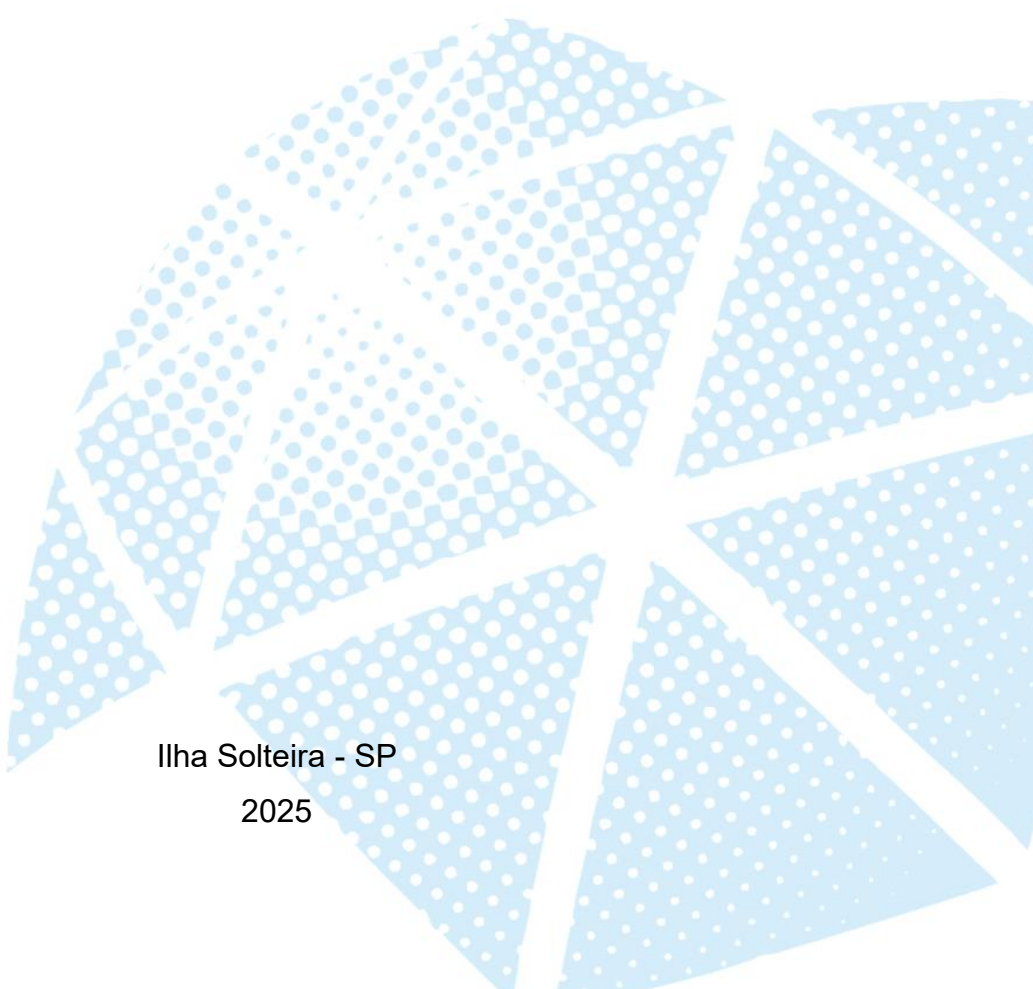


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

PAULA ANTONIO MARQUES

**USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA MELHORIAS NAS
ESTRADAS RURAIS USADAS PARA O ESCOAMENTO DE CANA DE AÇÚCAR:
um estudo de caso**

Ilha Solteira - SP
2025



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PAULA ANTONIO MARQUES

**USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA MELHORIAS NAS
ESTRADAS RURAIS USADAS PARA O ESCOAMENTO DE CANA DE AÇÚCAR:
um estudo de caso**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Faculdade de
Engenharia do Campus de Ilha Solteira,
para obtenção do título de Engenheira

Orientador:

Prof. Dr. Marco Antonio de Moraes Alcantara

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Marques, Paula Antonio.

M357u Uso de resíduos de construção e demolição para melhorias nas estradas rurais usadas para o escoamento de cana de açúcar: um estudo de caso / Paula Antonio Marques. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
62 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025

Orientador: Marco Antônio de Moraes Alcântara

Inclui bibliografia

1. Resíduos de Construção e demolição. 2. Estradas rurais. 3. Pavimentação.
4. Sustentabilidade. 5. Cana de açúcar.

PAULA ANTONIO MARQUES

**USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA MELHORIAS NAS
ESTRADAS RURAIS USADAS PARA O ESCOAMENTO DE CANA DE AÇÚCAR:
um estudo de caso**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Engenheira Civil

Aprovada em: 02/06/2025

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Marco Antonio de Moraes Alcantara (Orientador)
UNESP - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira



Prof. Dr. Adriano Souza (Examinador)
UNESP - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira



Documento assinado digitalmente
RODRIGO ANDRAUS BISPO
Data: 02/06/2025 16:43:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. MSc. Rodrigo Andraus Bispo (Examinador)
UFSCAR – Departamento de Engenharia Civil - Câmpus de São Carlos

Dedico este trabalho aos meus pais, Artur e Claudia, as duas pessoas mais apaixonadas pelo ensino que já conheci.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa não apenas o encerramento de uma etapa acadêmica, mas também a concretização de um sonho construído com o apoio e incentivo de muitas pessoas, às quais sou profundamente grata. Depois de quatro faculdades diferentes, esta trajetória se encerra com um caminho lindo, repleto de aprendizados, tropeços e incontáveis pessoas que marcaram minha vida ao longo desses anos.

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador, professor Marco, pela orientação e apoio ao longo desses anos.

Aos dois melhores professores que a vida poderia me dar: meus pais, Artur e Claudia. Obrigada pelo exemplo de pessoas e profissionais. É inspiradora a paixão de vocês pelo ensino e pela engenharia. É um prazer enorme aprender com vocês todos os dias, e foi um prazer ainda maior poder aprender com vocês também dentro da sala de aula. Tudo o que sou devo a vocês. Obrigada por me guiarem e me incentivarem a cada dia nessa trajetória desafiadora e apaixonante que é a engenharia civil. Obrigada pelo amor incondicional, pelo incentivo constante e por acreditarem no meu potencial mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço, em especial, à minha família de coração: Laurize, Rayssa e tia Eni. Obrigada por sempre estarem ao meu lado, por todo o amor, carinho e paciência. Foi um privilégio crescer e aprender com vocês.

Aos professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, agradeço por cada ensinamento, por cada palavra de incentivo e por despertarem em mim ainda mais amor pela engenharia. Aos funcionários da instituição, meu reconhecimento e gratidão pelo cuidado, pela atenção e pelo suporte ao longo do curso.

Ao meu namorado, obrigada por estar ao meu lado, pelo amor, pela paciência e por me apoiar mesmo nos momentos mais difíceis, sua presença é essencial.

Ao meu psicólogo, minha profunda gratidão por me ajudar a entender e acolher meus limites, foi fundamental para que eu pudesse atravessar os altos e baixos desta jornada.

Agradeço, do fundo do coração, às amigas que a vida me presenteou ao longo dessa caminhada. Foram vocês que me arrancaram sorrisos nos dias difíceis, que seguraram minha mão quando eu quis desistir, que dividiram os medos, os cafés, os choros e as conquistas. Levo cada um de vocês comigo, não só na memória, mas no coração. Essa vitória também é de vocês. Sem a presença, o carinho e a força que encontrei em cada amizade, este momento não teria o mesmo significado — e talvez nem mesmo teria acontecido.

"Seja a mudança que você quer ver no mundo."

— *Mahatma Gandhi*

RESUMO

Este trabalho analisa a viabilidade técnica e econômica da utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) na melhoria de estradas rurais utilizadas para o escoamento de cana-de-açúcar, com foco em um trecho localizado no município de Rafard, SP. O estudo parte da constatação de que essas vias, frequentemente não pavimentadas, apresentam baixa resistência estrutural, o que compromete a logística agrícola e eleva os custos com manutenção. A fim de melhorar a qualidade de rolamento e suporte dessas vias foi estudado a melhoria do índice de suporte do solo com agregado reciclado. Foram coletadas amostras de solo da região e realizados ensaios laboratoriais de caracterização do solo, com o objetivo classificar e avaliar o comportamento mecânico do solo, seguindo as especificações NBR 15115 (ABNT, 2004). Os agregados reciclados se enquadraram nas faixas granulométricas estabelecidas na Norma DNIT 141/2010. O solo foi classificado como siltoso (A-4), considerado regular, com Índice de Suporte Califórnia (ISC) de 11,7%, na energia intermediária, e 22,3% quando misturado com RCD. Desse modo foram executados ensaios de mistura 40% solo e 60% RCD, obteve-se um ISC de 22,83% podendo, assim, ser usado como subbase. Deste modo, a melhoria do ISC com agregado reciclado é uma alternativa viável para aplicação em obras de pavimentos. No dimensionamento do pavimento, método MEDINA e método CBR, foi considerado o tráfego previsto para os próximos oito anos. A análise de viabilidade econômica demonstrou que, embora o custo inicial de implantação com RCD seja superior ao da manutenção convencional, há significativa redução de custos operacionais ao longo do tempo, além de benefícios ambientais e sociais. Conclui-se que o uso de RCD representa uma alternativa sustentável e eficaz para o reforço estrutural de estradas rurais em regiões agrícola promovendo ganhos em durabilidade, segurança viária e gestão de resíduos sólidos.

Palavras-chave: resíduos de construção e demolição; estradas rurais; cana-de-açúcar; pavimentação; sustentabilidade.

ABSTRACT

This study analyzes the technical and economic feasibility of using construction and demolition waste (CDW) to improve rural roads used for sugarcane transportation, focusing on a segment located in the municipality of Rafard, São Paulo, Brazil. These unpaved roads often have low structural resistance, which hinders agricultural logistics and increases maintenance costs. To enhance the bearing capacity and surface quality, recycled aggregate was used to improve the soil support index. Soil samples from the region were collected and subjected to laboratory tests in accordance with NBR 15115 (ABNT, 2004) to classify and evaluate the mechanical behavior of the soil. The recycled aggregates met the gradation requirements of DNIT Standard 141/2010. The native soil was classified as silty (A-4), with a California Bearing Ratio (CBR) of 11,7% under intermediate compaction energy. When mixed with 60% CDW, the CBR increased to 22.83%, making it suitable for use as a subbase layer. Pavement design was carried out using both the MEDINA and CBR methods, considering projected traffic over the next eight years. The economic feasibility analysis indicated that, although the initial cost of using CDW is higher than that of conventional maintenance, it results in significant operational cost savings over time, in addition to environmental and social benefits. The study concludes that CDW is a sustainable and effective alternative for the structural improvement of rural roads in agricultural regions, offering advantages in durability, road safety, and solid waste management.

Keywords: construction and demolition waste; rural roads; sugarcane transportation; pavement; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrada rural usada para escoamento de produção agrícola.....	17
Figura 2 – Caminhão canavieiro.....	17
Figura 3 – Camadas do pavimento	19
Figura 4 – Esquema estrutural de pavimento na cidade de São Paulo.....	22
Figura 5 – Classificação dos resíduos de construção e demolição	24
Figura 6 – Patologia em estrada rural	26
Figura 7 – Sequência de cálculo do método CBR.....	28
Figura 8 – Espessuras das Camadas do pavimento	32
Figura 9 – Ábaco para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis	33
Figura 10 – Análise granulométrica do solo	38
Figura 11 – Ensaio de limite de Plasticidade.....	38
Figura 12 – Ensaio de limite de Liquidez.....	39
Figura 13 – Gráfico Limite de Liquidez.....	43
Figura 14 – Curva granulométrica do solo	45
Figura 15 – Curva granulométrica do RCD	46
Figura 16 – Ensaio de compactação Proctor intermediário, solo e solo+RCD	47
Figura 17 – Gráfico Ensaio Mini-CBR solo	48
Figura 18 – Ensaio de ISC ou CBR solo e solo-RCD.....	49
Figura 19 – Ensaio CBR SoloRCD.....	50

LISTA TABELA

Tabela 1 – Requisitos mínimos de CBR e expansão	21
Tabela 2 – Esquema estrutural de pavimento na cidade de São Paulo	26
Tabela 3 – Principais patologias em estradas rurais	27
Tabela 4 – Fatores Climáticos	29
Tabela 5 – Fatores de Equivalência Estrutural	31
Tabela 6 – Coeficiente de equivalência Estrutural (k)	32
Tabela 7 – Valores de R em função de N	34
Tabela 8 – Classificação dos solos	41
Tabela 9 – Limite de Liquidez	43
Tabela 10 – Limite de Plasticidade	44
Tabela 11 – Análise granulométrica do solo	44
Tabela 12 – Análise granulométrica do RCD	46
Tabela 13 – Ensaio Proctor – Amostra 3	47
Tabela 14 – Valores de CBR e expansão.	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.1.1	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	ESTRADAS RURAIS	15
2.2	TRÁFEGO EM VIAS USADAS PARA ESCOAMENTO DE CANA DE AÇÚCAR.....	16
2.3	PAVIMENTAÇÃO.....	18
2.4	ESTABILIZAÇÃO DO SOLO	20
2.4.1	Materiais de base, sub-base e subleito Estabilização do solo	20
2.4.2	Solos agregados.....	21
2.4.3	Bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente	21
2.5	PAVIMENTAÇÃO COM AGREGADO DE RCD	22
2.6	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	23
2.6.1	Classificação dos Resíduos de Construção e Demolição.....	23
2.6.2	Normas dos Resíduos	25
2.7	PATOLOGIAS EM ESTRADAS VICINAIS	26
2.8	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS - MÉTODO DNIT	28
2.8.1	Cálculo de N	30
2.8.2	Dimensionamento das camadas do pavimento	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	COLETA DE AMOSTRAS	34
3.1.1	Caracterização da Área de Estudo	35
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	36
3.3	NORMAS USADAS.....	36
3.4	ENSAIOS	37
3.4.1	Análise Granulométrica	37
3.4.2	Limite de Plasticidade (LP)	38
3.4.3	Limite de Liquidez (LL)	39
3.4.4	Compactação.....	39
3.4.5	Ensaio Mini Proctor.....	40

3.4.6	Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR).....	40
3.5	MATERIAIS UTILIZADOS.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	ESTIMATIVA DE TRÁFEGO.....	41
4.2	ENSAIOS DE CLASSIFICAÇÃO.....	42
4.2.1	Limite de Liquidez (LL)	43
4.2.2	Limite de Plasticidade (LP).....	44
4.2.3	Análise granulométrica	44
4.2.3.1	Granulometria do solo	44
4.2.3.2	Granulometria do RCD	46
4.3	COMPACTAÇÃO	46
4.3.1	Compactação do Solo – Ensaio de Proctor	46
4.4	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA OU CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR).....	47
4.4.1	Ensaio Mini-CBR e Proctor.....	48
4.5	DIMENSIONAMENTO.....	50
4.5.1	Verificação da Estrutura Equivalente (Método CBR).....	52
4.6	VIABILIDADE ECONOMICA	53
5	CONCLUSÃO.....ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
	REFERÊNCIAS.....	55
	APENDICE A – ENSAIO CBR (SOLO)	59
	APENDICE B – ENSAIO CBR (RCD)	60
	ANEXO A – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO (HRB) - AASHO	61

1 INTRODUÇÃO

As estradas rurais desempenham um papel essencial na integração territorial e no escoamento da produção agrícola, especialmente em regiões cuja economia é baseada no agronegócio, entretanto, a baixa resistência estrutural de grande parte dessas vias, grande maioria não pavimentadas ou executadas com técnicas construtivas inadequadas à intensidade e ao peso do tráfego que recebem, tem resultado em sérios problemas operacionais e econômicos (Bernucci et al., 2008; DNIT, 2006).

