

UNIGUAÇU – UNIÃO DE ENSINO SUPERIOR DO IGUAÇU LTDA

FACULDADE UNIGUAÇU

ENGENHARIA CIVIL

PROJETO FINAL DE CURSO II

THAIS MONIELLY SILVA OLIVEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLOS COM ADIÇÃO
DE AGREGADO DE RCD PARA APLICAÇÃO EM BASES E SUB-
BASES DE PAVIMENTOS**

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR

2025

THAIS MONIELLY SILVA OLIVEIRA

ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLOS COM ADIÇÃO DE AGREGADO DE RCD PARA APLICAÇÃO EM BASES E SUB- BASES DE PAVIMENTOS

Projeto de pesquisa apresentado como requisito para
aprovação na disciplina de Projeto Final de Curso II do
curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU.
Orientador(a): Daniela Kunz.

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR

2025



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TERMO DE APROVAÇÃO

THAIS MONIELLY SILVA OLIVEIRA

ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLOS COM ADIÇÃO DE AGREGADO DE RCD PARA APLICAÇÃO EM BASES E SUB- BASES DE PAVIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil apresentado, sob a orientação da Profa. Me. Daniela Kunz, aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel no curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU, pela seguinte banca examinadora:

Professora Me. Daniela Kunz
Faculdade UNIGUAÇU

Profa. Me. Melissa Pastorini Proença
Faculdade UNIGUAÇU

Prof. Me. Aleksey Grando
Faculdade UNIGUAÇU

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU, 5 DE NOVEMBRO DE 2025.

A folha devidamente assinada está sob guarda da secretaria do curso.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, acima de tudo, a Deus, por ter me concedido força, sabedoria e serenidade ao longo de toda esta jornada.

Aos meus pais, minha base, por todo o amor incondicional, apoio constante e por nunca deixarem de acreditar em mim. Cada conquista alcançada é também de vocês, pois estiveram ao meu lado em todos os momentos, sendo pilares fundamentais na minha formação pessoal e acadêmica.

E, com orgulho, dedico este feito a mim mesmo. Por ter acreditado nos meus sonhos, por ter perseverado mesmo diante dos desafios e por nunca ter desistido deste objetivo. A conclusão deste trabalho representa muito mais do que o encerramento de um ciclo — é a confirmação do esforço, da superação e da dedicação empenhada ao longo de toda minha trajetória na Faculdade Uniguaçu.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ser minha fonte constante de força, sabedoria e serenidade em cada etapa desta caminhada. Sem a Sua presença e luz, nada disso teria sido possível.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pela paciência e pelo apoio em todos os momentos. A confiança de vocês em meu potencial foi o alicerce que me sustentou, dando-me coragem para seguir adiante mesmo diante das maiores dificuldades.

À minha orientadora, Mestra e Engenheira Civil Daniela Kunz, pela orientação técnica precisa, pela paciência, disponibilidade e por compartilhar seu vasto conhecimento de forma tão generosa. Sua dedicação e compromisso acadêmico foram fundamentais para a realização deste trabalho, contribuindo de maneira significativa para a qualidade e o rigor científico desta pesquisa.

À Engenheira Mecânica Jaqueline Orth, por sua atenção, incentivo e apoio em momentos decisivos. Seu profissionalismo, sensibilidade e exemplo pessoal foram inspirações constantes ao longo desta jornada.

Um agradecimento muito especial à Mestra Gabriela Oro, laboratorista da instituição, pela dedicação, paciência e inestimável auxílio na realização dos ensaios laboratoriais. Sua competência técnica e disponibilidade foram essenciais para a execução prática deste trabalho e para a obtenção de resultados confiáveis e consistentes.

A todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para esta trajetória — colegas, amigos, professores e familiares — deixo meu mais sincero reconhecimento. Este trabalho não representa apenas o resultado de um esforço individual, mas também a soma do apoio, da orientação e da inspiração recebidos ao longo do caminho.

A cada um de vocês, meu profundo e eterno agradecimento.

EPÍGRAFE

“Até aqui nos ajudou o Senhor.”

RESUMO

O presente trabalho analisa o comportamento mecânico de um solo argiloso natural incorporado com diferentes teores de resíduos da construção e demolição (RCD) — 25% e 50% — com o propósito de avaliar a viabilidade técnica dessas misturas para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. A pesquisa foi conduzida com base nos procedimentos das normas ABNT NBR 9895:2017, que estabelece as diretrizes para determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR), e ABNT NBR 7182:2016, referente ao ensaio de compactação tipo Proctor Normal. O solo utilizado foi coletado no município de São Miguel do Iguaçu – PR, caracterizando-se como um solo fino argiloso de baixa capacidade de suporte inicial, condição comum em diversas regiões do Estado do Paraná. As amostras foram preparadas em laboratório com teores de 0%, 25% e 50% de RCD, devidamente homogêneas e moldadas para os ensaios de compactação e resistência. Os resultados obtidos demonstraram que a introdução de RCD ao solo propicia melhorias significativas no comportamento mecânico dos materiais, principalmente devido ao aumento da fração granular e à redução da plasticidade. Observou-se que a adição de RCD elevou os valores de CBR em todas as misturas estudadas, além de reduzir os índices de expansão, indicando maior estabilidade volumétrica durante o processo de saturação. A mistura contendo 25% de RCD apresentou o melhor desempenho geral, alcançando um equilíbrio satisfatório entre capacidade de suporte, densidade seca máxima e comportamento volumétrico. Tais características tornam essa proporção adequada para utilização em camadas de sub-base de pavimentos destinados a vias urbanas e estradas de baixo a médio volume de tráfego, atendendo às exigências das normas técnicas e às recomendações encontradas na literatura. Já o teor de 50% de RCD, apesar de também apresentar incremento de resistência em relação ao solo natural, não superou o desempenho da mistura de 25%, provavelmente devido ao excesso de material granular, que prejudicou a compactação ideal e, consequentemente, seu comportamento mecânico. Diante desses resultados, o estudo evidencia o potencial do RCD como um insumo alternativo, sustentável e economicamente viável para obras rodoviárias, contribuindo para a redução da disposição inadequada de resíduos, a conservação de jazidas naturais e o incentivo a práticas construtivas alinhadas aos princípios da economia circular. Assim, a pesquisa reforça a importância da valorização de materiais reciclados na Engenharia Civil, demonstrando que soluções tecnicamente eficientes podem caminhar lado a lado com ações ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: RCD; CBR; solo argiloso; pavimentação; sustentabilidade.

ABSTRACT

This study analyzes the mechanical behavior of a natural clay soil incorporating different levels of construction and demolition waste (CDW) — 25% and 50% — with the purpose of evaluating the technical feasibility of these mixtures for application in base and sub-base layers of pavements. The research was conducted based on the procedures of ABNT NBR 9895:2017, which establishes the guidelines for determining the California Bearing Ratio (CBR), and ABNT NBR 7182:2016, referring to the Standard Proctor compaction test. The soil used was collected in the municipality of São Miguel do Iguaçu – PR, and is characterized as a fine clayey soil with low initial bearing capacity, a common condition in several regions of the State of Paraná. The samples were prepared in the laboratory with 0%, 25%, and 50% recycled construction and demolition waste (RCD) contents, properly homogenized, and molded for compaction and resistance tests. The results obtained demonstrated that the introduction of RCD to the soil provides significant improvements in the mechanical behavior of the materials, mainly due to the increase in the granular fraction and the reduction in plasticity. It was observed that the addition of RCD increased the CBR values in all the mixtures studied, in addition to reducing the expansion indices, indicating greater volumetric stability during the saturation process. The mixture containing 25% recycled concrete aggregate (RCD) showed the best overall performance, achieving a satisfactory balance between bearing capacity, maximum dry density, and volumetric behavior. These characteristics make this proportion suitable for use in sub-base layers of pavements intended for urban roads and highways with low to medium traffic volume, meeting the requirements of technical standards and recommendations found in the literature. The 50% RCD content, although also showing increased resistance compared to natural soil, did not surpass the performance of the 25% mixture, probably due to the excess of granular material, which hindered ideal compaction and, consequently, its mechanical behavior. Given these results, the study highlights the potential of C&D waste as an alternative, sustainable, and economically viable input for road construction, contributing to the reduction of inadequate waste disposal, the conservation of natural deposits, and the encouragement of construction practices aligned with the principles of the circular economy. Thus, the research reinforces the importance of valuing recycled materials in Civil Engineering, demonstrating that technically efficient solutions can go hand in hand with environmentally responsible actions.

Keywords: C&D waste; CBR; clay soil; paving; sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 JUSTIFICATIVA	13
3 OBJETIVOS	14
3.1 OBJETIVO GERAL	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E SUSTENTABILIDADE	15
4.2 PANORAMA GERAL E NO BRASIL DA GERAÇÃO DE RCD	16
4.3 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	18
4.4 PROCESSAMENTO E REAPROVEITAMENTO DO RCD	20
4.5 PAVIMENTAÇÃO	22
4.6 SOLOS PARA BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS	24
4.7 APLICAÇÃO DO RCD NA PAVIMENTAÇÃO	28
4.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS SOLOS MELHORADOS COM RCD	29
4.8.1 Ensaio de Granulometria	29
4.8.2 Ensaio dos Limites de Atterberg	30
4.8.3 Índice de Suporte Califórnia (CBR)	32
4.9 CAPACIDADE DE SUPORTE DOS SOLOS – ENSAIO CBR	33
5 MATERIAIS E MÉTODOS	35
5.1 MATERIAIS	35
5.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	36
5.2.1 Caracterização dos materiais	36
5.2.2 Preparação das misturas solo–RCD	37
5.2.3 Ensaio de compactação (Proctor Normal)	37
5.2.4 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR)	38
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO DE RCD	39
6.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	40
6.2.1 Granulometria	40
6.2.2 Limites de Atterberg	41
6.3 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	43

6.3.1 Classificação SUCS.....	43
6.3.2 Classificação HRB	44
6.4 COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL.....	44
6.4.1 Resultados compactação solo natural	44
6.4.2 Resultados compactação solo com adição de 25% de agregado de RCD	45
6.4.3 Resultados compactação solo com adição de 50% de agregado de RCD	46
6.5 ENSAIO DE CBR SOLO NATURAL	47
6.6 ENSAIO CBR COM ADIÇÃO DE 25% DE AGREGADO DE RCD	50
6.7 ENSAIO CBR COM ADIÇÃO DE 50% DE AGREGADO DE RCD	53
7 CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Separação do RCD	17
Figura 2 - Separação do RCD	17
Figura 3 - Total de geração de RCD em milhões de ton/ano na Europa.....	17
Figura 4 - Granulometria Brita nº 2 - RCD	19
Figura 5 - Areia (pó reciclado)	21
Figura 6 - Rachãozinho	21
Figura 7 - Brita Graduada	22
Figura 8 - Brita Corrida	22
Figura 9 - Camadas do pavimento flexível	24
Figura 10 - Casagrande	32
Figura 11 - Incisão central	32
Figura 12 - Amostra antes e depois do ensaio	32
Figura 13 - Equipamento usado para realização do CBR	34
Figura 14 - Mapa mental dos ensaios a serem realizados por ordem de execução .	35
Figura 15 - Agregado de RCD- Brita nº 1	36
Figura 16 – Curva Granulométrica dos agregados de RCD.....	39
Figura 17 – Curva Granulométrica do solo.....	41
Figura 18 – Gráfico da Reta de Limite de Liquidez (LL) em Função do Número de Golpes.....	42
Figura 19 – Curva de Compactação Proctor – Relação entre Umidade e Densidade Seca.....	45
Figura 20 - Curva de Compactação Proctor com adição de 25% de agregado de RCD.....	46
Figura 21- Curva de Compactação Proctor com adição de 50% de agregado de RCD.....	47
Figura 22 - Curva 1 CBR – Solo natural	48
Figura 23 – Curva 2 CBR – Solo natural	48
Figura 24 – Curva 3 CBR – Solo natural	49
Figura 25 – Curva 4 CBR – Solo natural	49
Figura 26 – Curva 1 CBR – Mistura 25% RCD 75% Solo	51
Figura 27 – Curva 2 CBR – Mistura 25% RCD 75% Solo	51
Figura 28 – Curva 3 CBR – Mistura 25% RCD 75% Solo	51
Figura 29 – Curva 4 CBR – Mistura 25% RCD 75% Solo	52
Figura 30 – Curva 1 CBR – Mistura 50% RCD 50% Solo	53
Figura 31 – Curva 2 CBR – Mistura 50% RCD 50% Solo	54
Figura 32 – Curva 3 CBR – Mistura 50% RCD 50% Solo	54
Figura 33 – Curva 4 CBR – Mistura 50% RCD 50% Solo	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Condições exigidas para agregados reciclados para pavimentação.....	20
Quadro 2 - Classificação dos solos - SUCS	24
Quadro 3 - Sistema de classificação dos solos HRB	25

1 INTRODUÇÃO

Vive-se em uma sociedade em constante evolução, na qual o seu avanço impacta diretamente o meio ambiente. A construção civil, é impulsionada pelo crescimento urbano e consome muitos recursos naturais sendo responsável por cerca de 75% da sua extração, contribuindo para a degradação ambiental (Pinto, 1999).

Dentre os principais desafios enfrentados pelo setor, a gestão dos resíduos da construção e demolição (RCD) tem se destacado como uma questão crítica, exigindo soluções sustentáveis para minimizar seus efeitos negativos. O “destino correto” dos resíduos sempre foi tema de discordância no meio construtivo, com base nisso o Conama nº 307 (BRASIL, 2002) elaborou o PGRCC- Plano de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil, a qual propõe aos grandes fornecedores de RCD efetuarem o descarte adequado dos resíduos gerados.

Segundo Moreira (2018), em diversos países europeus a preocupação com a geração de RCD já vem sendo discutida há décadas, o que resultou na adoção de políticas eficazes para reduzir a deposição irregular e estimular a reutilização desses materiais na construção civil. A reciclagem de RCD é uma alternativa eficaz para reduzir impactos ambientais e o uso de agregados naturais. Complementando esse cenário, Iglesias e Alberte (2019) destacam que, somente no ano de 2017, foram coletados aproximadamente 45 milhões de toneladas/ano de RCD, evidenciando a magnitude do problema e a relevância de soluções que favoreçam o reaproveitamento desses resíduos.

A reciclagem desses resíduos, geralmente é realizada nas usinas de reciclagem de RCD onde o material pode ser dividido em quatro classes, essa divisão é referente ao tipo de material. Ribeiro (2022), afirma que os materiais inertes predominantes no RCD são o Betão e materiais cerâmicos que podem variar seu volume entre 40% e 85%, e para que o material reciclado possa ser empregado na construção civil o mesmo precisa pertencer a classe A e atender aos requisitos do Conama nº 307 (BRASIL, 2002).

Diante disso, este estudo avalia a incorporação de RCD em solos para verificar sua viabilidade em camadas de base e sub-base de pavimentos, com foco na capacidade de suporte obtida pelo ensaio de CBR. A pesquisa busca incentivar práticas mais sustentáveis, promovendo melhor destinação dos resíduos e menor uso de recursos naturais.

2 JUSTIFICATIVA

A realização desse trabalho se justifica pela necessidade de alternativas mais sustentáveis na pavimentação, reduzindo o impacto ambiental e promovendo soluções economicamente viáveis para o setor da construção civil. A incorporação de resíduos da construção e demolição (RCD) ao solo para uso como base e sub-base é uma estratégia promissora, pois contribui para a reutilização de materiais descartados e minimiza a extração de agregados naturais. A busca por alternativas sustentáveis tem se tornado crescente devido a demanda por infraestrutura viária no Brasil.

De acordo com Silva, Fucale e Ferreira (2019), a substituição graduada de agregados por RCD tem se mostrado eficaz, proporcionando um desempenho satisfatório e, em alguns casos, excelente. Essa prática melhora as propriedades mecânicas e físicas do solo, como compactação, resistência e permeabilidade, resultando em camadas mais estáveis e duráveis para pavimentação, os resultados tem atendido as especificações da ABNT NBR 15116:2021 e NBR 9895:2017.

