UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

JULIANA SANTANA SULZ

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM SOLO TÍPICO DA REGIÃO DE ANCHIETA/ES PARA APLICAÇÕES EM PAVIMENTAÇÃO E ATERRO SANITÁRIO

VITÓRIA
2025

JULIANA SANTANA SULZ

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM SOLO TÍPICO DA REGIÃO DE ANCHIETA/ES PARA APLICAÇÕES EM PAVIMENTAÇÃO E ATERRO SANITÁRIO

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Karla Maria Wingler Rebelo

VITÓRIA
2025

JULIANA SANTANA SULZ

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM SOLO TÍPICO DA REGIÃO DE ANCHIETA/ES PARA APLICAÇÕES EM PAVIMENTAÇÃO E ATERRO SANITÁRIO

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

COMISSÃO EXAMINADORA

Profa. Dra. Karla Maria Wingler Rebelo
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

Profa. Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki
Universidade Estadual de Maringá
Examinador Externo

RESUMO

SULZ, Juliana Santana. **Avaliação do potencial de incorporação de resíduos da construção civil em solo típico da região de Anchieta/ES para aplicações em pavimentação e aterro sanitário.** 2025. 82 f. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2025.

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar o efeito da incorporação de Resíduos da Construção Civil (RCC) nas propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo típico da região, visando sua utilização em obras geotécnicas e ambientais. Para isso, foram avaliadas as propriedades do mini-CBR e de expansão, referentes ao índice de suporte, de permeabilidade, de resistência à compressão e de contração volumétrica, a partir de misturas com teores de 25% e 50% de RCC adicionados ao solo. Os resultados demonstraram que a incorporação de RCC alterou significativamente a umidade ótima e a massa específica seca das misturas. No mini-CBR, observou-se uma redução na capacidade de suporte em relação ao solo natural, embora a mistura com 25% de RCC ainda tenha atendido aos critérios exigidos para pavimentação. No ensaio de expansão, a mistura com 50% de RCC apresentou uma melhoria significativa, sugerindo um comportamento mais estável. A permeabilidade variou conforme a proporção de RCC, com a mistura de 50% atendendo aos requisitos para aplicação em aterros sanitários. Quanto à resistência à compressão, a mistura com 25% de RCC demonstrou desempenho superior ao solo natural, enquanto a mistura com 50% apresentou menor resistência. A contração volumétrica reduziu com a adição de RCC, indicando maior estabilidade volumétrica das misturas. Com base nos resultados, conclui-se que a incorporação de RCC pode ser uma solução viável e sustentável para diferentes aplicações em engenharia civil. A mistura com 75% Solo + 25% RCC mostrou-se mais adequada para pavimentação, enquanto a mistura com 50% de RCC apresentou características favoráveis para aterros sanitários. Esses achados reforçam o potencial da reutilização de RCC na melhoria das propriedades geotécnicas dos solos, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para a otimização do uso de materiais na construção civil.

Palavras-chave: Resíduo de Construção Civil; Aditivos; Metodologia MCT; Obras de pavimentação; Obras de aterros sanitários.

ABSTRACT

SULZ, Juliana Santana. **Evaluation of the potential incorporation of construction and demolition waste in a typical soil from the Anchieta/ES region for pavement and landfill applications.** 2025. 82 p. Bachelor's Thesis (Bachelor's in Civil Engineering) – Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2025.

The main goal of this paper is to analyze the effect of incorporating Construction and Demolition Waste (CDW) into the mechanical and hydraulic properties of a typical local soil, aiming at its use in geotechnical and environmental works. Therefore, the properties of the mini-CBR and expansion tests were evaluated in terms of soil support, permeability, compressive strength, and volumetric contraction, using mixtures with 25% and 50% CDW added to the soil. The results showed that the incorporation of CDW significantly altered the optimum moisture content and the specific dry density of the mixtures. In the mini-CBR test, a reduction in soil support was observed compared to the natural soil, although the mixture with 25% CDW still met the required criteria for pavement applications. In the expansion test, the mixture with 50% CDW showed a significant improvement, suggesting a more stable behavior. Permeability varied according to the proportion of CDW, with the 50% mixture meeting the requirements for landfill applications. Regarding compressive strength, the mixture with 25% CDW showed superior performance compared to the natural soil, while the 50% mixture exhibited lower strength. Volumetric contraction decreased with the addition of CDW, indicating greater volumetric stability of the mixtures. Thus, based on the results, it can be concluded that the incorporation of CDW can be a viable and sustainable solution for different applications in civil engineering. The mixture with 75% soil + 25% CDW proved to be more suitable for paving, while the mixture with 50% CDW showed favorable characteristics for landfills. These findings reinforce the potential of reusing CDW to improve the geotechnical properties of soils, contributing to the reduction of environmental impacts and the optimization of material use in civil construction.