Um dos principais desafios enfrentados pelas administrações públicas e produtores rurais está relacionado ao alto custo de manutenção dessas vias, frequentemente impactadas por deformações, buracos, erosões e perda de material devido à ação do clima e, principalmente, ao intenso tráfego de veículos pesados, é comum que essas estradas sejam utilizadas por composições canavieiras de grande porte, as quais transportam a produção do campo até as usinas, esses veículos impõem elevadas tensões ao solo, muitas vezes superiores à sua capacidade de suporte, provocando danos recorrentes e acelerando a deterioração da via (Santos et al., 2019).

A deficiência na estrutura dessas estradas está, em grande parte, associada à baixa qualidade e resistência dos solos locais, que geralmente não são estabilizados ou preparados para suportar cargas elevadas, conseqüentemente há um aumento significativo na frequência de intervenções emergenciais, como deposição de mais solo e recompactação, o que eleva os custos operacionais e compromete a eficiência logística do sistema de transporte (DNIT, 2022).

Diante desse cenário, torna-se fundamental o estudo de alternativas técnicas que visem ao melhoramento do solo e ao aumento da resistência das camadas de rolamento, de modo a garantir maior durabilidade, menor custo de manutenção e melhores condições de tráfego ao longo de todo o ano. Uma alternativa sustentável é o uso de resíduos de construção e demolição (RCD) como insumo na estabilização e reforço do solo. Esses resíduos, quando adequadamente processados, podem atuar como agentes de melhoria na estrutura do solo, promovendo aumento da resistência mecânica, redução da plasticidade e melhora nas condições de drenagem (Pinto, 2005; Freitas; Motta, 2013).

A utilização de RCD surge, portanto, como uma alternativa técnica e ambientalmente viável, considerando-se o elevado volume de resíduos gerados nos centros urbanos quanto o seu potencial de reaproveitamento em obras rodoviárias. O aproveitamento desses materiais não só contribui para a durabilidade das estradas rurais, como também favorece práticas sustentáveis, ao dar uma destinação adequada a materiais que seriam descartados. Do ponto de vista ambiental, essa prática colabora com a redução da disposição incorreta de entulhos e com a mitigação dos impactos provocados pela extração de recursos naturais. No aspecto econômico, representa uma oportunidade concreta de reduzir os gastos com manutenção e tornar a infraestrutura rural mais eficiente, principalmente em áreas de grande produção agrícola como o setor sucroenergético (CETESB, 2021; Silva; Barros, 2011).

Assim, a análise da viabilidade técnica da aplicação de RCD em estradas rurais utilizadas para o escoamento de cana-de-açúcar justifica-se não apenas pela busca por maior resistência e durabilidade das vias, mas também por seu potencial em promover uma engenharia mais sustentável, alinhada com as práticas de gestão integrada de resíduos sólidos e com os objetivos do desenvolvimento regional.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) para aumento do índice de suporte da base e subbase do pavimento de uma estrada rural usada para o escoamento de cana de açúcar no município de Rafard, SP.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar o solo local (Rafard, SP) utilizado como subbase e base e sua capacidade de suporte;
- Verificar a viabilidade técnica da aplicação de RCD como material de reforço desse solo em termos de resistência e durabilidade
- Analisar, por meio de ensaios laboratoriais (CBR e Mini Proctor), o comportamento de misturas solo-RCD;
- Calcular o número N de operações e por fim dimensionar o pavimento para o tráfego previsto para os próximos 8 anos de uso da via.
- Verificar a viabilidade econômica do uso de RCD na estabilização do solo da via rural estudada.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ESTRADAS RURAIS

As estradas rurais são vias de transporte terrestre localizadas em áreas não urbanas, destinadas principalmente ao atendimento da população rural e ao escoamento da produção agrícola, em geral, são vias de padrão técnico mais simples, na maiorias das vezes não pavimentadas, com largura reduzida e baixo volume de tráfego. São fundamentais para garantir a integração social e econômica de comunidades do campo, conectando propriedades agrícolas e distritos aos centros urbanos e às rodovias de maior porte.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), as estradas rurais têm um papel essencial para o desenvolvimento regional, pois permitem o transporte de insumos, o acesso à assistência técnica e o escoamento eficiente da produção (DNIT, 2006).

De acordo com o Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais do DER-SP (1987), essas vias são classificadas como estradas vicinais, sendo, portanto, de jurisdição municipal. Ainda segundo esse manual, quando essas vias são pavimentadas, passam a ser chamadas de rodovias vicinais, e quando não são pavimentadas, mantêm a denominação de estradas vicinais, estando inseridas no sistema viário como vias locais.

Estradas rurais é um termo que inclui qualquer via de tráfego situada fora das áreas urbanas, incluindo estradas internas de fazendas, caminhos de acesso a áreas de preservação, vias para escoamento agrícola, entre outras, as estradas vicinais são um subconjunto das estradas rurais, geralmente definidas como vias de baixa capacidade, não pavimentadas, que fazem parte da rede viária local, conectando propriedades ou comunidades a estradas maiores (coletoras e arteriais).

Além do aspecto técnico, as estradas rurais também têm função social e territorial, promovendo a mobilidade da população rural, o acesso à educação e saúde, e contribuindo para a redução das desigualdades entre campo e cidade (Silva e Barros, 2011).

As estradas vicinais, geralmente são vias de responsabilidade municipal, não muito complexas tecnicamente, podendo ser pavimentadas ou não, e compostas, em

geral, por pista única. Classificam-se como vias locais, destinadas a atender um tráfego de baixa intensidade, compatível com o uso predominantemente rural. No entanto, com os avanços tecnológicos no setor agrícola e a modernização dos equipamentos de transporte, observa-se uma mudança significativa na função atribuída a essas vias.

Atualmente, em diversas regiões, as estradas vicinais têm sido utilizadas para o escoamento de grandes volumes de produção agrícola, por meio de veículos de grande porte, com composições que chegam a até nove eixos. Exemplos desse uso incluem o transporte de cana-de-açúcar para usinas de açúcar e álcool, bem como o escoamento de grãos em larga escala voltados à exportação.

Diante desse novo cenário, as estradas e rodovias vicinais passaram a desempenhar funções que extrapolam sua concepção inicial, como complementar a atuação das vias coletoras e arteriais, promovendo sua alimentação; contribuir para a integração territorial, demográfica e cultural das regiões onde estão inseridas; favorecer a elevação da renda no setor primário, ao facilitar o escoamento da produção agropecuária, agroindustrial e mineral; além de permitir o acesso a áreas de interesse turístico, histórico e cultural, entre outras.

Convém destacar, ainda, que há uma distinção entre essas vias: aquelas que são pavimentadas são denominadas rodovias vicinais, enquanto as não pavimentadas mantêm a designação de estradas vicinais (DER-SP, 1987).

2.2 TRÁFEGO EM VIAS USADAS PARA ESCOAMENTO DE CANA DE AÇÚCAR

As estradas rurais, especialmente aquelas classificadas como vicinais, desempenham papel fundamental no escoamento da produção agrícola em diversas regiões do Brasil, particularmente nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Essas vias, por serem de jurisdição municipal, muitas vezes não recebem investimentos proporcionais à sua importância econômica e social, resultando em infraestrutura deficiente para suportar o tráfego intenso e pesado típico das atividades agroindustriais (Figura 1) (Silva; Barros, 2011).

Figura 1 – Estrada rural usada para escoamento de produção agrícola



Fonte: Autoria própria

O transporte da cana-de-açúcar é realizado, na maioria dos casos, por composições canavieiras de grande porte (Figura 2), que geram elevadas cargas por eixo e provocam solicitações significativas sobre o pavimento.

Figura 2 – Caminhão canavieiro



Fonte: <https://estradao.estadao.com.br/>

Segundo o Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais do DER-SP (1987), tais estradas geralmente seguem traçados preexistentes, com condições geométricas e estruturais limitadas, e muitas vezes não pavimentadas, o que contribui para o surgimento de patologias como afundamentos, trilhas de roda e buracos. Essas condições não apenas comprometem a eficiência logística da cadeia produtiva, como também elevam os custos operacionais e de manutenção das vias, reforçando a necessidade de intervenções técnicas que aumentem sua capacidade estrutural e durabilidade.

2.3 PAVIMENTAÇÃO

Os pavimentos rodoviários devem assegurar condições de condução segura e confortável aos condutores (funções funcionais), resistir aos esforços induzidos pelo tráfego e às ações climáticas (funções estruturais), ao longo do período de vida útil.

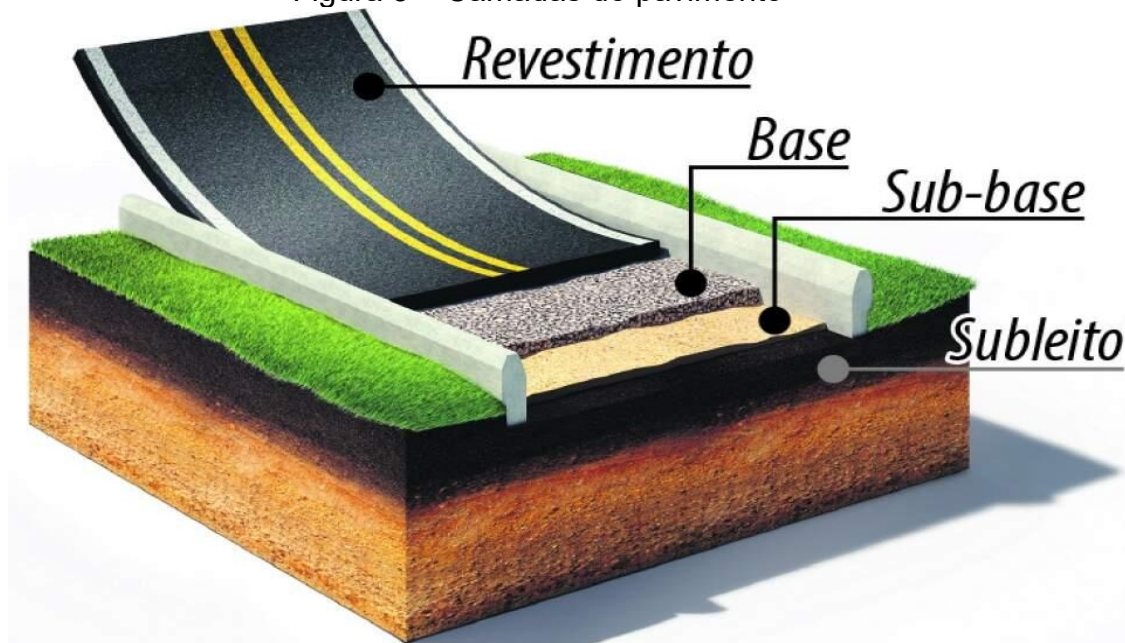
O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem DNER (1997, p.194), descreve pavimento como:

Estrutura construída após a terraplenagem, destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos dos veículos, a melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e a resistir aos esforços horizontais tornando mais durável a superfície e rolamento

A pavimentação aumenta a resistência da via à ação do tráfego e aos agentes climáticos, reduzindo significativamente os custos de manutenção rotineira. Segundo o DNER (1996), os pavimentos têm como objetivo principal fornecer uma superfície de rolamento confortável, segura e economicamente viável, devendo ser projetados conforme o tipo de solo, volume de tráfego e disponibilidade de materiais, a pavimentação também minimiza a formação de poeira em épocas secas, melhora a aderência dos veículos e reduz o tempo de deslocamento, o que impacta diretamente na produtividade econômica e na eficiência do transporte.

A Figura 3 traz as camadas que compoem um pavimento.

Figura 3 – Camadas do pavimento



Fonte: Bandeira et al, 2024

A pavimentação de estradas rurais tem um importante papel no desenvolvimento socioeconômico das regiões interioranas, promovendo melhorias significativas na mobilidade, na integração territorial e no escoamento da produção agropecuária. Além de facilitar o deslocamento da população local, a pavimentação garante melhores condições de tráfego durante todo o ano, especialmente nos períodos chuvosos, quando as vias não pavimentadas frequentemente se tornam intransitáveis devido à formação de lama, erosões e atolamentos (DER-SP, 1987).

No aspecto social, a pavimentação de vias rurais é essencial para garantir o acesso da população a serviços básicos como educação, saúde e assistência técnica, contribuindo diretamente para a redução das desigualdades entre o meio urbano e o rural. Conforme Silva e Barros (2011), a acessibilidade proporcionada por uma rede viária de melhor qualidade é fator-chave para o fortalecimento da agricultura familiar e para a permanência das famílias no campo.

Ainda segundo o DER-SP (1987), as estradas vicinais pavimentadas passam a ser classificadas como rodovias vicinais, assumindo papel estruturante na malha viária municipal. Isso reforça sua relevância para a logística regional, promovendo integração entre comunidades e fortalecendo cadeias produtivas locais, portanto, investir na pavimentação de estradas rurais é uma estratégia de desenvolvimento com

efeitos duradouros, não apenas melhora as condições técnicas da via, mas também transforma realidades sociais, promovendo qualidade de vida, inclusão territorial e sustentabilidade econômica para as populações do campo.

2.4 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

A estabilização de solos é uma técnica amplamente utilizada na engenharia e na construção de pavimentos, especialmente em regiões onde os solos naturais não possuem resistência ou suporte suficientes para atender às exigências do tráfego. Seu objetivo principal é melhorar as características físicas e mecânicas dos solos locais por meio da adição de estabilizantes ou pelo uso de materiais alternativos, como os resíduos de construção e demolição (RCD), promovendo maior resistência, durabilidade e economia nas obras viárias (Bernucci et al., 2008; Pinto, 2005).

Nas estradas rurais, em especial aquelas utilizadas para o escoamento da produção agrícola como a cana-de-açúcar, a estabilização do solo torna-se ainda mais necessária devido ao tráfego intenso de veículos pesados, como composições canavieiras, a melhoria da estrutura do subleito e das camadas de rolamento visa aumentar a vida útil do pavimento, reduzir a manutenção e assegurar melhores condições de trafegabilidade (DNIT, 2022).

