS NOVOS/RN**

ANGICOS

2025

LUCAS QUERINO DA COSTA BORGES

**CARACTERIZAÇÃO DO SUBLEITO PARA PASSAGEM DE VEÍCULOS PESADOS:
ESTUDO DE CASO TRECHO DA BR-104, ENTRE CERRO CORÁ/RN E CURRAIS
NOVOS/RN**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof(a). Dra. Andreza Kelly Costa
Nóbrega dos Santos.

ANGICOS

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.

Q4c Querino, Lucas.
Caracterização do subleito para passagem de
veículos pesados: estudo de caso trecho da BR-104,
entre os municípios de Cerro Corá/RN e Currais
Novos/RN / Lucas Querino. - 2025.
60 f. : il.

Orientadora: Andreza Kelly.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2025.

1. Pavimentação. 2. Análise de Subleito. 3.
Compactação. 4. CBR. I. Kelly, Andreza, orient.
II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

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.

LUCAS QUERINO DA COSTA BORGES

**CARACTERIZAÇÃO DO SUBLEITO PARA PASSAGEM DE VEÍCULOS PESADOS:
ESTUDO DE CASO TRECHO DA BR-104, ENTRE OS MUNICÍPIOS DE CERRO
CORÁ/RN E CURRAIS NOVOS/RN**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 1 / 8 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



ANDREZA KELLY COSTA NOBREGA DOS SANTO:

Data: 05/08/2025 09:18:27-0300

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

Andreza Kelly Costa Nóbrega dos Santos, Prof(a). Dra. (UFERSA/Campus Angicos)

Documento assinado digitalmente



JANAINA SALUSTIO DA SILVA

Data: 05/08/2025 13:00:15-0300

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

Janaina Salustio da Silva, Prof(a). Dra. (UFERSA/ Campus Angicos)

Documento assinado digitalmente



VALQUIRIA MELO SOUZA CORREIA

Data: 05/08/2025 18:57:53-0300

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

Valquiria Melo Souza Correia, Prof(a). Dra. (UFERSA/ Campus Angicos)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me permitir realizar essa grande conquista em minha vida. Sou grato por sua orientação em todas as minhas escolhas, por suas bênçãos em cada momento da minha vida e por me conduzir ao início de uma nova jornada tão desejada.

Agradeço a minha família que sempre me apoiou nesta trajetória, em especial à minha mãe Maria da Luz Querino, que contribuiu diretamente para que tudo isso se tornasse realidade. Ela, sem dúvida, é minha maior inspiração! e aos meus irmãos Filipe Querino e Tiago José Querino, por estarem sempre ao meu lado me incentivando. Sou grato por tudo que fizeram e ainda fazem por mim e dedico todas as minhas conquistas a vocês três, Obrigado família!

À minha namorada Isadora Isis, por todo companheirismo, amor, paciência, e, por me motivar todos os dias a concluir este trabalho. Por estar ao meu lado em todos os momentos. Serei eternamente grato pelo que fez e ainda faz por mim.

À minha orientadora, Dr^a. Andreza Kelly Costa Nóbrega dos Santos, pela atenção, orientação e apoio nesse momento tão significativo e seu comprometimento durante a condução deste estudo.

Agradeço aos docentes do curso de Engenharia Civil por todo o conhecimento teórico, prático e de vida transmitido e adquirido durante todo o curso, pois foram fundamentais na minha trajetória acadêmica.

Aos meus amigos, em especial Jonas Mike, Victor Alencar, Caio Pedro, Nathan Palhares e Tainan Costa. Obrigado pela amizade de todos vocês, por nos incentivarmos e torcermos sempre uns pelos outros.

Por fim, quero agradecer a Universidade Federal Rural do Semi-Árido por ter me possibilitado uma graduação de qualidade. Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram, direta ou indiretamente para a minha formação, e para que a realização desse trabalho fosse possível.

RESUMO

Existe a necessidade de análise das rodovias, quando se fala a respeito dos avanços dos sistemas de transportes, com cargas mais elevadas e de maiores dimensões por exemplo aos transportes que fazem a mobilização dos elementos que constituem a construção das torres eólicas. Fez-se necessário a adequação de um trecho da BR-104 que se encontra entre os municípios de Cerro Corá/RN e Currais Novos/RN para o transporte seguro de pás eólicas, que por sua vez, apresenta aproximadamente 80 metros de comprimento, assim como outros elementos que compõem as torres de energia eólica, que apesar de não serem compridas como as pás, apresentam maior massa, com peças que chegam a pesar mais de duas vezes a sua massa. Na execução de uma estrada, para que ela seja segura e apresente maior durabilidade, se faz necessário a análise das camadas estruturantes que irá compor a rodovia, pois é a partir desses estudos que se evita patologias precoces, como recalques, fissuras, trincas, assim como buracos, comprometendo a segurança de quem trafega pela rodovia. É indispensável a realização das análises prévias do subleito para que permaneça segura e com menor número de problemas, oferecendo segurança, garantia e economia à obra, com o planejamento, também, de respeitar o meio ambiente. Este trabalho tem por finalidade a análise do solo do subleito, que é o terreno natural da região. O solo foi retirado e analisado respeitando todas as normativas que envolvem os ensaios realizados, dentre elas estão a NBR 6457:2020 (preparação para ensaios de compactação e caracterização), NBR 7181:2025 (análise granulométrica), NBR 6459:2016 (limite de liquidez), NBR 7180:2016 (limite de plasticidade), NBR 7182:2020 (ensaio de compactação) e a NBR 9895:2017 (índice de suporte Califórnia - CBR). A partir desses ensaios, é possível realizar o dimensionamento de pavimentos rodoviários, pois, indicará se o solo tem capacidade de suportar cargas de tráfego, além de constatar solos expansivos, quando imerso em água. Após o levantamento dos resultados laboratoriais, houve a conclusão, baseado nas normativas brasileiras, de que o solo é apropriado para compor a camada do subleito, já que apresentou Índice de Suporte Califórnia (ISC) igual a 19,73%, ou seja, é admissível pois apresenta ISC maior que 8%, definidos em norma, para a realização de rodovias com passagem de veículos pesados.

Palavras-chave: Pavimentação. Análise de Subleito. Compactação. CBR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Local em estudo.....	24
Figura 2– Amostra de solo coletada.....	25
Figura 3– Destorroamento do solo.....	25
Figura 4– Amostras das partículas maiores.....	26
Figura 5– Peneiramento no agitador mecânico.....	27
Figura 6– Estufa utilizada em estudo.....	27
Figura 7– Agentes dispersantes.....	28
Figura 8– Ensaio de sedimentação com auxílio do decímetro.....	29
Figura 9 – Aparelho Casagrande.....	30
Figura 10– Ensaio de pasticidade do solo.....	31
Figura 11– Massa específica do solo.....	32
Figura 12– Ferramentas utilizadas no ensaio de compactação.....	33
Figura 13– Cilindro utilizado no ensaio de compactação.....	34
Figura 14– Preenchimento das camadas para compactação.....	34
Figura 15– Retirada de material compactado.....	35
Figura 16– Momento inicial da imersão em água do solo.....	37
Figura 17– Ensaio CBR.....	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Carta de Plasticidade de Casagrande.....	43
Gráfico 2 - Curva granulométrica.....	45
Gráfico 3 - Curva de compactação.....	49
Gráfico 4 - Ensaio CBR.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Massa da amostra para granulometria.....	39
Tabela 2- Peneiramento grosso.....	40
Tabela 3- Peneiramento fino.....	40
Tabela 4- Sedimentação.....	41
Tabela 5 - Parâmetros utilizados na calibração e cálculo da sedimentação.....	41
Tabela 6- Dado gerais de granulometria.....	42
Tabela 7 - Classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos).....	43
Tabela 8 - Faixa de classificação do Índice de Grupo (IG).....	44
Tabela 9- Limite de liquidez.....	46
Tabela 10- Limite de plasticidade.....	46
Tabela 11- Ensaio de compactação.....	48
Tabela 12- Índice de Suporte Califórnia (CBR)	50
Tabela 13 - Resultado de penetração CBR.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LL – Limite de Liquidez

LP- Limite de Plasticidade

CBR – California Bearing Ratio

ISC - Índice de Suporte Califórnia

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ES – Especificação de Serviço

ME – Método de Ensaio

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Objetivos.....	11
1.1.1	Objetivos Geral.....	11
1.1.2	Objetivos Específicos.....	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1	História da pavimentação no Mundo.....	12
2.2	História da pavimentação no Brasil.....	13
2.3	Estrutura do pavimento e o papel do subleito.....	14
2.3.1	Pavimento flexível.....	14
2.3.2	Pavimento rígido.....	15
2.3.3	Pavimento semirrígido.....	15
2.3.4	Estrutura do pavimento rodoviário.....	15
2.4	Propriedade dos solos utilizados no subleito.....	17
2.4.1	Solos e materiais utilizados nas camadas estruturantes do pavimento.....	17
2.5	Normas técnicas e critérios para subleito rodoviário.....	19
2.6	Métodos de melhoria do subleito.....	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1	Área de estudo.....	23
3.2	Coleta de amostras.....	24
3.3	Ensaio laboratoriais.....	24
3.3.1	Solo analisado.....	24
3.3.2	Ensaio granulométrico.....	26
3.3.3	Limite de liquidez.....	29
3.3.4	Limite de plasticidade.....	30
3.3.5	Massa específica do solo.....	31
3.3.6	Ensaio de compactação do solo.....	32
3.3.7	Ensaio CBR (California Bearing Ratio)	35
4	RESULTADOS E DISCURSÕES.....	38
4.1	Apresentação dos resultados.....	38
4.2	Comparação com normas e discussão técnica	51
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
	REFERÊNCIAS.....	55
	ANEXO	58

1 INTRODUÇÃO

O estudo geotécnico do subleito de pavimentos rodoviários desempenha um papel essencial no dimensionamento e no desempenho estrutural das vias, sobretudo em rodovias destinadas ao tráfego de veículos pesados. O subleito é a camada de suporte mais profunda de um pavimento, sobre a qual serão aplicadas as camadas superiores, com a sub-base, base e revestimento. Sua função principal é distribuir adequadamente as cargas provenientes do tráfego, para evitar deformações e recalques excessivos (Bernucci, 2010). Para garantir a eficiência dessa camada, a análise das propriedades mecânicas e geotécnicas do solo presente no subleito é fundamental a realização de ensaios laboratoriais específicos, que seguem normativas técnicas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

As características geotécnicas do solo, como granulometria, limites de consistência, capacidade de suporte e comportamento frente à compactação, determinam sua adequação para uso em subleitos rodoviários. A análise granulométrica, conforme a NBR 7181:2025, permite classificar o solo com base na proporção de pedregulhos, areia, silte e argila, o que influencia diretamente na permeabilidade e na resistência do material (ABNT, 2025). Por sua vez, os limites de liquidez e de plasticidade, avaliados segundo a NBR 6459:2016 e a NBR 7180:2016, ajudam a determinar a plasticidade e a coesão do solo, sendo parâmetros cruciais para identificar possíveis deformações volumétricas e sensibilidade à umidade (ABNT, 2016).

Outro aspecto importante é a densidade e o teor de umidade do solo, que podem ser ajustados e otimizados através do processo de compactação. O ensaio de compactação, descrito na NBR 7182:2020, estabelece os valores de densidade máxima e umidade ótima do solo, parâmetros que garantem maior resistência ao cisalhamento e menor vulnerabilidade à formação de recalques diferenciais (ABNT, 2020). A capacidade de suporte do subleito, é avaliada por meio do Índice de Suporte Califórnia (CBR), conforme a NBR 9895:2017, que quantifica a resistência à penetração do solo e determina sua capacidade de suportar o tráfego projetado (ABNT, 2017). Segundo os critérios do DNIT 031/2006 – ES e do DNIT 072/2006 – ME, o subleito deve apresentar valores mínimos de CBR e limites admissíveis de expansão para ser considerado adequado (DNIT, 2006).

Nesse contexto, o presente Trabalho Final de Graduação (TFG) tem como objetivo analisar as características geotécnicas do subleito de uma estrada, localizada na BR-104 entre os municípios de Cerro Corá/RN e Currais Novos/RN, trecho que suporta tráfego de veículos pesados. A coleta e análise do solo, foram realizadas conforme as normativas técnicas da ABNT e do DNIT, sendo os resultados obtidos fundamentais para avaliação da adequação do subleito às exigências normativas e ao dimensionamento do pavimento rodoviário.

A relevância desse estudo, é reforçada pelo impacto direto do subleito na durabilidade e no desempenho funcional das rodovias. Segundo Bernucci (2010), a deterioração precoce do pavimento está frequentemente associada à deficiência no comportamento do subleito e à escolha inadequada dos materiais utilizados. Portanto, o conhecimento aprofundado das propriedades do solo, é imprescindível para o sucesso das obras rodoviárias, contribuindo para a redução de custos de manutenção e para a segurança dos usuários.

Este trabalho está estruturado em capítulos que descrevem os procedimentos metodológicos adotados, incluindo a coleta de amostras e a realização de ensaios laboratoriais, conforme as normas NBR 6457:2020 (preparação para ensaios de compactação e caracterização), NBR 7181:2025 (análise granulométrica), NBR 6459:2016 (limite de liquidez), NBR 7180:2016 (limite de plasticidade), NBR 7182:2020 (ensaio de compactação) e a NBR 9895:2017 (índice de suporte Califórnia - CBR), bem como a apresentação e discussão dos resultados obtidos e a comparação com os critérios estabelecidos pelo DNIT 031/2006 – ES e pelo DNIT 072/2006 – ME. Espera-se que as conclusões alcançadas possam contribuir para análise e o dimensionamento de pavimentos rodoviários, reforçando a importância dos estudos geotécnicos e das normas técnicas no planejamento e execução de obras viárias.