Além dos benefícios técnicos, a utilização de RCD na engenharia de pavimentos está alinhada com diretrizes ambientais e práticas sustentáveis, contribuindo para a redução de passivos ambientais e incentivando a inovação no setor de infraestrutura. Dessa forma, este estudo busca reforçar a viabilidade dessa abordagem, ampliando as possibilidades para uma engenharia mais sustentável e eficiente.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da incorporação de diferentes porcentagens de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades mecânicas de um solo para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos, com foco na capacidade de suporte (CBR), comparando os resultados com o solo sem adição de RCD.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Caracterizar os materiais utilizados, incluindo o solo natural e o agregado de RCD, por meio de ensaios físicos e granulométricos;
- II. Definir a umidade ótima e o peso específico seco máximo através do ensaio proctor normal;
- III. Determinar a capacidade de suporte das misturas solo-RCD e comparar com o solo sem adição de resíduos;
- IV. Avaliar o impacto da incorporação do RCD nas propriedades mecânicas do solo;
- V. Comparar os resultados obtidos com especificações normativas e diretrizes técnicas, verificando a viabilidade da aplicação do solo-RCD em camadas de base e sub-base de pavimentos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E SUSTENTABILIDADE

Com a revolução industrial, o desenvolvimento urbano e rural teve um impulso significativo, o que acarretou em ganhos e perdas ao longo dos anos. Esse crescimento desenfreado levou a exploração acelerada da matéria-prima. A consolidação do capitalismo industrial veio carregada de inovações, as quais trouxeram à tona a pauta sobre poluição industrial e as construções de indústrias em áreas urbanas, que se tornaram geradoras de resíduos, aumentando assim os poluentes lançados no meio ambiente (GANZALA, 2018).

No âmbito da construção civil, a sustentabilidade tem se tornado um recurso notório. Dentre as diversas formas de aplicá-la, o reaproveitamento de materiais descartados, provenientes de construções e reformas, vem ganhando destaque, pois sua reutilização tem impacto direto na economia dos projetos (KREBS; DANILEVICZ, 2022).

Com isso, pode-se afirmar que a sustentabilidade não se trata mais de uma filosofia, mas sim de uma prioridade universal, ou seja, um pilar social. Esse tema tem se tornado cada vez mais presente na sociedade, despertando uma consciência ambiental mais aguçada. A busca pela minimização dos impactos ambientais, vem ganhando força, devido a necessidade de manutenção e preservação do meio ambiente (COSTA, 2019).

Na construção civil, observa-se que o consumo de matéria-prima e a geração de resíduos tem se tornado cada vez mais preocupante. Oliveira e Santos (2021), alegam que a criação de medidas para minimizar esses impactos começou a ser discutida e adotada pelas indústrias.

No entanto, nem todos os centros urbanos realizam o descarte adequado dos resíduos de construção e demolição (RCD), e destacam também que a construção civil é responsável por utilizar 50 % dos recursos naturais nas obras (GOMES; SILVA; SOUZA, 2021).

Com o objetivo de promover uma gestão ambientalmente adequada dos resíduos da construção civil (RCC), a Resolução nº 307 do CONAMA, de 2002, estabelece diretrizes para a redução, reutilização, reciclagem e destinação final correta desses materiais. A norma classifica os resíduos em quatro categorias: **Classe**

A (materiais reutilizáveis ou recicláveis como agregados, como concreto, argamassa, tijolos e solos), **Classe B** (materiais recicláveis para outros usos, como plásticos, papéis, metais e vidros), **Classe C** (materiais sem viabilidade técnica ou econômica de reciclagem, como certos resíduos de gesso) e **Classe D** (resíduos perigosos ou contaminados, como tintas, solventes e materiais de demolição com amianto).

A resolução também define responsabilidades para os geradores, que devem apresentar um Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC), e para os municípios, que devem organizar a infraestrutura para recepção, triagem e destinação dos resíduos. Dessa forma, a Resolução nº 307/2002 contribui diretamente para a sustentabilidade na construção civil, minimizando os impactos ambientais e incentivando práticas mais conscientes no setor.

Dessa forma, percebe-se que a sustentabilidade na construção civil deixou de ser apenas uma tendência e passou a representar uma necessidade diante dos desafios ambientais contemporâneos. A adoção de práticas sustentáveis, como o reaproveitamento de materiais e a correta gestão dos resíduos de construção e demolição, contribui significativamente para a redução dos impactos ambientais, a preservação dos recursos naturais e a promoção de um desenvolvimento urbano mais equilibrado. Assim, reforça-se a importância da conscientização e do comprometimento de todos os agentes envolvidos no setor da construção civil, a fim de garantir obras mais responsáveis e alinhadas aos princípios da sustentabilidade.

4.2 PANORAMA GERAL E NO BRASIL DA GERAÇÃO DE RCD

A construção civil possui um papel significativo no esgotamento de materiais não renováveis. Barreto & Amorim (2020), mostram que os resíduos provenientes de construções são concebidos em grande escala e raramente tem o descarte adequado. Silva, Fucale e Ferreira (2019) afirmam que os resíduos de construção e demolição possuem um potencial de reciclagem equivalente a 91%. As Figuras 01 e 02 ilustram o processo de triagem dos materiais, etapa fundamental para separar e identificar os resíduos com potencial de reutilização.

Figura 01 – Separação do RCD.

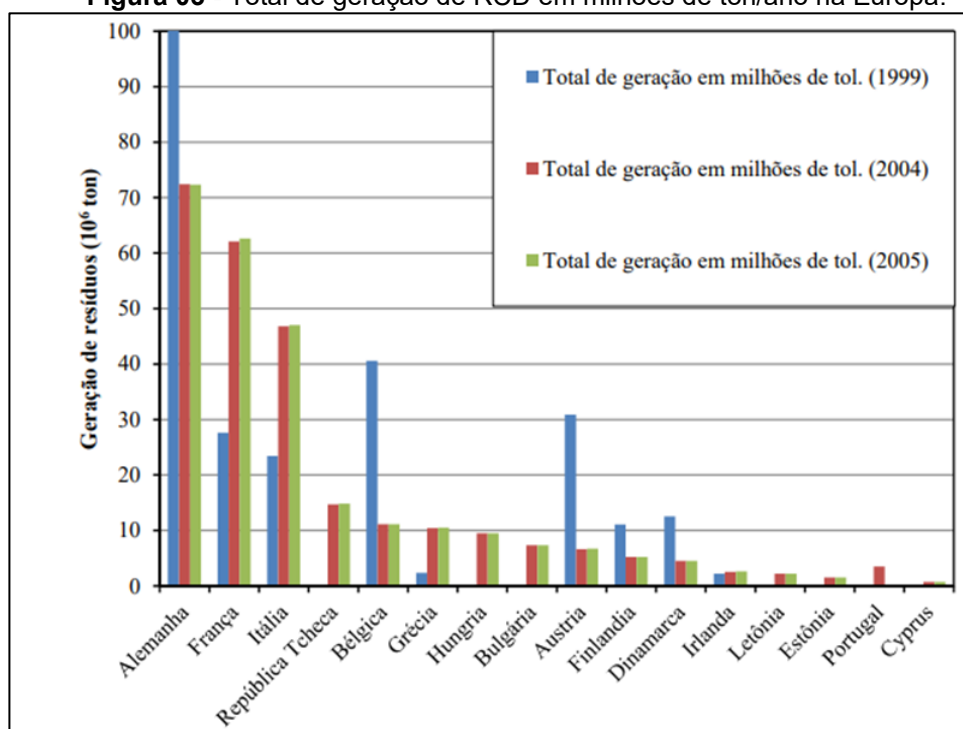
Fonte: Future Eco, (2025).

Figura 02 – Separação do RCD.

Fonte: Future Eco, (2025).

Moreira (2018), diz que países de primeiro mundo, foram os percursores no controle do crescimento dos materiais de RCD. Países da Europa demonstram esse empenho desde 1999 na figura 03. Observa-se que a diminuição do RCD é notória com o decorrer dos anos.

Em 2010, a união europeia atingiu a bagatela de 2,51 bilhões de toneladas de resíduos da construção e demolição (RCD). Países como China e Austrália também vem contribuindo negativamente para o aumento e armazenamento indevidos desses resíduos (BARRETO & AMORIM, 2020).

Figura 03 - Total de geração de RCD em milhões de ton/ano na Europa.

Fonte: MOREIRA, (2018).

No Brasil cerca de 50% dos resíduos gerados no país são provenientes dos resíduos de construção e demolição (Barreto & Amorim, 2020). Estados como São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Bahia, lideram o ranque de estados que mais geram resíduos de construção no país. O estado de São Paulo chega a emitir 23,1 milhões de toneladas por ano de RCD (PAULINO *et al.*, 2023).

Segundo o IBGE (2024), a estimativa populacional do Brasil neste mesmo ano seria de 212,6 milhões de habitantes, Bettini Comunicação (2024) salienta que em média um habitante gera entorno de 227 Kg anualmente de RCD, ou seja, se aplica essa quantidade a estimativa de habitantes de 2024 se tem entorno de 48,2602 milhões toneladas de RCD produzidos no ano.

Em concordância, segundo Iglesias e Alberte (2019), somente no ano de 2017 foram coletados aproximadamente 45 milhões de toneladas de RCD.

Autores como Pinto (1999) já apresentava preocupações provenientes do aumento crescente do RCD nos centros urbanos.

4.3 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são materiais resultantes de construções, reformas, reparos e demolições de obras civis, bem como da preparação e escavação de terrenos. Incluem-se nesse grupo materiais como blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros. Esses resíduos são popularmente conhecidos como entulhos de obras, calça ou metralha (CONAMA, 2002).

Grande parte desses materiais pode ser reaproveitado em obras de infraestrutura, como em pavimentações. No entanto, para que possam ser reutilizados de forma segura e eficiente, devem atender aos critérios técnicos de qualidade estabelecidos pela norma NBR 15115 (ABNT, 2004), que especifica os requisitos mínimos para o uso de RCD como material de pavimentação. Entre os parâmetros exigidos, destacam-se:

- I. Granulometria do material (coeficiente de uniformidade ≥ 10), a variação de tamanho dos grãos deve ser coerente, Figura 04;
- II. Dimensão máxima do grão de 63,5 mm, sendo que quando compactado ele não ultrapasse 2/3 da dimensão máxima estabelecida;

III. Porcentagem de material que passa na peneira de 0,42 mm (n° 40), para melhor compactação as partículas finas devem estar entre 10% a 40%;

IV. Índice de Suporte California (CBR) para base precisa ser $\geq 20\%$, isso vai dizer que o material terá uma resistência adequada para suportar grandes cargas, para garantir que o material tenha um volume equilibrado sua expansão precisa ser $\leq 1,0\%$, energia de compactação normal.

V. Para que não ocorra problemas na hora da compactação do material, a porcentagem dos grãos lamelares precisa ser menor que 30%;

VI. As porcentagens máximas de materiais indesejáveis com a mesma característica, não devem ultrapassar a linha de 2% em massa do RCD;

VII. Já os de características distintas precisam atender a 3% da massa;

VIII. Para que o RCD tenha a aprovação para ser usado, os materiais contidos nele não podem apresentar riscos à saúde ou ao meio ambiente.

O cumprimento desses critérios assegura a qualidade, a durabilidade e a segurança da aplicação do RCD em camadas de pavimentos. Além disso, essa regulamentação é essencial para orientar a gestão adequada dos resíduos da construção civil, promovendo a sustentabilidade, a economia circular e a redução de impactos ambientais no setor.

Figura 04 – Granulometria Brita n°2 – RCD.



Fonte: Future Eco, (2025).

Para que seja utilizado adequadamente, o RCD deve atender à NBR 15116 (ABNT,2004) pertencendo exclusivamente à a classe A, e apresentando distribuição

granulométrica adequada. Entre os requisitos (Quadro 1), destacam-se: coeficiente de uniformidade (Cu) superior a 10; dimensão máxima do agregado inferior a 63 mm; índice de forma inferior a 3, para garantir boa compactação sem comprometer a estabilidade do pavimento; e teor de material passante na peneira de 0,42 mm entre 10% e 40%, assegurando a qualidade do pavimento.

Quadro 01- Condições exigidas para agregados reciclados para pavimentação.

Propriedades		Agregado reciclado classe A		Normas de ensaios	
		Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
composição granulométrica		Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade Cu > 10		ABNT NBR 7181	
Dimensão máxima característica		≤ 63 mm		ABNT NBR NM 248	
Índice de forma		≤ 3	-	ABNT NBR 7809	-
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm		Entre 10% e 40%		ABNT NBR 7181	
Contaminantes - teores máximos em relação á massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas características ¹	2		Anexo A	Anexo B
	Materiais não minerais de características distintas ¹	3		Anexo A	Anexo B
	Sulfatos	2		ABNT NBR 9917	
¹ Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.					

Fonte: ABNT (2021).

4.4 PROCESSAMENTO E REAPROVEITAMENTO DO RCD

Segundo Silva (2021), a reciclagem é uma prática adotada com o objetivo de minimizar os impactos negativos das atividades humanas sobre o meio ambiente. No contexto da construção civil, municípios de diferentes portes enfrentam dificuldades para realizar o descarte adequado dos resíduos de construção e demolição (RCD). O aumento expressivo do volume desses resíduos tem tomado uma proporção significativa, e aterros de inerte, conhecidos também como “bota-foras”, que ficam localizados cada vez mais em áreas periféricas, enfrentam o esgotamento devido ao crescimento elevado tanto dos resíduos quanto do crescimento urbano.

A escassez de aterros centrais, especialmente em regiões metropolitanas, eleva os custos relacionados à coleta, transporte e destinação dos RCDs, em função do difícil acesso às áreas adequadas. Como consequência, aumenta-se a incidência de descartes irregulares em áreas urbanas densamente povoadas, configurando um grave problema de gestão (PINTO, 1999).

De acordo com Pinto (1999), e conforme reforçado por Mália, Brito e Bravo (2011), o descarte inadequado de RCD em locais impróprios tem se tornado cada vez mais comum, gerando não apenas impactos ambientais, mas também riscos à saúde pública.

De acordo com o Art. 9º da Resolução CONAMA nº 307/2002, o gerenciamento dos resíduos da construção civil deve seguir etapas específicas, iniciando-se pela caracterização, na qual o gerador identifica e quantifica os resíduos produzidos. Em seguida, ocorre a triagem, preferencialmente realizada no local de origem, podendo também ser executada em áreas de destinação licenciadas, respeitando-se as classes previamente estabelecidas. O acondicionamento deve assegurar o confinamento adequado dos resíduos até o transporte, garantindo condições que possibilitem sua reutilização e reciclagem. O transporte deve obedecer às exigências técnicas e legais aplicáveis, e a destinação final dos resíduos deve estar em conformidade com os critérios definidos na própria resolução.

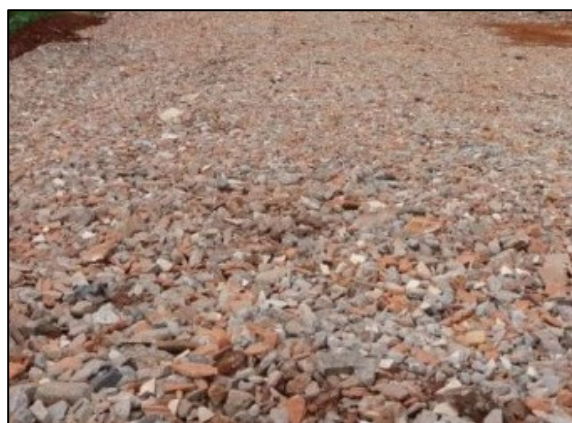
Estudos indicam que o processo de reciclagem tem início ainda no canteiro de obras. Após a triagem inicial, os materiais que não apresentam potencial para reutilização como agregados devem ser corretamente descartados. Já os resíduos classificados como Classe A — aqueles com potencial de reaproveitamento — são encaminhados para usinas de reciclagem, onde passam por etapas de trituração e peneiramento granulométrico. Esse processo permite a separação dos elementos e a obtenção de materiais com características granulométricas semelhantes às dos agregados convencionais, como areia (Figura 5), rachãozinho (Figura 6), brita graduada (Figura 7) e brita corrida (Figura 8) (OLIVEIRA; SANTOS, 2021).