Keywords: Construction and Demolition Waste; Additives; MCT Methodology; Pavement Works; Landfill Works.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me guiar e fortalecer ao longo dessa trajetória, me concedendo saúde, perseverança e sabedoria para superar cada desafio.

Aos meus pais, Juscelino e Vania, e aos meus irmãos, Clarissa e Saulo, pelo apoio incondicional, amor e cuidado. Sou imensamente grata por acreditarem em mim e tornarem possível a realização desse sonho. Espero, um dia, retribuir com a mesma dedicação e amor.

Ao David, por todo amor e paciência, que foram essenciais para que eu pudesse me dedicar a essa caminhada. Por compreender minhas ausências, sempre me incentivar e, acima de tudo, por me fazer acreditar em mim.

Ao meu melhor amigo Ian, que mesmo à distância, esteve sempre presente, oferecendo todo o suporte necessário em incontáveis ligações no meet.

À minha orientadora, Profa. Dra. Karla Maria Wingler Rebelo, pelo valioso direcionamento e ensinamentos, fundamentais para a realização dessa pesquisa.

Aos queridos, Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires e Profa. Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki, por aceitarem participar deste momento tão importante, contribuindo com suas análises e considerações. Aos técnicos do LabGeo, Carol e Sid, que não mediram esforços para me auxiliar durante a pesquisa.

À Vila Recicla, especialmente ao Bruno Bosi e Amanda Vieira, por disponibilizarem as amostras utilizadas e colaborarem para um mundo mais sustentável.

À Universidade Federal do Espírito Santo e a todos os professores que contribuíram para minha formação. Em especial aos que me fizeram despertar a paixão pelo curso.

Aos meus amigos de longa data e à minha família, que me incentivaram ao longo dessa etapa, em especial aos meus padrinhos, Getúlio e Alice.