1.1 Objetivos

Neste tópico serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos necessários para o desenvolvimento deste trabalho

1.1.1 Objetivos Geral

Caracterizar e analisar as amostras do subleito de uma rodovia a fim de verificar se o solo atende às exigências normativas e ao dimensionamento para uso em pavimento rodoviário.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Executar ensaio granulométricos para classificar os materiais conforme normas técnicas;
- ✓ Realizar ensaios laboratoriais de compactação do solo;
- ✓ Realizar ensaios laboratoriais de CBR para determinar a capacidade de suporte dos solos;
- ✓ Identificar a plasticidade e coesão dos solos;
- ✓ Comparar os resultados obtidos com os limites estabelecidos por normas do DNIT e da ABNT.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 História da pavimentação no Mundo

A história da pavimentação de um modo geral está relacionada ao desenvolvimento das civilizações, que reflete o progresso das técnicas de transporte e infraestrutura. Estudos relevam que as primeiras formas de pavimentação surgiram na Mesopotâmia e no Egito Antigo, onde estradas simples com pedras e terra compactada foram construídas para promover o deslocamento de mercadorias e pessoas. (Benevolo, 2016).

Na Grécia Antiga, as vias calçadas continuaram em desenvolvimento em função das necessidades, principalmente, comerciais e militares. Onde, suas estradas feitas de pedras e solo compactado, eram projetadas para resistir ao tráfego de carruagens e cavalos. Entretanto, o sistema rodoviário que mais foi notado no mundo ocidental foi o dos romanos. Que, a partir do século III a.C., o Império Romano executou uma extensa construção de estradas pavimentadas que tinha como material prima as pedras, areia e cascalhos, dando maior viabilidade para trafegar entre as cidades e fortalezas. A estrada conhecida como Via Ápia, é um exemplo da avançada engenharia romana por resistir até os dias atuais. (Morris, 2010).

A pavimentação teve que passar por mudanças no momento da Revolução Industrial, pois o alto índice de tráfego urbano e o desenvolvimento de automóveis motorizados, fez com que as estradas exigissem maior resistência. Segundo John Loudon McAdam, engenheiro escocês, apresentou no século XIX uma maneira de executar a construção de estradas, baseada em camadas de pedras britadas, com o auxílio de valas laterais para drenagem de águas pluviais, ficou conhecido como macadame. Esse sistema apresentado, teve resultados positivos quando se fala a respeito de eficiência e economia, servindo como base para os futuros pavimentos asfálticos, revolucionando o transporte rodoviário. (Henderson, 2014).

Já no século XX, com o desenvolvimento de novas tecnologias, a pavimentação teve avanço significativo, com o auxílio do concreto e betume, por exemplo. Logo, o surgimento de veículos com maiores dimensões e massa, houve a necessidade de pavimentos capazes de suportar cargas mais elevadas. Com isso, surgiram as primeiras rodovias pavimentadas com concreto armado e asfalto, que, logo passou a se tornar o método de transporte modernos. Nos Estados Unidos, por exemplo, a construção da Rota 66 e do sistema de rodovias no país a partir da década de 1950, marca uma nova fase no desenvolvimento rodoviário global. (Casado, 2015).

No momento presente, o estímulo para a pavimentação está relacionado à sustentabilidade e à durabilidade dos materiais utilizados. A pavimentação sustentável está diretamente associada ao uso de materiais reciclados, a diminuição do impacto ambiental e a maior durabilidade da vida útil

das vias, assegurando que os transportes rodoviários permaneçam eficiente e seguro. (Souza et al., 2018).

2.2 História da pavimentação no Brasil

No Brasil, a história da pavimentação está diretamente relacionada ao processo de colonização e ao avanço econômico e territorial do país. Nesse período de colonização, o deslocamento era realizado por meio de estradas de terra batida, conhecidas como “picadas”, que serviam para a condução de pessoas e para escoar produtos agrícolas e minerais, como ouro e café. Devida a baixa estabilidade das estradas, era frequente a dificuldade para os transportes transitarem, principalmente em períodos chuvosos. (Holanda, 1995).

Devido à alta movimentação causada pelo ciclo do café, no século XIX, o Brasil começou a investir de fato nas melhorias da infraestrutura rodoviária. Foi então nesse período, que, surgiram as primeiras vias pavimentadas, especialmente nas regiões produtoras de café, como Rio de Janeiro e São Paulo por exemplo, com a estratégia de promover o escoamento da produção até os portos. Inaugurada em 1861, a construção da Estrada União e Indústria, que ligava Petrópolis (RJ) a Juiz de Fora (MG), foi um marco desse período, pois é considerada a primeira rodovia pavimentada do país, onde se utilizava paralelepípedos como revestimento, que para a época, foi uma maneira avançada de construção. (Lopes, 2013).

Em meados do início do século XX, com a expansão das indústrias automobilísticas, o Brasil teve que adotar novas técnicas e materiais para a pavimentação de rodovias. Foi então que em 1928, o governo de São Paulo inaugurou a primeira estrada asfaltada do Brasil, denominada Rodovia Washington Luís, que se tornou um dos marcos mais importantes do desenvolvimento rodoviário do país. Logo, o asfaltado foi passando a substituir, de forma gradativa, o revestimento de paralelepípedos nas principais cidades e rodovias. (Abreu, 2007).

No período do governo do presidente Juscelino Kubitschek, com seu plano de “50 anos em 5”, onde ocorreu vários investimentos em construções no país, a infraestrutura rodoviária não ficou de fora, dando mais um passo na expansão novas estradas. Com a criação da cidade de Brasília nessa década de 1950, e a então transferência da capital federal para um território mais centralizado do país, exigiram a execução de novas vias que interligassem o território nacional. Foi durante esse período, também, que foram realizadas estradas importantes, como a BR-050 e a BR-040, que ligavam Brasília a outros estados. As técnicas utilizadas de pavimentação já eram com padrões internacionais, que incluíam o uso de concreto e asfalto. (Diniz, 2001).

Segundo o DNIT (2012), a partir da década de 1970, com um novo crescimento da frota de veículos e a necessidade de novas estradas, o Brasil passou a investir em estradas de asfalto e na ampliação das vias federais. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), criado em 2001, assumiu a responsabilidade de definir normas e diretrizes técnicas para a construção

e manutenção das rodovias brasileiras, com ênfase na qualidade do subleito, na capacidade de suporte e na drenagem das rodovias. (DNIT, 2012).

Atualmente, a pavimentação no Brasil enfrenta desafios parecidos com o do mundo, que está associado à sustentabilidade e à durabilidade dos materiais utilizados. A busca por técnicas inovadoras, como o uso do asfalto borracha, pavimentos permeáveis e técnicas de reciclagem de pavimentos, tem ganhado espaço nas discussões sobre o futuro da pavimentação no país, pois, essas iniciativas visam reduzir os impactos ambientais e aumentar a vida útil das vias brasileiras. (Souza et al., 2018).

2.3 Estrutura do pavimento e o papel do subleito

O pavimento rodoviário é definido como uma estrutura em camadas, que são constituídas por diferentes materiais, com o intuito de distribuir as cargas provenientes do tráfego e proteger o solo natural, conhecido como subleito, contra deformações exageradas (DNIT, 2006). De acordo com Bernucci et al. (2008), o pavimento deve atender à três funções principais: proporcionar uma superfície de rolamento segura e confortável para quem trafega, resistir às solicitações mecânicas impostas pelo tráfego e às variações climáticas, assim como minimizar os custos de manutenção durante sua vida útil.

De acordo com Bernucci et al. (2008), o pavimento pode ser classificado em dois tipos principais: o pavimento flexível, que é o mais utilizado no Brasil e apresenta uma estrutura elástica, e o pavimento rígido, que possui placas de concreto como revestimento, dando maior rigidez a estrutura. As duas maneiras são projetadas considerando o tipo de solo, as características do tráfego e o clima local, fatores no quais afetam diretamente a escolha dos materiais e as técnicas construtivas adotadas. Para Balbo (2007), a classificação dos pavimentos rodoviários baseia-se no comportamento estrutural das suas camadas, e que, os principais tipos de pavimentos são o pavimento flexível, o pavimento rígido e o pavimento semirrígido.

2.3.1 Pavimento flexível

O pavimento flexível é composto por diferentes camadas que distribuem as cargas do tráfego de forma gradativa até o terreno natural, o subleito. Essa distribuição é feita por meio de camadas de diferentes espessuras e materiais, como misturas asfálticas, brita graduada e solos estabilizadores. A flexibilidade do pavimento está relacionada à capacidade de adaptação às deformações sem comprometer a funcionalidade da rodovia. (DNIT, 2006).

Segundo Bernucci et al. (2008), o pavimento flexível é o mais utilizado no Brasil devido à disponibilidade de materiais asfálticos e à menor complexidade construtiva. Porém, o mesmo

apresenta maior vulnerabilidade às condições climáticas e ao desgaste decorrente do tráfego intenso, logo, o número de manutenções e o reforço das camadas é realizado com mais frequência.

2.3.2 Pavimento rígido

Para Baldo (2007), o pavimento rígido é caracterizado pela presença de placas de concreto na camada de revestimento, tornando sua estrutura mais rígida e com menor número de deformabilidades à estrada. Esse tipo de pavimento distribui as cargas de maneira uniforme, fazendo com que as camadas inferiores sejam menos solicitadas, minimizando a deformação do subleito.

O pavimento rígido, se comparado ao flexível, apresenta maior durabilidade e menor necessidade de manutenções. No entanto, seu custo inicial é mais elevado, o que pode limitar sua aplicação às rodovias com tráfego pesado ou trechos urbanos com grande fluxo. (DNIT, 2006).

Já para Almeida (2016), o pavimento rígido é conhecido por sua longa durabilidade e pela capacidade de suportar os efeitos climáticos sem necessitar de manutenções frequentes. Sua estrutura é composta, principalmente, por uma sub-base que, embora apresente baixa contribuição estrutural, desempenha um papel relevante no controle de fenômenos como bombeamento, expansão e contração.

2.3.3 Pavimento semirrígido

Segundo Bernucci et al. (2008), o pavimento semirrígido combina características dos pavimentos flexíveis e rígidos, utilizando, por exemplo, materiais estabilizados com cimento nas camadas intermediárias. Essa estrutura oferece maior resistência e durabilidade, se comparado com o pavimento flexível, porém, por apresentar menor flexibilidade, é comum o aparecimento de fissuras, prematuramente, se realizado de forma incorreta.

2.3.4 Estrutura do pavimento rodoviário

A estrutura do pavimento rodoviário é composta por diferentes camadas, que desempenham funções específicas e complementares. As principais camadas compostas pelo pavimento flexível incluem o revestimento, a base, sub-base e o subleito. A eficiência do pavimento depende da interação entre essas camadas e da adequação dos materiais utilizados. (DNIT, 2006).

O revestimento é a camada superior do pavimento e a única que entra em contato direto com o tráfego. Sua função consiste em proporcionar uma superfície regular, aderente e resistente ao desgaste, além de proteger as camadas inferiores contra a ação de agentes climáticos, como a infiltração de água (Bernucci et al., 2008).

A base e a sub-base são as camadas intermediárias que contribuem para a resistência estrutural do pavimento, distribuindo as cargas do tráfego e evitando que as tensões atinjam o subleito de forma direta. De acordo com o DNIT (2006), a base é a camada de maior resistência dentre as camadas estruturantes do pavimento, e que podem ser constituídas por matérias como a brita graduada, solo estabilizado ou concreto magro. A sub-base, atua como uma camada de suporte secundário, e pode ser composto por materiais granulares de menor resistência.

O solo natural, mais conhecido como subleito, que serve como base de sustentação para camadas superiores de um pavimento. Em função de suas propriedades mecânicas, ele pode influenciar diretamente o comportamento estrutural e a durabilidade do pavimento rodoviário. Quando o solo do subleito apresenta baixa capacidade de suporte, o reforço dessa camada torna-se uma medida indispensável para evitar deformações ou falhas que possam comprometer a estabilidade do pavimento e aumento dos custos de manutenção. O processo de reforço tem como objetivo principal aumentar a resistência do subleito, garantindo que ele possa suportar o peso das cargas atuantes e minimizar o risco de recalques diferenciais (Bernucci, 2008).

A camada mais profunda, na qual sustenta toda a estrutura do pavimento, é denominada subleito. Sua função é suportar as solicitações transmitidas das camadas que estão na parte superior e garantir que o pavimento se mantenha estável ao longo do tempo. O comportamento do subleito depende, diretamente, de suas propriedades mecânicas, como a capacidade de suporte, a resistência às deformações e à sua fragilidade em meio aquoso. (Bernucci, 2008).

Quando o subleito apresenta baixa capacidade de suporte, é necessário realizar técnicas de melhoramento do solo, como compactação ou estabilização com cal, cimento ou outros tipos de aditivos químicos. Essas técnicas fazem com que sua resistência aumente, mantendo a estabilidade volumétrica do subleito, diminuindo a possibilidade de aparecimento de deformações, logo, a durabilidade do pavimento será garantida por mais tempo (Balbo, 2007).

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os índices mínimos de CBR (Índice de Suporte Califórnia) e os limites máximos de inchamento recomendados para cada camada estrutural de um pavimento flexível são estabelecidos para garantir a resistência e a estabilidade da estrutura. Esses valores variam de acordo com as propriedades mecânicas dos materiais constituintes de cada camada. Para o subleito, recomenda-se utilizar solos com CBR acima de 2% e inchamento máximo de 0,5%. Na sub-base utiliza-se matérias com CBR acima de 20%, com inchamento máximo de 0,5%. Na base, o CBR admissível é acima de 60% e inchamento menor que 0,5%. Já para o revestimento, o CBR não é um parâmetro diretamente utilizado, pois essa camada utiliza materiais como misturas asfálticas que tem resistência mecânica específica e propriedades diferentes, como a resistência à deformação permanente.