Figura 05 – Areia (pó reciclado).



Fonte: Future Eco, (2025).

Figura 06 – Rachãozinho.



Fonte: Future Eco, (2025).

Figura 07 – Brita graduada.

Fonte: Future Eco, (2025).

Figura 08 – Brita Corrida.

Fonte: Future Eco, (2025).

Conforme estabelece a NBR 15116, para que um agregado possa ser classificado como agregado reciclado, apto ao uso na construção civil, é necessário que ele pertença exclusivamente à classe A. Essa classe pode ser subdividida em dois tipos principais: os agregados de resíduos de concreto (ARC), compostos predominantemente por fragmentos minerais oriundos de concreto à base de cimento Portland ou rochas naturais, devendo conter no mínimo 90% de fração graúda; e os agregados de resíduos mistos (ARM), que também têm origem mineral, entretanto, porém com fração graúda inferior a 90%.

É importante destacar que os agregados reciclados possuem limitações quanto à sua aplicação, especialmente devido à sua resistência mecânica inferior em comparação aos agregados naturais. Por esse motivo, seu uso não é recomendado em concretos estruturais. No entanto, apresentam bom desempenho e viabilidade técnica para aplicações em obras de pavimentação (ARMAS *et al.*, 2011).

4.5 PAVIMENTAÇÃO

Ramos e Savi (2022) definem o pavimento como o conjunto de camadas executadas sobre o subleito, após a etapa de terraplenagem, cuja função é resistir e distribuir adequadamente os esforços verticais provenientes do tráfego, melhorar as condições de rolamento em termos de conforto e segurança, além de aumentar a durabilidade da superfície de tráfego, suportando também os esforços horizontais nela incidentes.

No Brasil, o modal rodoviário compreende aproximadamente 1,725 milhões de quilômetros de rodovias. Contudo, devido à escassez de investimentos, grande parte dessas vias apresenta condições precárias. Apenas, cerca de 12,4%, o equivalente a 164,213 Km, encontram-se pavimentadas, o que compromete a qualidade da infraestrutura viária (SOUZA E ROCHA, 2022).

De acordo com Pereira (2019), a vida útil média das rodovias brasileiras varia entre 8 a 12 anos. A pavimentação é essencial para proporcionar conforto e segurança aos usuários, além de favorecer o desenvolvimento econômico das regiões atendidas ao intensificar o fluxo de veículos.

Os pavimentos podem ser classificados em três categorias: rígidos, semirrígidos, flexíveis. O dimensionamento dos pavimentos rígidos depende resistência da sua própria estrutura, enquanto nos pavimentos flexíveis a resistência está relacionada ao subleito. Além da classificação quanto a rigidez, os pavimentos também podem ser categorizados de acordo com as suas camadas estruturais, que são: base, sub-base, subleito e revestimento (PEREIRA, 2019).

Ramos e Savi (2022) explicam que o pavimento flexível é formado por várias camadas, cuja resistência está relacionada principalmente à força de cisalhamento provocada pelo tráfego. O revestimento é composto por concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), dosado e controlado em usinas apropriadas. No entanto, os autores observam que, embora amplamente utilizado, esse tipo de revestimento pode apresentar patologias, como fissuras, especialmente sob tráfego intenso.

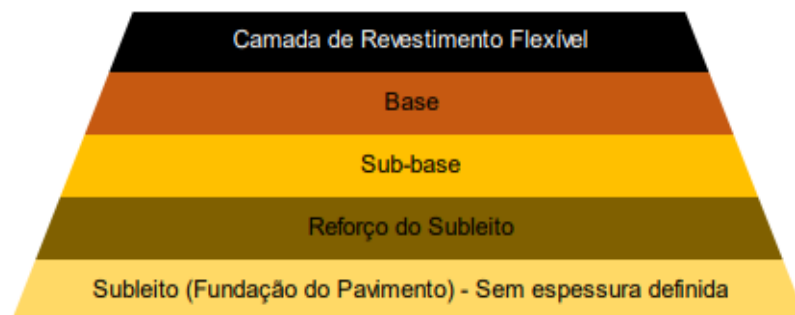
Os pavimentos semirrígidos, por sua vez, também utilizam revestimento asfáltico, mas se diferenciam dos pavimentos flexíveis por possuírem ligantes hidráulicos (como cimento Portland ou cal hidratada) em sua base ou sub-base. Suas camadas incluem revestimento, base cimentada, sub-base granular, reforço do subleito e subleito (PAIXÃO; CORDEIRO; CORREIA, 2017).

Quanto ao pavimento rígido, Guel, Locastro e Jorge (2024) destacam que ele é constituído por placas de concreto de cimento Portland, armado ou não, dispostas sobre base granular ou estabilizada. Esse tipo de pavimento deve atender aos requisitos mecânicos especificados em projeto.

Segundo Moreira (2018), no Brasil os pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico são os mais amplamente utilizados. Em vista disso, o presente estudo foca na aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) nas camadas de base e sub-base desses pavimentos, visando avaliar a resistência mecânica resultante dessa

adição. A Figura 9 ilustra as camadas constituintes de um pavimento flexível, detalhando sua estrutura típica, que será considerada na análise dos impactos da incorporação de RCD.

Figura 09 - Camadas do pavimento flexível.



Fonte: MOREIRA, (2018).

4.6 SOLOS PARA BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS

De acordo com a Embrapa (2025), os solos podem ser classificados quanto sua composição morfológica, sua composição química e física, bem como no perfil mineralógico. Para obter uma classificação mais precisa, podem ser aplicados métodos geotécnicos, os quais visam prever o comportamento estrutural dos solos obtidos em diferentes cenários.

Segundo Berto (2009), o método do Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, divide o solo em seis grupos principais, com base em sua granulometria e nos limites de consistência. O quadro 02 apresenta os seis grupos do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Quadro 02- Classificação dos solos - SUCS.

Classificação geral	Tipos principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (menos que 50% passando na #200)	Pedregulho ou solo pedregulhoso (Gravel)	GW, GP, GC e GM
	Areia (Sand) ou solo arenoso	SW, SP, SC e SM
SOLOS FINOS (mais que 50% passando na #200)	Baixa compressibilidade($LL < 50$)	ML, CL e OL
	Alta compressibilidade($LL > 50$)	MH, CH, OH
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfa (Peat)	Pt

Fonte: Adaptado de VARGAS (2009).

Berto (2009) ainda explica que, quando o solo apresenta uma quantidade relevante de partículas distintas, a classificação é feita utilizando uma simbologia dupla (ex.:GW-GP). A distinção entre solos finos e grossos ocorre após o material passar pela peneira de 0,075 mm, sendo que solos com partículas maiores são classificados como solos grossos e aqueles com partículas menores, como solos finos. Além disso, critérios como densidade, plasticidade, compressibilidade, dilatação, resistência a seco e rigidez também são avaliadas para determinar o comportamento do solo.

Outro método importante na classificação dos solos, é o *Highway Research Board* – HRB, que considera a granulometria e os limites de liquidez e plasticidade. A análise, realizada a partir do Quadro 03, envolve um processo de eliminação da esquerda para a direita, com os principais grupos sendo: A-1, que abrange materiais como pedregulho e areia, A-2, que contém solos intermediários com variação na plasticidade e teor de finos e A-3, composto por áreas finas, os quais detêm solos granulares com boa atuação, em seguida os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7, trazem solos silto-argilosos com atuação inferior, pois com o aumento da plasticidade e fragilidade ocorre a variação volumétrica (DNIT,2006) .

Quadro 03- Sistema de classificação dos solos HRB.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 max.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT, (2006).

Além da granulometria e dos limites de liquidez e plasticidade, segundo o DNIT (2006), o método HRB considera IG (índice de grupo) que seria o número inteiro que varia de 0 a 20, calculado com base na granulometria e nos limites de Atterberg do solo, o qual vai quantificar, de forma empírica, o desempenho esperado do solo sob tráfego rodoviário. Para realização desse cálculo, usa-se a equação:

$$IG = 0,2 a + 0,005 ac + 0,01 bd$$

- Eq.1

Onde:

- **a** = % de material que passa na peneira nº 200 -35.

Se o resultado for > 75, adota-se 75; se for < 35, adota-se 35. O valor final de a varia de 0 a 40.

- **b** = % de material que passa na peneira nº 200 - 15.

Se o resultado for > 55, adota-se 55; se for < 15, adota-se 15. O valor de b varia de 0 a 40.

- **c** = Valor do Limite de Liquidez -40.

Se o Limite de Liquidez for > 60, adota - se 60; se for < 40, adota-se 40. O valor de c varia de 0 a 20.

- **d** = Valor de Índice de Plasticidade -10.

Se o índice de Plasticidade for > 30, adota-se 30; se for < 10, adota-se 10. O valor de d varia de 0 a 20.

A execução das camadas de base e sub-base dos pavimentos deve ser realizada com materiais provenientes de jazidas ou áreas de empréstimo previamente selecionadas, que apresentem composição granulométrica adequada e estejam em conformidade com os limites estabelecidos pelas normas técnicas vigentes. Esses materiais não podem conter frações orgânicas, partículas friáveis ou quaisquer impurezas que comprometam o desempenho mecânico da estrutura do pavimento.

a) Materiais para Camada de Base (DNIT 141/2022)

A norma estabelece critérios rigorosos quanto ao comportamento mecânico e às características de plasticidade, garantindo maior estabilidade e resistência. Os principais requisitos são:

- Limite de Liquidez (LL): deve ser $\leq 25\%$;
- Índice de Plasticidade (IP): deve ser $\leq 6\%$.

Esses parâmetros visam assegurar que o material apresente baixa deformabilidade, reduzida susceptibilidade à umidade e comportamento adequado sob carregamentos repetitivos.

b) Materiais para Camada de Sub-base (DNIT 139/2010-ES)

Para a sub-base, além dos critérios granulométricos, destacam-se requisitos geotécnicos fundamentais para garantir suporte e controle de expansão dos materiais empregados.

- Índice de Grupo (IG): deve ser igual a zero, indicando solo de boa qualidade para aplicação rodoviária.
- Granulometria: o material retido na peneira nº 10 deve ser constituído por partículas duráveis, isentas de matéria orgânica, agregados moles ou substâncias prejudiciais.
- Índice de Suporte Califórnia (CBR/ISC):
 - Deve apresentar $\text{CBR} \geq 20\%$;
 - A expansão observada no corpo de prova deve ser $\leq 1\%$.Esses parâmetros devem ser determinados de acordo com os procedimentos estabelecidos na DNIT 139/2010-ES.
- Ensaio requeridos:
 - Compactação: conforme DNER-ME 129/94, utilizando a energia do Método B ou superior;
 - Ensaio CBR: conforme DNER-ME 049/94, observando a mesma energia utilizada no ensaio de compactação.
- Materiais Lateríticos: No caso específico de solos lateríticos, admite-se certa flexibilidade em relação aos limites usuais, considerando suas características peculiares de formação e comportamento. Assim, são aceitos:
 - i. Índice de Grupo diferente de zero;
 - ii. Expansão superior a 1%, desde que o material apresente expansibilidade inferior a 10%, conforme o ensaio DNER-ME 029/94.

Para garantir que os solos atendam aos critérios geotécnicos exigidos pelas normas técnicas, é necessário realizar ensaios específicos, como o *California Bearing Ratio* (CBR), que avaliam a compactação e resistência do solo. Esses testes são fundamentais para a classificação e seleção dos materiais, assegurando que o solo seja capaz de suportar os esforços impostos pela estrutura dos pavimentos, sejam eles rígidos ou flexíveis (ABNT, NBR 7182,2016).

4.7 APLICAÇÃO DO RCD NA PAVIMENTAÇÃO

Segundo Melo, Ferreira e Rodrigues (2021), o uso dos resíduos de construção e demolição no reforço das camadas de base, sub-base e subleito, tem ganhado relevância, por contribuir para a redução dos impactos ambientais gerados pela construção civil, principalmente em pavimentação em vias com baixo volume de tráfego.

Barreto e Amorim (2020), relatam que a aplicação do RCD na pavimentação no Brasil teve início na década de 1980, sendo considerada uma alternativa geotécnica econômica e eficaz. Os autores destacam que o RCD atende, ou até mesmo supera, os requisitos mínimos de resistência, durabilidade e estabilidade exigidos por normas técnicas, desde que devidamente testado. Ressaltam ainda que a adição de 20% de RCD ao solo pode dobrar o Índice de Suporte Califórnia (CBR), enquanto a brita exige uma adição de cerca de 40% para se obter ganho equivalente, o que demonstra a eficácia do RCD.

No contexto nacional, o crescente volume de resíduos de construção civil, impulsionado pela urbanização, torna o uso de RCD em vias urbanas uma alternativa viável para o reaproveitamento de materiais. A reutilização contribui para a redução da extração de recursos naturais e do volume de resíduos destinados a aterros (FRAGA; NASCIMENTO; OLIVEIRA, 2022).

Melo, Ferreira e Rodrigues (2021), destacam que a pavimentação é uma das mais beneficiadas pela utilização de agregados reciclados oriundos de RCD. Em estudo realizado, observaram que:

[...] os agregados oriundos de RCD desempenharam um bom potencial de sua utilização em revestimentos asfálticos à quente, baseado nas análises dos corpos de prova. Concluíram em seu estudo, que o RCD

para uso em pavimentação asfáltica, possuem boas propriedades referentes a Abrasão Los Angeles (35%) e índice de forma (0,87) atendendo os parâmetros estabelecidos pelas normas (ABNT) vigentes. [...]

Mediante ao que foi exposto, o desempenho dos resíduos de construção e demolição, tem se mostrado eficiente quando usados nas camadas de base e sub-base de pavimentos, desde que sejam observadas as normas técnicas que regulam sua classificação e aplicação.

4.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS SOLOS MELHORADOS COM RCD

Estudos de Nicolau e Barbosa (2023), bem como de Silva, Fucale e Ferreira (2019), demonstram que o uso do RCD como aditivo para melhoria de solos em pavimentação se consolidou como uma alternativa sustentável e eficiente para reforço de subleitos e camadas de pavimento. Quando o solo sofre essa incorporação, ele atua como estabilizante granular, promovendo o aumento da resistência mecânica, especialmente do Índice de Suporte Califórnia (CBR), além de reduzir a compressibilidade e melhorou a compactação, resultando em maior capacidade de suporte e durabilidade da estrutura do pavimento.

4.8.1 Ensaio de Granulometria

Barreto & Amorim (2020), com o ensaio de granulometria, confirmaram que a adição de RCD alterava positivamente as propriedades mecânicas dos solos, pois indicou que a adição do RCD em porcentagens de 50 a 70% proporcionou melhora significativa na capacidade de suporte.

O ensaio de granulometria, é essencial para determinar as propriedades físicas, como permeabilidade, capacidade de carga e compactação. Passa -se a amostra por uma série de peneiras de malhas gradualmente menores (geralmente variando de 4,8 mm a 0,075 mm), permitindo a separação das partículas em diferentes frações, como areia, cascalho, silte e argila. O material retido em cada peneira é pesado, e a partir dos dados obtidos, é possível calcular o percentual de cada fração e traçar a curva granulométrica, que é essencial para entender o comportamento do solo (ABNT, NBR 7181, 1984).

Equação para o cálculo da massa total da amostra:

$$M_s = \frac{(M_t - M_g)}{(100 + h)} \times 100 + M_g$$

- Eq. 2

Onde,

M_s = massa total da amostra;

M_t = massa da amostra seca ao ar;

M_g = massa do material seco retido na peneira de 2,0 mm;

H = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,00 mm.

Equação para as peneiras 50, 38, 25, 19, 9,5, 4,8 e 2,0mm.

$$Q_g = \frac{(M_s - M_i)}{M_s} \times 100$$

- Eq. 3

Onde:

Q_g = porcentagem de material passado em cada peneira;

M_s = massa total da amostra;

M_i = massa do material retido acumulado em cada peneira.