Por fim, sou imensamente grata aos amigos que fiz na faculdade, em especial, Mariana, Mariane e João, meus grandes confidentes, e aos queridíssimos do 2018/2, que tornaram essa caminhada mais leve.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição majoritária das usinas brasileiras quanto ao RCD.....19
Figura 2 – Classificação dos tipos de pavimentos.....21
Figura 3 – Programa de ensaios e resultados para classificação MCT.....26
Figura 4 – Gráfico de referência para classificação de solos 27
Figura 5 – Amostra de solo utilizada na pesquisa 32
Figura 6 – Amostra de RCC utilizada na pesquisa fornecida pela Vila Recicla.....34
Figura 7 – Unidade de Beneficiamento de Agregados Reciclados (UBAR). (a) Pátio de estoque de agregados; (b) Galpão de triagem 34
Figura 8 – Equipamento de compactação miniatura 36
Figura 9 – Corpo de prova com camada de 10 mm extraída 37
Figura 10 – Corpos de prova submersos com cápsula para recolhimento do material 38
Figura 11 – Sobrecarga padrão e suporte para ensaio CBR com extensômetro acoplado.....38
Figura 12 – Disposição dos corpos de prova durante o ensaio de mini-CBR e expansão. (a) Corpos de prova no suporte com extensômetro submersos; (b) Detalhe de lâmina d'água de 5 mm. 39
Figura 13 – Prensa (MP 01) utilizada para o ensaio mini-CBR 40
Figura 14 – Permeâmetro de parede flexível 41
Figura 15 – Suporte adaptado para avaliação de contração.....41
Figura 16 – Prensa utilizada para o ensaio de Resistência à Compressão Simples.44
Figura 17 – Ábaco com as classificações do solo natural, mistura 75% Solo + 25% RCC e mistura 50% Solo + 50% RCC.....52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exigências mínimas para as camadas de sub-base e base para pavimento flexível 23
Tabela 2 – Requisitos mínimos para utilização de solos tropicais em aterros sanitários 25
Tabela 3 – Relação entre a classificação MCT e suas correspondentes na classificação convencional 29
Tabela 4 – Propriedades dos solos de acordo com a classificação MCT 30
Tabela 5 – Adequação dos solos da classificação MCT para uso em base de pavimento 30
Tabela 6 – Ensaios de caracterização física realizados 35
Tabela 7 – Características do ensaio Mini-Proctor para energia normal 42
Tabela 8 – Parâmetros obtidos a partir da classificação MCT 52
Tabela 9 – Parâmetros físicos das amostras 53
Tabela 10 – Resultados obtidos no ensaio de compactação 56
Tabela 11 – Resultados obtidos no ensaio de mini-CBR 57
Tabela 12 – Resultados obtidos no ensaio de expansão 59
Tabela 13 – Resumo dos valores obtidos do coeficiente de permeabilidade para cada amostra 62
Tabela 14 – Percentual de passantes nas aberturas distintas 64
Tabela 15 – Resumo dos resultados obtidos no ensaio de compressão simples 66
Tabela 16 – Resultados obtidos no ensaio de contração volumétrica 69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de deformabilidade em função do número de golpes para o solo natural 45
Gráfico 2 – Curva de deformabilidade em função do número de golpes para a mistura 75% Solo + 25% RCC 46
Gráfico 3 – Curva de deformabilidade em função do número de golpes para a mistura 50% Solo + 50% RCC 46
Gráfico 4 – Curva de deformabilidade em função do mini-MCV para obtenção do coeficiente c' para o solo natural 47
Gráfico 5 – Curva de deformabilidade em função do mini-MCV para obtenção do coeficiente c' para a mistura 75% Solo + 25% RCC 47
Gráfico 6 – Curva de deformabilidade em função do mini-MCV para obtenção do coeficiente c' para a mistura 50% Solo + 50% RCC 48
Gráfico 7 – Curvas de compactação para obtenção do coeficiente d' para o solo natural 48
Gráfico 8 – Curvas de compactação para obtenção do coeficiente d' para a mistura 75% Solo + 25% RCC 49
Gráfico 9 – Curvas de compactação para obtenção do coeficiente d' para a mistura 50% Solo + 50% RCC 49
Gráfico 10 – Mini-MCV x altura final do CP para o solo natural 50
Gráfico 11 – Mini-MCV x altura final do CP para a mistura 75% Solo + 25% RCC ...50
Gráfico 12 – Mini-MCV x altura final do CP para a mistura 50% Solo + 50% RCC ...50
Gráfico 13 – Mini-MCV x Pi para o solo natural.....51
Gráfico 14 – Mini-MCV x Pi para a mistura 75% Solo + 25% RCC 51
Gráfico 15 – Mini-MCV x Pi para a mistura 50% Solo + 50% RCC 51
Gráfico 16 – Curvas granulométricas das amostras.....53
Gráfico 17 – Curva de compactação das amostras.....55
Gráfico 18 – Curvas obtidas pelo ensaio de mini-CBR 57
Gráfico 19 – Relação entre o mini-CBR das misturas e o solo natural na umidade ótima 58
Gráfico 20 – Curvas obtidas pelo ensaio de expansão 59
Gráfico 21 – Relação entre a expansão das misturas e o natural na umidade ótima60
Gráfico 22 – Coeficientes de permeabilidade obtidos para o solo natural.....61