O subleito desempenha um papel fundamental no comportamento estrutural do pavimento. Conforme o DNIT (2006), um subleito inadequado pode causar problemas como afundamentos,

fissuras e trincas no pavimento, reduzindo sua vida útil e aumentando os custos de manutenção. Por essa razão, é importante realizar uma avaliação detalhada das propriedades do subleito durante a fase de projeto, realizando ensaios laboratoriais como o ensaio de compactação, o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e o ensaio de permeabilidade (Bernucci, 2008).

Entre as propriedades mais relevantes do subleito estão a capacidade de suporte, que indica a resistência do solo às cargas aplicadas, e sua vulnerabilidade à umidade, que afeta diretamente a estabilidade volumétrica do solo. Solos argilosos, por exemplo, apresentam alta vulnerabilidade à umidade e podem sofrer expansões e contrações significativas, o que compromete a estabilidade do pavimento (Balbo, 2007).

2.4 Propriedade dos solos utilizados no subleito

A granulometria é uma das propriedades mais importantes, pois determina a distribuição das partículas do solo e influencia a permeabilidade, a capacidade de suporte e a coesão. Solos com granulometria bem graduada (mistura equilibrada de partículas finas, média e grossas) tendem a apresentar maior resistência ao cisalhamento e melhor compactação, o que é essencial para evitar deformações e recalques diferenciais no subleito. De acordo com o DNIT (2006), solos arenosos bem compactado e solos lateríticos apresentam bom comportamento mecânico e são frequentemente utilizados em subleitos de pavimentos rodoviários.

Outra propriedade importante é a plasticidade, que está relacionado à quantidade de argila presente no solo e à sua capacidade de deforma-se sem quebrar. Solos com alta plasticidade, como as argilas expansivas, podem sofrer deformações volumétricas significativas devidos às variações de umidade, o que pode comprometer a estabilidade do pavimento. Logo, o índice de plasticidade deve ser avaliado para determinar se o solo necessita de estabilização antes de ser utilizado no subleito. Conforme a NBR 7180:2016, solos com índice de plasticidade elevado devem ser estabilizados com cal ou cimento para reduzir sua sensibilidade à umidade e melhorar sua resistência ao cisalhamento.

A capacidade de suporte é uma propriedade fundamental, e é determinada por meio do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR), que avalia a resistência do solo à penetração de cargas verticais. Solos utilizados no subleito devem apresentar um CBR mínimo de 2%, conforme o Manual de Pavimentação do DNIT (2006). Solos que não atingem essa porcentagem, podem ser estabilizados com materiais estabilizantes ou reforçar com geossintéticos.

2.4.1 Solos e materiais utilizados nas camadas estruturantes do pavimento

Na estrutura de um pavimento, diferentes tipos de solos poder ser utilizados nas camadas de subleito, sub-base e base, desde que atendam aos critérios de resistência, compactação e capacidade de suporte. Entre os principais tipos de solos utilizados estão os solos lateríticos, os solos arenosos, os cascalhos lateríticos e as misturas solo-agregado (DNIT, 2006).

Os solos lateríticos são amplamente utilizados em subleitos e sub-bases, devido à sua boa capacidade de suporte e alta resistência ao cisalhamento. Esses solos ricos em óxidos de ferro e alumínio, o que causa uma coloração avermelhada e uma estrutura granular favorável a compactação. Conforme Baldo (2007), os solos lateríticos compactados apresentam boa estabilidade e resistência mecânica, o que os tornam ideais para pavimentos que recebem cargas elevadas.

Os solos arenosos também podem ser utilizados no subleito, especialmente em regiões com clima seco e solos de baixa coesão. Esses solos possuem boa permeabilidade, o que reduz o risco de acúmulo de água e de deformações volumétricas. Porém, devido à baixa coesão, pode ser necessário estabilizá-lo com cimento ou cal para melhorar sua resistência ao cisalhamento e sua capacidade de suporte (DNIT, 2006).

Os cascalhos lateríticos são outro tipo de material frequentemente utilizados nas camadas inferiores do pavimento. Esses materiais consistem em uma mistura de fragmentos rochosos e solos lateríticos, apresentando alta resistência mecânica e boa compactação. Segundo Bernucci (2008), os cascalhos lateríticos devem apresentar uma granulometria equilibrada e um Índice de Suporte Califórnia (CBR) mínimo de 20% para serem utilizados em sub-bases.

As misturas solo-agregado também são comuns nas camadas estruturantes do pavimento. Essas misturas consistem na adição de agregados grossos, como brita ou cascalhos, ao solo natural, fazendo com que sua coesão e capacidade de suporte aumente. Conforme Balbo (2007), essas misturas são eficazes em solos de baixa resistência, pois aumentam a resistência ao cisalhamento e reduzem o risco de deformações permanentes.

Além dos solos, as camadas estruturantes do pavimento podem ser constituídas por outros materiais que desempenham papéis fundamentais na estabilidade, resistência e durabilidade da estrutura. Entre esses materiais, destacam-se a Brita Graduada Simples (BGS), a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e os materiais estabilizados com agentes químicos. Esses materiais, são escolhidos de acordo com as propriedades específicas desejadas para cada camada do pavimento, como sub-base e base (Bernucci, 2008).

A Brita Graduada Simples (BGS), é um dos materiais mais utilizados na camada de base ou sub-base dos pavimentos flexíveis. Trata-se de uma mistura de agregados minerais, como brita e pó de pedra, que apresentam uma granulometria equilibrada e adequada à compactação. Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a BGS deve apresentar uma distribuição granulométrica que garanta boa intertravamento entre as partículas, proporcionando resistência mecânica e estabilidade estrutural à camada.

As principais propriedades da BGS incluem a alta resistência ao cisalhamento, boa capacidade de suporte e baixa probabilidade de deformações permanentes. Conforme Bernucci (2008), o uso da BGS em camadas estruturantes do pavimento reduz riscos de recalques diferenciais e contribui para a uniformidade da superfície de rolamento. Além disso, esse material possui boa

permeabilidade, o que facilita o escoamento de água e diminui o risco de danos relacionados à ação da umidade.

A Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), é uma variação da BGS que recebe uma quantidade controlada de cimento, para melhorar suas propriedades mecânicas. Essa mistura proporciona maior rigidez e resistência à tração, o que contribui para aumento da vida útil do pavimento. Segundo Balbo (2007), a BGTC é especialmente indicada em situações em que a camada de base precisa suportar cargas pesadas, como em rodovias de alto tráfego.

Para o DNIT (2006), o processo de estabilização com cimento melhora a resistência ao cisalhamento e reduz a possibilidade de o material apresentar deformações causadas por ciclos de umedecimento e secagem. Para que a mistura tenha o desempenho adequado, o teor de cimento deve ser cuidadosamente dosado, de forma que o material apresente boa trabalhabilidade e resistência à compactação.

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), é um dos materiais mais utilizados na camada de revestimento dos pavimentos flexíveis. Esse material, segundo Bernucci (2008), é composto por agregados minerais (brita, areia e pó de pedra) e por ligante betuminoso (asfalto), que são misturados em usinas de asfalto e aplicados a quente sobre a superfície do pavimento. O CBUQ, apresenta alta resistência ao desgaste superficial, boa aderência pneu-pavimento e excelente desempenho em termos de impermeabilidade.

A qualidade do CBUQ depende diretamente da dosagem dos materiais e do processo de compactação. O Manual de Pavimentação do DNIT (2006), especifica que a mistura deve atender a critérios técnicos rigorosos, como o teor de ligante asfáltico, granulometria dos agregados e temperatura de usinagem e aplicação. Esses fatores são fundamentais para garantir a durabilidade e o desempenho funcional da rodovia.

Outro material cada vez mais utilizados nas camadas estruturantes do pavimento é o geossintético. Os geossintéticos são materiais sintéticos, como geotêxteis e geogrelhas, que desempenham funções de separação, reforço e drenagem. De acordo com Bernucci (2008), os Geossintéticos são eficazes em pavimentos construídos sobre solos de baixa resistência, pois aumentam a capacidade de suporte e reduzem o risco de deformações permanentes.

Os geossintéticos podem ser aplicados entre o subleito e a sub-base, ou entre a sub-base e a base, para evitar a mistura de materiais e garantir a estabilidade estrutural do pavimento. O uso de geossintéticos também contribui para a drenagem da água infiltrada, reduzindo o risco de erosão, logo, prolongando a vida útil do pavimento.

2. 5 Normas técnicas e critérios para subleito rodoviário

Uma das principais normas que regem o subleito rodoviário é o DNIT 164/2013 – ES, que estabelece critérios para o projeto e a execução de pavimentos flexíveis e semirrígidos. De acordo

com essa norma, a capacidade de suporte do subleito deve ser avaliada por meio do Índice de Suporte Califórnia (CBR), conforme o procedimento descrito na NBR 9898:2017. O CBR é um parâmetro que mede a resistência do solo à penetração, sendo essencial para classificar o solo e definir sua adequação ao uso no subleito.

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), o subleito deve apresentar um valor mínimo de CBR que varie entre 2% e 8%, dependendo do tipo de pavimento e da intensidade do tráfego projetado. Para rodovias com tráfego pesado, recomenda-se a estabilização do solo do subleito com agentes químicos, como cal ou cimento, caso o CBR natural esteja abaixo dos valores mínimos exigidos. Além disso, o subleito deve apresentar um índice de expansão inferior à 2%, para minimizar os riscos de deformações volumétricas causadas por variações de umidade.

A caracterização do solo é uma etapa indispensável no processo de projeto e execução de pavimentos rodoviários. Conforme a NBR 7181:2025, a classificação do solo deve ser realizada com base nos resultados dos ensaios granulométricos, que determinam a distribuição dos tamanhos das partículas do solo, e nos ensaios de limites de Atterberg, que medem as propriedades de consistência do solo, como limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade.

De acordo com o DNIT (2006), os solos podem ser classificados em quatro grupos principais: solos granulares, solos siltosos, solos argilosos e solos lateríticos. Os granulares, como areia e pedregulhos, são geralmente utilizados no subleito devido à sua alta capacidade de suporte e menores chances de reformações. Já os solos argilosos, que apresentam baixa permeabilidade e tendência ao inchamento, devem ser evitados ou estabilizados com cal ou cimento antes de serem utilizados.

Outro aspecto fundamental para garantir o desempenho do subleito é o controle de compactação do solo. Conforme a NBR 7182:2020, o grau de compactação deve ser avaliado por meio do ensaio de compactação, que determina a relação entre o peso específico seco do solo e o teor de umidade. Segundo o DNIT 072/2006 – ME, o subleito rodoviário deve ser compactado até atingir no mínimo 95% do peso específico seco máximo obtido em ensaios, para assegurar uma densidade adequada e evitar recalques diferenciais nas vias.

O controle tecnológico durante a execução do subleito também é regularizado por normas técnicas. O DNIT 173/2011 ME, por exemplo, estabelece critérios para o controle da umidade e da densidade do solo compactado. Além disso, o uso de geossintéticos, como geotêxteis e geogrelhas, pode ser recomendado para reforçar o subleito e melhorar sua capacidade de suporte, especialmente em situações em que o solo natural apresente baixa resistência mecânica.

2.6 Métodos de melhoria do subleito

Nos casos que o solo natural não apresenta as propriedades mecânicas adequadas para uso no subleito, a estabilização é uma prática recomendada para melhorar o desempenho do solo. Conforme

Balbo (2007), a estabilização pode ser mecânica, por meio de compactação eficiente, ou química, com adição de materiais estabilizantes, como cal, cimento e betume. A estabilização com cal é eficiente em solos argilosos, pois reduz sua plasticidade e melhora sua resistência ao cisalhamento. Já a estabilização com cimento, é recomendada para solos arenosos e lateríticos, pois aumenta a coesão entre as partículas e melhora a capacidade de suporte do subleito.

Outra técnica de reforço do subleito é o uso de geossintéticos, que atuam como elementos de separação, reforço e drenagem. Os geotêxteis e geogrelhas são utilizados para reforçar o subleito em regiões com solos de baixa resistência, como argilas moles e solos saturados. Segundo Bernucci (2008), o uso de geossintéticos contribui para a estabilidade do pavimento, reduzindo o risco de deformações permanentes e prolongando a vida útil da estrutura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta das amostras de solo, foi realizada na camada do subleito da rodovia em estudo, com base nas normas DNIT-ME 025/94 e NBR 6457:2020, que fala sobre a coleta e preparação de amostras para ensaios de compactação e caracterização. As amostras foram coletadas entre 0,20 metros a 0,50 metros abaixo da superfície, em local representativo do trecho analisado, armazenado em recipientes adequados e transportados para laboratório.

As amostras de solo foram submetidas à secagem ao ar livre conforme especificado pela ABNT NBR 6457:2020, em ambiente coberto e ventilado, protegido da incidência direta de luz solar e de agentes externos. O solo foi revolvido periodicamente, e os torrões maiores foram desagregados manualmente, sem uso de calor ou energia mecânica, garantindo a preservação das características naturais do material. Em seguida, foi realizado o destorroamento do solo e então pesagem, onde garantiu a remoção de impurezas e a separação adequada das frações granulométricas, seguindo o protocolo normativo NBR 6457:2020 (preparação para ensaios de compactação e caracterização). (ABNT, 2020).