4.8.2. Ensaio dos Limites de Atterberg

Esses ensaios seguem as diretrizes da NBR 6459 (ABNT,1984) e a NBR 7180 (ABNT,1984) e são essenciais para se determinação e a caracterização do comportamento plástico e de consistência dos solos finos, especialmente os argilosos, em diferentes teores de umidade.

Para a realização do limite de liquidez, prepara-se uma amostra conforme a NBR 6457, utiliza-se metade da amostra obtida na capsula de porcelana, onde é adicionado água destilada em quantidade reduzida, misturando-se arduamente até obter uma pasta homogênea com consistência adequada para que a incisão formada se feche em cerca de 35 golpes. A pasta é então moldada na concha do aparelho de Casagrande (Figura 10), garantindo uma espessura uniforme e ausência de bolhas de ar. Utilizando um cinzel, abre-se uma incisão central (Figura 11), e realiza-se o ensaio, contando-se os golpes até que as bordas da incisão se unam em 13 mm (Figura 12).

Amostras são coletadas junto à região fechada da incisão para determinação da umidade, repetindo-se o processo com diferentes teores de água até obter pelo menos cinco pontos distintos, cobrindo uma faixa de 15 a 35 golpes. Os dados são então plotados em gráfico com escala logarítmica para os golpes e escala aritmética para o teor de umidade, deste modo ajusta-se uma reta para encontrar o teor de umidade correspondente a 25 golpes, valor que define o limite de liquidez. Todo o processo deve ser realizado em condições ambientais controladas para evitar perda de umidade por evaporação, assegurando a precisão do resultado final (ABNT NBR 6459,1984).

Quanto ao limite de plasticidade, também é realizada a separação da amostra conforme a NBR 6457, solo com ou sem secagem prévia, após a separação a amostra é umedecida até atingir consistência plástica e moldar cilindros com cerca de 10 g da amostra, rolando-os até atingirem 3 mm de diâmetro. O solo é considerado plástico até o ponto em que o cilindro começa a se fragmentar, o que indica o limite de plasticidade. Caso ocorra o rompimento do cilindro antes de atingir esse diâmetro, a amostra é umidificada novamente e o processo repetido. A umidade correspondente ao momento da fragmentação é determinada e registrada, sendo necessário repetir o procedimento três vezes para obter um valor representativo (ABNT NBR 7180,1984). O limite de plasticidade pode ser calculado desta forma:

Limite de plasticidade:

$$Lp = \left(\frac{M2}{M1 + M2} \right) \times 100$$

- Eq. 4

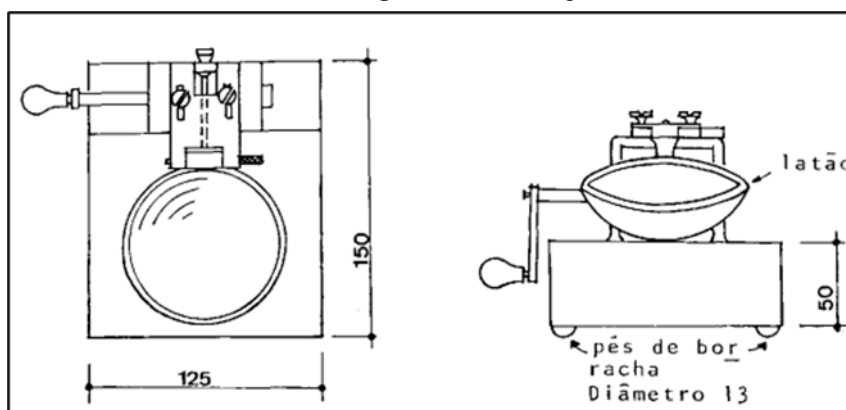
M1 = massa da amostra de solo úmida

M2= massa da amostra de solo seca

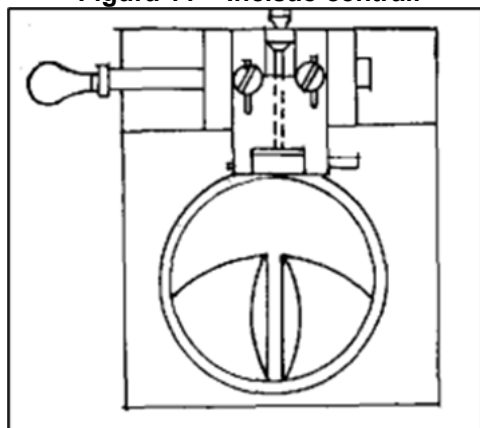
Índice de plasticidade:

$$IP = LL - LP$$

- Eq. 5

Figura 10 – Casagrande.

Fonte: NBR 6459, (1984).

Figura 11 – Incisão central.

Fonte: NBR 6459, (1984).

Figura 12 – Amostra antes e depois do ensaio.

Fonte: NBR 6459, (1984).

4.8.3. Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Neste ensaio, a amostra deve ser preparada conforme a NBR 6457 (ABNT,2024). A quantidade recomendada pela norma NBR 9895-87 (ABNT,1987) é de 50 kg, que deve ser umedecida e compactada até a densidade especificada. Em seguida, a amostra é colocada em um módulo de ensaio e o pistão de 50 mm é pressionado sobre o solo a uma taxa controlada de 1,27 mm/min, registrando a carga necessária para a penetração.

A carga aplicada ao solo é então comparada com a carga de referência, obtida em uma amostra de solo californiano, para calcular o índice CBR, que é expresso em porcentagem e reflete a resistência do solo à penetração. O índice CBR é fundamental para o dimensionamento das camadas de pavimento, determinando a capacidade de um solo ou material de suportar o tráfego e outras cargas aplicadas nas obras de infraestrutura (ABNT NBR 9895, 2017).

De acordo com a NBR 9895:2017, o valor do CBR é calculado nas penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm, utilizando a relação entre a pressão medida e a pressão padrão de referência (70,3 kgf/cm² e 105,6 kgf/cm², respectivamente). Para calcular o CBR, utilizamos a equação:

$$CBR(\%) = \frac{\sigma_{medida}}{\sigma_{padrao}} \times 100$$

-Eq. 6

Equação para cálculo do CBR:

$$Expansão(\%) = \frac{(leitura\ final - leitura\ inicial\ no\ extensômetro)}{altura\ inicial\ do\ corpo - de - prova} \times 100$$

-Eq. 7

Barreto & Amorim (2020), apresentaram resultados positivos quanto a adição de agregado de RCD ao solo, pois promoveu melhorias nas características geotécnicas, como a capacidade de suporte. Neste ensaio, é realizada a compactação, disposta pela ABNT NBR 7182(1986), dos corpos de prova moldados com a adição do RCD, com intuito de medir a resistência do solo quando submetido a uma carga axial até a ruptura. Os resultados obtidos vão classificar a mistura quanto a sua aptidão para ser usada como base e sub-base. Esse ensaio é essencial para a determinação do desempenho mecânico do solo.

Assim, verifica-se que a incorporação do agregado de RCD aos solos representa uma solução viável e sustentável para aprimorar o desempenho mecânico das camadas de pavimentação, desde que utilizadas dentro dos parâmetros normativos estabelecidos.

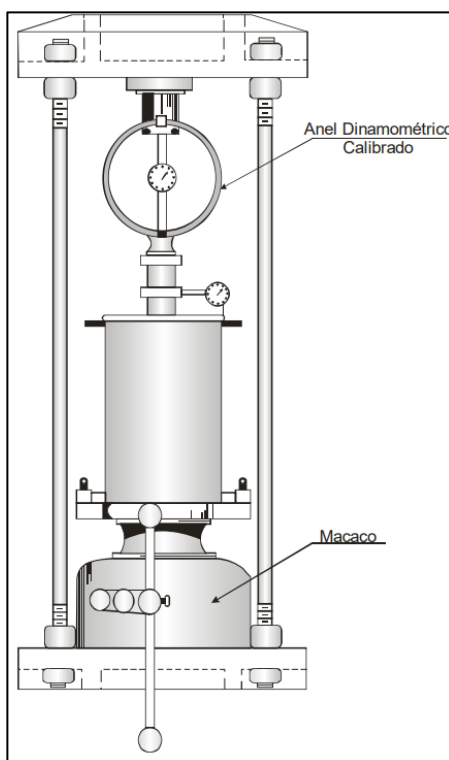
4.9 CAPACIDADE DE SUPORTE DOS SOLOS – ENSAIO CBR

Sokalaski (2021), expressa que para avaliar a capacidade de carga de um solo, ou seja, ver o melhor teor de umidade e nível de compactação do solo padrão ou solo aditivado, pode-se usar o ensaio California Bearing Ratio (CBR), onde se realiza o ensaio de penetração em corpos de prova compactados.

O Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), diz que o ensaio possui etapas que necessitam ser seguidas para obter resultados precisos. Preliminarmente, o solo em análise é compactado em um molde com cinco camadas de material, denominado de corpo de prova, onde executa-se 12 golpes para subleitos e 26 ou 55 para sub-base e base, com um soquete (4,5Kg), onde a altura total atinja 12,5 cm após a compactação. Logo depois, o material é raspado na altura exata do molde e uma amostra representativa é retirada para análise da umidade. Múltiplos corpos de prova são produzidos com diferentes teores de umidade, e a curva de compactação é traçada.

Os corpos-de-prova são imersos em água por quatro dias antes de serem submetidos à penetração em uma prensa (Figura 13) a uma velocidade constante. A curva pressão-penetração é ajustada, caso necessário, e o valor do CBR é calculado comparando a pressão corrigida com a pressão padrão. O valor final do CBR é determinado com base nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas, sendo registrado junto à curva de compactação, indicando a umidade ótima do solo.

Figura 13 – Equipamento usado para realização do CBR.



Fonte: DNIT, (2006).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado no município de São Miguel do Iguaçu – PR, região pertencente à Mesorregião Oeste Paranaense (Figura 14), composta predominantemente por Latossolos e Nitossolos segundo a EMBRAPA (2025). Esses solos apresentam textura argilo-siltosa, característica favorável para estudos de estabilização, dada a sua elevada plasticidade e baixa capacidade de suporte natural.

Figura 14 – Localização do município de São Miguel do Iguaçu- PR.



Fonte: Paiva; Gonçalves Junior; Santos (2023).

Os agregados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD) foram disponibilizados por uma usina de reciclagem de RCD localizada na cidade de Cascavel -PR. Ela seleciona, recondiciona e destina corretamente esses resíduos, transformando-os em agregados reciclados para reutilização em novas obras. A empresa foi considerada a melhor usina de reciclagem de RCD do país, certificada pelo programa de qualidade da ABRECON, sendo modelo de sustentabilidade no ranking nacional (ABRECON, 2022).

Os agregados reciclados fornecidos pela usina, possuem granulometria semelhantes a brita 1, Figura 15.

Figura 15: Agregado de RCD- Brita nº 1



Fonte: Autora, 2025.

5.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A pesquisa foi conduzida no Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade Uniguaçu, conforme os procedimentos normativos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). O estudo teve como objetivo avaliar a influência da adição de resíduos de construção e demolição (RCD) nas propriedades físicas e mecânicas de um solo local, visando seu uso em camadas de base de pavimentos.

A metodologia foi organizada em quatro etapas principais: caracterização dos materiais, preparação das misturas, ensaio de compactação e determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR).

5.2.1 Caracterização dos materiais

A caracterização física do solo e do RCD foi realizada para compreender suas propriedades e identificar o potencial de uso nas misturas. Os ensaios realizados foram:

- a) **Análise Granulométrica – NBR 7181:2016:** O ensaio permitiu determinar a distribuição das partículas por tamanho, diferenciando as frações de pedregulho, areia, silte e argila. O procedimento utilizou peneiramento para as frações grossas e sedimentação com o método da pipeta para as frações finas, conforme os critérios da norma.

b) Limites de Atterberg – NBR 6459:1984 (Limite de Liquidez) e NBR 7180:1984 (Limite de Plasticidade): Esses limites indicam a variação de consistência do solo em função do teor de umidade. A diferença entre ambos fornece o **Índice de Plasticidade (IP)**, que auxilia na avaliação da expansibilidade e da trabalhabilidade do material.

c) Classificação dos Solos – SUCS e HRB/DNIT (2006): A partir dos resultados de granulometria e limites de consistência, o solo foi classificado segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e o Sistema de Classificação do HRB (Highway Research Board) adotado pelo DNIT, permitindo enquadrar o material em grupos de aplicação em pavimentação.

Além disso, foram avaliadas visualmente as características do RCD, considerando sua composição predominante (fragmentos de concreto, argamassa e cerâmica) e o processo de britagem e peneiramento para obtenção da granulometria adequada à mistura com o solo.

5.2.2 Preparação das misturas solo–RCD

O solo natural foi seco ao ar e destorroado manualmente, passando pela peneira de abertura 4,8 mm, para garantir uniformidade. O RCD foi previamente triturado e peneirado na mesma malha, visando compatibilidade granulométrica entre os materiais.

As misturas foram preparadas em proporções de 0%, 25% e 50% de RCD em massa seca, representando níveis crescentes de substituição. Cada amostra foi homogeneizada em bandejas metálicas até atingir aparência e textura uniformes.

O objetivo desta etapa foi analisar a influência progressiva da adição do RCD nas propriedades físicas e mecânicas, observando possíveis ganhos de estabilidade e redução da plasticidade, fatores essenciais para uso em bases de pavimentos.

5.2.3 Ensaio de compactação (Proctor Normal)

O ensaio de compactação foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 7182 (ABNT, 2016), adotando-se a energia de compactação

normal ($600 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$). A escolha dessa energia justifica-se por representar o nível de compactação característico de obras rodoviárias sujeitas a tráfego leve a moderado, como subleitos melhorados e camadas de sub-base, proporcionando valores de densidade e umidade compatíveis com as condições efetivamente obtidas em campo para esse tipo de solicitação. Além disso, a energia normal evita a superestimação da densidade seca, permitindo a avaliação realista do comportamento mecânico do solo e das misturas com RCD. O ensaio teve por finalidade determinar a umidade ótima (w_o) e a massa específica seca máxima (γ_{dmax}) das amostras, parâmetros essenciais para o controle tecnológico e para o adequado desempenho das camadas estruturais do pavimento.

Cada corpo de prova foi moldado em três camadas, recebendo 26 golpes por camada, aplicados por um soquete de 4,5 kg caindo de uma altura de 45 cm, em molde cilíndrico de 10 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura.

Após a compactação, as amostras foram pesadas e secas em estufa a 105 ± 5 °C até massa constante, permitindo a construção da curva de compactação. Essa curva foi utilizada para identificar os parâmetros de densificação e avaliar o efeito do RCD na estrutura do solo.

5.2.4 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR)

A resistência ao cisalhamento e à penetração das misturas foi avaliada por meio do Ensaio CBR, conforme a NBR 9895 (ABNT, 2017). O método consistiu na penetração de um pistão de 50 mm de diâmetro, à velocidade constante de 1,27 mm/min, sobre corpos de prova moldados na umidade ótima e densidade máxima determinadas no ensaio de compactação.

Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram imersos em água por quatro dias (96 horas), simulando condições de saturação em campo. Durante a penetração, foram registradas as pressões correspondentes às deformações de 0,1" e 0,2", sendo o valor de CBR obtido pela relação entre a pressão medida e a pressão padrão de um solo californiano (70,31 e 105,46 kgf/cm², respectivamente).

Além do valor do índice CBR, foi observada a expansão volumétrica das amostras após o período de imersão, parâmetro relevante para avaliar o comportamento expansivo do solo e o efeito estabilizador do RCD.