Gráfico 23 – Coeficientes de permeabilidade obtidos para a mistura 75% Solo + 25% RCC 61
Gráfico 24 – Coeficientes de permeabilidade obtidos para a mistura 50% Solo + 50% RCC 61
Gráfico 25 – Curvas granulométricas após ensaio de permeabilidade 63
Gráfico 26 – Curvas de resistência à compressão para os CPs de solo natural.....64
Gráfico 27 – Curvas de resistência à compressão para os CPs da mistura 75% Solo + 25% RCC 65
Gráfico 28 – Curvas de resistência à compressão para os CPs da mistura 50% Solo + 50% RCC 65
Gráfico 29 – Relação entre a tensão de compressão das misturas e o natural na umidade ótima.....67
Gráfico 30 – Contração volumétrica do solo natural.....68
Gráfico 31 – Contração volumétrica da mistura 75% Solo + 25% RCC 68
Gráfico 32 – Contração volumétrica da mistura 50% Solo + 50% RCC 69
Gráfico 33 – Relação entre a contração volumétrica das misturas e o natural na umidade ótima.....70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos tipos de solos conforme metodologia MCT.....26
Quadro 2 – Ensaios da metodologia MCT e seus métodos correspondentes.....29
Quadro 3 – Resumo do potencial de utilização dos materiais estudados 71

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ASTM	American Society for Testing and Materials
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
LABGEO	Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MEAS	Massa específica aparente seca
RCC	Resíduo de Construção Civil
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SUCS	Sistema Unificado de Classificações
TRB	Transportation Reseach Board
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15

2 OBJETIVOS 16

2.1 OBJETIVO GERAL 16

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16

3 REFERENCIAL TEÓRICO 17

3.1 PANORAMA SOBRE OS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL 17

3.1.1 Composição geral dos Resíduos de Construção Civil 18

3.2 POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE RCC EM OBRAS DE ENGENHARIA E AMBIENTAIS 20

3.2.1 Pavimentação 20

3.2.1.1 Pavimento flexível 22

3.2.1.1.1 Requisitos mínimos 22

3.2.2 Aterros sanitários 23

3.2.2.1 Camadas de base e de cobertura 24

3.2.2.2 Requisitos mínimos 24

3.3 METODOLOGIA MCT 25

3.3.1 Classificação MCT 26

3.3.1.1 Coeficiente c' 27

3.3.1.2 Coeficiente d' 28

3.3.1.3 Parâmetro Pi 28

3.3.1.4 Índice e' 28

3.3.2 Utilizações recomendadas 29

4 METODOLOGIA 31

4.1 MATERIAIS 31

4.1.1 Solo 31

4.1.2 Resíduo de Construção Civil 32

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL 34

4.2.1 Caracterização física dos materiais 35

4.2.2 Metodologia MCT 35

4.2.2.1 Compactação em equipamento miniatura 35

4.2.2.2 Mini-MCV e perda de massa por imersão 36

4.2.2.3 Mini-CBR e expansão 38

4.2.3 Permeabilidade 40
4.2.4 Contração 41
4.2.5 Resistência à compressão simples 42
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 45
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA 45
5.1.1 Classificação MCT 45
5.1.2 Classificação convencional 53
5.1.3 Considerações sobre as classificações 54
5.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA 55
5.2.1 Compactação 55
5.2.2 Mini-CBR 56
5.2.3 Expansão 59
5.2.4 Permeabilidade 60
5.2.5 Resistência à compressão simples 64
5.2.6 Contração 67
5.3 DISCUSSÕES FINAIS 71
6 CONCLUSÃO 73
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 75
REFERÊNCIAS 76
ANEXOS 82

1 INTRODUÇÃO

A construção civil, uma das atividades mais antigas da humanidade, é responsável pela geração de grandes volumes de resíduos de diversas naturezas. Além disso, essa indústria é uma das principais consumidoras de recursos naturais não renováveis, o que resulta em impactos ambientais diretos. (Lintz *et al.*, 2012 apud Boldrin *et al.*, 2006). O crescimento contínuo dessa atividade, essencial para o avanço das infraestruturas urbanas, acarreta consequências ambientais significativas, desde a extração de matérias-primas até o descarte inadequado de resíduos (Brasileiro; Matos, 2015).

Com o aumento da demanda por materiais, além da escassez de recursos naturais e da implementação de normas reguladoras mais rigorosas, a busca por soluções sustentáveis tem se intensificado (Furieri, 2019). Nesse cenário, a incorporação de Resíduos da Construção Civil (RCC) ao solo se apresenta como uma alternativa promissora. A utilização desses resíduos, originados nos processos de construção e demolição, é uma estratégia eficaz para reduzir os impactos ambientais da extração de recursos naturais e diminuir a quantidade de resíduos descartados de forma inadequada no meio ambiente.