O primeiro ensaio realizado foi o de análise granulométrica, conforme diretrizes da NBR 7181:2025, que aborda a análise granulométrica (ABNT, 2025). Esse ensaio consiste em determinar a distribuição das partículas do solo por meio de peneiramento e sedimentação.

Inicialmente, uma amostra seca foi submetida ao peneiramento com um conjunto de peneiras normatizadas, identificando a proporção de partículas de areia grossa, média e fina. Posteriormente, realizou-se a análise por sedimentação para avaliar a fração de partículas finas, como argila e silte. Esse procedimento é fundamental para caracterizar o tipo de solo e seu comportamento quanto à permeabilidade, resistência e capacidade de suporte (ABNT, 2025).

Já para o ensaio de limite de liquidez, foi realizado conforme a NBR 6459:2016, que apresenta a determinação do limite de liquidez (ABNT, 2016). No procedimento, o solo preparado foi colocado na concha do aparelho Casagrande e submetido a golpes padronizados até o fechamento da abertura central. A partir dos dados obtidos, construiu-se a curva do limite de liquidez, que define o comportamento do solo em diferentes estados de consistência e contribui para a classificação de solos expansivos (ABNT, 2016).

No limite de plasticidade, foi determinado seguindo a NBR 7180:2016, que fala sobre a determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016). Esse ensaio, mede o menor teor de umidade no qual o solo pode ser moldado em forma de cilíndrica sem se romper.

Para a execução do ensaio, o solo foi moldado manualmente até a obtenção de fios cilíndricos de 3 milímetros de diâmetro. O limite de plasticidade indica a transição do comportamento plástico para o comportamento semissólido do solo, sendo um parâmetro de soma

importância para a classificação dos solos coesivos e para a avaliação da expansividade (ABNT, 2016).

O ensaio de compactação foi conduzido conforme a NBR 7182:2016 (ABNT, 2016). A partir desse ensaio, determinam-se a densidade seca máxima e o teor de umidade ótima do solo, parâmetros essenciais para avaliar a qualidade da compactação do subleito. No ensaio, usou o método Proctor Modificado, que consiste na compactação do solo em camadas em um cilindro padronizado, com o auxílio de um soquete de 4,5 kg. Os dados obtidos permitem a construção da curva de compactação, que define a condição ideal para a aplicação do solo em camadas de subleito rodoviário (ABNT, 2016).

O ensaio CBR (California Bearing Ratio), foi determinado conforme a NBR 9895:2017 (ABNT, 2017). Esse ensaio mede a capacidade de suporte do solo compactado em relação a uma carga padrão e é um dos critérios fundamentais para a classificação do subleito em projetos de pavimentação.

O ensaio foi conduzido com amostras compactadas no teor de umidade ótimo, obtido no ensaio Proctor Modificado. As leituras de penetração do pistão no solo compactado foram registradas e comparadas com as cargas padrão. A partir desses valores, calcula-se o índice de suporte do subleito, sendo interpretados com base nas diretrizes do DNIT 164/2013 – ES (ABNT, 2017; DNIT, 2013).

3.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho está situada no trecho da rodovia BR-104, entre os municípios de Cerro Corá/RN e Currais Novos/RN, no interior do estado do Rio Grande do Norte. As amostras de solo utilizadas para a caracterização geotécnica foram coletadas ao longo desse segmento, em ponto selecionado com base na variabilidade do terreno e em região onde foi observada manifestações patológicas.

A BR-104 é uma rodovia federal que desempenha papel estratégico na ligação entre cidades do Seridó potiguar, sendo rota importante para o transporte regional de cargas e passageiros. Durante visitas in loco, figura 1, e com base em relatos de usuários frequentes da rodovia, foram identificados diversos problemas de desempenho funcional e estrutural, incluindo afundamentos localizados, trincas, além de deformações plásticas visíveis na superfície do pavimento. Tais ocorrências indicam possíveis falhas no subleito ou em outras camadas do pavimento, sendo o principal fator motivador para a realização de ensaios laboratoriais com o solo da região.

A análise geotécnica das amostras coletadas visa contribuir para o entendimento do comportamento do solo de subleito nesse trecho da BR-104, com o intuito de fornecer subsídios técnicos para eventuais intervenções corretivas ou reforço da estrutura do pavimento.

Figura 1 – Local em estudo



Fonte: Autoria própria (2025)

3.2 Coleta de amostras

A coleta de amostras de solo para fins de análise em laboratório, é uma etapa fundamental no estudo de pavimentação rodoviário, especialmente quando se trata da caracterização do subleito. Esse procedimento deve ser realizado com rigor técnico, seguindo normas e procedimentos estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). A correta execução dessa etapa, garante que os resultados dos ensaios sejam representativos das condições reais do solo e possam ser utilizados com precisão no dimensionamento das camadas do pavimento.

A NBR 6457:2020 e DNIT-ME 025/94, estabelece os procedimentos técnicos para a coleta, preservação e transporte das amostras de solo destinadas à realização de ensaios laboratoriais. Logo, as amostras foram coletadas entre 0,20 metros a 0,50 metros abaixo da superfície, em local representativo do trecho analisado, manuseado de forma a preservar suas propriedades físicas e mecânicas, evitando alterações nas características naturais do solo, armazenado em recipientes adequados como sacos plásticos duplo e transportados para laboratório.

3.3 Ensaios laboratoriais

3.3.1 Solo analisado

O solo que foi analisado, que representa o subleito de um trecho da BR-104 entre os municípios de Cerro corá/RN e Currais Novos/RN, apresenta características de solo conhecido como piçarra, que é um solo que apresenta características de material bem graduada com areia, pedregulho e argila. Por apresentar algumas partes aglomeradas, foi necessário a retirada da umidade ao ar livre, como mostra a Figura 02, e o destorroamento do solo, demonstrado na Figura 03, para então realizar o ensaio de caracterização. Os ensaios necessários para caracterizar essa amostra de solo, foram realizadas no laboratório de solos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), localizada em Natal/RN.

Figura 2 – Amostra de solo coletada



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 3 – Destorroamento do solo



Fonte: Autoria Própria (2025)

3.3.2 Ensaio granulométrico

O ensaio de granulometria, conforme estabelecido pelo NBR 7181:2025, visa determinar a distribuição do tamanho das partículas do solo, permitindo a classificação e avaliação do comportamento geotécnico do material, figura 4.

Seguindo a NBR 7181:2025, a amostra de solo foi para estufa à uma temperatura de 105 °C para secagem, conforme a Figura 6. Com a amostra seca e destorroada, ela é então pesada e, em seguida, colocada em conjunto de peneiras dispostas em ordem decrescente de aberturas, que variam de 75 milímetros à 0,075 milímetros, de acordo com a Figura 5. O conjunto de peneiras é, então, colocado no agitador mecânico e submetido a vibração contínua por um período de 15 minutos. Esse tempo é suficiente para garantir que as partículas maiores sejam efetivamente separadas e retidas nas peneiras superiores, enquanto as menores passam para as peneiras inferiores (ABNT, 2025).

Após o peneiramento, o material retido em cada uma das peneiras é pesado separadamente. As massas obtidas são registradas para posterior cálculo de porcentagem de partículas que passaram ou foram retidas em cada peneira. Esses dados são fundamentais para a construção da curva granulométrica (ABNT, 2025).

Figura 4 - Amostragem das partículas maiores



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 5 – Peneiramento no agitador mecânico



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 6 – Estufa utilizada em estudo



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise granulométrica por sedimentação é necessária quando o solo contém uma significativa proporção de partículas finas, como silte e argila, que não podem ser adequadamente separadas apenas pelo peneiramento. Esse procedimento é baseado no princípio da sedimentação, descrita pela Lei de Stokes, que relaciona a velocidade de queda das partículas em suspensão ao seu diâmetro (ABNT, 2025).

Para evitar que partículas finas formem aglomerados, a amostra de solo é misturada com um agente dispersante, como mostra a Figura 7, que geralmente é uma solução de hexametáfosfato de sódio a 4%, conforme indicado pela NBR 7181:2025. Em seguida, a amostra é agitada mecanicamente por um período de 15 a 20 minutos para assegurar a dispersão completa das partículas (ABNT, 2025).

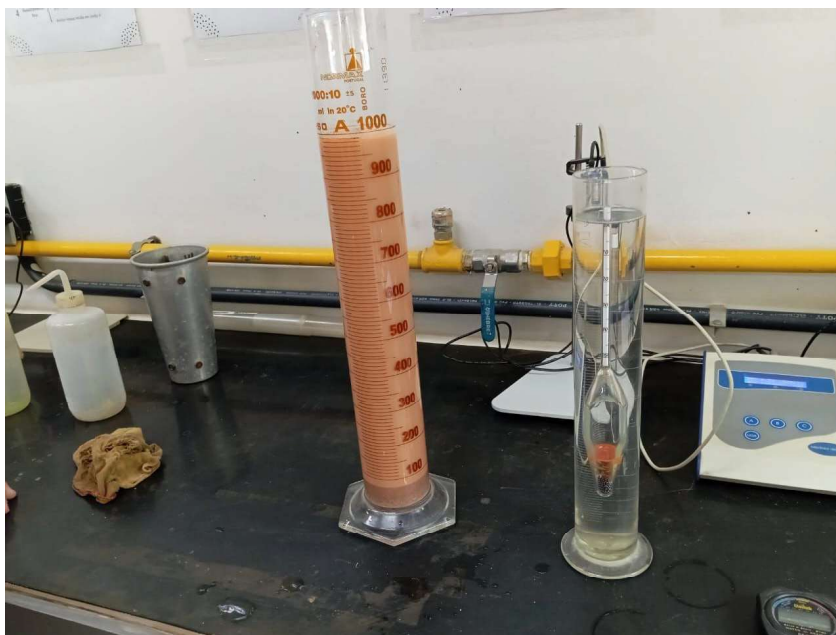
Após a dispersão, a suspensão do solo é transferida para um cilindro graduado e deixado em repouso. As leituras de densidade relativa do líquido em suspensão são feitas em intervalos de tempo pré-determinados com o auxílio do decímetro, representado na Figura 8. A densidade medida em cada intervalo é usada para calcular o diâmetro equivalente das partículas em sedimentação, seguindo as equações estabelecidas na norma (ABNT, 2025).

Figura 7 - Agentes dispersantes



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 8 – Ensaio de sedimentação com auxílio do decímetro



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3.3 Limite de liquidez

A preparação da amostra constitui a primeira fase do ensaio. O solo coletado em campo, perdeu sua umidade ao ar livre, de forma a evitar que as partículas argilosas sofram alterações estruturais. Em seguida, a amostra foi destorroadada manualmente, garantindo que não haja fragmentos maiores que comprometam os resultados laboratoriais. Após esse processo, o solo é peneirado em uma peneira de 0,425 milímetros, e apenas a fração que passa por essa peneira é utilizada para o ensaio (ABNT, 2016).

Depois de peneirado, o solo é misturado com água destilada até formar uma pasta homogênea. Essa mistura foi realizada cuidadosamente, com a adição gradual de pequenas quantidades de água e mexendo o solo até atingir uma consistência desejável. A pasta de solo obtida é então colocada no aparelho de Casagrande, que possui uma concha metálica, identificado na Figura 09. Utilizando uma espátula, a pasta é nivelada no interior da concha até atingir a linha de corte marcada pela norma, que divide a amostra ao meio. Essa linha é traçada com a ferramenta apropriada e apresenta 2 milímetros de profundidade e largura uniforme (ABNT, 2016).

Na sequência, o aparelho de Casagrande é acionado manualmente. A concha que contém o solo é levantado e solta repetidamente a uma altura padrão de 1 centímetro. O objetivo é verificar o número de golpes necessários para que as duas metades da amostra de solo se unam ao longo de uma extensão de 1 centímetro, preenchendo a fenda anteriormente traçada, com diferentes teores de umidade (ABNT, 2016).

Ao final dos testes, pequenas amostras de solo retiradas de cada ensaio são pesadas em cápsulas metálicas, e colocadas em estufa a uma temperatura de 105 °C, até atingirem peso constante. Após a secagem, as cápsulas são novamente pesadas para determinar a umidade

presente em cada uma das amostras. Com os dados obtidos, é possível identificar a porcentagem dos resultados, que indicará o teor de umidade correspondente a 25 golpes, que é o ponto de referência definido pela NBR 6459:2016 (ABNT, 2016).

Figura 9 – Aparelho Casagrande



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3.4 Limite de Plasticidade

Inicialmente, o solo destinado ao ensaio deve ser previamente preparado conforme os procedimentos da NBR 6457:2020. Esse procedimento envolve a secagem ao ar livre, com destorroamento manual do solo e peneiramento em peneira de abertura 0,425 milímetros, sendo utilizada apenas a fração que passa pela malha, para garantir maior uniformidade na análise (ABNT, 2020).

Após a preparação da amostra, uma quantidade suficiente de solo peneirado é homogeneizada com água destilada até formar uma massa plástica, que não apresente rachaduras durante a manipulação. O solo é então moldado manualmente, formando uma pequena porção que será rolado em uma superfície plana e rígida, preferencialmente uma placa de vidro opaca, para evitar interferências na medição, como mostra a Figura 10. Durante o procedimento, o solo é rolado até formar fios com 3 milímetros de diâmetro. Esse valor é estabelecido pela norma e deve ser rigorosamente controlado por meio de régua ou paquímetro (ABNT, 2020).