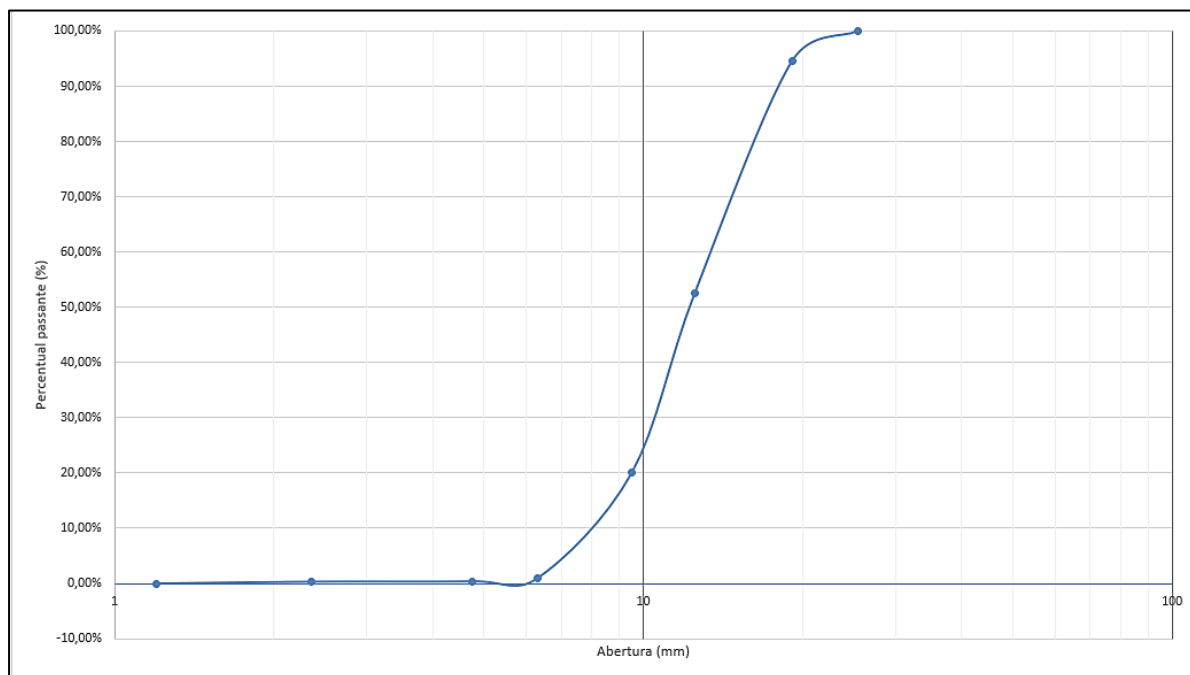
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO DE RCD

A caracterização granulométrica do agregado proveniente de resíduos da construção civil (RCD) evidenciou um material predominantemente composto por partículas de granulometria média a grossa, com boa distribuição entre as frações areia grossa e pedregulho fino. A curva granulométrica apresentada na Figura 16 demonstra uma transição contínua entre as diferentes faixas de tamanho de partícula, o que indica boa graduação e ausência de descontinuidades significativas.

Observa-se que o material apresenta percentual elevado de passante entre 10 mm e 4,8 mm, sugerindo predominância de partículas de dimensões compatíveis com agregados utilizados em camadas granulares de pavimentação. Tal característica é desejável, pois contribui para o melhor empacotamento das partículas durante a compactação, resultando em maior densidade seca e estabilidade mecânica (DNIT 183/2018).

Figura 16: Curva Granulométrica dos agregados de RCD.



Fonte: Autora, 2025.

O comportamento da curva indica que o RCD analisado possui classificação próxima à de um material bem graduado, podendo ser comparável a solos granulares

com frações arenosas. Essa característica favorece sua aplicação como material alternativo para bases e sub-bases de pavimentos, desde que apresentadas boas condições de compacidade e resistência.

Além disso, a presença de partículas angulares e rugosas — típicas de materiais reciclados de concreto e argamassa — tende a melhorar o atrito interno da mistura solo-RCD, favorecendo o desempenho sob esforços de cisalhamento e confinamento. De acordo com Silva et al. (2021), esse tipo de textura superficial contribui para o aumento do módulo de resiliência e da capacidade de suporte, aspectos essenciais em camadas estruturais de pavimentos.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

6.2.1 Granulometria

A Figura 17 apresenta a curva granulométrica do solo natural, obtida conforme a NBR 7181:2016 – Análise Granulométrica de Solos.

Observa-se que a curva apresenta uma transição suave entre as frações granulométricas, indicando uma distribuição contínua de tamanhos de partículas, sem descontinuidades significativas. O comportamento da curva evidencia que o solo possui uma fração considerável de partículas finas, com percentuais expressivos de silte e argila, além de pequena fração arenosa.

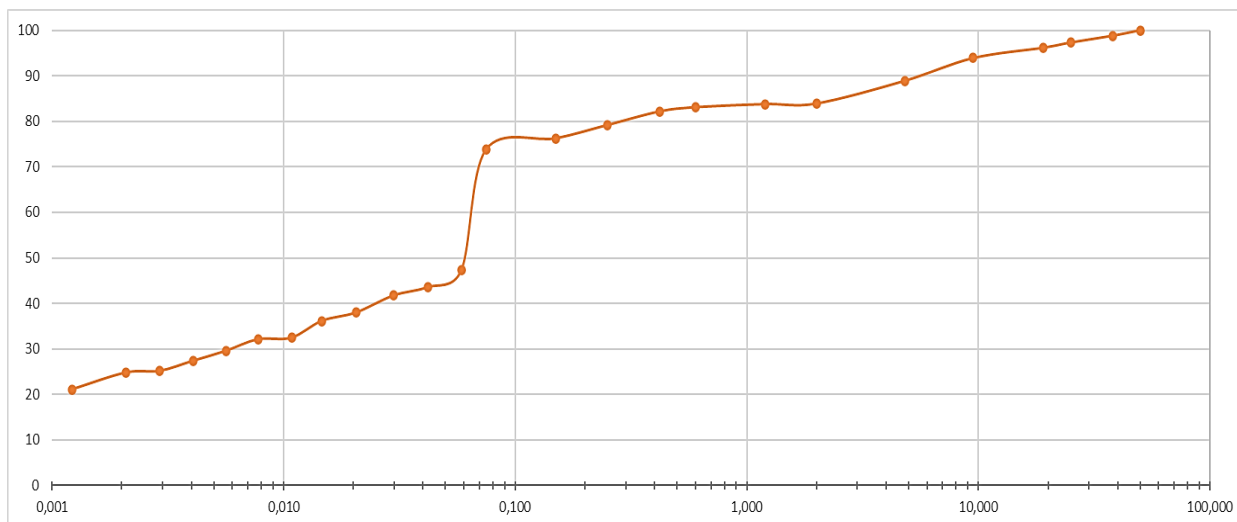
O ponto de inflexão acentuado próximo à faixa de 0,075 mm (passante na peneira nº 200) demonstra a predominância das partículas finas, características de solos de textura média a fina. Essa configuração é típica de solos argilo-siltosos, nos quais a presença de finos exerce grande influência no comportamento mecânico, especialmente quanto à plasticidade, permeabilidade e compactabilidade.

De modo geral, o solo apresenta:

- Frações grossas (areias): pequena proporção, representando a estrutura de suporte granular;
- Frações finas (silte + argila): predominantes, conferindo alta coesão e sensibilidade à variação de umidade;

- Curva contínua e bem graduada: indica que o material não é uniformemente granulado, o que favorece o empacotamento das partículas, embora a presença de argila reduza a permeabilidade.

Figura 17: Curva Granulométrica do solo.



Fonte: Autora, 2025.

6.2.2 Limites de Atterberg

Para a caracterização do solo, foram realizados os ensaios de limites de Atterberg conforme as normas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984). Esses ensaios permitiram determinar o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP) e o consequente índice de plasticidade (IP), parâmetros fundamentais para avaliar o comportamento do solo quanto à consistência e à variação volumétrica em função da umidade.

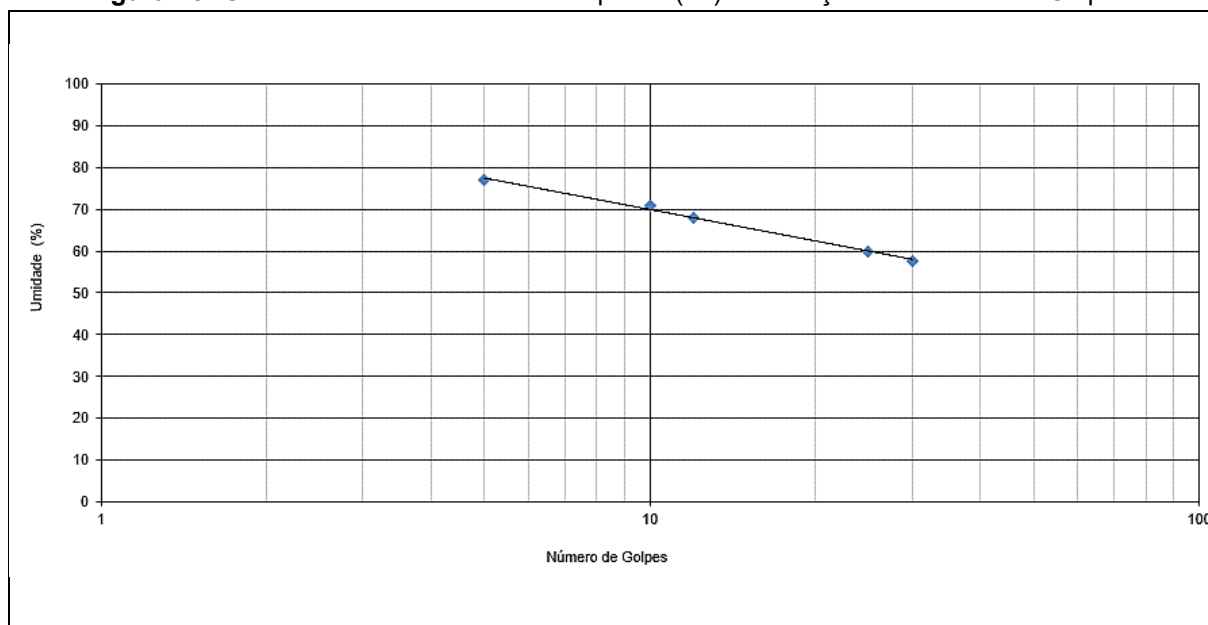
a) Limite de Liquidez (LL)

No ensaio de limite de liquidez, foram obtidos valores crescentes de umidade para diferentes números de golpes no aparelho de Casagrande. A relação entre o teor de umidade e o logaritmo do número de golpes resultou em uma reta de regressão linear, conforme ilustrado na Figura 18.

A partir dessa curva, o ponto correspondente a 25 golpes foi adotado para determinação do limite de liquidez (LL), resultando em um valor de 60%. Esse resultado indica um solo de alta plasticidade, característico de materiais com

predominância da fração argilosa e comportamento fortemente dependente da umidade. Solos com LL acima de 50% são classificados como argilas de alta plasticidade (CH), segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Figura 18: Gráfico da Reta de Limite de Liquidez (LL) em Função do Número de Golpes.



Fonte: Autora, 2025.

b) Limite de Plasticidade (LP)

O limite de plasticidade (LP) foi determinado de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 1984), resultando em uma média de 40,26% de umidade. Esse valor representa o teor de umidade no qual o solo passa da condição plástica para a condição semissólida, deixando de poder ser moldado sem ruptura.

c) Índice de Plasticidade (IP)

O índice de plasticidade (IP), calculado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, foi de 19,74%, conforme a Equação 1.

$$IP = LL - LP = 60\% - 40,26\% = 19,74\%$$

De acordo com os critérios do DNIT 172/2016 – ME, valores de IP entre 10% e 20% indicam solos com plasticidade média a alta. Esse comportamento sugere que o

material apresenta coesão considerável, mas ainda mantém certa trabalhabilidade e capacidade de compactação. No entanto, solos com IP elevado tendem a exibir redução na resistência ao cisalhamento quando saturados, o que justifica a proposta de adição de RCD como material estabilizante, buscando reduzir a plasticidade e melhorar a performance mecânica do solo para uso em bases e sub-bases de pavimentos.

6.3 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização e dos limites de consistência, o solo foi classificado segundo dois sistemas amplamente utilizados em engenharia geotécnica e rodoviária: o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e a Classificação do DNIT (2006). Essa análise permite identificar o comportamento do material quanto à plasticidade, coesão e aplicabilidade em obras de infraestrutura, especialmente em camadas de pavimentação.

6.3.1 Classificação SUCS

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), que utiliza como parâmetros principais o limite de liquidez (LL) e o índice de plasticidade (IP), o solo analisado foi classificado como MH, correspondente a um silte de alta compressibilidade. Essa classificação decorre do fato de o material apresentar $LL = 60\%$, valor superior ao limite de 50% que separa solos de baixa/média compressibilidade (ML, CL) dos solos de alta compressibilidade (MH, CH). Além disso, o índice de plasticidade $IP = 19,74\%$ encontra-se abaixo da Linha A do SUCS, o que confirma sua natureza siltosa, e não argilosa.

Solos do tipo MH possuem comportamento pouco coesivo, elevada sensibilidade à variação de umidade e grande tendência à deformabilidade, podendo apresentar variações volumétricas significativas em condições de saturação. Embora sejam comuns em diversas regiões do Paraná, seu uso em pavimentação exige melhorias ou estabilizações, como adição de material granular, ligantes (cal ou cimento) ou materiais reciclados, como o RCD incorporado nesta pesquisa, a fim de aumentar sua resistência e reduzir a suscetibilidade à deformação.

6.3.2 Classificação HRB

Segundo o método de classificação proposto pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), HRB – Highway Research Board (atual AASHTO), que considera a granulometria e os limites de Atterberg, o solo analisado foi enquadrado no grupo A-7, representativo de solos argilosos com baixa qualidade para uso estrutural direto em pavimentação.

Mais especificamente, o material foi classificado como A-7-5, categoria que engloba solos com índice de plasticidade superior a 10% e limite de liquidez elevado, características que indicam alta plasticidade e baixa permeabilidade. Tais propriedades resultam em baixo valor de suporte (CBR) e alta suscetibilidade à deformação quando expostos à umidade, tornando necessário algum tipo de estabilização antes de sua aplicação em camadas estruturais.

Essa classificação reforça o diagnóstico obtido pelo SUCS, evidenciando que o solo, embora apresente coesão e estabilidade em estado seco, sofre redução significativa de resistência sob condições saturadas, comportamento típico de argilas lateríticas e expansivas encontradas em solos tropicais da região Sul do Brasil.