A incorporação de RCC em solos, especialmente nas camadas de base e sub-base de pavimentação, bem como em aterros sanitários, nas camadas de impermeabilização de base e de cobertura, tem se mostrado uma alternativa eficaz (Ângulo, 2000; dos Santos, 2007). Além de mitigar o impacto ambiental, essa prática reduz os custos de produção de materiais e contribui para a diminuição do consumo de recursos não renováveis.

Neste contexto, a incorporação de RCC aos solos se apresenta como uma solução sustentável, com grande potencial em obras de pavimentação e aterros sanitários. A justificativa deste trabalho reside na necessidade de avaliar a viabilidade dessa abordagem, com ênfase na análise dos efeitos do RCC nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos, visando suas aplicações geotécnicas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

A pesquisa tem como objetivo principal analisar o efeito da incorporação de RCC nas propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo típico da região, visando sua utilização em obras de pavimentação e aterro sanitário.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o solo natural e misturas de solo incorporado com RCC por meio da metodologia MCT;
- Avaliar a influência de diferentes porcentagens de resíduos no desempenho da mistura;
- Analisar as propriedades mecânicas e hidráulicas do solo natural e das misturas, considerando resistência à compressão, mini-CBR e expansão, contração e permeabilidade;
- Avaliar o potencial dos materiais para aplicações em obras geotécnicas com base nas classificações convencional e MCT;
- Verificar a consistência entre o potencial indicado pelas classificações convencional e MCT e o comportamento real dos materiais ensaiados;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda o cenário de geração, quantidade e impactos ambientais resultantes dos Resíduos da Construção Civil em nível nacional e estadual, além de discutir a composição geral desses resíduos e seu potencial de aplicação em projetos de engenharia e ambientais. Também serão apresentados os conceitos da metodologia MCT, que permitirão a classificação tanto do solo natural quanto do solo incorporado com RCC e, posteriormente, sua categorização com base no potencial de uso.

3.1 PANORAMA SOBRE OS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

O setor da construção civil desempenha um papel crucial na estimulação do progresso econômico e social de uma nação. Embora tenha avançado significativamente na adoção de diversas tecnologias para atender suas demandas, também ganhou notoriedade por ser um dos principais responsáveis pelo impacto ambiental negativo. Isso inclui o consumo excessivo de recursos naturais e a produção considerável de resíduos (Nagalli, 2014).

De acordo com informações levantadas pela Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), em 2022, os municípios brasileiros recolheram mais de 45 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), indicando uma redução de 1,8% em comparação com o ano anterior. No entanto, mesmo com a queda na geração de RCD, a região Sudeste continua contribuindo com maior parte do RCD coletados no país (50,6%). Vale ressaltar que, grande parte desses resíduos corresponde a materiais provenientes de construções e demolições abandonadas em vias e espaços públicos (ABREMA, 2023).

A taxa de produção de resíduos de construção por habitantes é influenciada por diversos fatores. Exemplo disso, é a grande densidade populacional em áreas urbanas, onde o consumo de materiais e a necessidade de infraestrutura são maiores, e os parâmetros relacionados à renda da população, como o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) (Ângulo; Oliveira; Machado, 2020).

Em 2019, os municípios do Espírito Santo que forneceram dados para o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e para o Sistema Nacional de

Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), por meio do Relatório Estadual de Gestão de Resíduos Sólidos relataram a coleta total de 1.313.589,6 toneladas de resíduos de construção civil (SINIR, 2019). Apesar disso, muitos desses municípios não tinham informações suficientes para determinar as quantidades exatas desses resíduos, sendo as razões para isso, seja pela falta de execução do serviço, seja pela ausência de fiscalização, principalmente a respeito da disposição inadequada desses materiais (Ângulo; Oliveira; Machado, 2020).