2.4.1 Materiais de base, sub-base e subleito Estabilização do solo

Os materiais que constituem as camadas de base, sub-base e reforço de subleito são formadas por solos granulares e/ou agregados naturais, como brita, porém, suas propriedades precisam ser estudadas, pois podem interferir na capacidade de suporte do pavimento. Também devem ser pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura (Bernucci et al, 2007).

De acordo com Lopes (2019) o pavimento, quando analisado por suas camadas, é construído conforme a necessidade viária, sendo possível encontrar pavimentos com maior ou uma menor rigidez estrutural, sendo então muito complicado adequar os parâmetros de elasticidade com os materiais a serem utilizados.

Seguindo as orientações do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), os materiais do subleito devem apresentar uma expansão, menor ou igual a 2% e um Índice de Suporte Califórnia (ISC), também conhecido como *California Bearing Ratio* (CBR), definida pelo ensaio de CBR, norma NBR 9895 (ABNT, 1987) e pela norma DNIT172-ME (DNIT, 2016) maior ou igual 2%. Já os materiais para reforço do subleito, devem

apresentar CBR, maior que o do subleito, e expansão menor ou igual a 1%. Os materiais para sub-base devem apresentar CBR maior ou igual a 20%, e expansão menor que 1%. Materiais para base, CBR maior ou igual a 80% e expansão maior que 0,5% para um número de repetições do eixo padrão ($N > 5 \times 10^6$), caso $N \leq 5 \times 10^6$, aceita-se o emprego de materiais com CBR igual a 60%, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos mínimos de CBR e expansão

Camada	CBR mín(%)	Expansão máx (%)
Subleito	≥ 2	≤ 2
Reforço do subleito	$> \text{CBR do subleito}$	≤ 1
Sub-base	≥ 20	< 1
Base ($N > 5 \times 10^6$)	≥ 80	$> 0,5$
Base ($N \leq 5 \times 10^6$)	≥ 60	$> 0,5$

Fonte: Adaptado de DNIT (2006); ABNT NBR 9895/1987; DNIT 172/2016

2.4.2 Solos agregados

Os materiais mais usados na pavimentação são: brita; macadame hidráulico; macadame seco; misturas estabilizadas granulometricamente ou quimicamente; mistura solo-brita; solo natural e solo melhorado com cimento ou cal, existem outros materiais que vêm sendo usados na pavimentação como escória de alto-forno, agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil (objeto de estudo), rejeitos da extração de rochas ornamentais e mistura asfáltica fresada (Bernucci et al, 2007).

As misturas solo-agregado, também conhecido como solo-brita, são definidas como misturas de solos naturais mais brita ou pedregulho, ou ainda, são areias que contenham silte e argila. Os solos agregados são subdivididos em três tipos dependendo da proporção relativa entre a parte graúda e a parte fina. Segundo Yoder e Witczak (1975 apud Oliveira Jr, Ayres e Araújo, 2018, p. 4) “essas subdivisões são classificadas como solo agregados sem finos, solo agregado com fino e solo agregados com muito fino”.

2.4.3 Bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT 139, 2010, p.2) define estabilização granulométrica como:

Processo de melhoria da capacidade resistente de materiais “in natura” ou mistura de materiais, mediante emprego de energia de compactação adequada, de forma a se obter um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade.

Para uma padronização de base e sub-base foram elaborados documentos (DNIT 141, 2010 e DNIT 139, 2010) que regulamentam as condições específicas para os insumos utilizados nas respectivas camadas citadas, tal norma cita que todos os materiais usados na base e sub-base têm que dispor de uma composição granulométrica satisfatória, levando em conta um número de tráfego e também diversos tipos de ensaios e testes de limites.

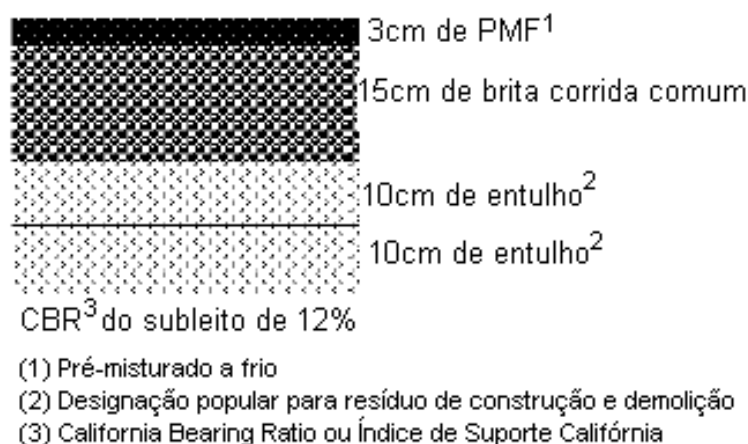
Quando não se tem a estabilização com ligante hidráulico asfáltico, tais camadas quando bem graduadas são nomeadas de “camadas estabilizadas granulometricamente”, onde adota-se uma estabilização estritamente mecânica (Balbo, 2007).

2.5 PAVIMENTAÇÃO COM AGREGADO DE RCD

Um estudo realizado por Grubba (2009), demonstrou que o agregado reciclado de concreto é uma boa opção de substituição dos agregados naturais (como a brita) em camadas de base e sub-base de pavimentos.

A primeira via que recebeu RCD no seu esquema estrutural, foi executada na cidade de São Paulo, em 1984, na região oeste da cidade, tendo como característica pouco volume de tráfego, notou-se bom desempenho assegurado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) que acompanhou a sua construção (Leite, 2007), sua composição é apresentada na Figura 4:

Figura 4 – Esquema estrutural de pavimento na cidade de São Paulo



Fonte: Motta (2005)

2.6 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

A construção civil é um dos setores que mais cresce no Brasil e no mundo, de acordo com a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (2012), esse segmento é considerado um dos principais indicadores de crescimento econômico global, podendo representar até 15% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial. Além de gerar milhões de empregos, o setor é também responsável por um elevado consumo de recursos naturais — cerca de 75% dos insumos extraídos da natureza — e por quase metade de toda a energia consumida globalmente (Bastos, 2016).

Contudo, esse avanço vem acompanhado de significativos impactos ambientais. O Panorama de Resíduos Sólidos da ABRELPE (2023) mostra que, somente em 2023, o Brasil gerou aproximadamente 44,46 milhões de toneladas de resíduos da construção e demolição (RCD), ainda que com uma leve redução de 1,3% em relação ao ano anterior. Tais números evidenciam a urgência de buscar soluções sustentáveis para o setor da construção, por meio do desenvolvimento de técnicas que priorizem o uso racional de recursos e a reutilização de materiais.

Nesse contexto, torna-se imprescindível o envolvimento de pesquisadores, engenheiros e empresas da construção civil na busca por alternativas sustentáveis. Entre essas alternativas destaca-se o uso de materiais reciclados, como agregados reciclados que vêm sendo estudados como substitutos parciais ou totais de agregados naturais em aplicações como pavimentação flexível e rígida, ou em misturas betuminosas. Diversos estudos (Barreto e Amorim, 2020, Tavares, 2017; Hortegal, Ferreira e Sant'Ana, 2009; entre outros) já demonstraram a viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização dos RCD como insumo para obras rodoviárias.

Com o objetivo de regulamentar e estimular a correta destinação e reaproveitamento desses resíduos, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) instituiu a Resolução nº 307/2002. Essa normativa estabelece diretrizes para a gestão dos resíduos da construção civil, classificando-os por categorias e determinando formas adequadas de reaproveitamento e disposição final, promovendo assim uma abordagem mais sustentável para o setor.

2.6.1 Classificação dos Resíduos de Construção e Demolição

A classificação dos resíduos se baseia em diversos critérios. Dependendo de sua origem são divididos em urbanos, industriais, serviços de saúde, construção e demolição, perigosos.

A resolução CONAMA nº 307 (CONAMA, 2002) classifica os resíduos da construção civil da seguinte forma:

- Classe A – são resíduos reutilizáveis ou recicláveis, como agregados, tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, argamassas, concretos, tubos, meio-fio, solos de terraplanagem, etc;
- Classe B – são resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel/papelão, metais, madeiras, etc;
- Classe C – resíduos ainda sem tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para a sua reciclagem/recuperação, tais como os oriundos do gesso (tratamento pelo gerador);
- Classe D – perigosos, como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados (tratamento pelo fabricante).

A Figura 5 traz a classificação de acordo como a Resolução CONAMA 307 (2002).

Figura 5 – Classificação dos resíduos de construção e demolição



Fonte: <https://www.pgrsbrasil.com.br>, s.d.

A Resolução CONAMA nº 431, de 2011, traz alteração na classificação dos resíduos da construção civil pois reclassifica o gesso como reciclável passando da Classe C para a Classe B (reciclável). Posteriormente, a Resolução CONAMA nº 469, de 2015, incluiu as embalagens vazias de tintas imobiliárias na Classe B, desde que contenham apenas película seca em seu interior, sem presença de tinta líquida residual.

Os agregados reciclados da Classe A possuem propriedades técnicas adequadas para reutilização em pavimentação, edificações e outras aplicações na construção civil. De acordo com a norma NBR 15111 (ABNT, 2021), eles são classificados em dois tipos: misto e de concreto. Os agregados de concreto devem conter pelo menos 90% em massa de fragmentos cimentícios e rochas naturais na fração gráuda, enquanto os mistos apresentam uma composição inferior a esse limite. Entre essas categorias, os agregados reciclados de concreto se destacam como os mais recomendados para aplicações estruturais, devido à sua maior uniformidade e desempenho mecânico.

Amorim, (2013) destaca que os RCD geralmente apresentam uma composição bastante heterogênea, o que dificulta a formulação de um modelo padronizado para sua caracterização e aplicação, independentemente da origem do resíduo.

A variedade de materiais presentes nos RCD ainda causa certa hesitação em sua utilização na engenharia civil (Vazquez, 2001; Oliveira, 2007). No entanto, os benefícios econômicos da reutilização são expressivos. De acordo com Carneiro et al. (2001), o reaproveitamento dos RCD em obras públicas, em vez de seu descarte em aterros, pode gerar uma redução de até 75% nos custos totais relacionados aos serviços de limpeza urbana em prefeituras.

Nesse contexto, Amorim (2013) ressalta ainda, a importância de realizar uma caracterização físico-química detalhada dos RCD, a fim de orientar sua utilização adequada em diferentes aplicações, o autor também destaca a necessidade de realizar uma triagem criteriosa dos resíduos, removendo e descartando, de maneira ambientalmente correta, os materiais que não apresentem viabilidade de reaproveitamento, seja em aterros sanitários comuns ou em aterros específicos para resíduos da construção civil.

2.6.2 Normas dos Resíduos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), implantou normas a serem seguidas para a utilização dos agregados que pudessem ser reutilizados, devido à falta de infraestrutura para o manuseio dos mesmos, tal como a Norma NBR 15115 (ABNT, 2004), quando o assunto é estudo sobre pavimentação, também se deve obedecer as normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, na Tabela 2 estão algumas das normas para o uso do RCD.

Tabela 2 – Esquema estrutural de pavimento na cidade de São Paulo

Norma	Descrição
NBR 15112/2004	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15113/2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15114/2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15115/2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.
NBR 15116/2004	Agregados reciclados de resíduos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Fonte: Adaptado de ABNT (2004)

O agregado utilizado nas obras de construção civil, devem ser submetidos a testes atendendo suas necessidades mínimas, como, resistência, durabilidade e estabilidade.

2.7 PATOLOGIAS EM ESTRADAS VICINAIS

As estradas rurais, especialmente as não pavimentadas servem, na grande maioria, para o escoamento da produção agroindustrial, no acesso a serviços básicos e na integração territorial, entretanto, a ausência de manutenção periódica, aliada ao tráfego intenso de veículos pesados e à vulnerabilidade frente às condições climáticas, contribui significativamente para o surgimento de diversas patologias que comprometem a eficiência e a segurança dessas vias, como exemplona Figura 6.

Figura 6 – Patologia em estrada rural



Fonte: Autoria própria.

De acordo com o Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais (DER-SP, 1987) e com estudos mais recentes como o de Valle Júnior e Nascimento (2018), as patologias mais comuns em estradas rurais incluem erosão, atoleiros, costelas de vaca, buracos, assoreamento de valetas, desagregação do revestimento e afundamentos nas trilhas de roda, essas falhas impactam negativamente o tráfego, geram altos custos operacionais e dificultam o desenvolvimento socioeconômico das comunidades atendidas, a Tabela 3 apresenta as principais patologias, suas causas e consequências.

Tabela 3 – Principais patologias em estradas rurais

Patologia	Descrição	Causas Comuns	Consequências
Erosão	Desgaste do solo por ação da água	Drenagem deficiente, declividade acentuada, taludes instáveis	Formação de sulcos, danos à via, degradação ambiental
Atoleiros	Acúmulo de lama que impede o tráfego	Falta de escoamento da água, tráfego intenso em solo saturado	Veículos presos, interrupção de tráfego
Costelas de vaca	Ondulações transversais na pista	Compactação inadequada, tráfego repetitivo	Desconforto, danos mecânicos aos veículos
Buracos e panelas	Cavidades na superfície da estrada	Infiltração de água, desgaste natural, falta de manutenção	Acidentes, maior desgaste veicular
Assoreamento de valetas/bueiros	Acúmulo de sedimentos em canais de drenagem	Erosão em taludes, ausência de manutenção	Alagamentos, falha na drenagem
Desagregação do revestimento	Perda do material de cobertura (cascalho)	Uso de material inadequado, falta de compactação	Exposição do subleito, aumento da manutenção
Afundamentos (trilhas de roda)	Depressões ao longo do caminho dos pneus	Excesso de carga, solo com baixa capacidade de suporte	Acúmulo de água, risco de atolamento

Fonte: Adaptado de DER-SP (1987); DNIT (2006); Valle Júnior e Nascimento (2018); Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro (2020).

A fim de mitigar os danos causados por essas patologias, diversas soluções técnicas são recomendadas, as estradas rurais, sobretudo as não pavimentadas, estão suscetíveis a patologias específicas que variam conforme o tipo de solo, o volume de tráfego, a topografia da região e a presença (ou ausência) de infraestrutura adequada. A erosão, por exemplo, pode ser controlada com a instalação de dispositivos como sarjetas, lombadas hidráulicas e bueiros, conforme mostra o Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006), já buracos decorrentes de baixa compactação e infiltração exigem preenchimento com material granular seguido de compactação adequada, como orienta o Manual de Conservação Rodoviária do DER-SP (1987).

Já os empoçamentos resultam de falhas no abaulamento da via, e sua correção envolve a reconfiguração da pista com declividade transversal de 2% a 5%, permitindo

o escoamento eficiente das águas pluviais (DNIT, 2006). As chamadas costelas de vaca exigem a regularização da via com motoniveladora e nova compactação. Afundamentos e recalques, por sua vez, exigem intervenções mais robustas, como substituição do subleito (DNER, 1994).