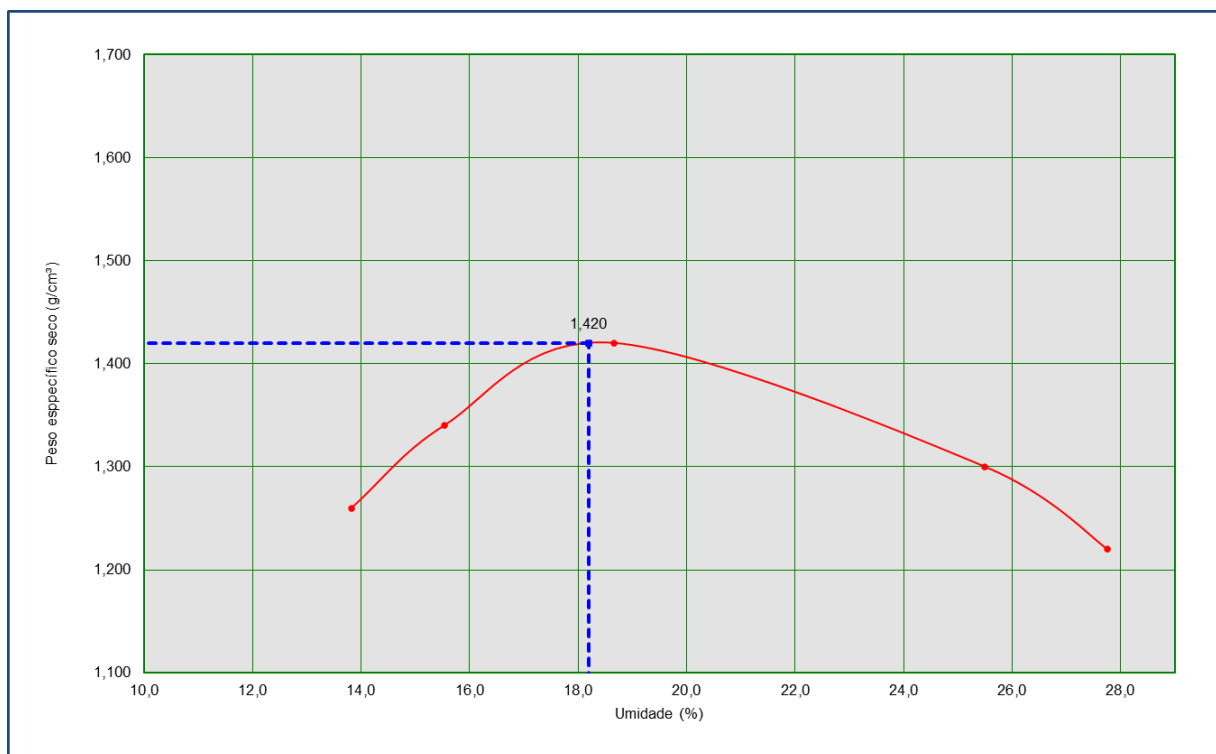
6.4 COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL

6.4.1 Resultados compactação solo natural

O solo analisado por meio do ensaio de compactação do tipo Proctor Normal, conforme a NBR 7182/1986, demonstrou um comportamento típico de materiais argilo-siltosos. O ensaio revelou uma densidade seca máxima de $1,42 \text{ g/cm}^3$, alcançada com um teor de umidade de 18,2%, considerado como a umidade ótima de compactação para esse material. Esse comportamento é típico de materiais finos, predominantemente argilo-siltosos, nos quais o aumento do teor de umidade até certo ponto favorece a lubrificação das partículas, proporcionando uma melhor rearrumação e, conseqüentemente, maior densidade. A partir desse ponto, o acréscimo de água passa a ocupar os vazios entre as partículas, reduzindo o contato entre elas e diminuindo a densidade seca.

A Figura 19 demonstra o resultado obtido através do ensaio de proctor normal no solo natural.

Figura 19: Curva de Compactação Proctor – Relação entre Umidade e Densidade Seca.



Fonte: Autora, 2025.

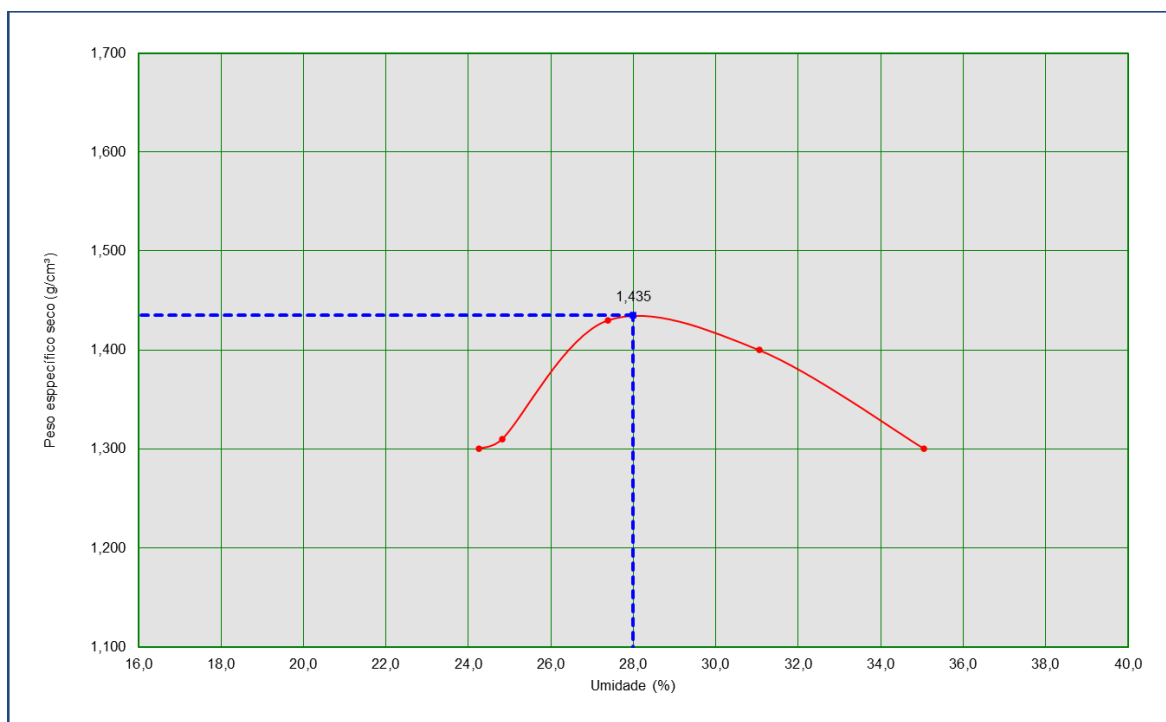
6.4.2 Resultados compactação solo com adição de 25% de agregado de RCD

Com a adição de 25% de RCD, os resultados demonstraram $\gamma_{dmax} = 1,435 \text{ g/cm}^3$ e $w_o = 28\%$, indicando pequeno aumento na densidade seca máxima e elevação expressiva da umidade ótima (Figura 20). Esse comportamento é coerente com o esperado para misturas com resíduos reciclados compostos por fragmentos de concreto, argamassa e cerâmica, materiais que possuem maior porosidade e absorção de água.

A adição do RCD promoveu uma estrutura mais granular, reduzindo a coesão e ampliando os vazios entre partículas. Com isso, foi necessária maior quantidade de água para lubrificar os contatos e permitir o rearranjo das partículas durante a compactação. A leve elevação da densidade indica que as partículas mais rígidas do resíduo contribuíram para um melhor empacotamento, mesmo com o aumento da umidade.

Do ponto de vista prático, essa mistura apresentou maior trabalhabilidade e menor sensibilidade à variação de umidade, favorecendo a compactação em campo e indicando potencial de uso em camadas de subleito e sub-base de pavimentos de baixo a médio tráfego.

Figura 20: Curva de Compactação Proctor com adição de 25% de agregado de RCD.



Fonte: Autora, 2025.

6.4.3 Resultados compactação solo com adição de 50% de agregado de RCD

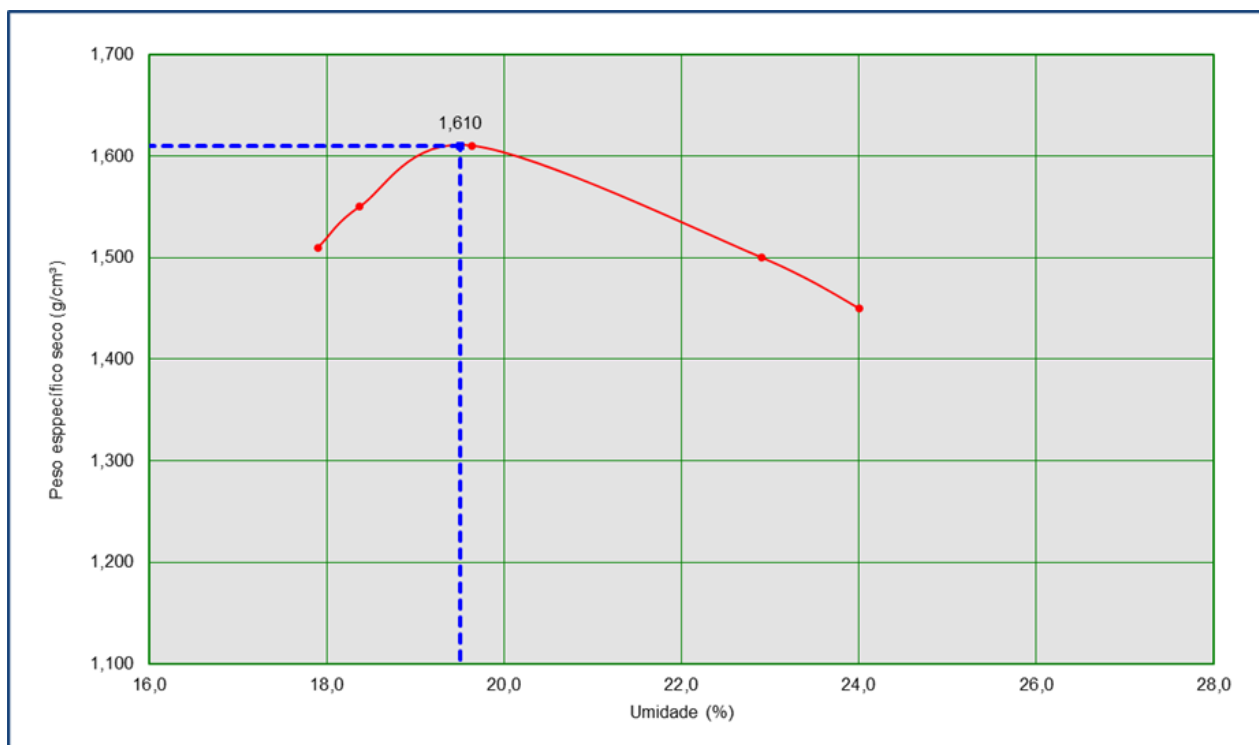
No ensaio com 50% de RCD, observou-se um comportamento distinto: a curva indicou $\gamma_{dmax} = 1,610 \text{ g/cm}^3$ e $w_o = 20\%$ (Figura 21). Esse resultado sugere um aumento expressivo da densidade seca máxima em relação às amostras anteriores, acompanhado de redução da umidade ótima.

Fisicamente, esse desempenho pode ser explicado pelo predomínio de partículas graúdas e angulosas, que passam a atuar como um esqueleto estrutural resistente, reduzindo a influência da fração fina e proporcionando maior compactação por empacotamento mecânico.

Ainda assim, considerando a natureza do material, o comportamento é coerente com uma mistura que se torna predominantemente granular, menos coesiva

e mais estável volumetricamente, com menor influência da água e melhor desempenho sob carregamento.

Figura 21: Curva de Compactação Proctor com adição de 50% de agregado de RCD.



Fonte: Autora, 2025.

6.5 ENSAIO DE CBR SOLO NATURAL

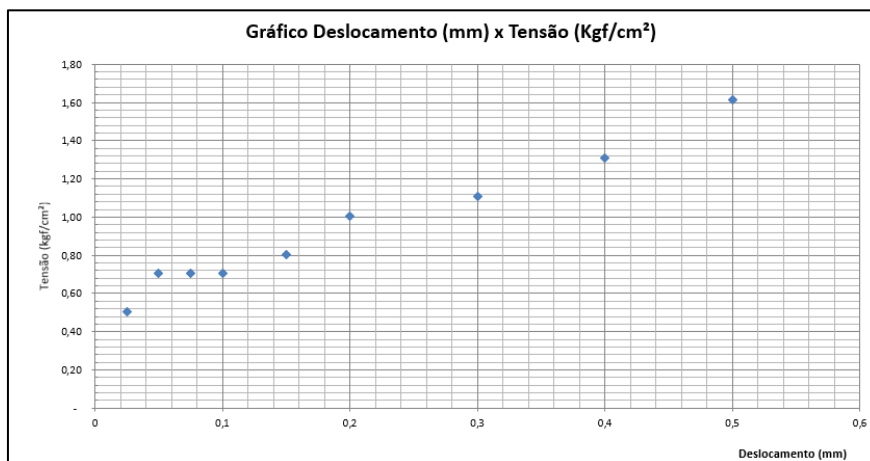
O ensaio de CBR (California Bearing Ratio) foi realizado para caracterizar a resistência do solo à penetração sob carga, conforme as diretrizes da NBR 9895:2017 e do DNER-ME 049/94, que definem o procedimento de determinação do índice de suporte Califórnia. O objetivo principal foi avaliar a capacidade de suporte do solo natural, fundamental para o dimensionamento de camadas de pavimentos e demais obras de infraestrutura rodoviária.

O solo em estudo foi classificado como solo fino, uma vez que mais de 50% do material passou pela peneira nº 200 (0,075 mm), conforme demonstrado na análise granulométrica.

Durante a execução, o pistão foi pressionado contra o corpo de prova com incrementos de penetração de 0,025 polegadas ($\approx 0,635$ mm), registrando-se a pressão (kgf/cm²) correspondente em cada etapa. As leituras obtidas foram

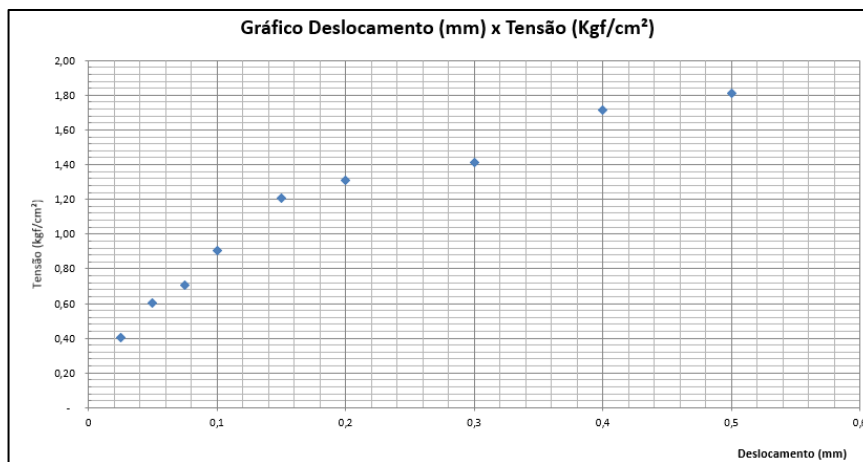
convertidas em gráficos relacionando pressão versus deslocamento, conforme ilustrado nas Figuras 22 a 25.

Figura 22: Curva 1 de CBR – Solo natural.

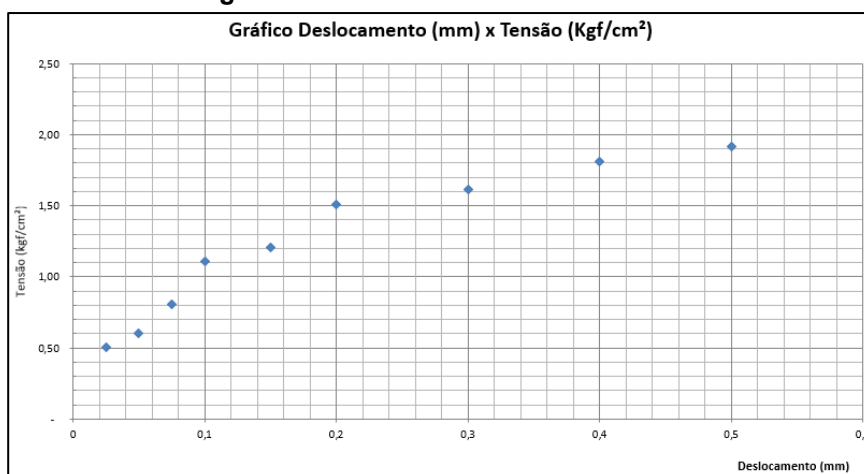


Fonte: Autora, 2025.

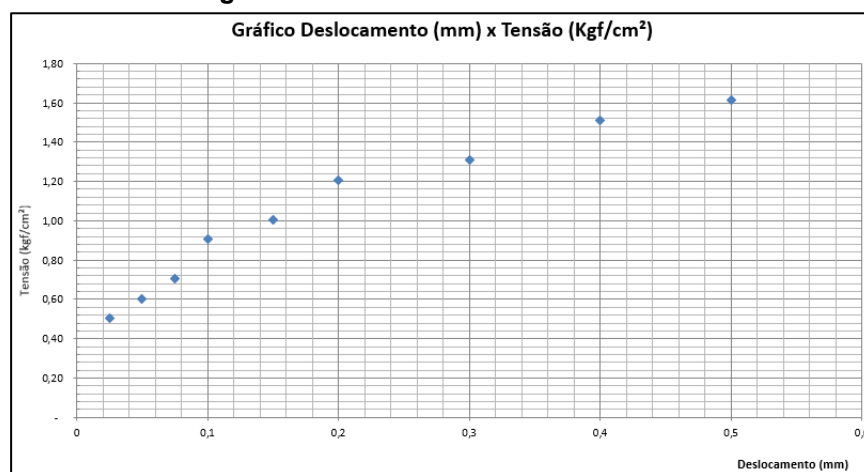
Figura 23: Curva 2 de CBR – Solo natural.