De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) nº 307/2002, “a disposição de resíduos da construção civil em locais inadequados contribui para a degradação da qualidade ambiental” (BRASIL, 2002). Ademais, esses problemas ambientais estão fortemente relacionados tanto ao desperdício de recursos naturais quanto à escassez de locais para deposição de resíduos. A sua má gestão não apenas causa entraves para a população, mas também exige grandes investimentos financeiros, o que coloca a indústria da construção civil no centro das discussões em busca do desenvolvimento sustentável em várias esferas (de Souza *et al.*, 2004).

Com base nas informações fornecidas, fica claro que é fundamental gerenciar os RCC de forma eficaz para possibilitar sua reciclagem e reaproveitamento. Além disso, tais medidas implicam em uma significativa redução do consumo de matérias primas naturais, ao mesmo tempo em que contribui para a diminuição dos pontos clandestinos de descarte de lixo e entulho quando coletados da maneira apropriada (Ângulo; Oliveira; Machado, 2020). Assim, benefícios de ordem social, econômica e ambiental também serão proporcionados (BRASIL, 2002).

3.1.1 Composição geral dos Resíduos de Construção Civil

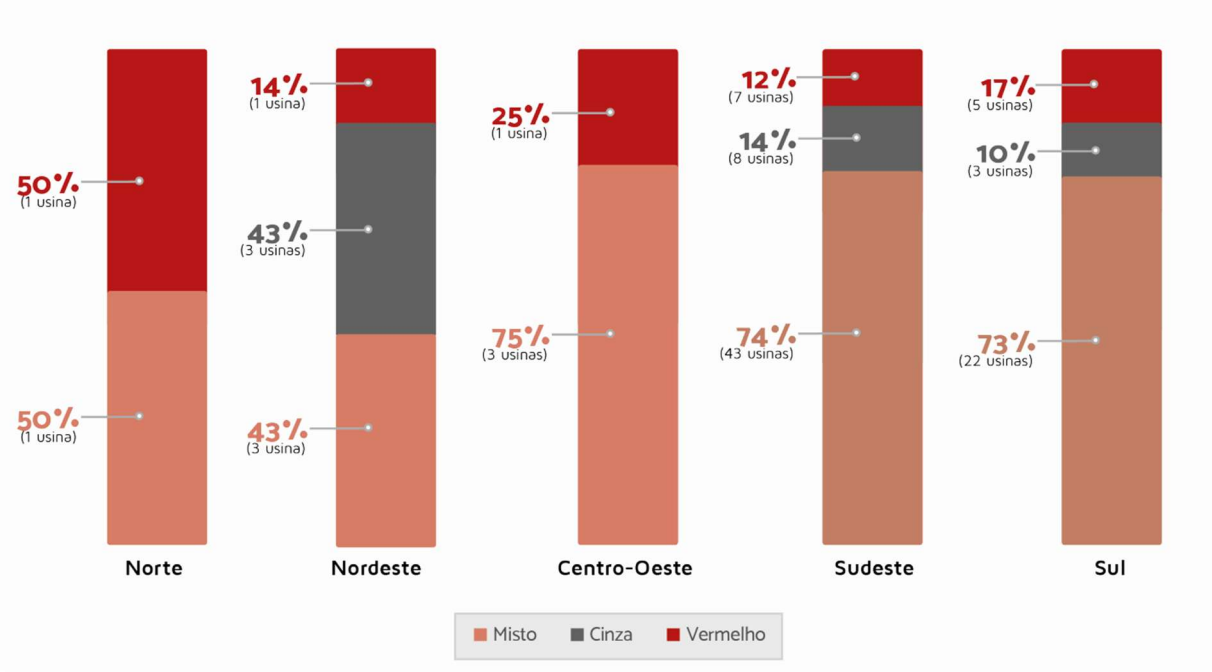
Conforme destacado por Batista (2022), a composição fundamental dos resíduos gerados por obras de construção civil é variável e depende dos métodos construtivos adotados, e das particularidades do local, incluindo os materiais disponíveis, a mão de obra e a tecnologia empregada em sua realização.