A adoção de medidas preventivas e corretivas contribui para a durabilidade, funcionalidade e segurança das estradas vicinais, assegurando a mobilidade no meio rural, a redução de custos operacionais e o acesso contínuo a serviços públicos essenciais, o que reflete diretamente no desenvolvimento socioeconômico das regiões atendidas (DER-SP, 1987; DNIT, 2006; DNER, 1994; DNER, 1996; Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, 2020).

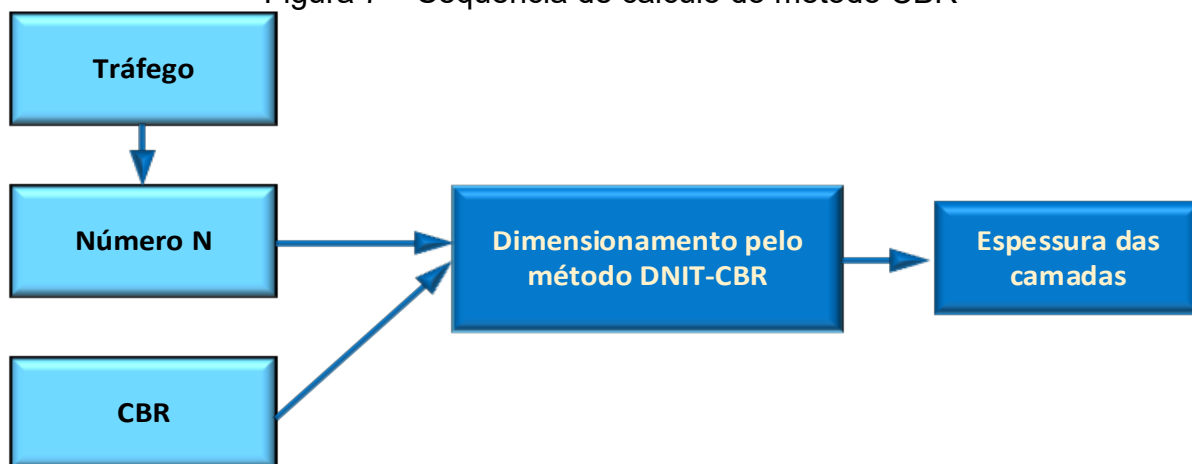
2.8 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS - MÉTODO DNIT

O método baseia-se no estudo Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume, desenvolvido por W.J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA. Além disso, considera as conclusões obtidas a partir da Pista Experimental da AASHTO (Elias, 2018).

Após a proposição de algumas adaptações, o método foi oficializado como método de dimensionamento oficial do Brasil (DNER, 1981).

O método tem como principal premissa garantir a proteção do subleito quanto à deformações plásticas. Assim, a estrutura do pavimento deve ser projetada com uma espessura total para que o subleito possa suportar os esforços impostos pelo carregamento e pelo intemperismo. A Figura 7 apresenta um esquema a ser seguido para o dimensionamento.

Figura 7 – Sequência de cálculo do método CBR



Fonte: Adaptado de Silva (S.d)

Para dimensionar um pavimento é preciso determinar as espessuras das camadas que o constituem de forma que elas resistam e transmitam ao subleito as pressões impostas pelo tráfego, sem levar o pavimento à ruptura ou a deformações e a desgastes excessivos (Chiarello, Nascimento e Marques, 2016), um fator determinante para o dimensionamento é o Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR). O Índice de Suporte Califórnia (ISC) mede a capacidade de suporte de um solo compactado. Este por sua vez permite verificar a resistência do solo e sua expansão e deve ser executado de acordo com a norma do DNIT-172/2016-ME (2016).

Quanto aos materiais que compõem o pavimento:

- **Subleito:** Os materiais do subleito devem apresentar uma expansão, medida pelo ensaio CBR, igual ou inferior a 2%, além de um CBR maior ou igual a 2%.

- **Tráfego:** o dimensionamento do pavimento é baseado no número equivalente (N) de operações de um eixo padrão ao longo do período de projeto escolhido. Esse número representa a carga acumulada que o pavimento deverá suportar, garantindo sua durabilidade e desempenho ao longo do tempo.

- **Fator Climático Regional (FR):** as variações de umidade dos materiais do pavimento durante o ano afetam a capacidade de suporte. Havendo falta de dados, podem-se adotar valores médios a serem estabelecidos por região, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores Climáticos

Altura média anual de chuva (mm)	Fator climático Regional (FR)
Até 800	0,7
De 800 a 1.500	1,4
Mais 1.500	1,8

Fonte: Adaptado de DNER, 2006.

O número equivalente de operações do eixo padrão (N) deve ser ajustado por um coeficiente (F.R.). Esses ajustes garantem um dimensionamento mais preciso, considerando os impactos climáticos sobre a estrutura do pavimento.

2.8.1 Cálculo de N

O número de operações equivalente(N) é determinado pela equação 1:

$$N = 365 \cdot V_m \cdot P \cdot FC \cdot FE \cdot FR \quad (1)$$

Sendo:

V_m = Volume médio diário de tráfego no sentido crítico;

P = Período de projeto;

FC = Fator de carga;

FE = Fator de eixo;

FR = Fator climático regional;

Para o cálculo de Volume médio deve ser considerado o volume de tráfego no primeiro e último ano de operação, conforme equação 2:

$$V_M = \frac{V_1 + V_P}{2} \quad (2)$$

Sendo:

V_1 – 1º ano de operação

V_P – último ano do período

Já o volume total de tráfego (todos os veículos) é dado pela equação 3:

$$V_T = 365 \times V_M \times P \quad (3)$$

Para a conversão desse volume em veículos comerciais equivalentes, são aplicados os seguintes fatores de correção:

- **Fator de Eixo (FE):** definido pelo DNER (1996) como o “número que, multiplicado pelo número de veículos dá o número de eixos correspondentes”. É cálculo pela equação 4.

$$FE = \left(\frac{p_2}{100}\right) \times 2 + \left(\frac{p_3}{100}\right) \times 3 + \dots + \left(\frac{p_n}{100}\right) \times n \quad (4)$$

Sendo:

- p_2 : porcentagem de veículos de 2 eixos;

- p_3 : porcentagem de veículos de 3 eixos;

- p_n : porcentagem de veículos de n eixos;

- **Fator de Carga (FC):** O cálculo do fator de carga é baseado no conceito de equivalência de operações. O fator de equivalência de operações é um parâmetro que relaciona o efeito da passagem de qualquer tipo de veículo sobre o pavimento com o efeito provocado pela passagem de um veículo considerado padrão. No método, o veículo padrão adotado é o veículo americano de 18.000 libras por eixo simples de roda dupla, ou seja, 9.000 libras como carga de roda. Sendo o veículo padrão de 18.000 libras por eixo simples, ou seja, 8,2 tf por eixo simples, veículos com carga por eixo simples superior a 8,2 tf terão fator de equivalência de operações maior que a unidade. A Tabela 5 traz os fatores de equivalência estrutural para eixos simples e tandem

Tabela 5 – Fatores de Equivalência Estrutural

Eixos simples carga por eixo (tf)	Fator de equivalência estrutural (f)	Eixos em tandem carga por eixo (tf)	Fator de equivalência estrutural (f)	Eixos em tandem carga por eixo (tf)	Fator de equivalência estrutural (f)
1,0	0,0	1,0	0,0	21,0	30,0
2,0	0,0	2,0	0,0	22,0	35,0
3,0	0,0	3,0	0,0	23,0	45,0
4,0	0,1	4,0	0,0	24,0	55,0
5,0	0,1	5,0	0,0	25,0	70,0
6,0	0,2	6,0	0,1	26,0	80,0
7,0	0,5	7,0	0,1	27,0	100,0
8,0	1,0	8,0	0,2	28,0	130,0
9,0	2,0	9,0	0,4	29,0	160,0
10,0	3,0	10,0	0,6	30,0	190,0
11,0	6,0	11,0	0,7		
12,0	9,0	12,0	1,3		
13,0	15,0	13,0	2,0		
14,0	25,0	14,0	3,1		
15,0	40,0	15,0	4,0		
16,0	50,0	16,0	6,0		
17,0	80,0	17,0	7,0		
18,0	110,0	18,0	10,0		
19,0	200,0	19,0	15,0		
20,0	260,0	20,0	20,0		

Fonte: DNER, 2006

Note que tanto o conceito de FE como o do FC é relativo a todos os eixos que operam na via, portanto um conceito associado à frota, e não a cada categoria de veículo.

- **Fator de Veículo (FV):** Definido pelo produto entre o Fator Carga e o Fator Eixo, fator que transforma o tráfego real em um tráfego equivalente de eixos padrão. Dado pela equação 5

$$FV = FExFC \quad (5)$$

2.8.2 Dimensionamento das camadas do pavimento

Os valores dos coeficientes de equivalência estrutural dependem do tipo de material construtivo utilizado no pavimento, como mostra Tabela 6.

Tabela 6 – Coeficiente de equivalência Estrutural (k)

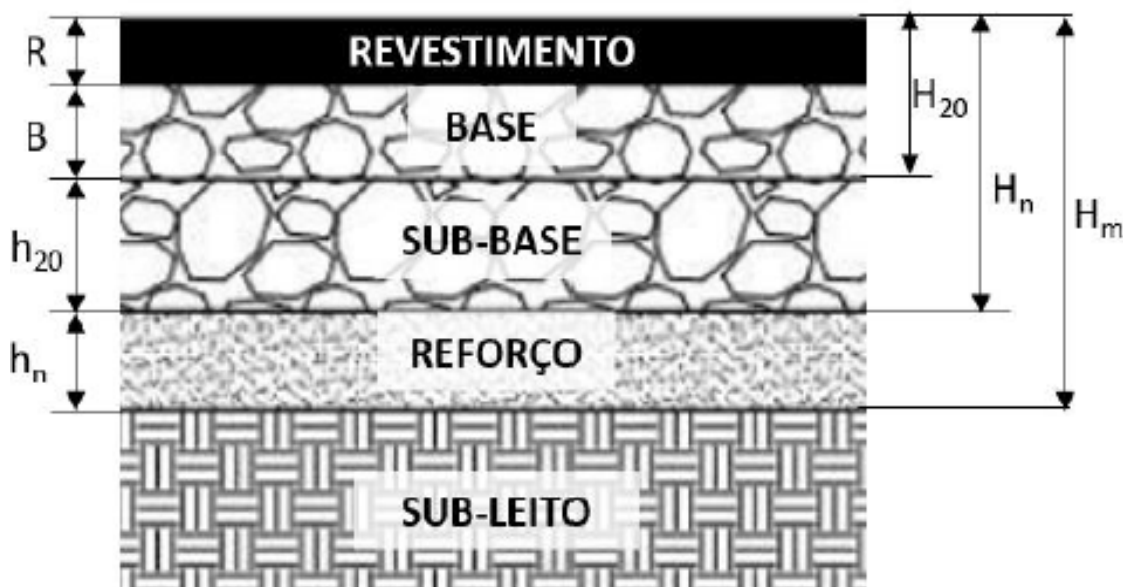
Componentes dos pavimentos	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento por penetração	1,20
Base granular	1,00
Sub-base granular	0,77 (1,00)
Reforço do subleito	0,71 (1,00)
Solo-cimento (resistência à compressão em 7 dias > 45kgf/cm ²)	1,70
Idem (resistência à compressão em 7 dias entre 45kgf/cm ² e 35kgf/cm ²)	1,40
Idem (resistência à compressão a 7 dias inferior 35kgf/cm ²)	1,00

Fonte: Senço, 2001

Cada camada possui um coeficiente de equivalência estrutural (k), que relaciona a espessura que a camada deve possuir de material padrão (base granular), com a espessura equivalente do material que realmente irá compor a camada.

Assim, considerando o CBR dos materiais e o número N de projeto, definem-se as espessuras H_m , H_n e H_{20} (Figura 8).

Figura 8 – Espessuras das Camadas do pavimento



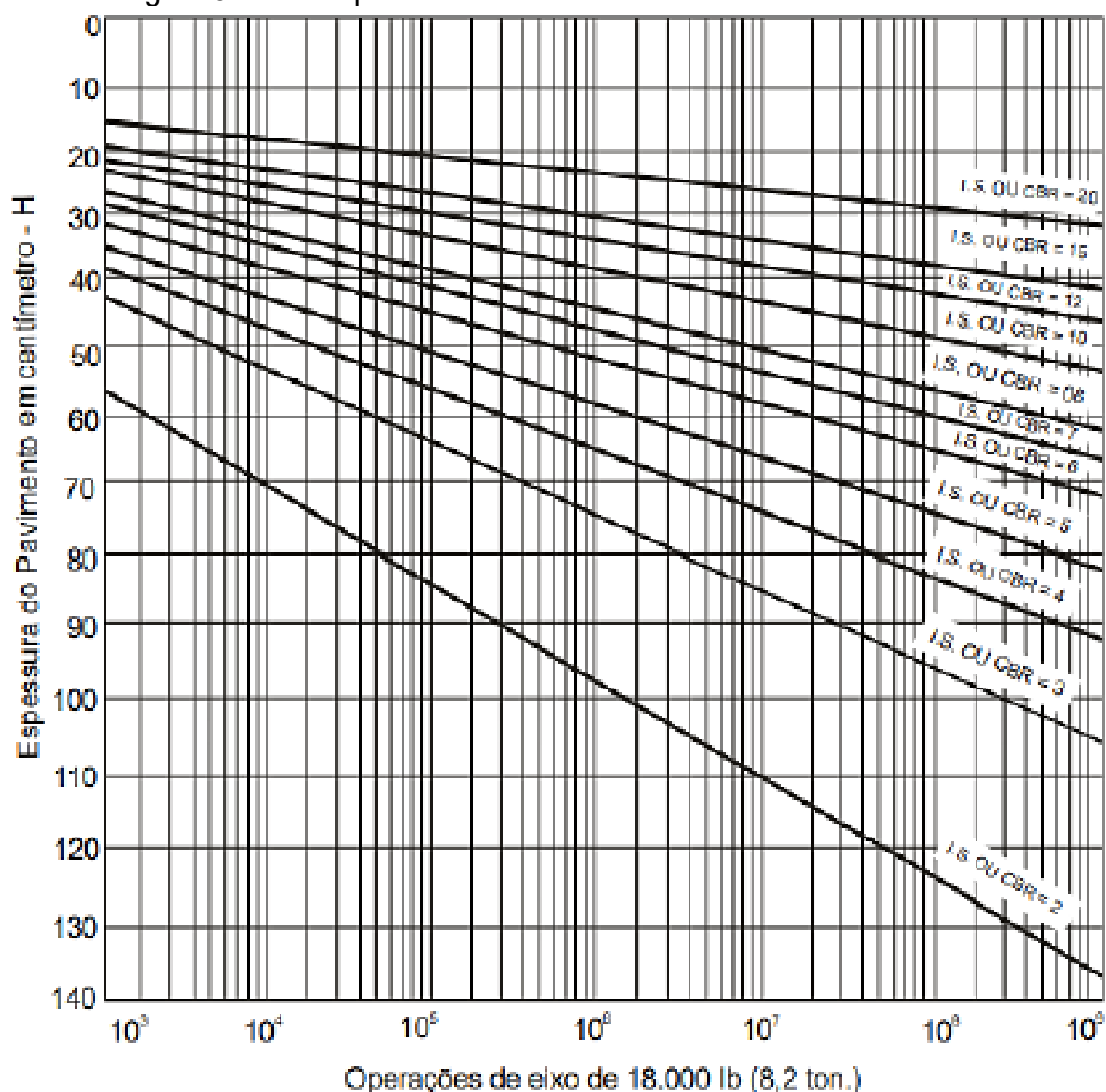
Fonte: Cava, 2018

O ábaco da Figura 10 dá a espessura total do pavimento, em função de N e do C.B.R.; a espessura fornecida por este ábaco é em termos de base granular.