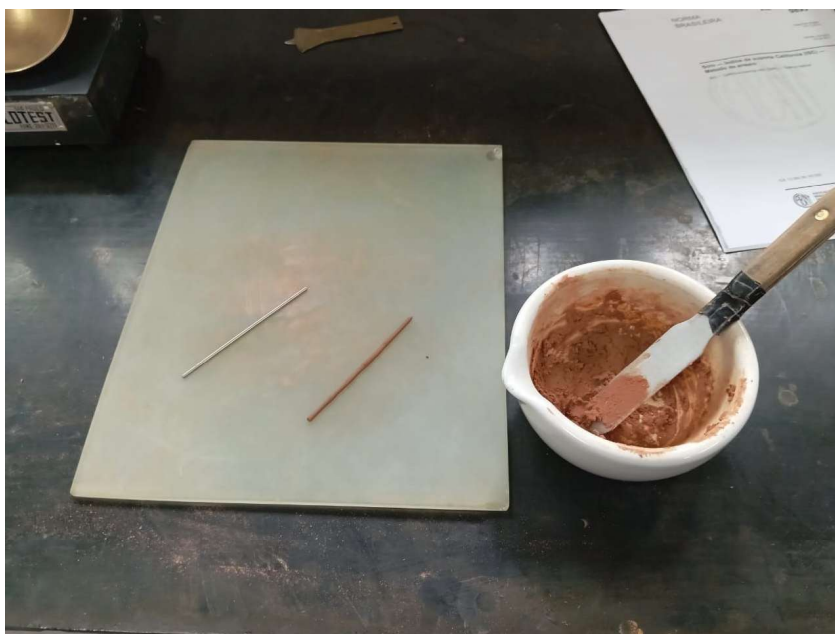
Durante o processo, se o fio de solo se romper antes de atingir 3 milímetros de diâmetro, é necessário adicionar uma quantidade adicional de água à amostra e repetir o processo. Esse procedimento deve ser realizado até que seja possível formar fios contínuos com o diâmetro estipulado sem que o solo se quebre durante o rolamento. Quando isso ocorre, o solo atingiu o

limite de plasticidade, e pequenas porções dos fios de solo são coletados e armazenados em cápsulas metálicos (ABNT, 2020).

As cápsulas contendo as amostras são então levadas à estufa para secagem a uma temperatura de 105 °C. Após a secagem, as amostras são pesadas em uma balança de precisão e a umidade é calculada. O limite de plasticidade é determinado pela média aritmética da umidade das amostras analisadas. Esse resultado, em conjunto com o limite de liquidez, é utilizado para calcular o índice de plasticidade do solo, que é o parâmetro essencial na classificação de solos e na avaliação do comportamento mecânico do material em projetos de engenharia (ABNT, 2020).

Esse ensaio tem grande importância prática, especialmente na análise do subleito de pavimentos rodoviários. Solos com baixos índices de plasticidade, tendem a ser menos suscetíveis a deformação e trincamentos em condições de variações de umidade, enquanto solos com altos índices de plasticidade, podem apresentar maior expansividade e deformabilidade. Portanto, os resultados do ensaio de limite de plasticidade ajudam a prever o comportamento dos solos em situações reais e fornecem subsídios para a tomada de decisão no dimensionamento de pavimentos e outras estruturas civis (ABNT, 2020).

Figura 10 – Ensaio de plasticidade do solo



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3.5 Massa específica do solo

A massa específica dos sólidos do solo, é definida como a razão entre a massa das partículas sólidas e o volume efetivamente ocupado por essas partículas, excluindo qualquer volume de vazios entre elas. Este parâmetro é fundamental para a caracterização dos solos, pois

permite determinar outras propriedades importantes como a porosidade, grau de saturação e o peso específico seco (Pinto, 2006).

O procedimento é regulamentado pela ABNT NBR 6508:2021, que estabelece o método padrão utilizando balão volumétrico de Le Chatelier e líquido não reativo, geralmente água destilada. Inicialmente, o solo é seco em estufa, desagregado e peneirado na malha 2 mm. Em seguida, uma quantidade conhecida de solo seco é inserida no balão, que já contém uma quantidade pré-determinada de líquido. A leitura inicial de volume é anotada, e após a introdução do solo, a nova leitura volumétrica permite determinar o volume ocupado pelos sólidos (ABNT, 2021).

Para garantir a exatidão da medição volumétrica, é essencial remover as bolhas de ar que poder ficar retidas entre as partículas de solo. Isso é feito com auxílio de um sistema de vácuo, como mostrado na Figura 11, o que assegura a total penetração do líquido entre os grãos, fazendo com que a aplicação do vácuo evita erros na leitura de volume (Gomes, 2010).

Esse ensaio é particularmente importante em estudos de mecânica dos solos e geotecnia, pois a massa específica dos sólidos serve de base para o cálculo da densidade relativa de solos granulares, para correções volumétricas em ensaios de compactação, além de influenciar diretamente nos parâmetros de resistência e deformidade do solo (Bernucci et al., 2010).

Figura 11 – Massa específica do solo



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3.6 Ensaio de compactação do solo

Inicialmente, o solo deve ser preparado conforme a NBR 6457:2020, ou seja, deve ser seco ao ar ou em estufa a uma temperatura inferior a 60 °C para preservar as características naturais das

partículas argilosas. Após secagem, o solo é destorreado manualmente e peneirado em peneiras com aberturas de 4,75 milímetros e 19,0 milímetros, conforme o tipo de ensaio que será realizado, com o objetivo de remover partículas grosseiras que possam interferir na compactação. Para solos de granulometria fina, utiliza-se a peneira de 4,75 milímetros, e para solos com maior proporção de agregados graúdos, aplica-se a peneira de 19,0 milímetros (ABNT, 2020).

Antes de iniciar o processo de compactação, o solo peneirado é umedecido gradualmente até atingir diferentes teores de umidade. Cada amostra é compactada no molde em camadas sucessivas, conforme o tipo de ensaio escolhido, e os golpes são aplicados de maneira uniforme para garantir uma compactação homogênea, demonstrados nas Figuras 12, 13 e 14. Após a compactação, o solo compactado no molde é nivelado, e o excesso é removido com uma régua metálica. O molde é então pesado para determinar a massa do solo compactado, e o peso é registrado para o cálculo da densidade aparente seca (ABNT, 2020).

Em seguida, o solo compactado é retirado do molde, como mostra a Figura 15, e pequenas amostras são coletadas para determinação do teor de umidade. Essas amostras são colocadas em cápsulas metálicas e levadas à estufa, onde são secas a uma temperatura de 105 °C, até atingirem peso constante. Após a secagem, as amostras são pesadas novamente, e o teor de umidade é calculado. O procedimento é repetido para diferentes teores de umidade (ABNT, 2020).

Figura 12 – Ferramentas utilizadas no ensaio de compactação



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 13 – Cilindro utilizado no ensaio de compactação



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 14 – Preenchimento das camadas para compactação



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 15 – Retirada de material compactado



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3.7 Ensaio CBR (California Bearing Ratio)

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (California Bearing Ratio – CBR), é utilizado para avaliar a capacidade de suporte do subleito, sub-base ou base de pavimentos rodoviários. Esse ensaio segue as diretrizes estabelecidas pela NBR 9895:2017, que especifica os materiais, equipamentos e procedimentos necessários para garantir resultados precisos e padronizados. O CBR, é um parâmetro fundamental no dimensionamento de pavimentos, pois auxilia na definição da espessura das camadas estruturais, permitindo adequar a estrutura do pavimento às condições do solo e à carga de tráfego projetada (ABNT, 2017).

O procedimento do ensaio inicia-se com a preparação das amostras de solo, que devem ser coletadas e preservadas conforme as recomendações da NBR 6457:2020, que trata da amostragem e preparação de solos para ensaio de caracterização e compactação. O solo é seco ao ar livre ~~que,~~ posteriormente, peneirado para retirada de partículas maiores que 19 milímetros. Em seguida, o solo é compactado em um molde cilíndrico, de acordo com os procedimentos de compactação estabelecidas na NBR 7182:2020, para garantir que o material atinja a densidade seca máxima e a umidade ótima determinadas anteriormente (ABNT, 2017).

O solo compactado no molde, deve ser nivelado e, então, uma placa perfurada é colocada sobre a superfície do solo. Em seguida, o conjunto é imerso em água por um período de 96 horas, a

fim de simular a saturação que o solo poderá sofrer em campo, conforme Figura 16. Durante o processo de imersão, a expansão do solo é monitorada com o auxílio de um relógio comparador, como é mostrado na Figura 17. A NBR 9895:2017, estabelece que o índice de expansão do solo deve ser calculado ao final do período, sendo um parâmetro fundamental para a avaliação da estabilidade volumétrica do solo em condições de saturação (ABNT, 2017).

Após a imersão, o ensaio de penetração é realizado. O conjunto do molde é fixado em uma máquina de ensaio equipada com pistão de penetração, que aplica uma carga axial na amostra de solo a uma velocidade constante de 1,27 mm/min. O pistão possui uma área de 19,35 cm², e simula a penetração de um pneu no solo. Durante o ensaio, registra-se a carga aplicada em diferentes profundidades de penetração de 2,5 mm, 5 mm, 7,5 mm, 10 mm e 12,5 mm, e os valores de força obtidos são utilizados para calcular o índice CBR, comparando-os com valores padrões de referência. O índice de suporte é calculado para cada profundidade de penetração, sendo considerado o maior valor obtido nas penetrações de 2,5 mm e 5 mm (ABNT, 2017).

A NBR 9895:2017 recomenda que, após a realização do ensaio de penetração, o solo compactado seja submetido à determinação do teor de umidade para verificar se os valores obtidos estão próximos à umidade ótima. Isso é importante, pois a discrepância entre a umidade utilizada durante o ensaio e a umidade ótima pode afetar os resultados. Se o teor de umidade estiver muito diferente do recomendado, o ensaio deverá ser repetido. Os valores finais do índice CBR e do índice de expansão do solo são utilizados para classificar o solo e orientar as decisões relacionadas ao dimensionamento e à execução do pavimento (ABNT, 2017).

Os resultados do ensaio de CBR fornecem informações indispensáveis sobre a qualidade e a capacidade de suporte do solo, permitindo verificar se ele está apto para ser utilizado como subleito ou se há necessidade de reforço ou substituição. Solos com baixo índice de suporte geralmente necessitam de melhorias, como adição de estabilizantes ou aumento da espessura das camadas do pavimento. Dessa forma, o ensaio de CBR contribui significativamente para a segurança e a durabilidade das rodovias, sendo amplamente utilizado em estudos de projeto e controle de qualidade em obras de infraestrutura (ABNT, 2017).

Figura 16 – Momento inicial da imersão em água do solo



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 17 – Ensaio CBR



Fonte: Autoria própria (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A etapa de apresentação dos resultados e discussão, constitui uma parte crucial de qualquer trabalho técnico e científico, principalmente em projetos relacionados à engenharia civil e, mais precisamente, à análise de solos. Após a realização dos ensaios laboratoriais de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR), é fundamental analisar os dados obtidos e discutir suas implicações práticas, confrontando-os com os parâmetros e limites estabelecidos pelas normativas brasileira. Essa análise crítica, busca avaliar a adequação do solo estudado à aplicação como subleito em pavimentos rodoviários, contribuindo para a qualidade e a durabilidade das obras viárias (ABNT, 2025; ABNT 2020; ABNT, 2017; ABNT, 2016).

4.1 Apresentação dos resultados

A análise granulométrica é essencial para determinar a distribuição dos tamanhos de partículas do solo, o que influencia diretamente suas características de compactação, comportamento estrutural e permeabilidade (Das, 2013). No presente trabalho, foram realizados ensaios de peneiramento e sedimentação, onde os resultados são apresentados nas Tabelas 1 a 5.

A Tabela 1 apresenta os dados iniciais da amostra coletada, indicando as massas utilizadas para o desenvolvimento da análise. A massa total da amostra seca ao ar foi de 1501,10 g, sendo que 280,95 g foram retidos na peneira nº10, representando a fração grossa. O material passante na peneira nº 10 somou 1220,15 g, do qual, após a evaporação da água (74,79 g), obteve-se uma massa seca de 1145,36 g. Com isso, a massa total da amostra seca (Ms) foi de 1426,31 g. Esses valores asseguram a representatividade da amostra e a confiabilidade do ensaio.

Na Tabela 2, estão dispostos os resultados referentes ao peneiramento grosso, que compreende as partículas com diâmetro superior a 2,00 mm. Observa-se que a maior fração retida ocorreu na peneira nº4 (4,80 mm), com 133,69 g, representando 8,91 % do total. A soma acumulada dos materiais retidos nas peneiras grossas atingiu 18,72 %, indicando que uma parcela significativa da amostra possui constituição granular mais espessa, o que é característico de solos com presença de pedregulhos e areia grossa.

Já na Tabela 3, mostra os resultados do peneiramento fino, abrangendo partículas entre 2,00 mm e 0,075mm. A distribuição dos finos indica um predomínio de frações entre as peneiras nº 30 (0,60 mm) e nº 100 (0,15 mm), com destaque para o teor de 13,55 g retido na peneira nº100, correspondente a 11,28% do total da fração fina. O material passante na peneira nº 200 foi utilizado no ensaio de sedimentação.

A Tabela 4, apresenta os dados do ensaio de sedimentação, necessário para a análise das partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm (silte e argila), utilizando o método do densímetro, assim como os valores dos parâmetros utilizados na calibração e cálculo, apresentados na Tabela 5. A massa específica dos sólidos foi determinada com 2,413 g/cm³. Os valores de leitura do densímetro ao longo do tempo indicaram uma progressiva redução do teor de partículas em suspensão, partindo de 29,27 % aos 30 segundos até 7,00 % após 24 horas. Isso evidencia a sedimentação progressiva das partículas mais finas e permite quantificar a fração de silte e argila na amostra.