A Resolução Conama nº 307/2002 define os resíduos da construção civil da seguinte maneira:

> "são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica [...]" (BRASIL, 2002, p. 1)

No entanto, no contexto brasileiro, o RCD comumente processado nas usinas é uma mistura heterogênea, composta por materiais cimentícios, como concretos e argamassas (resíduo cinza), cerâmica vermelha, como tijolos e telhas, podendo conter teores variados de solos argilosos, que contribuem para a tonalidade avermelhada do resíduo (resíduo vermelho), e pela combinação desses materiais (resíduo misto), como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Composição majoritária das usinas brasileiras quanto ao RCD



Fonte: Ângulo; Oliveira; Machado. (2020).

Em contrapartida, ainda que os resíduos sejam principalmente constituídos por materiais cimentícios e cerâmica vermelha, eles podem apresentar uma grande variabilidade de comportamento em termos de resistência mecânica (Matuella, 2017).

3.2 POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE RCC EM OBRAS DE ENGENHARIA E AMBIENTAIS

Segundo Ângulo (2000), Cincotto (1983) e Pinto (1986) foram os precursores dos estudos acerca da aplicação dos RCC no Brasil. Posteriormente, esses materiais continuaram a ser investigados por diversos outros pesquisadores, explorando diferentes aplicações na sua reciclagem para serem utilizados, principalmente, na produção de concreto e na pavimentação. Além disso, em 2005, Affonso e Barros pesquisaram sobre a viabilidade de utilização desses resíduos em camadas drenantes de aterros sanitários e sobre o seu potencial uso como material de cobertura, respectivamente (dos Santos, 2007).

No entanto, o emprego dos resíduos como substituto da matéria-prima convencional requer a conformidade com os padrões de desempenho necessários para a sua aplicação (da Fonseca, 2020). Nesse sentido, serão descritos abaixo os requisitos mínimos exigidos para as estruturas de pavimento flexível, assim como para os sistemas de impermeabilização e de cobertura de aterros sanitários. Ressalta-se, ainda, que conforme relatado na literatura, nesses exemplos de obras geotécnicas e ambientais a aplicação de misturas de RCC com solo apresentaram-se viáveis.

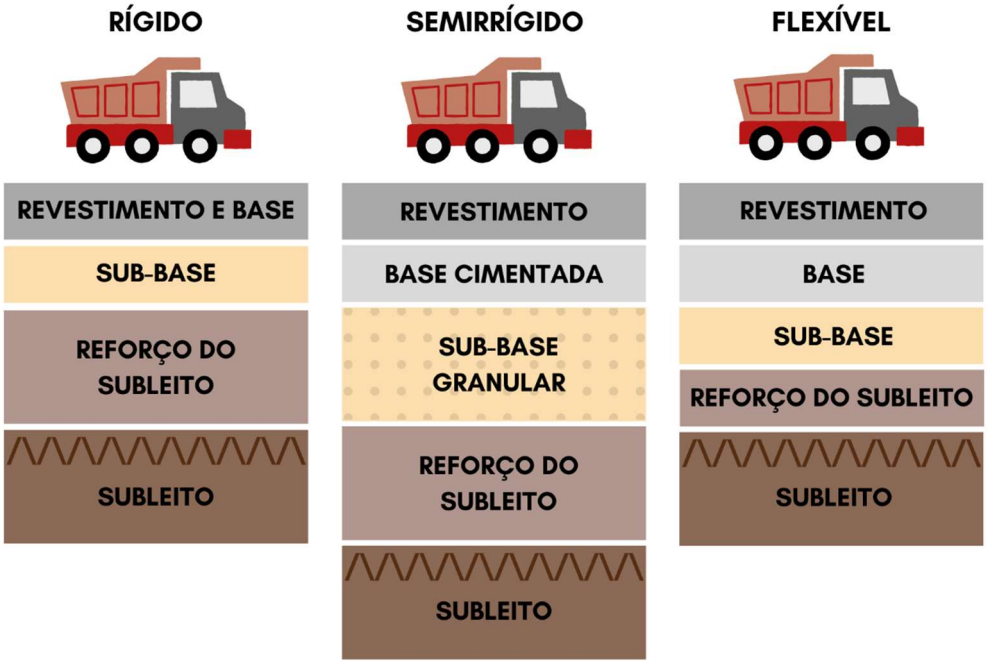
3.2.1 Pavimentação

Conforme as diretrizes do Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o pavimento é conceituado como um sistema, denominado também de superestrutura, constituído por camadas distintas de espessuras finitas. Tais camadas são implementadas sobre uma área teoricamente infinita (conhecida como subleito), que serve como infraestrutura ou terreno de fundação (BRASIL, 2006).