Entrando-se em abscissas, com o valor de N, procede-se verticalmente até encontrar a reta representativa da capacidade de suporte (I.S. ou C.B.R.) e, procedendo-se horizontalmente, encontra-se, em ordenadas, a espessura do pavimento. Supõe-se sempre, que há uma drenagem superficial adequada e que o lençol d'água subterrâneo foi rebaixado a, pelo menos, 1,50 m em relação ao greide de regularização.

Outra observação é que mesmo que o C.B.R. da sub-base seja superior a 20 %, a espessura do pavimento necessário para protegê-la (H20) é determinada como se esse valor fosse 20 % (DNER, 2006).

Figura 9 – Ábaco para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis



Fonte: DNER, 2006.

Em função do número equivalente “N” de operações do eixo padrão, o tipo e

espessura são dados conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de R em função de N

N	R _{min} (cm)	Tipo de revestimento
Até 10 ⁶	2,5 - 3,0	Tratamento Superficial
10 ⁶ a 5 x 10 ⁶	5	Revestimento Betuminoso
5 x 10 ⁶ a 10 ⁷	5	Concreto betuminoso
10 ⁷ a 5 x 10 ⁷	7,5	Concreto betuminoso
Mais de 5 x 10 ⁷	10	Concreto betuminoso

Fonte: DNER, 2006.

Uma vez determinadas as espessuras R , H_m , H_n , H_{20} pelo ábaco e determinados os coeficientes de as espessuras de base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n), são obtidas pela resolução sucessiva das inequações

$$R \cdot k_R + B \cdot K_B \geq H_{20} \quad (6)$$

$$R \cdot k_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_S \geq H_n \quad (7)$$

$$R \cdot k_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot k_S + h_n K_{ref} \geq H_m \quad (8)$$

As espessuras mínimas para as camadas de base e sub-base compactadas é de 15 cm (DNIT,2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido por meio de uma pesquisa bibliográfica com base em livros, teses, dissertações, manuais revistas periódicas e sites na internet, permitindo que se obtivesse conhecimentos necessários para o começo da pesquisa exploratória.

3.1 COLETA DE AMOSTRAS

A coleta das amostras de solo foi realizada em pontos de uma estrada rural, onde há evidência de degradação recorrente. Foram coletadas amostras indeformadas com massa aproximada de 10 kg, em profundidades de 2,0 m e 5,0 m, de modo a representar adequadamente as camadas inferiores do subleito da via, e foram

encaminhados ao laboratório para a classificação do solo e a verificação da sua viabilidade para uso em camada de base e sub bases de pavimentos flexíveis, seguindo as especificações da NBR 6457 (ABNT, 1986) que trata de amostras de solos-preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Os agregados utilizados para o desenvolvimento da pesquisa foram coletados na usina de produção de agregado reciclado de resíduos de construção e demolição, próximo a cidade.

3.1.1 Caracterização da Área de Estudo

O município de Rafard, localizado na região de Piracicaba, interior do estado de São Paulo, foi selecionado como área de estudo devido à sua expressiva atividade agrícola, com destaque para o cultivo de cana-de-açúcar, com uma população estimada em cerca de 9 mil habitantes (IBGE, 2025), abriga a Usina Rafard.

As estradas rurais do município são amplamente utilizadas para o escoamento da produção agrícola, especialmente durante a safra, período em que há intenso tráfego de veículos pesados, como composições canavieiras.

A região apresenta clima tropical de altitude, com verões quentes e úmidos e invernos secos e amenos. As temperaturas médias anuais variam entre 15°C e 29°C, com umidade relativa entre 50% e 80%. A média histórica de precipitação no mês de maio é de aproximadamente 61 mm (CLIMATEMPO, 2025). Tais condições climáticas influenciam diretamente na durabilidade das estradas não pavimentadas, especialmente em épocas de chuva.

No que diz respeito às características do solo, o município está inserido em uma região com predominância de Latossolos, Cambissolos e Planossolos, com relevo suavemente ondulado. A geologia local é composta por arenitos, argilitos e siltitos da Formação Itararé, além de ocorrências de basaltos e diabásios. Essas condições interferem na capacidade de suporte do solo e na suscetibilidade a patologias como afundamentos e erosões (Oliveira, 1982). Assim, Rafard representa um cenário realista e tecnicamente adequado para o desenvolvimento de um estudo de caso voltado à aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) como solução para melhoria da infraestrutura viária rural.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

As amostras foram encaminhadas ao laboratório para a realização de ensaios de caracterização geotécnica, conforme metodologias recomendadas pelo DNIT, os ensaios realizados incluíram:

- Ensaio de compactação (Mini Proctor) para obtenção da densidade máxima seca e do teor de umidade ótimo;
- Ensaio de CBR (California Bearing Ratio) para avaliar a capacidade de suporte do solo;
- Granulometria, Limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) para classificação do solo segundo o Sistema HRB

Esses ensaios forneceram subsídios para a avaliação do comportamento mecânico do solo sob as cargas previstas, e para o dimensionamento da melhoria da estrutural por meio da estabilização com resíduos de construção e demolição (RCD).

Os agregados utilizados para o desenvolvimento da pesquisa foram coletados na usina de produção de agregado reciclado de resíduos de construção e demolição, e se enquadraram nas faixas granulométricas estabelecidas A, C e E da Norma DNIT 141/2010 ES (Pavimentação – base estabilizada granulometricamente) e, também, atenderam as condições estabelecidas na NBR 15115 (ABNT, 2004). As faixas A e C são usadas para tráfegos médios e pesados, já a faixa E, deve ser utilizada para tráfegos mais leves com um número de solicitações do eixo padrão $(N) \leq 5.10^6$.

O solo do município foi classificado para verificar a sua possibilidade de uso em pavimentação, a mistura do solo com agregados provenientes de RCD foi objeto de estudo com a finalidade de melhorar o índice de suporte do solo de base ou subbase da via rural estudada.

3.3 NORMAS USADAS

Para esse estudo foram utilizadas as normas de projeto de pavimentos segundo o Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) órgão federal vinculado ao Ministério dos Transportes que tem o objetivo de implementar a política federal de viação no país e normas da Associação Brasileiras de Normas Técnicas (ABNT), a saber:

- DNER ME: 080/94: Solos - análise granulométrica por peneiramento.
- DNER ME 041/94: Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização.
- DNIT 141/2010 ES - Pavimentação – base estabilizada granulometricamente;
- DNIT-172/2016-ME: Solos- Determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC/CBR) utilizando amostras não trabalhadas- método de ensaio;
- DNIT 254/2023-ME: Solos – Compactação em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão – Método de ensaio;
- NBR 6459/84: Solos- Determinação do limite de liquidez;
- NBR 7180/84: Solos- Determinação do limite de plasticidade;
- NBR 7182/84: Solos- Ensaio de Compactação.
- NBR 6457/86: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 11805/91 - Materiais para sub-base ou base de solo-brita;
- NBR 9895/97: Solos - Índice de suporte Califórnia
- NBR 15115/2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;

3.4 ENSAIOS

3.4.1 Análise Granulométrica

Seguindo a norma ABNT NBR 7181, o ensaio de análise granulométrica tem como objetivo determinar os tamanhos das partículas do solo, fazendo o peneiramento e a sedimentação. O ensaio foi feito a partir do peneiramento dos grãos que passam por diversas peneiras com aberturas diferentes. Os grãos conhecidos pelos métodos de peneiramento devem ter o diâmetro superior à 0,075 mm, que é a abertura mínima de peneira, os grãos que passam pela peneira de 0,075 mm são classificados pelo processo de sedimentação. A Figura 10 apresenta o jogo de peneiras usadas no ensaio de granulometria.

Figura 10 – Análise granulométrica do solo



Fonte: Autoria própria

3.4.2 Limite de Plasticidade (LP)

O limite de plasticidade corresponde ao teor de umidade necessário para que o solo adquira características plásticas, ele marca a transição do estado semi-sólido para o plástico, tornando o solo moldável ao ultrapassar esse limite. Em laboratório, o ensaio é realizado por meio da confecção de cilindros com 3 mm de diâmetro (Figura 11), sendo o LP determinado no momento em que o cilindro se rompe. Esse procedimento segue as diretrizes da norma NBR 7180 (ABNT, 1984).

Figura 11 – Ensaio de limite de Plasticidade



Fonte: Autoria própria

3.4.3 Limite de Liquidez (LL)

O limite de liquidez indica a transição do estado plástico para o estado líquido do solo, para sua determinação em laboratório, utiliza-se o aparelho de Casagrande (Figura 12), que mede o número de golpes necessários para o fechamento da fenda criada na amostra de solo posicionada sobre a concha do dispositivo. O ensaio deve ser repetido várias vezes, obtendo diferentes teores de umidade para definir a umidade correta que possibilita o fechamento da fenda. Esse procedimento segue as diretrizes da norma NBR 6459 (ABNT, 1984).

Figura 12 – Ensaio de limite de Liquidez



Fonte: Autoria própria

3.4.4 Compactação

A adição de água a um solo seco melhora sua capacidade de compactação, o ensaio de Proctor é essencial para o controle de qualidade de aterros, permitindo a determinação da densidade máxima do solo, o que contribui significativamente para o desempenho estrutural e hidráulico da obra. Esse ensaio é realizado pela compactação de camadas de solo em um cilindro de volume conhecido, variando os teores de umidade para gerar um gráfico de umidade por densidade, a partir do qual se obtém a umidade ótima de compactação e a densidade seca máxima. Ele pode ser realizado em três níveis de energia de compactação, conforme as especificações da obra: normal, intermediária e modificada. No Brasil, a norma que regulamenta esse procedimento é a NBR 7182 (ABNT, 1986). Para este estudo, utilizou-se a energia intermediária de compactação.

3.4.5 Ensaio Mini Proctor

O mini-Proctor é uma versão reduzida do ensaio de compactação tradicional, utilizada para determinar a massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima de compactação do solo. Esses parâmetros são essenciais para o controle tecnológico em obras de infraestrutura, garantindo a adequada execução das camadas de subleito, sub-base e base de pavimentos rodoviários, especialmente em estradas rurais não pavimentadas.

O procedimento envolve a compactação de amostras de solo em um molde cilíndrico de menor volume, utilizando um soquete de compactação mais leve e aplicando um número reduzido de camadas e golpes, em comparação com o método convencional. Após a compactação, as amostras são pesadas e submetidas à secagem, permitindo a construção da curva de compactação, da qual se extraem a umidade ótima e a densidade seca máxima.

A realização do mini ensaio de Proctor segue a norma DNIT 129/2018 – ME: Ensaio de compactação com energia reduzida, sendo especialmente indicada quando a quantidade de solo disponível é limitada ou para ensaios preliminares de caracterização.

3.4.6 Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR)

O ensaio CBR (California Bearing Ratio) é empregado para avaliar a capacidade de suporte do solo, sendo um dos principais parâmetros no dimensionamento de pavimentos, especialmente nas camadas de subleito, sub-base e base. Trata-se de um ensaio de penetração que compara a resistência do solo analisado com a de um material-padrão, como brita britada.

O procedimento consiste na aplicação de um pistão metálico cilíndrico sobre a superfície de um corpo de prova compactado, mensurando-se a pressão necessária para penetrar o solo a profundidades de 2,5 mm e 5,0 mm. O valor do CBR é expresso em porcentagem e corresponde à relação entre a carga medida no solo testado e a carga-padrão obtida com brita.

Valores baixos de CBR indicam solos com baixa resistência e capacidade de suporte, exigindo substituição ou estabilização. Conforme a norma DNIT 136/2018 – ME: Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR), os ensaios devem ser realizados em corpos de prova moldados na umidade ótima e densidade seca obtidas

no ensaio de compactação, garantindo a representatividade dos resultados. A Tabela 8 apresenta uma classificação geral dos solos com base nos valores de CBR:

Tabela 8 – Classificação dos solos

Faixa de CBR (%)	Capacidade de Suporte	Classificação Geral
< 5%	Muito baixa	Argilas moles, solos orgânicos
5% – 10%	Baixa	Siltes e areias finas
10% – 20%	Média	Solos arenosos compactados
> 20%	Alta	Cascalhos, solos lateríticos bons

Fonte: DNIT, 2006.

3.5 MATERIAIS UTILIZADOS

- Trena; trado; solo; RCD; água destilada; cápsulas; estufa; balança de precisão; espátula, régua biselada, extrator de amostras;
- Equipamentos para ensaio de Limite de Liquidez;
- Equipamentos para ensaio de Limite de Plasticidade;
- Equipamentos para ensaio de Proctor e Mini-Proctor;
- Equipamentos para ensaio CBR;
- Notebook;
- Software para dimensionamento de pavimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTIMATIVA DE TRÁFEGO

Foi realizada uma simulação de carga com base em dados operacionais de uma usina da região, cuja previsão de moagem para o ano de 2033, considerando o período (P) de 8 anos, é de aproximadamente 2.151.000 toneladas de cana-de-açúcar em uma única safra, considerando-se 200 dias de operação durante a safra (equação 9), tem-se:

$$Carga\ diaria\ transportada = \frac{2.151.000\ ton}{200\ dias} = 10.755\ ton/dia \quad (9)$$

Considerando que cada composição canavieira de 9 eixos, conforme a Resolução nº 882/2021 do Conselho Nacional de Trânsito (Contran), possui um limite de Peso Bruto Total Combinado de até 74 toneladas, e que a tara média do conjunto

é de aproximadamente 20 toneladas, adota-se para fins de cálculo a capacidade líquida de transporte de **54 toneladas** de cana-de-açúcar por viagem. Dessa forma, o número de viagens diárias necessárias para o escoamento da produção é estimado pela equação 210:

$$Viagens\ diárias\ (ida) = \frac{10.755 \frac{ton}{dia}}{54 \frac{ton}{viagem}} \approx 199\ viagens \quad (10)$$

Como cada viagem envolve ida e volta, e considerando uma frota de **10 caminhões (cavalos mecânicos)** em operação contínua, estima-se pela equação 11:

$$Movimentações\ totais\ diárias\ (ida\ e\ volta) = 199 \times 2 = 398\ movimentações \quad (11)$$

Acrescentando-se uma margem de **10% para outras movimentações e manobras**, obtém-se por meio da equação 12:

$$Movimentações\ totais\ diárias\ (Vp) = 398 \times 1,10 = 438 \approx 440 \frac{viagens}{dia} \quad (12)$$

Estimando da mesma forma o tráfego do primeiro ano de operação, sendo 2025, com a previsão de moagem de 2.496.000 toneladas de cana-de-açúcar e levando em consideração os mesmos parâmetros utilizados anteriormente, tem-se:

$$Carga\ diária\ transportada = \frac{2.496.000\ ton}{200\ dias} = 12.480\ ton/dia$$

$$Viagens\ diárias\ (ida) = \frac{12.480 \frac{ton}{dia}}{54 \frac{ton}{viagem}} \approx 231\ viagens$$

$$Movimentações\ totais\ diárias\ (ida\ e\ volta) = 231 \times 2 = 462\ movimentações$$

$$Movimentações\ totais\ diárias\ (Vi) = 462 \times 1,10 = 508 \approx 510\ viagens/dia$$

4.2 ENSAIOS DE CLASSIFICAÇÃO

Para a caracterização do solo utilizado na pesquisa foi realizada uma campanha de ensaios laboratoriais, incluindo os ensaios de Limite de Liquidez (LL), Índice de Plasticidade (IP), Ensaio Mini-Proctor para obtenção da densidade ótima de compactação e um Mini-ensaio de CBR (California Bearing Ratio). As amostras foram coletadas no trecho em estudo e preparadas conforme procedimentos recomendados

pelo DNIT (2018) e pela norma NBR 7180 (ABNT, 2016).