Os dados gerais da análise granulométrica, está representado na Tabela 6. A composição granulométrica revelou 18,7 % de pedregulho, 47,4 % de areia (dividido entre grossa, média e fina), 19,3 % de silte e 14,5 % de argila. O coeficiente de não uniformidade ($C_u = 365,653$) indica um solo muito bem graduado, enquanto o diâmetro efetivo ($d_{10} = 0,001$ mm) aponta para uma predominância de partículas finas. Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo analisado foi classificado como SC – Areia argilosa, conforme a Tabela 7 visto que apresentou mais de 50% da fração entre 0,075 mm e 4,75 mm (areia), conteúdo de finos superior a 12% e Índice de Plasticidade de 11%, caracterizando uma fração fina predominantemente argilosa. A carta de plasticidade, como mostra o Gráfico 1, mostrou posicionamento acima da linha A, e o índice de grupo obtido foi 1,60, demonstrado na Tabela 8, o que indica boas condições para suporte de carga, ainda que com necessidade de controle rigoroso de umidade e compactação.

Esses dados são fundamentais para o entendimento do comportamento geotécnico do subleito, contribuindo com as etapas de dimensionamento, escolha dos materiais de reforço e previsão de desempenho da futura estrutura viária, pois a caracterização granulométrica influencia diretamente a resistência, permeabilidade e estabilidade do solo (Silva; Valente, 2019).

Tabela 1 – Massa da amostra para granulometria

Descrição	Símbolo	Valor (g)
Massa da amostra seca ao ar	Mt	1501,1
Massa do material retido na peneira nº 10 (2,0 mm)	Mg	280,95
Massa do material passante na peneira nº 10	–	1220,15
Massa da água adicionada	–	74,79
Massa do material seco passante na peneira nº 10	–	1145,36
Massa total da amostra seca	Ms	1426,31

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 2 – Peneiramento grosso

Peneira	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retido	% Retido acumulado	% Passante (Qg)
3/4"	19	19,41	1,29%	1,29%	98,71%
3/8"	9,5	29,56	1,97%	3,26%	96,74%
Nº 4	4,8	133,69	8,91%	12,17%	87,83%
Nº 10	2	98,29	6,55%	18,72%	81,28%
Total	–	280,95	18,72%	–	–

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 3 – Peneiramento fino

Peneira	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retido	% Retido acumulado	% Passante (Qf)
Nº 16	1,2	5,65	4,70%	4,70%	77,46%
Nº 30	0,6	14,78	12,31%	17,01%	67,46%
Nº 40	0,43	7,72	6,43%	23,44%	62,23%
Nº 50	0,3	6,94	5,78%	29,22%	57,53%
Nº 100	0,15	13,55	11,28%	40,50%	48,36%
Nº 200	0,07	9,45	7,87%	48,37%	41,97%
Total	–	58,09	48,37%	–	–
Massa da fração úmida (Mu): 120,09 g					
Massa da fração seca (finos): 120,09 g					

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 4 – Sedimentação

Tempo (s)	Leitura do Densímetro (L)	Temperatura (°C)	% da Amostra
30	1,028	25,8	29,27%
60	1,0255	25,8	26,37%
120	1,0235	25,8	24,05%
240	1,022	25,8	22,31%
480	1,02	25,8	19,99%
900	1,0195	25,6	19,30%
1800	1,0185	25,3	17,98%
3600	1,0175	24,5	16,38%
7200	1,0172	24,2	15,87%
14400	1,0171	24,1	15,70%
28800	1,0162	23,9	14,54%
86400	1,0151	26	7,00%

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 5 – Parâmetros utilizados na calibração e cálculo da sedimentação

Parâmetro	Valor
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,413
Densímetro	Nº 17609104
Coeficientes da equação $A + B \cdot r(H)$ (1ª calibração)	A = -206,28
	B = 222,71
Coeficientes da equação $A + B \cdot r(H)$ (2ª calibração)	A = -206,28
	B = 223,67

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 6 – Dados gerais de granulometria

Parâmetro	Valor
Fração granulométrica	
Pedregulho	18,70%
Areia grossa	13,80%
Areia média	16,00%
Areia fina	17,60%
Silte	19,30%
Argila	14,50%
Parâmetros granulométricos	
Diâmetro efetivo (d_{10})	0,001 mm
Diâmetro d_{30}	–
Diâmetro d_{60}	0,366 mm
Coefficiente de curvatura (C_i)	–
Coefficiente de não-uniformidade (C_u)	365,653
Classificação do solo	
Sistema SUCS	SC (Areia argilosa)
Índice de Grupo (IG)	1,6
Carta de Plasticidade	Acima da Linha A

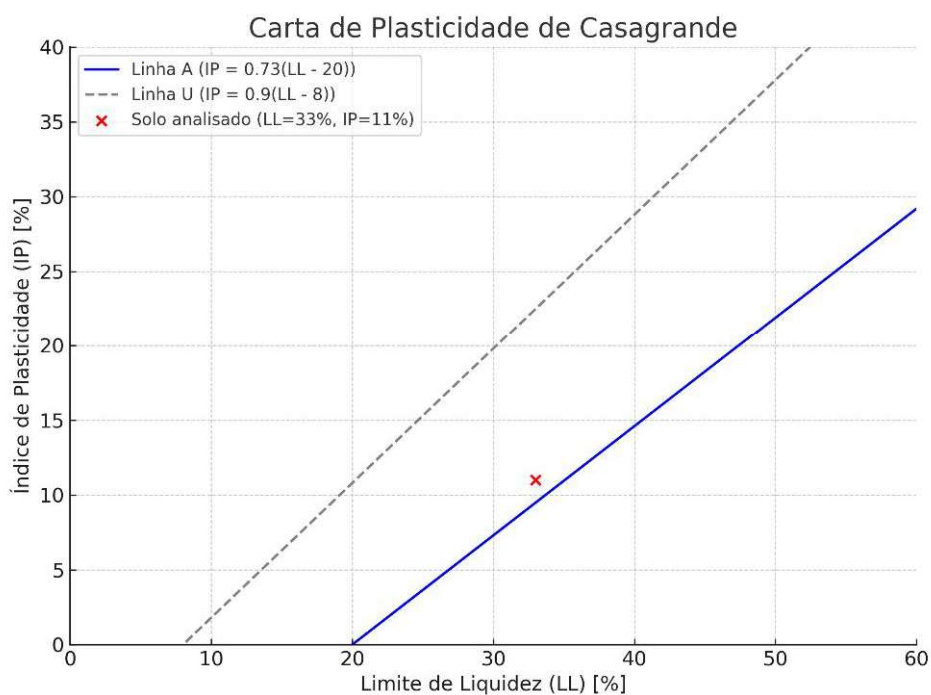
Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 7 – Classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos)

Símbolo	Tipo de Solo	LL (Limite de Liquidez)	IP (Índice de Plasticidade)
GW	Cascalho bem graduado	–	–
GP	Cascalho mal graduado	–	–
GM	Cascalho com silte	< 50%	< Linha A
GC	Cascalho com argila	< 50%	≥ Linha A
SW	Areia bem graduada	–	–
SP	Areia mal graduada	–	–
SM	Areia com silte	< 50%	< Linha A
SC	Areia com argila	< 50%	≥ Linha A
ML	Silte de baixa plasticidade	< 50%	< Linha A
CL	Argila de baixa plasticidade	< 50%	≥ Linha A
MH	Silte de alta plasticidade	≥ 50%	< Linha A
CH	Argila de alta plasticidade	≥ 50%	≥ Linha A

Fonte: DNER-ME (1994)

Gráfico 1 – Carta de plasticidade de Casagrande



Fonte: Pinto (2006)

Tabela 8 – Faixa de classificação do Índice de Grupo (IG)

Índice de Grupo (IG)	Classificação	Capacidade de Suporte
0 a 1	Excelente	Alta
2 a 4	Boa	Boa
5 a 9	Regular	Média
10 a 19	Ruim	Baixa
≥ 20	Muito Ruim	Muito Baixa

Fonte: DNER-ME (1994)

A curva granulométrica do solo coletado no subleito, representado pelo Gráfico 2, construído a partir dos dados obtidos nos ensaios de peneiramento (grosso e fino) e sedimentação. Essa curva representa a distribuição percentual acumulada das partículas em função do diâmetro equivalente, sendo essencial para a avaliação do comportamento geotécnico do solo.

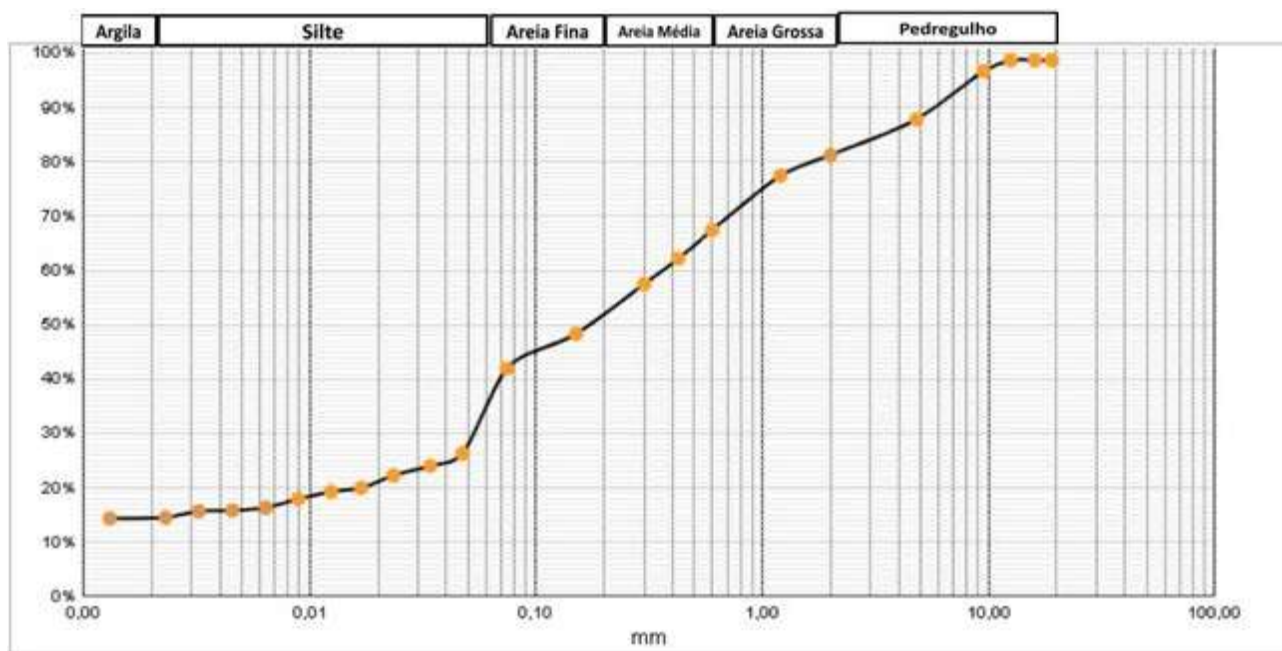
A análise visual da curva demonstra uma distribuição contínua e bem distribuída entre os diferentes tamanhos de partículas, sem grandes descontinuidades, o que indica que o solo é bem graduado. Observa-se uma variação significativa de tamanhos, com presença de partículas desde a faixa de argila e silte até pedregulhos, passando por areias finas, médias e grossas. Isso confirma a heterogeneidade do solo, o que é positivo do ponto de vista da compactação e estabilidade, desde que bem controlado em campo.

A maior parte da curva encontra-se entre as faixas de silte e areia fina, revelando que o solo possui predominância de partículas finas, o que tende a reduzir sua permeabilidade e aumentar seu potencial de retenção de água. Isso pode interferir diretamente no comportamento do subleito sob condições de umidade elevada, exigindo atenção especial quanto ao controle tecnológico e à drenagem da estrutura viária.

Nas porções superiores da curva, observa-se a presença de areia mais grossas e pedregulhos, embora em menor proporção. Essa fração contribui para uma maior resistência ao cisalhamento, mas também pode afetar a uniformidade do solo compactado.

A forma da curva confirma os resultados obtidos anteriormente, que classificou o solo como arenoso argiloso com presença de silte (SC, segundo SUCS). A boa graduação observada também justifica o índice de grupo baixo ($IG = 1,60$), indicando que, mesmo com presença de finos, o solo apresenta características adequadas para uso em subleito, desde que acompanhado de um controle rigoroso de compactação e umidade.

Gráfico 2 – Curva Granulométrica



Fonte: Autoria própria (2025)

Os limites de consistência são parâmetros fundamentais para a classificação e compreensão do comportamento plástico dos solos finos, influenciando diretamente sua trabalhabilidade, estabilidade e suscetibilidade à variação de umidade (PINTO, 2006). Esses limites são determinados por meio de ensaios padronizados conforme a NBR 6459:2016 (limite de liquidez) e a NBR 7180:2016 (limite de plasticidade), ambas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2016).

A Tabela 9, apresenta os dados do ensaio de Limite de Liquidez, onde foram realizadas sete determinações utilizando diferentes cápsulas e número de golpes no aparelho de Casagrande. Os valores de umidade variaram entre 31,14 % e 35,26 %, com número de golpes entre 17 e 34. A partir do ajuste da curva dos pontos obtidos, chegou-se ao valor médio do Limite de Liquidez de 33 %, indicando que o solo apresenta comportamento plástico moderado quando saturado (Silva; Valente, 2019).

Já na Tabela 10, são apresentados os dados referentes ao Limite de Plasticidade, obtido por meio do ensaio de rolagem em superfície de vidro até o rompimento das hastes de solo com 3 mm de diâmetro. Os valores de umidade variaram entre 20,73 % e 26,14 %, resultando em um Limite de Plasticidade médio de 22 % (ABNT, 2016).