Fonte: Autora, 2025.

Figura 24: Curva 3 de CBR – Solo natural.

Fonte: Autora, 2025.

Figura 25: Curva 4 de CBR – Solo natural.

Fonte: Autora, 2025.

As curvas obtidas apresentaram crescimento gradual da pressão com o aumento da penetração, comportamento típico de solos finos de baixa resistência, onde o aumento da carga promove deformações plásticas progressivas.

A. Resultado CBR referente ao solo natural

Com base nas médias das pressões registradas nos quatro pontos de leitura, foram obtidos os seguintes resultados:

- Penetração de 2,5 mm: 0,91 kgf/cm², com CBR = 12,94%
- Penetração de 5,0 mm: 1,31 kgf/cm², com CBR= 12,40%

De acordo com o critério normativo, adota-se o maior valor obtido, portanto o valor do CBR=12,94%.

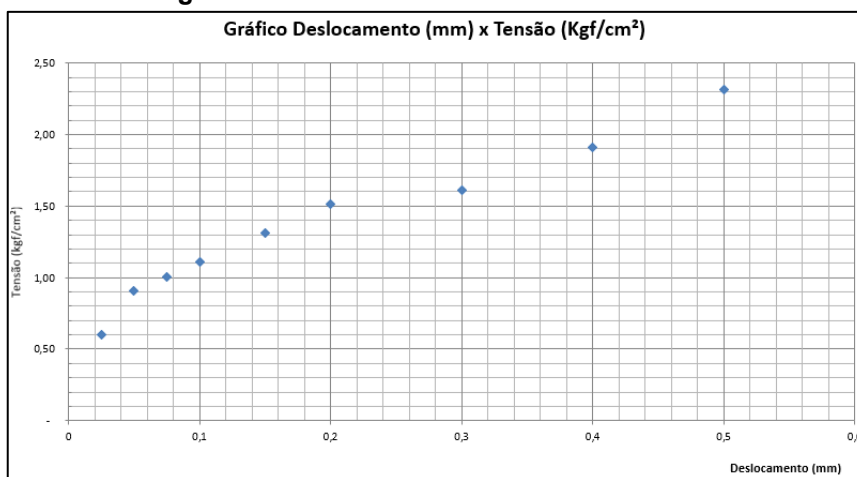
B. Resultado do cálculo de expansão – CBR solo natural

Com base na altura inicial do corpo de prova ($h_0 = 175$ mm) e na leitura média final de 0,6 mm, obteve-se uma expansão de 0,343%, conforme os procedimentos da ABNT NBR 9895:2017. De acordo com a norma, valores inferiores a 0,5% indicam solos de baixa expansibilidade. Assim, o solo analisado pode ser classificado como pouco expansivo, apresentando comportamento estável durante a imersão, característica favorável para uso em camadas de pavimento, ainda que seu CBR de 12,94% revele baixa capacidade de suporte.

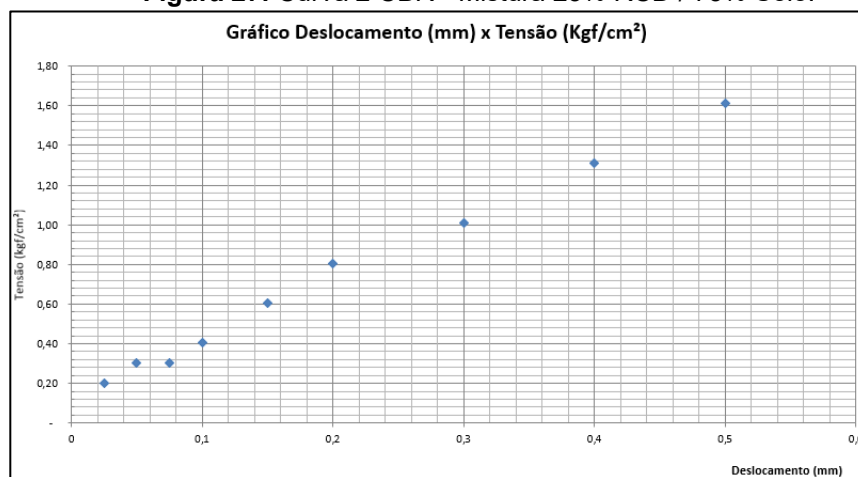
6.6 ENSAIO CBR COM ADIÇÃO DE 25% DE AGREGADO DE RCD

O ensaio de CBR (California Bearing Ratio) da amostra com 25% de resíduo de construção e demolição (RCD) teve como objetivo avaliar a influência da incorporação desse material reciclado sobre a resistência e a estabilidade volumétrica do solo. O procedimento foi conduzido conforme as recomendações da NBR 9895:2017 e do DNER-ME 049/94.

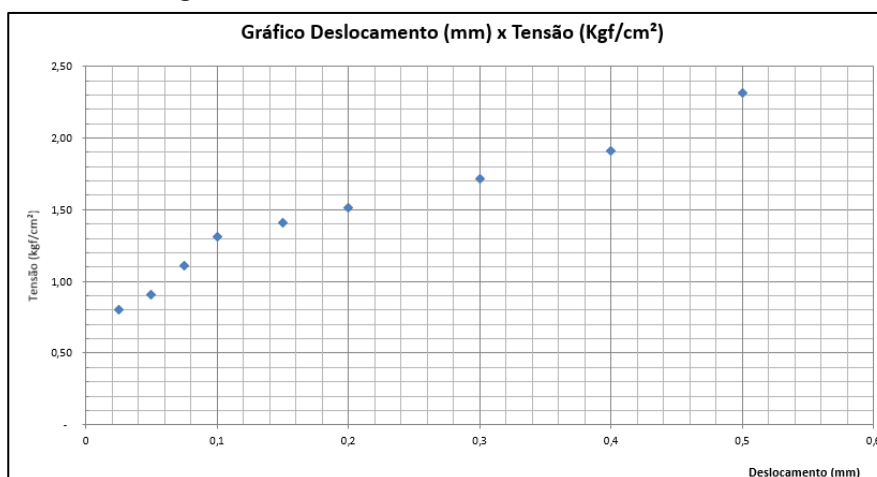
Durante o ensaio, o pistão foi pressionado contra o corpo de prova com incrementos de penetração de 0,025 polegadas ($\approx 0,635$ mm), registrando-se as pressões correspondentes (kgf/cm^2). As curvas apresentaram comportamento semelhante ao do solo natural, mas com aumento notável nas pressões de resistência, evidenciando o efeito positivo da adição de material granular proveniente do RCD, Figura 26 a 29.

Figura 26: Curva 1 CBR - Mistura 25% RCD / 75% Solo.

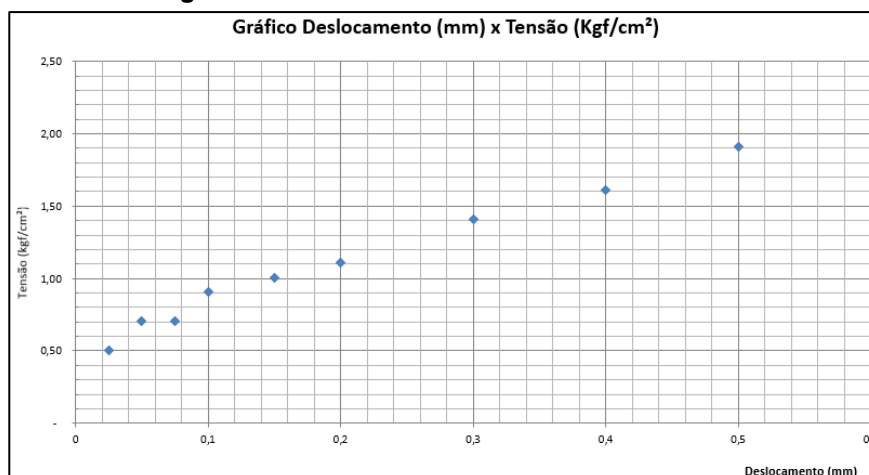
Fonte: Autora, 2025.

Figura 27: Curva 2 CBR - Mistura 25% RCD / 75% Solo.

Fonte: Autora, 2025.

Figura 28: Curva 3 CBR - Mistura 25% RCD / 75% Solo.

Fonte: Autora, 2025.

Figura 29: Curva 4 CBR - Mistura 25% RCD / 75% Solo.

Fonte: Autora, 2025.

A. Resultado CBR referente ao solo com adição de 25% de RCD

O valor do CBR foi determinado conforme as penetrações de 2,5 mm e 5,0 mm, segundo a relação entre a tensão medida e a tensão padrão de referência, portanto obtemos:

- Penetração de 2,5 mm: 1,11 kgf/cm², com CBR= 15,78%.
- Penetração de 5,0 mm: 1,51 kgf/cm², com CBR= 14,29%.

De acordo com o critério normativo, adota-se o maior valor obtido, portanto o valor do CBR=15,78%. Esse resultado representa um aumento de aproximadamente 22% em relação ao solo natural (CBR = 12,94%), evidenciando que a adição de RCD promove melhora significativa na capacidade de suporte do material. As partículas mais angulosas e rígidas do resíduo favorecem o intertravamento entre os grãos, reduzindo o índice de vazios e aumentando a resistência à penetração, o que resulta em um comportamento mecânico mais adequado para utilização em camadas de pavimento.

B. Resultado do cálculo de expansão – CBR com adição de 25% de RCD.

Com base na altura inicial do corpo de prova ($h_0 = 175$ mm) e na leitura média final de 0,625 mm, obteve-se uma expansão de 0,36%, determinada conforme os

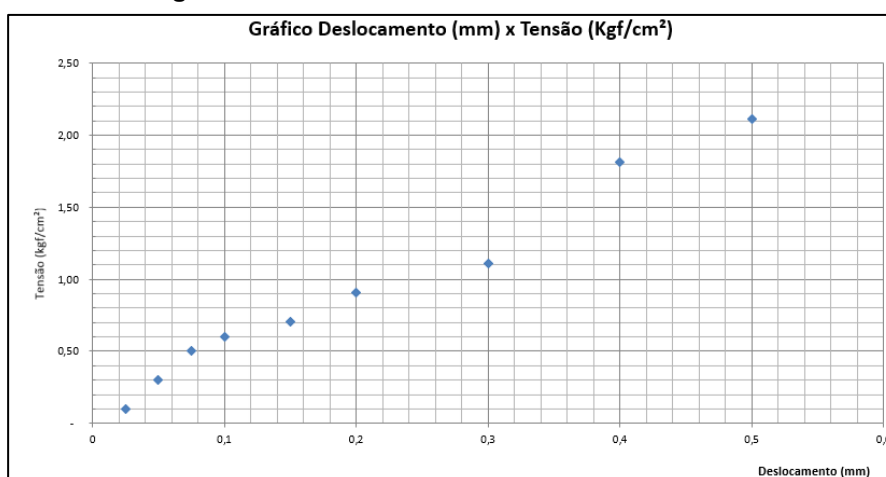
procedimentos descritos na ABNT NBR 9895:2017 – Solo – Índice de Suporte Califórnia (CBR) – Determinação. De acordo com a norma, valores de expansão inferiores a 0,5% classificam o solo como de baixa expansibilidade, indicando comportamento estável durante a imersão. Dessa forma, o solo com adição de 25% de RCD pode ser considerado pouco expansivo, apresentando reduzida variação volumétrica e melhor desempenho geotécnico para aplicação em camadas estruturais de pavimentos.

6.7 ENSAIO CBR COM ADIÇÃO DE 50% DE AGREGADO DE RCD

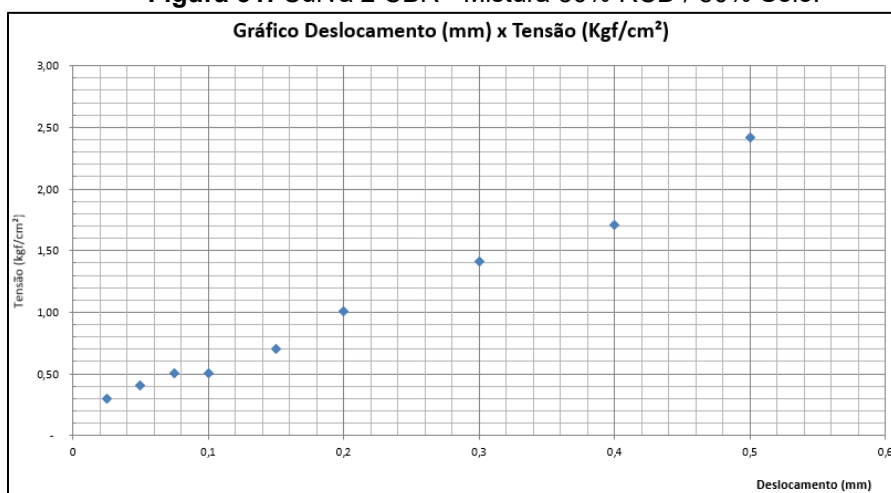
O ensaio de CBR da amostra contendo 50% de RCD teve como finalidade avaliar o comportamento do solo frente a uma substituição mais elevada de material natural por agregado reciclado. Assim como nos ensaios anteriores, seguiram-se as orientações da NBR 9895:2017 e do DNER-ME 049/94.

O comportamento observado foi de resistência crescente com a penetração, apresentando valores superiores ao solo puro e próximos aos da mistura com 25% de RCD. A forma da curva tensão versus deslocamento manteve-se estável, demonstrando boa repetibilidade e coerência dos dados, conforme as Figuras 30,31,32 e 33.

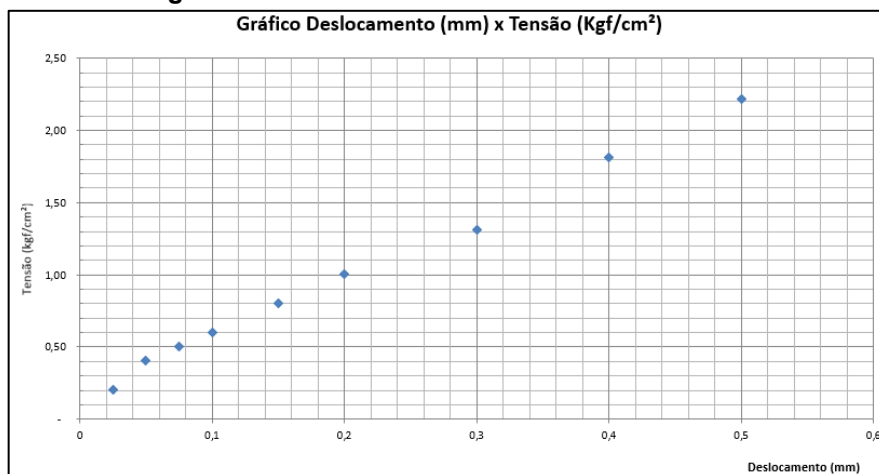
Figura 30: Curva 1 CBR - Mistura 50% RCD / 50% Solo.



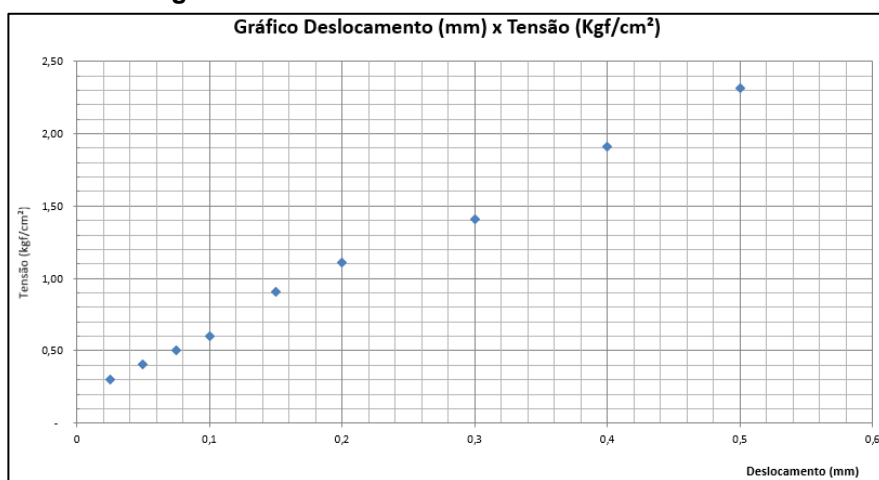
Fonte: Autora, 2025.