Dentre as três amostras analisadas, a Amostra 3 apresentou os melhores resultados de suporte, sendo considerada para o dimensionamento, os resultados de caracterização para esta amostra.

4.2.1 Limite de Liquidez (LL)

A Tabela 9 traz os resultados da umidade e do número de golpes obtido no ensaio de Limite de Liquidez e a Figura 13 traz o gráfico com o resultado obtido no ensaio.

Tabela 9 – Limite de Liquidez

AMOSTRA 3			
Cap nº	24	28	34
Nº de golpes	29	20	15
Massa S+C+A (g)	22,323	19,675	23,029
Massa S+C (g)	20,775	18,381	21,185
Massa cap, (g)	13,867	13,05	13,857
Massa da água	1,548	1,294	1,844
Massa do solo seco	6,908	5,331	7,328
Teor de umidade (%)	22,41	24,27	25,16
LIMITE LIQUIDEZ - LL	23,2%		

Fonte: Autoria própria

Figura 13 – Gráfico Limite de Liquidez



Fonte: Autoria própria

4.2.2 Limite de Plasticidade (LP)

A Tabela 10 traz os resultados do ensaio de Limite de Plasticidade.

Tabela 10 – Limite de Plasticidade

AMOSTRA 3			
Cap nº	39	42	46
Massa S+C+A (g)	14,594	15,277	15,071
Massa S+C (g)	14,426	15,095	14,952
Massa cap (g)	13,436	14,03	14,255
Massa da água (g)	0,168	0,182	0,119
Massa do solo seco (g)	0,99	1,065	0,697
teor de umidade (%)	16,97	17,09	17,07
LIMITE PLASTICIDADE - LP (%)			17,04

Fonte: Autoria própria

Logo, pelo gráfico: **LP= 17,04%**

Assim: **IP** = LL-LP = 23,2-17,04 = 5,9% = **6,0%**

4.2.3 Análise granulométrica

4.2.3.1 Granulometria do solo

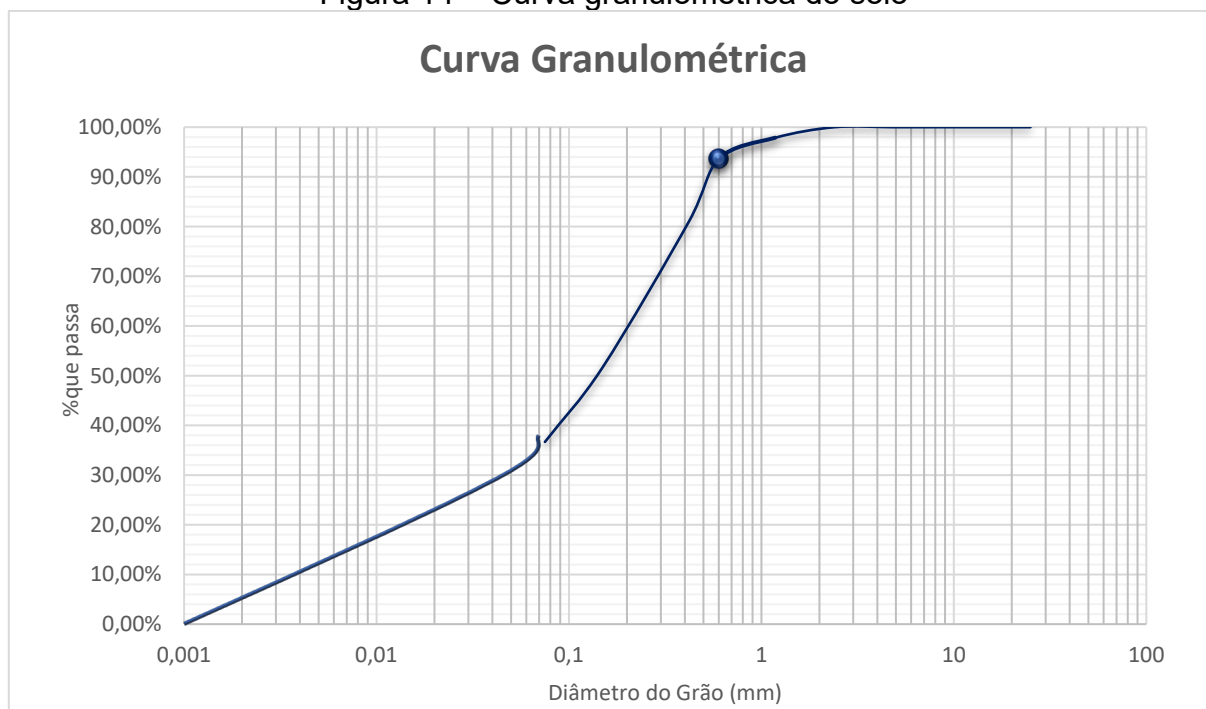
A Tabela 11 traz os resultados da análise granulométrica usado para classificação do solo. A Figura 14 apresenta o gráfico da granulometria do solo.

Tabela 11 – Análise granulométrica do solo

Massa amostra(g)	120				
# peneira	retido(g)	passado(g)	% retido	% acumulada	% passa
25	0	-	0,00%	0,00%	100,00%
19	0	-	0,00%	0,00%	100,00%
9,5	0	-	0,00%	0,00%	100,00%
6,3	0	-	0,00%	0,00%	100,00%
4,75	0	-	0,00%	0,00%	100,00%
2,4	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
1,18	2,55	117,45	2,13%	2,13%	97,88%
0,6	5,1	112,35-	4,25%	6,37%	93,63%
0,42	15,14	97,21	12,62%	18,99%	81,01%
0,15	35,112	31,99	29,26%	48,25%	51,75%
0,075	18,09	39,31	15,08%	63,33%	36,67%
				99,39%	0,61%

Fonte: Autoria própria

Figura 14 – Curva granulométrica do solo



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a norma DNIT 139 (2010) o solo para ser usado em base de acordo com a norma DNIT 141 (2010) a fração do solo passante na peneira n° 40 deve apresentar um LL igual ou inferior a 25% e um IP igual ou inferior a 6%.

A porcentagem obtida para o material passante na peneira n° 200 e 40 são respectivamente 36,65% e 81,01%. De acordo com a norma DNIT 141 (2010) a porcentagem passante na peneira n° 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira n° 40 para ser usado na base do pavimento. Assim, percebe-se que os valores obtidos na análise do solo estão dentro do enquadramento exigido pela normativa.

Desse modo o solo foi classificado pelo Sistema de Classificação do Highway Research Board (HRB), ANEXO A, empregada na classificação de solos para fins rodoviários, como solo - A4 considerado regular a ruim para camada de pavimento. Isso demonstra que o solo precisa ser estabilizado granulometricamente para que seja usado em rodovias e vias urbanas.

4.2.3.2 Granulometria do RCD

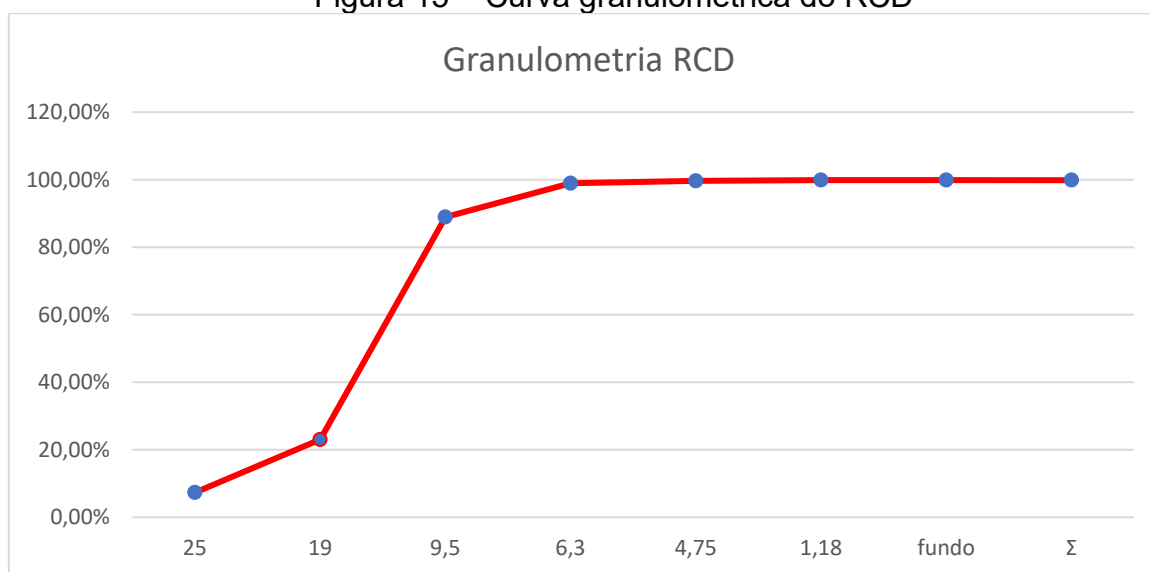
A Tabela 12 e a Figura 15 trazem os resultados da análise Granulométrica do RCD.

Tabela 12 – Análise granulométrica do RCD

Massa amostra (g)	500				
# peneira	Retido(g)	Passado(g)	% retido	% acumulada	% passa
25,000	36,60	463,40	7,32%	7,32%	92,68%
19,000	78,54	384,86	15,71%	23,03%	84,29%
9,500	329,52	55,34	65,90%	88,93%	34,10%
6,300	50,04	5,30	10,01%	98,94%	89,99%
4,750	3,45	1,85	0,69%	99,63%	99,31%
1,180	1,19	0,66	0,24%	99,87%	99,76%
Fundo	0,00	0,66	0,00%	99,87%	100,00%
Σ	499,34		99,86%	99,86%	0,14%

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – Curva granulométrica do RCD



Fonte: Autoria própria

4.3 COMPACTAÇÃO

4.3.1 Compactação do Solo – Ensaio de Proctor

O ensaio de compactação do solo foi efetuado, neste trabalho, devido as características exigidas pela norma, energia intermediária. A Figura 16 demonstra o ensaio e a Tabela 13 traz o resultado do ensaio.

Figura 16 – Ensaio de compactação Proctor intermediário, solo e solo+RCD



Fonte: Autoria própria, 2025.

Tabela 13 – Ensaio Proctor – Amostra 3

AMOSTRA 3				
PONTOS	1	2	3	
Area do cilindro cm ²	19,63	19,63	19,63	
Altura CP (cm)	5,057	5,009	5,016	
Volume do cilindro (cm ³)	99,27	98,33	98,46	
Massa do solo (g)	210,00	209,00	209,00	
Massa especifica umida (g/cm ³)	2,12	2,13	2,12	
Massa especifica seca (g/cm³)	1,875	1,884	1,882	1,884
Umidade ótima (Wot) (%)	12,80	12,80	12,80	12,80

Fonte: Autoria Própria

4.4 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA OU CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

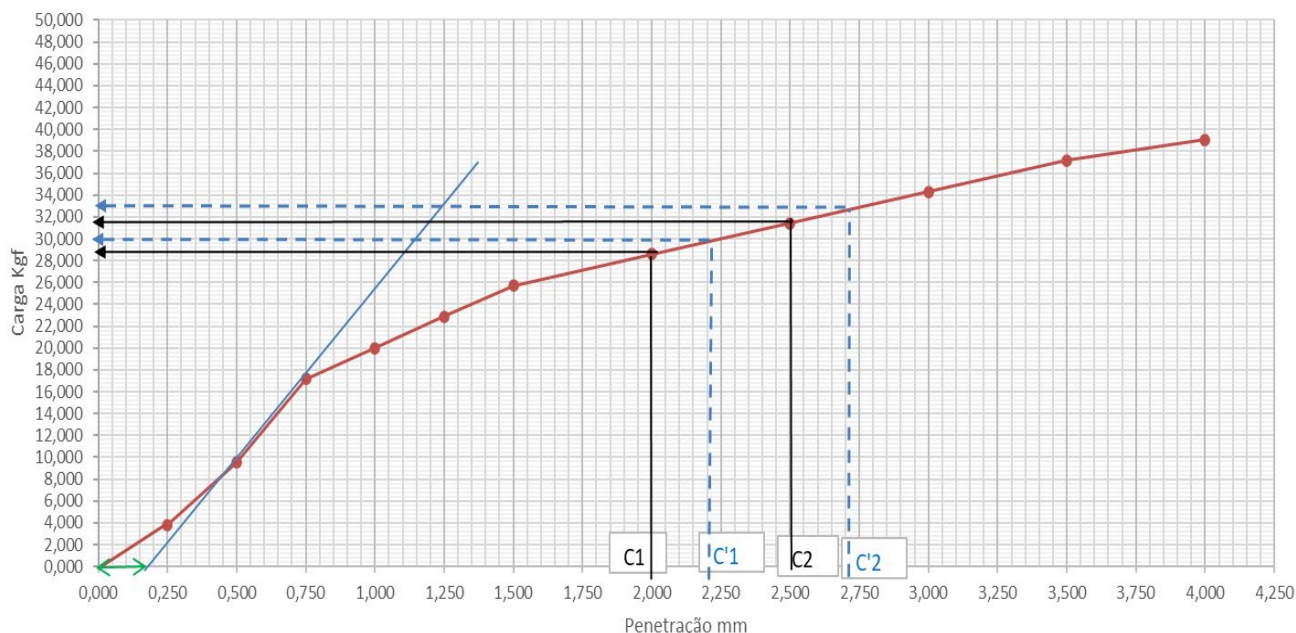
O Índice de Suporte Califórnia mede a capacidade de suporte de um solo compactado. Mede a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente. Essa relação é expressa em porcentagem (Greco, 2011).