A diferença entre os dois limites resulta no Índice de Plasticidade, que neste caso foi de 11 %, valor que indica uma plasticidade intermediária. Solos com Índice de Plasticidade entre 10 % e

20 % são considerados moderadamente plásticos, podendo apresentar certa coesão, mas também sensibilidade à umidade, especialmente se houver grande proporção de silte (Vargas, 1997).

Esses resultados são coerentes com a classificação SC (solo argiloso arenoso), obtida anteriormente pela análise granulométrica, e reforçam a necessidade de controle rigoroso da umidade durante a execução de obras sobre esse tipo de solo. Além disso, o fato de o solo ter apresentado valores acima da Linha A na Carta de Plasticidade, indica predominância de comportamento argiloso, o que pode implicar variações volumétricas em função de mudanças de umidade no subleito da rodovia (Tomlinson; Boogaard, 2011).

Tabela 9 – Limite de liquidez

Nº	Descrição	Cápsula 1	Cápsula 2	Cápsula 3	Cápsula 4	Cápsula 5	Cápsula 6	Cápsula 7
1	Identificação da cápsula	17	76	32	22	14	57	62
2	Peso da cápsula (g)	5,18	5,61	5,24	5,65	5,41	5,9	5,53
3	Peso bruto úmido (g)	9,3	9,83	8,64	9,13	8,77	10,14	8,52
4	Peso bruto seco (g)	8,23	8,73	7,79	8,3	7,95	9,12	7,81
5	Umidade (%)	35,08	35,26	33,33	31,32	32,28	31,68	31,14
6	Número de golpes	17	18	22	31	23	34	30
Limite de Liquidez: 33%								

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 10 – Limite de plasticidade

Nº	Descrição	Cápsula 1	Cápsula 2	Cápsula 3	Cápsula 4	Cápsula 5	Cápsula 6	Cápsula 7
1	Identificação da cápsula	71	65	1	110	12	44	52
2	Peso da cápsula (g)	5,39	5,94	4,58	5,61	5,44	5,42	5,39
3	Peso bruto úmido (g)	6,53	6,96	5,7	6,96	6,43	6,53	6,77
4	Peso bruto seco (g)	6,33	6,77	5,5	6,72	6,26	6,3	6,52
5	Umidade (%)	21,28	22,89	21,74	21,62	20,73	26,14	22,12
Limite de Plasticidade: 22%								
Índice de Plasticidade: 11%								

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Tabela 11 são apresentados os resultados referentes ao ensaio de compactação. A partir dessas informações, elaborou-se a curva de compactação do solo, representado no Gráfico 3. Esta curva evidencia a relação entre teor de umidade (%) e a massa específica aparente seca (g/cm^3), conforme os procedimentos da NBR 7182:2020 (ABNT, 2020), que estabelece os métodos de ensaio para determinação das propriedades de compactação dos solos.

A distribuição dos pontos experimentais demonstra que, à medida que o teor de umidade aumentou de 10,0 % para 14 %, a massa específica seca também se elevou, atingindo seu valor máximo de $1,973 \text{ g}/\text{cm}^3$, o que caracteriza a umidade ótima (Silva; Valente, 2019). Este ponto é marcado na curva por uma linha vertical tracejada, representando o teor de umidade em que o solo apresenta sua máxima densidade seca.

Após esse ponto crítico, observa-se uma queda significativa na densidade seca com o aumento da umidade, como evidenciado no Gráfico 3 com a redução da massa específica aparente seca para $1,73 \text{ g}/\text{cm}^3$ na umidade de 16,5 %. Esse comportamento é típico de solos finos, nos quais o excesso de água ocupa os vazios entre partículas, dificultando a aproximação entre os grãos e, consequentemente, reduzindo a compactação (Pinto, 2006).

A forma da curva obtida é característica do método de compactação com energia intermediária, refletindo uma boa moldagem dos dados experimentais e indicando que o solo analisado apresenta comportamento coesivo, com boa resposta à compactação mecânica. Essa característica é fundamental para o dimensionamento do subleito, pois garante menor deformidade e maior capacidade de suporte, desde que mantidas as condições próximas da umidade ótima (Vargas, 1997).

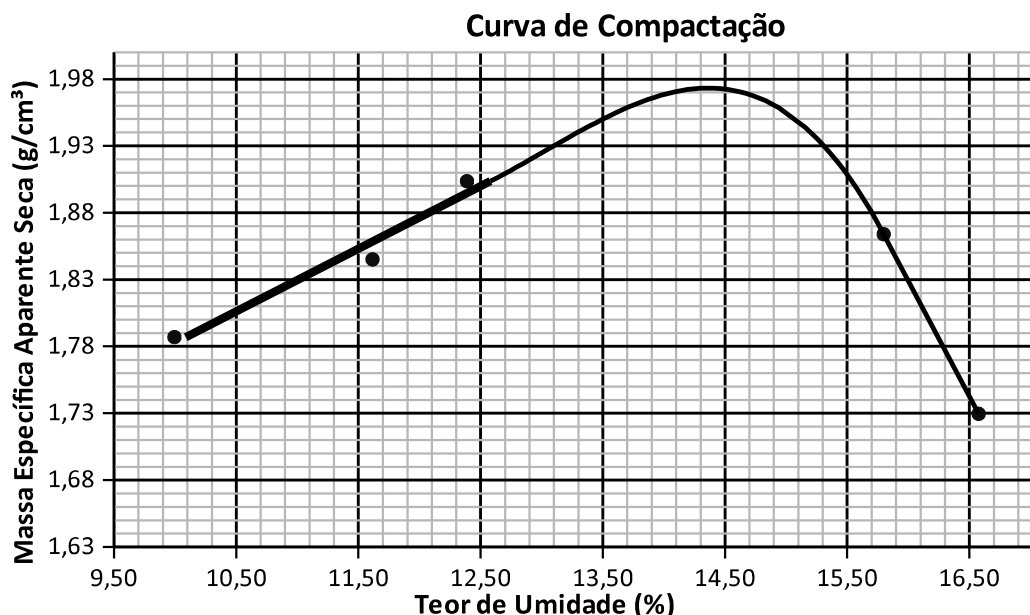
A obtenção da curva de compactação, aliada à análise de propriedades como índice de vazios, porosidade e grau de saturação, permite estabelecer critérios técnicos para controle de compactação em campo, assegurando o desempenho estrutural da camada de subleito ao longo da vida útil do pavimento (Silva; Valente, 2019).

Tabela 11 – Ensaio de compactação

Parâmetro	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Peso do cilindro + solo úmido (g)	8.363,10	8.558,20	8.724,40	8.763,80	8.468,50
Peso do solo úmido (g)	4.084,40	4.279,50	4.445,70	4.485,10	4.189,80
Massa específica aparente úmida (g/cm ³)	1,97	2,06	2,14	2,16	2,02
Cápsula (1ª determinação)	3-A	1	111A	B-4	10-A
Peso da cápsula (g)	16,47	16,05	16,47	17,04	15,99
Peso da cápsula + solo úmido (g)	64,91	64,91	63,03	67,94	70,02
Peso da cápsula + solo seco (g)	60,51	59,8	57,89	60,84	61,84
Teor de umidade (%)	9,99	11,68	12,41	16,21	17,84
Cápsula (2ª determinação)	1-C5	3A	4D	8A	P-03
Peso da cápsula (g)	17,07	17,4	16,72	17,19	17,95
Peso da cápsula + solo úmido (g)	73,18	65,3	57,88	66,16	79,33
Peso da cápsula + solo seco (g)	68,08	60,34	53,35	59,63	71,18
Teor de umidade (%)	10	11,55	12,37	15,39	15,31
Teor de umidade médio (%)	10	11,6	12,4	15,8	16,6
Peso do cilindro (g)	4.278,70	4.278,70	4.278,70	4.278,70	4.278,70
Volume do cilindro (cm ³)	2.077,98	2.077,98	2.077,98	2.077,98	2.077,98
Massa específica aparente seca (g/cm ³)	1,79	1,85	1,9	1,86	1,73
Índice de vazios (e)	0,49	0,44	0,4	0,43	0,54
Porosidade (%)	32,87	30,69	28,49	29,98	35,03
Grau de saturação (%)	54,33	69,84	82,78	98,22	81,85
Massa específica aparente seca máxima: 1,973 g/cm³					
Umidade ótima: 14%					
Energia de compactação: Intermediária					

Fonte: Autoria própria (2025)

Gráfico 3 – Curva de compactação



Fonte: Autoria própria (2025)

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia foi realizado utilizando-se um corpo de prova moldado na umidade ótima encontrada, 14,37% e massa específica seca máxima de 1,973 g/ cm³, obtida através do ensaio de compactação com energia de compactação intermediária. O corpo de prova foi deixado submerso por 4 dias, conforme a NBR 9895:2017 (CBR). Para que o ensaio ocorresse sob condições representativas de campo, a umidade higroscópica do solo foi determinada em 6,53 %, e o volume de água adicionado à amostra úmida (7.000 g) foi de 514,96 ml. Para o CBR do material ensaiado, deve-se adotar o maior dos valores obtidos nas penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm, a saber, 19,73 % (Pinto, 2006).

A Tabela 12 apresenta os dados de penetração do pistão no solo e as respectivas leituras de carga e pressão. Observa-se que a carga aplicada aumentou progressivamente conforme a penetração crescia, atingindo 4494,23 N (2,33 MPa) aos 12,7 mm de penetração, conforme visualizado também na curva de penetração CBR do Gráfico 4. A curva mostra um comportamento típico de solos coesivos com transição para comportamento granular, com inclinação progressiva.

Já na Tabela 13, traz o cálculo do Índice de Suporte Califórnia (CBR) nas penetrações padronizados de 2,54 mm e 5,08 mm, cujos valores corrigidos de pressão foram de 1,362 MPa e 1,657 MPa, respectivamente. Isso resultou em valores de ISC de 6,90 % para 2,54 mm e 10,35 % para 5,08 mm.

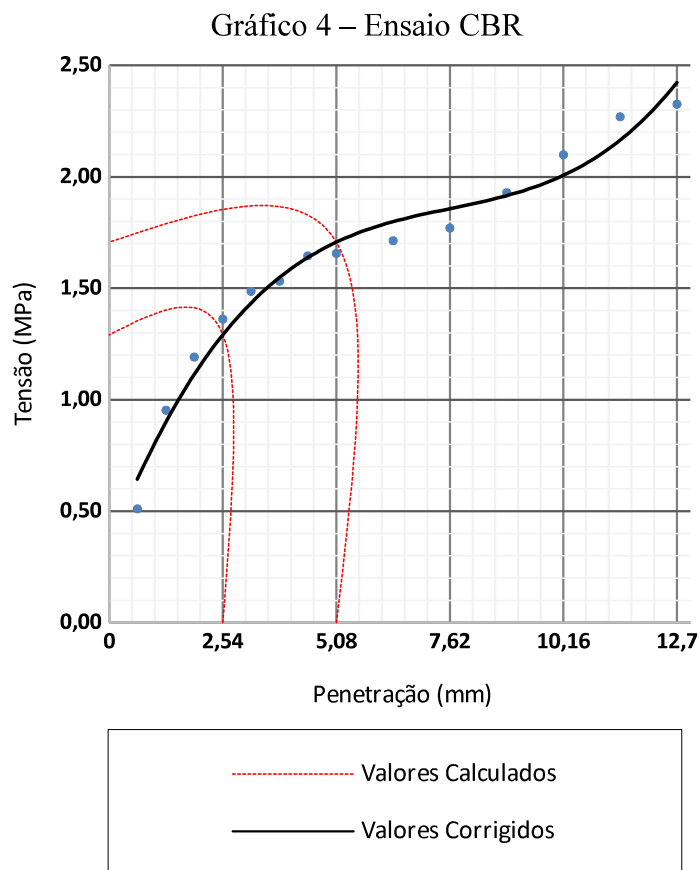
De acordo com a DNIT 072/2018-PRO, quando o valor de CBR na penetração de 5,08 mm for maior que o de 2,54 mm, o CBR padrão a ser adotado será o menor valor entre eles, desde que ambos estejam dentro da faixa considerada confiável. Neste caso, adota-se o valor de 6,90 % que representa a resistência de suporte do solo para efeitos de projeto.

Esse resultado classifica o solo como baixo suporte, o que exige a consideração de camadas de reforço, como sub-base ou substituição parcial do solo, para garantir o desempenho da estrutura viária (Silva; Valente, 2019). A forma suave e contínua da curva no gráfico, indica ausência de irregularidades durante a penetração, o que reforça a consistência do ensaio e a homogeneidade da amostra.

Tabela 12 – Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Parâmetro	Valor			
Umidade ótima (%)	14,37			
Massa específica seca máxima (g/cm³)	1,973			
Umidade higroscópica da amostra (%)	6,53			
Massa de solo úmido a pesar (g)	7.000,00			
Volume de água a adicionar (mL)	514,96			
Energia de compactação	Intermediária			
Leituras de Penetração ao Longo do Tempo:				
Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (µm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0,5	0,63	45	986,54	0,51
1	1,27	84	1.841,54	0,95
1,5	1,9	105	2.301,92	1,19
2	2,54	120	2.630,77	1,36
2,5	3,17	131	2.871,93	1,49
3	3,81	135	2.959,62	1,53
3,5	4,44	145	3.178,85	1,65
4	5,08	146	3.200,77	1,66
5	6,35	151	3.310,39	1,71
6	7,62	156	3.420,00	1,77
7	8,89	170	3.726,93	1,93
8	10,16	185	4.055,77	2,1
9	11,43	200	4.384,62	2,27
10	12,7	205	4.494,23	2,33

Fonte: Autoria própria (2025)



Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 13 – Resultado de penetração CBR

Penetração (mm)	Pressão (MPa)			ISC (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão	
2,54	1,362	1,362	6,90	19,73
5,08	1,657	1,657	10,35	16,01

Fonte; Autoria própria (2025)

4.2 Comparação com normas e discussão técnica

A soma dos componentes de grãos grossos (pedregulho e areia) é 66,1 %, enquanto os grãos finos (silte e argila) totalizam 33,8 %. Isso nos sugere que o solo apresenta características intermediárias entre um solo arenoso e siltoso, sem uma dominância extrema de frações finas (silte e argila) ou frações muito grossas (pedregulho).