Figura 31: Curva 2 CBR - Mistura 50% RCD / 50% Solo.

Fonte: Autora, 2025.

Figura 32: Curva 3 CBR - Mistura 50% RCD / 50% Solo.

Fonte: Autora, 2025.

Figura 33: Curva 4 CBR - Mistura 50% RCD / 50% Solo

Fonte: Autora, 2025.

A. Resultado CBR referente ao solo com adição de 50% de RCD

Com base nas médias de pressão obtidas, têm-se:

- Penetração de 2,5 mm: 1,01 kgf/cm², com CBR= 14,36%.
- Penetração de 5,0 mm: 1,31 kgf/cm², com CBR= 12,40%.

De acordo com o critério normativo, adota-se o maior valor obtido, portanto o valor do CBR=14,36%. Embora esse resultado seja ligeiramente inferior ao obtido para a mistura com 25% de RCD (CBR = 15,78%), ele ainda representa um aumento de aproximadamente 11% em relação ao solo natural (CBR = 12,94%), confirmando que a adição de 50% de RCD também contribui para o reforço mecânico do solo. Esse comportamento indica que o resíduo atua melhorando o intertravamento entre as partículas, reduzindo a compressibilidade e aumentando a resistência à penetração, mesmo em teores mais elevados.

C. Resultado do cálculo de expansão – CBR com adição de 25% de RCD.

A expansão calculada para a mistura com 25% de RCD foi de 0,20%, valor que se destaca por ser o menor entre todas as combinações analisadas. Esse comportamento indica uma maior estabilidade volumétrica após o período de imersão, característica desejável para materiais aplicados em camadas de base e, especialmente, sub-base de pavimentos. Índices de expansão reduzidos minimizam o risco de deformações indesejáveis, fissuras ou manifestações patológicas no revestimento, reforçando a adequação da mistura solo-RCD para obras viárias. A presença de partículas granulares provenientes do RCD contribui para reduzir a influência de finos plásticos, diminuindo a sensibilidade do material às variações de umidade.

Esses resultados corroboram os achados de Barreto e Amorim (2020), que observaram valores de expansão variando entre 0,00% e 0,29% em misturas de solo com diferentes teores de RCD, classificando-as como não expansivas e tecnicamente apropriadas para camadas granulares de pavimentação. Os autores destacam que o aumento da fração granular melhora o comportamento volumétrico, uma vez que reduz o potencial de expansão associado à argila presente no solo natural. Assim, o

valor de 0,20% obtido neste estudo confirma a eficácia da adição de RCD na mitigação da expansibilidade e reforça a viabilidade técnica da substituição de 25% para utilização em sub-bases, alinhando-se ao que aponta a literatura especializada.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou o desempenho mecânico de um solo argiloso natural incorporado com diferentes teores de resíduos da construção e demolição (RCD) – 25% e 50% –, com o objetivo de avaliar sua aplicabilidade em camadas de base e sub-base de pavimentos. Seguindo os procedimentos das normas ABNT NBR 9895:2017 (CBR) e NBR 7182:2016 (Compactação), foram realizados ensaios com solo coletado em São Miguel do Iguaçu – PR, caracterizado como um solo fino típico da região. Os resultados obtidos demonstraram que a adição de RCD promoveu melhoria significativa no comportamento mecânico do material, elevando a capacidade de suporte e reduzindo a expansibilidade.

O solo natural apresentou CBR de 12,94% e expansão de 0,34%, confirmando sua baixa resistência e alta sensibilidade à umidade. A adição de 25% de RCD elevou o CBR para 15,78%, representando ganho de cerca de 22% em relação ao solo natural, com expansão controlada de 0,36%. Já a mistura com 50% de RCD apresentou CBR de 14,36% e expansão reduzida para 0,20%, tornando-se o material com menor variação volumétrica entre os analisados. Esse comportamento demonstra que frações maiores de RCD aumentam a granularidade e reduzem a influência dos finos plásticos, melhorando a estabilidade do material durante a saturação.

Esses achados são coerentes com os resultados apresentados por Barreto e Amorim (2020), os quais concluíram que as misturas solos–RCD tendem a apresentar valores de expansão muito baixos (entre 0,00% e 0,29%) e melhorias relevantes nos parâmetros mecânicos, especialmente quando utilizadas frações intermediárias de substituição. Os autores destacam que teores moderados de RCD melhoram a resistência sem comprometer a densificação, enquanto teores elevados podem reduzir a eficiência da compactação ideal em solos muito finos — fenômeno também identificado neste estudo, já que 50% de RCD apresentou resistência inferior ao teor de 25%, apesar de maior estabilidade volumétrica. Assim, os resultados desta pesquisa se alinham às conclusões da literatura, evidenciando que a otimização do percentual de substituição depende do equilíbrio entre ganho de granulometria e manutenção da compactação eficiente.

Do ponto de vista crítico, os resultados comprovam a viabilidade técnica e ambiental do uso do RCD como material estabilizante para solos finos, atendendo aos critérios de desempenho estabelecidos pelo DNER-ME 049/94 e pela NBR 15116

(ABNT,2021). No entanto, observa-se que a eficiência do RCD não cresce de forma linear com o aumento do teor incorporado. A mistura com 25% apresentou o melhor desempenho estrutural, enquanto 50% mostrou-se mais eficiente no controle da expansão, mas com redução da capacidade de suporte. Isso indica que a escolha do teor ideal deve considerar as condições específicas de projeto, como nível de tráfego, sensibilidade à umidade e função estrutural da camada do pavimento.

Portanto, conclui-se que a mistura contendo 25% de RCD apresenta o melhor equilíbrio entre resistência e estabilidade, sendo recomendada para camadas de sub-base em vias de baixo e médio volume de tráfego. Já a mistura com 50% de RCD, por apresentar menor expansibilidade, pode ser indicada para situações em que o controle da variação volumétrica seja mais crítico que a resistência, como regiões sujeitas à alta saturação. Assim, o estudo reforça o potencial do RCD como alternativa sustentável, economicamente viável e alinhada à Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), contribuindo para a redução da extração de agregados naturais e para a gestão ambientalmente responsável dos resíduos da construção civil.

REFERÊNCIAS

- ABRECON. **Empresa do Paraná recebe certificado de melhor usina de reciclagem de resíduos da construção civil do país.** Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição. 22 ago. 2022. Disponível em: <https://abrecon.org.br/artigos/empresa-do-parana-recebe-certificado-de-melhor-usina-de-reciclagem-de-residuos-da-construcao-civil-do-pais>. Acesso em: 05 maio 2025.
- ARMAS, C. T. de; et al. **Resíduos de construção e demolição - RCD.** 2011. Disponível em: https://www2.ufpel.edu.br/cic/2011/anais/pdf/EN/EN_01396.pdf. Acesso em: 21 mar. 2025.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Solos — Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade.** 3.^a edição, Rio de Janeiro, 09 jan. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação e compressão.** Rio de Janeiro, 2016. ISBN 978-85-07-9. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-de-uberaba/normas-tecnicas/nbr-7182-ensio-de-compactacao-e-compressao-do-solo/47113308>. Acesso em: 5 mai. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6459:1984 – Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 1984. Disponível em: <https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17403/material/NBR%206459%20-%20Solo%20-%20Determinação%20do%20Limite%20de%20Liquidez.pdf>. Acesso em: 15 maio 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7180:1984 – Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984. Disponível em: <https://ecivilufes.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/03/nbr-7180.pdf>. Acesso em: 15 maio 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/nbr-7181-1984-solo-anlise-granulomtrica/29157750>. Acesso em: 15 maio 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9895:2017 – Solo — Índice de suporte Califórnia (ISC) — Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017. (Versão corrigida em 09 ago. 2017). Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/799235373/NBR-9895-2017-Solo-Indice-de-Suporte-California-ISC>. Acesso em: 18 out. 2025.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados para pavimentação — Execução de camadas não ligadas de pavimentação.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. NBR 15115. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: https://portal.seuma.fortaleza.ce.gov.br/fortalezaonline/servletrepositoriolegislacao?arquivo=NBR_15115.pdf&pasta=legislacaoGeral. Acesso em: 26 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15116:2021 – **Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/261471624/Nbr-15116>. Acesso em: 17 maio 2025.

BARRETO, A. C.; AMORIM, E. F. **Desempenho técnico de misturas de solo com RCD para uso em obras de pavimentação**. Holos, [s.l.], v. 7, 2020. DOI: 10.15628/holos.2020.9696.

BERTO, E. **Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS**. Disponível em: <https://engenheiroberto.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/05/istema-unificado-de-classificacao-dos-solos-e28093-sucs.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2025.

BETTINI COMUNICAÇÃO. **Brasil produz 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição**. Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo, 13 nov. 2024. Disponível em: <<https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/brasil-produz-48-milhoes-de-toneladas-de-residuos-de-construcao-e-demolicao/>>. Acesso em: 27 fev. 2025.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Diário Oficial da União, Brasília, 17 jul. 2002.

COSTA, B. S. L. M. Um estudo sobre a sustentabilidade. **Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído)** — Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2019.

DER/PR – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. ES-P 07/05 – **Pavimentação: Camadas Estabilizadas Granulometricamente**. Curitiba, 2005. 16 p. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/781514217/es-p07-05camadasestabilizadasgranul>. Acesso em: 18 out. 2025.

DNER. Norma Rodoviária DNER-ME 049/94 – **Solos: Determinação do índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/307231475/DNER-ME049-94>. Acesso em: 26 out. 2025.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação – IPR 719 – Versão corrigida e com errata 1**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Classificação de solos**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs/classificacao-de-solos>. Acesso em: 26 mar. 2025.

FORTALEZA. NBR 15115: **Diretrizes para elaboração de projetos de urbanização** [PDF]. Fortaleza: Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente, 2021. Disponível em: https://portal.seuma.fortaleza.ce.gov.br/fortalezaonline/servletrepositoriolegislacao?aquivo=NBR_15115.pdf&pasta=legislacaoGeral. Acesso em: 26 mar. 2025.

FRAGA, G. V.; NASCIMENTO, Y. B. do; OLIVEIRA, S. L. de. **Uso de resíduos da construção civil na pavimentação de vias públicas no município de Cariacica-ES**. Faculdade Multivix – Cariacica. 2022. Disponível em: <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2022/04/uso-de-residuos-da-construcao-civil-na-pavimentacao-de-vias-publicas-no-municipio-de-cariacica-es.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

FUTURE ECO. **Fábrica**. Disponível em: <https://www.future.eco.br/galeria-de-fotos/fabrica>. Acesso em: 22 maio 2025.

GANZALA, G. G. **A industrialização, impactos ambientais e a necessidade de desenvolvimento de políticas ambientais sustentáveis no século XXI**. 2018. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Relações Internacionais) – Universidade Internacional de Curitiba, Curitiba, 2018.

GOMES, A. L.; SILVA, S. C. F.; SOUZA, A. O. **Sustentabilidade na construção civil: uma reflexão sobre as novas propostas de projetos sustentáveis**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA – CONTECC, 2021, Brasília. Anais [...]. Brasília: CONFEA, 2021.

GUEL, K. C.; LOCASTRO, J. K.; JORGE, G. X. **Análise técnica comparativa entre pavimento rígido e flexível**. Journal of Exact Sciences – JES, v. 42, n. 2, p. 05-10, jul.-set. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas da População: **População estimada do país chega a 212,6 milhões de habitantes em 2024**. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html>. Acesso em: 13 fev. 2025.

IGLESIAS, Jád Tosta Ventin; ALBERTE, Elaine Pinto Varela. **Situação e evolução do setor de reciclagem de RCD no Brasil**. Universidade Federal da Bahia, 2019.

KREBS, K. F.; DANILEVICZ, Â. M. F. **Modelo de negócio sustentável: reaproveitamento de resíduos de construção e demolição (RCD)**. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

MÁLIA, M.; BRITO, J.; BRAVO, M. **Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 75-89, 2011.

MARQUES, G. L. O. **Notas de aula da disciplina Pavimentação - TRN 032.** Universidade Federal de Juiz de Fora, 2025.

MELO, A. L. R.; FERREIRA, M. L.; RODRIGUES, R. C. **Utilização de resíduos da construção civil na pavimentação: uma revisão sistemática.** Engineering Sciences, v. 9, n. 1, p. 102-113, 2021.

MOREIRA, E. B. **Comportamento mecânico de um solo argiloso misturado com resíduos de construção e demolição para utilização em pavimentação.** 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

NICOLAU, C. O.; BARBOSA, F. M. D. R. **Análise do comportamento do solo com adição de resíduo de construção e demolição (RCD).** Research, Society and Development, [S. l.], v. 12, n. 7, e12912742598, 2023.

OLIVEIRA, V. R.; SANTOS, V. R. **Sustentabilidade na construção civil: geração de resíduos.** Fernandópolis: Fundação Educacional de Fernandópolis. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdades Integradas de Fernandópolis. 2021

PAIVA, R. G.; GONÇALVES JUNIOR, F. de A.; SANTOS, R. M. **Análise multitemporal do município de São Miguel do Iguaçu – Brasil: análise dos aspectos gerais da paisagem rural.** Observatório Geográfico da América Latina. 2023. Disponível em: <<http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal13/Nuevastecnologias/Teledeteccion/01.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2025.

PAIXÃO, M. P.; CORDEIRO, C. C. C.; CORREIA, M. C. N. **Pavimentos semirrígidos: prevenção e tratamento da reflexão de trincas.** XVI SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, UNIFACS, 2017.

PAULINO, R. S.; et al. **Atualização do cenário da reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 2008-2020.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, n. 3, p. 277-292, jul./set. 2023.

PEREIRA, M. P. C. **Análise comparativa entre pavimento rígido e pavimento flexível.** Paracatu: Centro Universitário Atenas, Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário Atenas. 2019.

PINTO, T. de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. 189 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

RAMOS, L. R. F. de; SAVI, O. **Análise da viabilidade técnica e financeira no uso de whitetopping na restauração do pavimento da rodovia PRC-280 em comparação ao uso de CBUQ.** 2022. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br> >. Acesso em: 28 fev. 2025.

RIBEIRO, V. M. G. **Reciclagem de resíduos de construção e demolição**. Dissertação. Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Escola de Engenharia. Fevereiro, 2022.

SILVA, A. C.; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. de M. **Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 24, n. 2, e-12641, 2019.

SILVA, G. M. **Reciclagem: uma relação entre a escola e o meio ambiente**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências: Biologia e Química) – Universidade Federal do Amazonas, Instituto de Saúde e Biotecnologia, Coari, AM, 2021.

SILVA, J. da. **Uso de resíduos da construção civil na pavimentação de vias públicas no município de Cariacica-ES**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Faculdade Multivix – Cariacica. 2022.

SOKALSKI, T. N. **Correlação entre os ensaios CBR e DCP para solos argilosos residuais basálticos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Maringá, Maringá, 2021.

SOUZA, J. S. de; ROCHA, R. C. V. **Verificação da influência dos materiais da camada de base dos pavimentos rodoviários nos custos de construção a partir do método de dimensionamento Medina**. Universidade Federal de São João Del Rei, 2022. Disponível em: https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ccivi/TCC-04_2022_2_Joseane_e_Rhully.pdf. Acesso em: 28 fev. 2025.

VARGAS, M. **Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS**. 2009. Disponível em: <https://engenheiroberto.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/05/istema-unificado-de-classificacao-dos-solos-e28093-sucs.pdf>. Acesso em: 17 maio 2025.