É um dos ensaios mais importantes e utilizados no mundo quando se tratam de obras rodoviárias, e permite verificar a resistência do solo e sua expansão, essenciais para o dimensionamento de pavimentos.

4.4.1 Ensaio Mini-CBR e Proctor

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR-) é realizado para obter-se a medida da resistência à penetração de uma amostra saturada compactada segundo o método Proctor. Este ensaio é realizado de acordo com a NBR 9895/1987 para definir a expansão do solo saturado, do solo+brita e do solo+RCD. Apesar de ter um caráter empírico, o ensaio de CBR é usado como base para o dimensionamento de pavimentos flexíveis (Silva e Nascimento, 2018.). A Figura 17 traz o Gráfico e o resultado do ensaio mini CBR do solo.

Figura 17 – Gráfico Ensaio Mini-CBR solo
Ponto 1



CBR (Mini-CBR): 11,7% com compactação na energia intermediária Mini-Proctor

Pela Tabela Anexo D (Norma DNIT 254/23)

	Ponto 1		CBR	Ponto 2		CBR	Ponto 3		CBR
	Carga	Corrigida		Carga	Corrigida		Carga	Corrigida	
CBR P/ 2,0mm (%)	28,58	30,00	11,7	22,860		9,16	18,10		7,44
CBR P/ 2,5mm (%)	31,43	33,00	11,6	27,623		9,79	20,96		7,6
MINI-CBR (%)			11,7			9,79			7,6

Fonte: Autoria Própria

Esses valores indicam que o solo, embora classificado como A4 (solo siltoso), apresenta um índice de suporte relativamente adequado para aplicação em camadas inferiores do pavimento, como subleito, especialmente em projetos de estradas rurais com tráfego leve. De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2018), solos com CBR entre 10% e 20% podem ser utilizados em obras viárias, desde que

associadas a melhorias com aditivos ou estabilizantes, como o uso de resíduos da construção civil (RCD).

O valor do CBR obtido de 11,7% foi essencial para o cálculo da estrutura do pavimento pelo método de Medina, permitindo estimar a espessura mínima necessária da estrutura (Hm). A Figura 18 mostra o ensaio CBR solo e soloRCD.

Figura 18 – Ensaio de ISC ou CBR solo e solo-RCD



Fonte: Autoria própria

Com o resultado obtido 11,7% nota-se que o solo poderia ser usado apenas para do subleito, conforme o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), mas não para base ou subbase.

Mas ao misturar 60% de RCD ao solo, o CBR passou para 22,83%, um acréscimo de 94,95%, em sua umidade ótima (12,80%), sendo assim a mistura pode ser usada em subbase de pavimentos com $N \geq 5.10^6$ e $N \leq 1.10^7$ demonstrando que a estabilização do solo com RCD é viável tecnicamente. A Figura 19 traz o gráfico do ensaio de CBR SoloRCD.

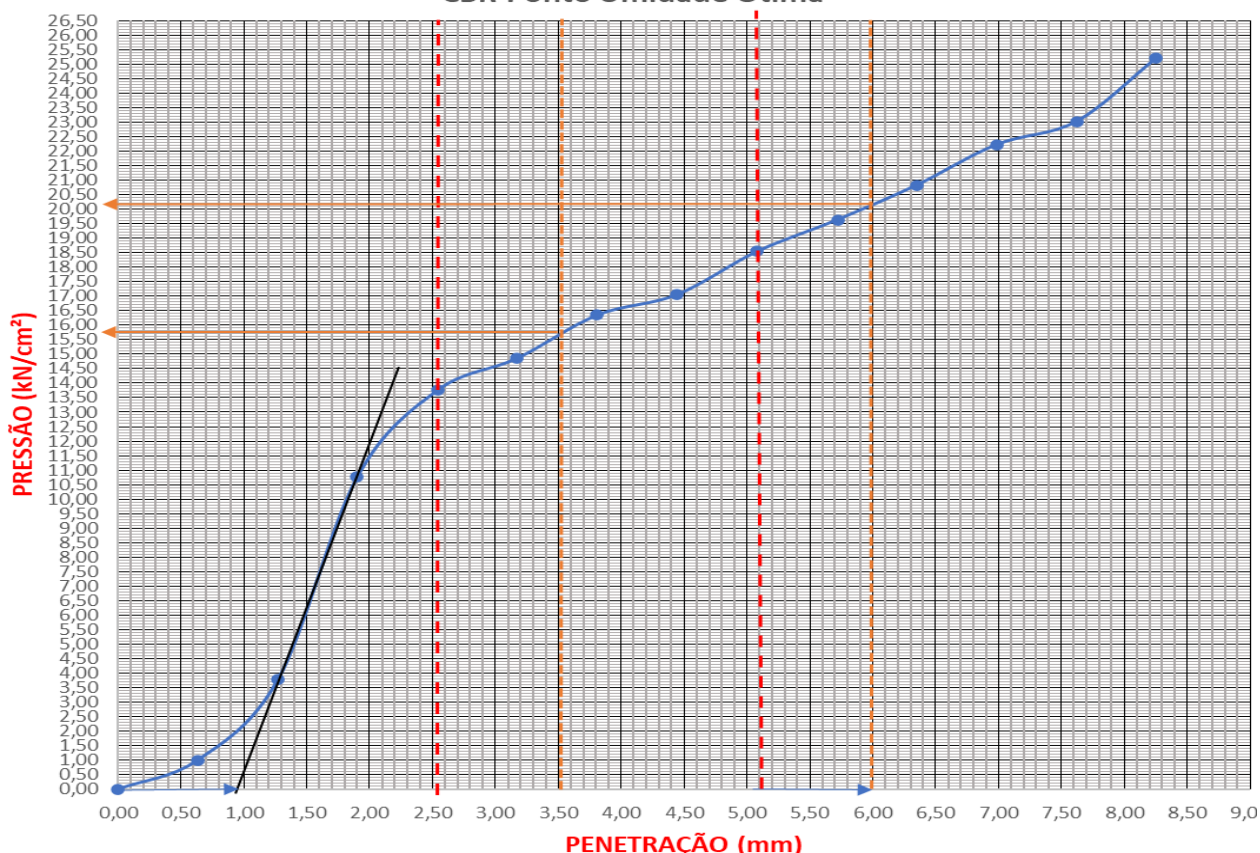
Mesmo acrescentando RCD o valor do CBR continua sendo essencial para o dimensionamento. A NBR 15115 (ABNT, 2004) fixa os valores mínimos de acordo com a função estrutural da camada do pavimento e traz o valor do ISC como parâmetro para emprego do agregado reciclado em pavimentação, além de considerar a expansão do agregado reciclado. A Tabela 14 mostra os valores do CBR e da expansão trazidos pela NBR 15115 (ABNT, 2004).

Tabela 14 – Valores de CBR e expansão.

Tipo de camada	ISC ou CBR (%)	Expansão (%)
Reforço subleito	≥ 12	$\leq 1\%$
Sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$
Base para $N \leq 5.10^6$	≥ 60	$\leq 0,5$
Base para $N > 5.10^6$	≥ 80	$\leq 0,5$

Fonte: NBR 15115 (ABNT, 2004)

Figura 19 – Ensaio CBR SoloRCD
CBR Ponto Umidade Ótima



Fonte: Autoria Própria

4.5 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento de pavimentos visa definir a espessura e os materiais das camadas que compõem a estrutura do pavimento, de modo que ela suporte o tráfego previsto durante a vida útil da via, foram utilizados dois métodos, o CBR e o método de Medina.

Para o dimensionamento pelo método CBR baseia-se na determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR), obtido por meio de ensaios de penetração em corpos de prova de solo compactado, cujo resultado foi obtido por ensaios de laboratório, e com base no valor do CBR do subleito e na previsão de tráfego, define-se a espessura mínima da estrutura do pavimento. Considerou-se o volume de tráfego no primeiro e último ano de operação, conforme dados coletados:

V_1 – 1º ano de operação – 510 viagens diárias

V_p – ultimo ano do período – 440 viagens diárias

P : vida útil do pavimento (8 anos)

A média de viagens diárias durante o período é:

$$V_M = \frac{V_1 + V_P}{2} = \frac{510 + 440}{2} = 475 \text{ viagens/dia}$$

O volume total de tráfego (todos os veículos) foi:

$$V_T = 365 \times 475 \times 8 = 1.387.000 \text{ veiculos}$$

Para a conversão desse volume em veículos comerciais equivalentes (N), foram aplicados os seguintes fatores de correção:

$Fe = 9$ – fator de equivalência para veículos comerciais

$Fc = 0,06$ – fração de veíc. comerciais no tráfego total (74ton, 9 eixos, eixo tandem)

$Fr = 1,4$ – fator de repetição/direcionalidade

Assim o valor de N será :

$$N = 365 \times 475 \times 8 \times 9 \times 0,06 \times 1,4 = 1.048.572 \text{ veículos}$$

$$N = 1,04 \times 10^6 \text{ veiculos comerciais equivalentes}$$

Com base em ensaios laboratoriais, obteve-se um valor de CBR do subleito igual a 11,7%. Para a sub-base, adotou-se um valor padrão de CBR = 20%, conforme recomendações técnicas. A espessura estrutural total necessária para este subleito (Hm) foi determinada como:

$$CBR_{SL} = 11,7\% \rightarrow H_m = 30\text{cm}$$

$$CBR_{SB} = 20\% \rightarrow H_{20} = 22\text{cm}$$

Os coeficientes de contribuição estrutural utilizados foram:

$$Kb = 1,0 \text{ – base}$$

$$Ksb = 0,77 \text{ – sub base}$$

$$Kr = 0 \text{ – não se aplica, estrada sem revestimento}$$

Obteve-se então as dimensões das camadas:

$$R \times Kr + B \times Kb + H_{20} \times Ksb \geq H_m$$

$$B \times Kb \geq 22 \rightarrow B \times 1 = 22 \rightarrow B = 22 \approx 25\text{cm}$$

$$R \times Kr + B \times Kb + H_{20} \times Ksb \geq H_m$$

$$22 + H_{20} \times 0,77 = 30$$

$$H_{20} \times 0,77 = 8 \rightarrow H_{20} = 10,4 \approx 10\text{cm} \rightarrow \text{adotado } 20\text{cm}$$

Visando a sustentabilidade e a valorização dos resíduos da construção civil (RCD), propôs-se a substituição parcial de materiais nas camadas do pavimento:

Camada de base: 70% de RCD

Camada de sub – base: 60% de RCD

Essa proposta está em consonância com diversos estudos que comprovam a viabilidade técnica da aplicação de RCD em camadas estruturais de pavimentos, respeitando os limites de resistência e durabilidade (Tavares, 2017; Hortegal et al., 2009).

4.5.1 Verificação da Estrutura Equivalente (Método CBR)

Para complementar a análise de viabilidade técnica do uso de resíduos de construção e demolição (RCD) nas camadas estruturais do pavimento, foi realizada uma estimativa da capacidade estrutural da seção projetada, por meio do cálculo do Número Estrutural Total (SN). Esse índice representa a soma ponderada das espessuras das camadas do pavimento, considerando os respectivos coeficientes estruturais (a), conforme prática recomendada pelo DNIT (2006), dada pela equação 13.

$$SN = a_1 \times h_1 + a_2 \times h_2 \quad (13)$$

Sendo:

- a : coeficiente estrutural de cada camada,
- h : espessura da camada correspondente, em centímetros (cm).

Considerou-se a seguinte configuração de camadas para o pavimento:

- Base (70% RCD) - $h_1 = 25\text{cm}$, $a_1 = 0,14$
- Sub-base (60% RCD) - $h_2 = 20\text{cm}$ $a_2 = 0,10$

$$SN = (0,14 \times 25) + (0,10 \times 20) = 5,5$$

De acordo com o DNIT (2006), estruturas com $SN \geq 6,0$ são indicadas para tráfego de até 10^6 repetições de eixo padrão. Portanto, a estrutura proposta apresenta desempenho próximo ao recomendado, sendo tecnicamente viável, com possibilidade de pequenos ajustes para aumento de durabilidade. Essa configuração também contribui para a sustentabilidade, ao valorizar o uso de RCD, reduzindo o impacto ambiental e os custos associados à execução de estradas rurais.

4.6 VIABILIDADE ECONOMICA

A manutenção de estradas rurais representa um custo significativo para os municípios e empresas, especialmente em regiões com tráfego intenso de veículos pesados, como os utilizados no escoamento da produção de cana-de-açúcar. Atualmente, os custos anuais com a manutenção da área considerada, que tem como extensão aproximadamente 1.243 km de estradas rurais, sem a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD), totalizam aproximadamente R\$ 1.460.000,00, o que corresponde a uma média de R\$ 1.174,37 por quilômetro por ano. Com o objetivo de avaliar a viabilidade econômica da incorporação de RCD no processo de melhoria do solo das estradas, foi considerada uma solução técnica composta por uma base com 25 cm de espessura contendo 60% de RCD e uma sub-base com 20 cm de espessura contendo 50% de RCD, sem aplicação de revestimento superficial.

O RCD é considerado de custo nulo para fins desta análise, assumindo sua disponibilidade gratuita por meio de doação da prefeitura, assim, os custos estimados se referem apenas à escavação, transporte, espalhamento, compactação e controle tecnológico dos materiais aplicados. Segundo o estudo de Silva et al. (2020), e dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2023), o custo médio para execução de camadas estabilizadas com RCD em estradas vicinais varia entre R\$ 55.000,00 e R\$ 70.000,00 por quilômetro. Adotando o valor médio de R\$ 60.000,00 por quilômetro, estima-se que a reabilitação dos 1.243 km de estradas, distribuída ao longo de 8 anos, teria o seguinte custo:

$$\text{Custo total com RCD} = 1243\text{km} \times 60.000,00 = \text{R\$}74.595.600,00$$

Dividido igualmente ao longo de 8 anos:

$$\text{Investimento anual com RCD} = \frac{\text{R\$}74.595.600,00}{8} = \text{R\$}9.324.450,00$$

Com a estabilização do solo, a durabilidade da estrada aumenta e os custos de manutenção diminuem substancialmente. Com base em experiências práticas documentadas por Guimarães et al. (2018), estima-se que os gastos com manutenção possam ser reduzidos em até 70%, passando para aproximadamente R\$ 438.000,00 por ano.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise técnica e econômica conduzida neste trabalho mostra que, embora o investimento inicial na melhoria de estradas rurais com o uso de resíduos de construção e demolição (RCD) seja superior ao custo da manutenção convencional ao longo de um horizonte de oito anos, os ganhos em durabilidade e desempenho estrutural justificam a adoção dessa alternativa, a utilização de RCD nas camadas de sub-base e base proporciona maior resistência mecânica ao pavimento, reduzindo significativamente a frequência de manutenções corretivas e, consequentemente, os custos operacionais ao médio e longo prazo.

Além dos benefícios econômicos diretos, observam-se vantagens indiretas relevantes, como a melhoria das condições de trafegabilidade e segurança das vias, a redução no tempo de escoamento da produção agrícola, a menor degradação dos veículos e aumento na eficiência logística, destaca-se também o aproveitamento ambiental dos resíduos sólidos da construção civil, que contribui para a redução da disposição inadequada de entulhos e para a conservação de jazidas naturais.