De acordo com a NBR 7181:2025, os solos podem ser classificados segundo a curva granulométrica obtida, o que é útil para determinar seu comportamento geotécnico em relação ao pavimento. Após a apresentação do gráfico, podemos tirar as seguintes conclusões: o solo apresenta uma considerável quantidade de areia, principalmente fina e média, mas com uma fração expressiva

de silte, aproximadamente 19,30 %, como mostra a Tabela 5. Esse comportamento sugere que o solo tem características arenoso-siltoso, o que pode influenciar diretamente sua capacidade de suporte e permeabilidade. Solos com frações finas, como silte e argila, acima de 30 % tendem a ser menos permeáveis e mais vulneráveis à deformação sob cargas.

Segundo o DNIT 072/2006 – ME, um solo ideal para subleito deve apresentar granulometria bem graduada, baixa plasticidade e uma quantidade controlada de finos. Como o solo em questão apresenta uma distribuição granulométrica relativamente equilibrada, e não há dominância extrema de finos, que, somados silte e argilas, não ultrapassam 35 %, conforme apresentado na Tabela 5, podendo assim ser adequado para subleito, desde que tenha um CBR superior a 8 %, conforme exigido pelas normas brasileiras.

Com os resultados apresentados para Limite de Liquidez ($LL = 33\%$), Limite de Plasticidade ($LP = 22\%$) e Índice de Plasticidade ($IP = 11\%$), podemos tirar importantes conclusões sobre o comportamento e a classificação do solo, conforme as normas brasileiras e referências técnicas. A interpretação desses valores será feita com base nas normativas da ABNT, como a NBR 6459:2016, NBR 7180:2016 e os critérios adotados pelo DNIT.

Segundo a NBR 7180:2016, o Índice de Plasticidade indica a capacidade do solo de absorver e reter água sem perder completamente a consistência. Um IP de 11 %, sugere que o solo apresente plasticidade média. Esse tipo de solo pode ser considerado coeso e potencialmente adequado para o uso em camadas inferiores do pavimento, como subleito, dependendo dos valores de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e expansão.

Com esses resultados, esse solo pode ser classificado como um solo coeso e moderadamente plástico, com potencial para ser utilizado no subleito, especialmente em estradas de tráfego moderado, desde que seu CBR atenda ao valor mínimo exigido pelas normas brasileira, preferencialmente acima de 8 %, conforme o DNIT 072/2006 – ME.

De acordo como DNIT 072/2006 – ME, o valor de 19,73% de ISC sugere que o solo em questão não possui capacidade suficiente para ser utilizado diretamente como base ou sub-base de um pavimento, uma vez que, para essas camadas, são exigidos valores mínimos mais elevados. No entanto, esse valor de ISC o classifica como um material adequado para ser utilizado no subleito, considerando que solos com valores de CBR acima de 8% geralmente são considerados aptos para desempenhar essa função em pavimentos rodoviários convencionais (DNIT, 2006).

Portanto, com base no ISC de 19,73%, o solo pode ser utilizado adequadamente na construção do subleito de um pavimento rodoviário, considerando que ele atende aos critérios estabelecidos pelas normas brasileiras, especialmente o DNIT 072/2006 – ME e a NBR 9895:2017. No entanto, para aplicação em sub-base ou bases, o solo precisaria de estabilização ou de uma mistura com materiais de melhor qualidade, ou, em último caso, a troca completa do material por outro que atinja os requisitos de suporte e resistência exigidos para essas camadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios laboratoriais realizados durante o estudo do subleito da estrada em questão permitiram uma avaliação detalhada das propriedades geotécnicas do solo, essenciais para a análise de sua adequação às camadas estruturais de um pavimento rodoviário. Cada ensaio seguiu rigorosamente os procedimentos estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras aplicáveis, garantindo a confiabilidade dos dados obtidos. Com base nos resultados, foi possível verificar parâmetros como granulometria, limites de consistência (limite de liquidez e limite de plasticidade), compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR), todos cruciais para a classificação do solo e para a determinação de seu potencial de uso no subleito.

A análise granulométrica, conforme a NBR 7181:2025, revelou uma composição mista de solo, contendo frações de pedregulhos, areia, silte e argila em proporções que o classificam como um material granular, com características siltosas predominantemente. Esse perfil granulométrico indica um comportamento intermediário entre solos coesos e não coesos, o que demanda cuidados específicos em relação à sensibilidade à umidade e à capacidade de drenagem, critérios fundamentais para o desempenho do subleito rodoviário.

Os limites de consistência, determinados de acordo com as normas NBR 6459:2016 e NBR 7180:2016, indicam um solo de plasticidade média, com Índice de Plasticidade (IP) de 11%. Esse resultado, aponta que o material apresenta certa capacidade de deformação sem ruptura, sendo menos suscetível à fissuração, mas, ao mesmo tempo, pode ser vulnerável a variações de umidade. Esse aspecto reforça a importância de garantir uma compactação adequada no campo e de avaliar a drenagem do pavimento, conforme as recomendações do DNIT 031/2006 – ES.

O ensaio de compactação, conduzido conforme a NBR 7182:2020, determinou a densidade máxima e o teor ótimo de umidade do solo. Esses parâmetros são essenciais para garantir o desempenho estrutural do subleito, uma vez que um solo compactado de forma adequada apresenta maior resistência ao cisalhamento e menor suscetibilidade a deformações e recalques diferenciais. O controle da compactação em campo, portanto, será imprescindível para assegurar a estabilidade e a durabilidade do pavimento.

Por fim, o ensaio CBR, realizado com base na NBR 9895:2017, forneceu uma avaliação quantitativa da capacidade de suporte do solo. O valor de CBR obtido foi comparado aos critérios estabelecidos pelo DNIT 072/2006 – ME, que estabelece o mínimo admissível para aplicação em subleitos de pavimentos rodoviários. O resultado indicou que o solo estudado apresenta uma capacidade de suporte suficiente para uso em subleitos de estradas de tráfego moderado, desde que

sejam implementadas medidas de controle adequadas, como compactação eficiente, reforço em áreas críticas e sistemas de drenagem adequados para evitar a saturação do material.

Em síntese, os resultados laboratoriais demonstraram que o solo analisado possui características que o tornam apto a ser utilizado em subleitos rodoviários, desde que respeitados os critérios normativos e adotadas as práticas construtivas recomendadas para assegurar a qualidade e durabilidade do pavimento. O estudo reforça a importância dos ensaios geotécnicos com ferramentas fundamentais para a tomada de decisões técnicas na pavimentação, contribuindo para o desenvolvimento de estradas mais seguras e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:2020 – Solos – Amostras – Preparação para ensaios de compactação e caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:2016 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508:2021 – Solo – Determinação da massa específica dos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:2025 – Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895:2017 – Solo – Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ALMEIDA, Marcelo. **Pavimentação rígida: conceitos e aplicações**. São Paulo: Editora Infraestrutura, 2016.

BENEVOLO, Leonardo. **História da Cidade**. São Paulo: Perspectiva, 2016.

BERNUCCI, Liedi Légi; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOUZA, F. J. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2008.

BERNUCCI, Liedi Légi; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOUZA, F. J.

Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras/Abeda, 2010.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

CASADO, Santiago. **Infraestrutura Rodoviária: Passado, Presente e Futuro.** Lisboa: Ed. Técnica, 2015.

DAS, Braja M. **Princípios de Engenharia Geotécnica.** 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT.
DNIT 031/2006 – ES – Pavimentos Flexíveis: Solos para Pavimentação. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT.
DNIT 072/2006 – ME: Pavimentos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR). Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT.
DNIT 164/2013 – ES: Pavimentos – Estabilização de Solos com Cimento – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT.
Manual de Estudos Geotécnicos Aplicados a Rodovias. Rio de Janeiro: DNIT, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT.
Manual de Pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT).
ME 025/94 – Coleta de amostras deformadas e indeformadas em campo. Rio de Janeiro: DNIT, 1994.

DINIZ, Clara. **Infraestrutura e Desenvolvimento: O Brasil no Século XX**. São Paulo: Edusp, 2001.

GOMES, R. C. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. São Paulo: Blucher, 2010.

HENDERSON, William. **Modern Road Building Techniques**. New York: Road Engineers Press, 2014.

HOLANDA, Sérgio Buarque de. **Caminhos e Fronteiras**. 7. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

JACKSON, David. **Engineering the Roads of Europe**. London: Historical Press, 2012.

LOPES, Fernando. **A História das Estradas Brasileiras**. São Paulo: Editora Infraestrutura, 2013.

MORRIS, Ian. **Why the West Rules – For Now**. Nova York: Farrar, Straus and Giroux, 2010.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SILVA, A. C.; VALENTE, F. P. **Geotecnia aplicada à pavimentação: materiais, ensaios e dimensionamento**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

SOUZA, Mariana et al. **Pavimentação Sustentável: Desafios e Perspectivas**. Revista Brasileira de Infraestrutura, v. 12, n. 1, p. 45-60, 2018.

TOMLINSON, M.; BOOGAARD, F. **Fundamentos de Engenharia de Fundações**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill do Brasil, 1977.

ANEXOS

O Anexo A apresenta os dados do ensaio de determinação do teor de umidade natural do solo, realizado conforme a norma ABNT NBR 6457:2020, que estabelece os procedimentos de preparação de amostras de solo para ensaios de compactação e caracterização. O resultado obtido foi um teor de umidade médio de 12,39 %, fundamental para ajustes na umidade de compactação do solo e interpretação da condição de campo da amostra coletada.

Já no Anexo B, apresenta os dados obtidos do ensaio de umidade higroscópica, executado conforme a ABNT NBR 6457:2020, com o objetivo de identificar a quantidade de água retida naturalmente no solo após exposição ao ambiente. A média registrada foi de 6,53 %, sendo esse valor utilizado para corrigir o teor de umidade da amostra quando necessário, especialmente em cálculos de dosagem e preparação para outros ensaios.

No Anexo C são apresentados os resultados do ensaio de massa específica dos grãos do solo, realizado segundo a ABNT NBR 6508:2021. Os dados obtidos, permitiram o cálculo da massa específica média dos grãos como 2,41582 g/cm³, posteriormente corrigida para a temperatura de 20 °C, resultando em 2,413 g/cm³. Este valor é essencial para os cálculos de vazios, grau de saturação e ensaios de compactação.

ANEXO A

Parâmetro	Símbolo	Cápsula 4	Cápsula C19	Cápsula C14
Massa da cápsula (g)	M ₃	7,35	6,72	7,07
Massa da cápsula + solo úmido (g)	M ₁	24,37	21,41	24,9
Massa da cápsula + solo seco (g)	M ₂	22,35	19,74	23,15
Teor de umidade (%)	w	13,47	12,83	10,88
Teor de umidade médio: 12,39%				

Fonte: Autoria própria (2025).

ANEXO B

Parâmetro	Símbolo	Cápsula 8-3	Cápsula D32	Cápsula 8-2
Massa da cápsula (g)	M ₃	7,33	6,98	7,01
Massa da cápsula + solo úmido (g)	M ₁	41,58	41,4	39,66
Massa da cápsula + solo seco (g)	M ₂	39,49	39,29	37,65
Teor de umidade (%)	w	6,5	6,53	6,56
Teor de umidade higroscópica médio: 6,53%				

Fonte: Autoria própria (2025)

ANEXO C

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Ensaio 1	Ensaio 2
Massa do solo úmido	M ₁	g	60,07	61,3
Temperatura do ensaio	T	°C	24,7	24,8
Massa do picnômetro + solo + água	M ₂	g	654,82	641,36
Número do picnômetro	—	—	A-5	10
Massa do picnômetro vazio	P ₁	g	141,9	116,35
Massa do picnômetro + solo	P ₂	g	201,97	177,65
Massa específica da água	—	g/cm ³	0,99712	0,9971
Massa específica do ar	—	g/cm ³	0,001	0,001
Volume do picnômetro	—	cm ³	479,6	491,13
Coeficiente de expansão do vidro	—	—	3,20×10 ⁻⁶	3,20×10 ⁻⁶
Massa do picnômetro + água	M ₃	g	619,56	605,49
Massa específica dos sólidos à temperatura T	δ _t	g/cm ³	2,421	2,411
Massa específica média dos grãos do solo (g/cm ³): 2,41582				
Fator de correção (K ₂₀): 0,99892				
Massa específica dos grãos do solo corrigida para 20 °C (D ₂₀): 2,413 g/cm ³				

Fonte: Autoria própria (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.

Q4c Querino, Lucas.
Caracterização do subleito para passagem de
veículos pesados: estudo de caso trecho da BR-104,
entre os municípios de Cerro Corá/RN e Currais
Novos/RN / Lucas Querino. - 2025.
60 f. : il.

Orientadora: Andreza Kelly.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2025.

1. Pavimentação. 2. Análise de Subleito. 3.
Compactação. 4. CBR. I. Kelly, Andreza, orient.
II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

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.