Portanto, a aplicação de RCD revela-se uma solução tecnicamente eficaz, economicamente viável e ambientalmente responsável para o fortalecimento da infraestrutura rural, quando se consideram os impactos sociais, ambientais e logísticos em conjunto com os econômicos, evidencia-se o potencial desta prática para fomentar o desenvolvimento sustentável no meio rural.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. São Paulo: ABRELPE, 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br>. Acesso em: 23 mar. 2025.

AMORIM, S. R. de. Avaliação do potencial de uso de resíduos da construção civil como materiais alternativos em camadas de pavimentos. 2013. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116:2021 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457:1986 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459:1984 – Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180:1984 – Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182:1984 – Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11805:1991 – Materiais para sub-base ou base de solo-brita – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895:1997 – Solo – Determinação do índice de suporte Califórnia (CBR). Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BASTOS, A. C. Gestão Ambiental na Construção Civil: resíduos da construção e demolição. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação: treinamento para engenheiros. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: <https://www.in.gov.br>. Acesso em: 23 maio 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011. Altera a Resolução nº 307/2002, que estabelece diretrizes para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 25 maio 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA Resolução nº 469, de 29 de julho de 2015. Altera a Resolução nº 307/2002, incluindo as embalagens de tintas como resíduos da Classe B. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 jul. 2015.

CARNEIRO, A. M. et al. Manual de gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos da construção civil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

CAVA, F. Como dimensionar pavimentos flexíveis pelo método do DNER (Atual DNIT). 2018. Disponível em: <https://alemdainercia.com/2018/01/31/como-dimensionar-pavimentos-flexiveis-pelo-metodo-do-dner/>. Acessado em: 3 mar.2025

CHIARELLO, M. H.; NASCIMENTO, C.; MARQUES, C. S. A. Utilização de agregados de resíduos da construção e demolição (RCD) em pavimentação. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário de Santa Fé do Sul, SP – UNIFUNEC, 2016.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Gerenciamento de resíduos da construção civil e demolição. São Paulo, 2021.

CLIMATEMPO. Previsão do tempo e clima para Rafard - SP. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/previsao-do-tempo/cidade/2479/rafard-sp>. Acesso em: 25 maio 2025.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DE SÃO PAULO – DER-SP. Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais – Volume I: Projeto. São Paulo: DER-SP, 1987. Disponível em: https://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/manuais/Manual_Basico_de_Estradas_e_Rodovias_Vicinais-Volume_I.pdf. Acesso em: 14 abr. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Manual de Pavimentação. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Manual de Restauração de Rodovias Não Pavimentadas. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2006.

ELIAS, Bruno Belisário. Dimensionamento de Pavimento Flexível. Trabalho de conclusão de curso de PósGraduação em Pavimentação e Restauração Rodoviária, Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade – FUMEC. Belo Horizonte. 99p. 2018. Disponível em: <https://www.der.mg.gov.br/files/335/Trabalhos-Academicos/16526/Dimensionamento-de-Pavimento-Flexivel.pdf>. Acessado em: 20 jan.2025.

HORTEGAL, L. G.; FERREIRA, M. A.; SANT'ANA, J. C. Reutilização de resíduos da construção civil como base de pavimentação. Revista Pesquisa em Foco, v. 17, n.2, p. 60-74, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Cidades e Estados: Rafard (SP). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/rafard.html>. Acesso em: 19 maio 2025.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Caracterização de Solos Tropicais por Meio da Metodologia MCT. Boletim Técnico, São Paulo, 2002.

INSTITUTO DE PESQUAS RODOVIÁRIAS. IPR 719: Estabilização de solos com cal para fins rodoviários. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

JEFFERSON, S. B.; PEREIRA, M. V. N.; SIQUEIRA, R. A.; SANTOS JUNIOR, G. A. dos. Uso de materiais reciclados em pavimentação asfáltica. Revista FT, v. 29, ed. 141, 06 dez. 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/uso-de-materiais-reciclados-em-pavimentacao-asfaltica/>.

LAUX, H. et al. Metodologia MCT aplicada aos solos arenosos finos lateríticos do Rio Grande do Sul visando pavimentação. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Solos, Florianópolis, 2020.

LEVY, S. M.; PAULO, C. C. Reciclagem de resíduos da construção: uma questão de educação ambiental. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE GESTÃO AMBIENTAL NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2., São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Poli/USP, 1995.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Disponível em: https://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf. Acessado em 10 fev.2025

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Pavimentação com Solos Lateríticos: Técnica Econômica para Países Tropicais. São Paulo: Editora Villibor, 1995.

NOVACANA. Usina Rafard - Raízen Energia S.A. Disponível em: <https://www.novacana.com/usinas/rafard>. Acesso em: 19 maio 2025.

OLIVEIRA, A. G. Resíduos da construção civil e a prática da sustentabilidade. São Paulo: Pini, 2007.

OLIVEIRA, J. B. de. Solos da folha de Piracicaba. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas – IAC, 1982. (Boletim Técnico, 63). Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 25 mar 2025.

OLIVEIRA JR., C. A.; AYRES, M. P.; ARAÚJO, M. G. Avaliação do comportamento de misturas solo-agregado reciclado para uso em pavimentação. In: Congresso Brasileiro de Pavimentação, 2018, Brasília. Anais [...]. Brasília: ABPv, 2018.

PINTO, T. P. Gestão e gerenciamento de resíduos da construção civil: implantação em municípios e propostas para atuação dos agentes envolvidos. São Paulo: Annablume, 2005.

SANTOS, V. F. et al. Diagnóstico da malha viária rural e custos com manutenção: estudo de caso no setor sucroenergético do interior paulista. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 23, n. 10, p. 765–771, 2019.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO – SMA. Construção Civil Sustentável. São Paulo: SMA, 2012.

SENÇO, W. Manual de Técnicas de Pavimentação - Volume 2. . 1º ed. Ed.Pini: São Paulo, SP. 764 p. 2001

SILVA, J. A. da; FERREIRA, M. A.; LIMA, A. C. de. Aplicação de RCD como estabilizante de solos em estradas vicinais: estudo de caso. Revista de Engenharia e Sustentabilidade, v. 7, n. 1, p. 55–68, 2020.

SILVA, B. O. Método de Dimensionamento Empírico do DNIT. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Campus Curvelo. CEFET-MG. Disponível em: https://sig-arquivos.cefetmg.br/arquivos/2023237062af7d47199655ec78a66ca5e/13._Mtodo_de_Dimensionamento_DNIT_ES2.pdf. Acessado em: 23 mar. 2025.

SILVA, M. A.; BARROS, R. T. V. Estradas rurais: funções e desafios. Revista de Desenvolvimento Rural, v. 1, n. 2, p. 15–28, 2011.

SILVA, R. A. Estudo do uso de agregados reciclados de resíduos da construção civil em bases e sub-bases de pavimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL – SINAPI. Tabelas de Composições de Preço. 2023. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br>. Acesso em: 23 maio 2025.

TAVARES, A. L. Avaliação do desempenho de misturas de solo com resíduos de construção e demolição para uso em pavimentação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

VALLE JÚNIOR, R. F.; NASCIMENTO, W. G. Patologias em estradas vicinais: causas e soluções técnicas. Revista Engenharia Rural, v. 7, n. 2, 2018.

VALLE JÚNIOR, R. S.; NASCIMENTO, C. R. Patologias em estradas vicinais: causas e soluções técnicas. Revista Transportes & Infraestrutura, v. 10, n. 1, p. 35–42, 2018.

VAZQUEZ, E. Recycling of construction and demolition waste. Final Report. Delft: RILEM Publications, 2001.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. Principles of pavement design. 2. ed. New York: Wiley, 1975.

ZAMBON, F. B.; CAMPOS, S. V. A importância das estradas rurais no desenvolvimento do meio agrícola. Revista Agrária, v. 10, n. 2, p. 77–89, 2015.

REVISTA MULTIDISCIPLINAR DO NORDESTE MINEIRO. Edição temática sobre infraestrutura rural. v. 6, n. 1, 2020. Disponível em: <https://www.revistanordestemineiro.com.br>. Acesso em: 23 mar. 2025.

APENDICE A – ENSAIO CBR (SOLO)

	UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "Júlio de Mesquita Filho" FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA	
---	---	---

ENSAIO DE CBR

Classificação: 100% SOLO	
Poço: 3	Umidade ótima: 12,8
Profundidade (m)	pd Máximo: 1,884 g/cm³
Local: RAFARD	Data: 01/12/2024
Registro:	Operador: OZIAS
Amostra: PAULA 3	Obs: SOLO A-4

PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Cilindro nº	1	2	3
Área do Cilindro (cm²)	19,63	19,63	19,63
Altura do CP (cm)	5,057	5,009	5,016
Vol. CP (cm³)	99,27	98,33	98,46
Massa úmida (g)	210,00	209,00	209,00
Vol. Cilindro	0	0	0
pw (g/cm³)	2,115	2,126	2,123

UMIDADE	1	2	3
Cápsula nº			
(S + A + T) (g)			
(S + T) (g)			
(S) (g)			
(A) (g)			
(T) (g)			
(w) (%)			
(w) Umidade Médio	12,8	12,8	12,8
pd (g/cm³)	1,875	1,884	1,882

EXPANSÃO

Hcp	HORA	TEMP. DEC.	Leitura	Δh	(%)
50,57	08:00	0	0,200	0,000	0,00
50,57	08:00	24	0,207	0,007	0,01
50,09	08:00	48	0,206	0,006	0,01
50,16	08:00	72	0,209	0,009	0,02

MINI-CBR (%)	11,7
Expansão (%)	0,02
OBS: LL=23%; IP=6% GC: 100% Δw: 0.0%	

PENETRAÇÃO

	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
(mm)	leitura	carga	leitura	carga	leitura	carga
0,250	2,0	3,810	3,0	5,715	1,5	2,858
0,500	5,0	9,525	5,0	9,525	3,0	5,715
0,750	9,0	17,145	6,5	12,383	4,0	7,620
1,000	10,5	20,003	8,0	15,240	5,0	9,525
1,250	12,0	22,860	9,0	17,145	6,0	11,430
1,500	13,5	25,718	10,0	19,050	8,0	15,240
2,000	15,0	28,575	12,0	22,860	9,5	18,098
2,500	16,5	31,433	14,5	27,623	11,0	20,955
3,000	18,0	34,290	15,0	28,575	12,5	23,813
3,500	19,5	37,148	16,0	30,480	13,5	25,718
4,000	20,5	39,053	18,0	34,290	15,0	28,575

CONSTANTE DO ANEL

K= 1,9050

CARGA CORRIGIDA

ponto 1	ponto 2	ponto 3
30,00		
33,00		

Correção =

Pela Tabela Anexo D (Norma DNIT 254/23)

	Ponto 1		CBR	Ponto 2		CBR	Ponto 3		CBR
	Carga	Corrigida		Carga	Corrigida		Carga	Corrigida	
CBR P/ 2,0mm (%)	28,58	30,00	11,7	22,860		9,16	18,10	7,44	
CBR P/ 2,5mm (%)	31,43	33,00	11,6	27,623		9,79	20,96	7,6	
MINI-CBR (%)			11,7			9,79		7,6	

APENDICE B – ENSAIO CBR (RCD)

	UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "Júlio de Mesquita Filho" FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA	
---	---	---

ENSAIO DE CBR

Classificação: 40% solo+60%RCD	
Poço:	Umidade ótima: 12,8
Profundidade (m)	pd Máximo: 1,97 g/cm³
Local:	Data: 20/03/2025
Registro:	Operador: OZIAS
Amostra CLÁUDIA	Obs:

PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Cilindro nº	5	2	3
Peso amostra+molde (g)	8750		
Peso molde (g)	4080		
Peso do solo úmido (g)	4670,00		
Vol. da amostra	2113,99		
ρw (g/cm³)	2,209		

UMIDADE	1	2	3
Cápsula nº	113	114	115
(S + A + T) (g)	62,66	57,57	62,08
(S + T) (g)	58,63	54,17	58,02
(S) (g)	31,71	26,57	31,54
(A) (g)	4,03	3,40	4,06
(T) (g)	26,92	27,60	26,48
(w) (%)	12,7%	12,8%	12,9%
(w) Umidade Médio	12,8%		
ρd (g/cm³)	1,97		

EXPANSÃO

Hcp	HORA	TEMP. DEC.	Leitura	Δh	(%)
11,65	08:00	0	0,200	0,000	0,00
11,65	08:00	24	0,265	0,065	0,56
11,65	08:00	48	0,266	0,066	0,57
11,65	08:00	72	0,266	0,066	0,57

CBR (%)	22,83%
Expansão (%)	0,57
OBS:	
GC: 100%	Δw: 0.0%

PENETRAÇÃO	TEMPO	leitura anel	Carga	Pressão
(mm)	(min)	(mm)	(N)	(kN/cm²)
0,00	0,0	0,0	0,0	0,000
0,630	0,5	10,0	20,2	0,997
1,270	1,0	38,0	76,8	3,787
1,900	1,5	108,0	218,2	10,764
2,540	2,0	138,0	278,8	13,754
3,170	2,5	149,0	301,0	14,850
3,810	3,0	164,0	331,3	16,345
4,440	3,5	171,0	345,4	17,043
5,080	4,0	186,0	375,7	18,538
5,720	4,5	197,0	397,9	19,634
6,350	5,0	209,0	422,2	20,830
6,990	5,5	223,0	450,5	22,225
7,620	6,0	231,0	466,6	23,022
8,260	6,5	253,0	511,1	25,215

Ponto 1	CBR (%)	Valor Corrigido	CBR (%)
Carga (kN/cm²)		Carga (kN/cm²)	
CBR P/ 2,54mm (%)	13,75	15,75	22,83
CBR P/ 5,08mm (%)	18,54	20,25	20,05
		CBR (%)	22,83

K= 2,0200

ANEXO A – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO (HRB) - AASHO

SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DO HIGHWAY RESEARCH BOARD (HBR) - AASHO											
Classificação Geral	Solos Granulares Pp,200 < 35%							Solos Siltosos e Argilosos Pp,200 > 35%			
Classificação por grupos e subgrupos % que passa	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
# 10	< 50										
# 40	< 30	< 50	> 50								
# 200	< 15	< 25	< 10	< 35	< 35	< 35	< 35	> 35	> 35	> 35	> 35
Limite de Liquidez	-	-	-	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40
Índice de Plasticidade	< 6		Não Plástico	< 10	< 10	> 10	> 10	< 10	< 10	> 10	> 10
Índice de Grupo	0		0	0		< 4		< 8	< 12	< 16	< 20
Tipo do material predominante	Pedregulho e Areia		Areia Fina	Pedregulhos e Areias Siltosas ou Argilas Solos Siltosos						Solos Argilosos	
Comportamento como camada do pavimento	Excelente a Bom					Regular a Mau					