Os pavimentos podem ser classificados em três categorias: rígidos, semirrígidos e flexíveis, conforme indicado na Figura 2. O pavimento rígido é aquele composto por concreto de cimento Portland, cujo revestimento apresenta uma rigidez significativamente superior em relação às camadas subjacentes e, portanto, absorve maior parte das tensões geradas pelo carregamento aplicado (Bernucci *et al.*, 2022). O pavimento flexível, por sua vez, é aquele constituído por uma camada superficial asfáltica, sustentada por camadas de base, sub-base e de reforço de subleito e que,

quando submetida a um carregamento sofre deformação elástica em todas as camadas, distribuindo a carga em parcelas aproximadamente equivalentes (BRASIL, 2006). Por fim, o pavimento semirrígido compartilha semelhanças com os pavimentos flexíveis, no entanto, sua camada de base e sub-base incluem materiais com propriedades cimentícias (Bernucci *et al.*, 2022).

Figura 2 – Classificação dos tipos de pavimentos



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O subleito, refere-se ao solo sobre o qual o pavimento é construído e serve como base primordial para a estrutura viária. Já o reforço do subleito é uma camada de espessura uniforme, disposta acima da camada de regularização, com propriedades geotécnicas inferiores à camada superior, mas melhores que o próprio subleito. A sub-base, por sua vez, é uma camada adicional à base, desempenhando funções semelhantes, sendo empregada quando é vantajoso reduzir a espessura da base por questões econômicas. A base é projetada para suportar os esforços verticais dos veículos distribuindo-os para o subleito e servindo como camada subjacente ao revestimento construído. Por fim, o revestimento é uma camada impermeável concebida para suportar diretamente a carga dos veículos, melhorando o conforto e a segurança do tráfego e resistindo aos esforços horizontais, o que contribui para a durabilidade da superfície de rolamento (BRASIL, 2006).

3.2.1.1 Pavimento flexível

Em conformidade com os dados apresentados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) em seu anuário, o Brasil dispõe de uma malha rodoviária que se estende por aproximadamente 1,7 milhão de quilômetros, dos quais cerca de 213,5 mil são pavimentados, correspondendo a uma parcela de 12,4% do total (CNT, 2022a). Dentre esses, a quase totalidade das estradas no país é construída com pavimento flexível, alcançando uma taxa de 99,0% (CNT, 2022b).

A construção e manutenção desses pavimentos demandam grandes volumes de materiais naturais, como solos e agregados granulares. Mesmo em situações em que não há ampliação da malha rodoviária, a manutenção periódica das rodovias requer quantidades significativas desse consumo, o que reforça a necessidade de buscar alternativas mais sustentáveis (Oda *et al.*, 2024). Nesse contexto, a incorporação do RCC surge como uma alternativa viável, desde que a mistura atenda aos requisitos mínimos estabelecidos para aplicação em bases e sub-bases de pavimento.

Barreto; Amorim (2020) analisaram o uso de RCC incorporados ao solo em proporções de 25%, 50% e 75%, com o objetivo de avaliar sua aplicabilidade em obras de pavimentação. Os resultados indicaram que a adição de RCC ao solo aumenta os valores de CBR, melhorando suas propriedades mecânicas. Além disso, Moreira (2018) desenvolveu equações para estimar o teor de resíduo no solo e verificou que o aumento da quantidade de RCD resulta na elevação do CBR, redução da expansão do solo e no aumento da resistência à compressão simples. Essas evidências confirmam que a incorporação do resíduo ao solo é uma alternativa viável e sustentável para sua aplicação em pavimentação.

3.2.1.1.1 Requisitos mínimos

O Manual de Pavimentação do DNIT (BRASIL, 2006) define as exigências mínimas para os materiais de reforço do subleito, sub-base e base estabilizada granulometricamente. Como o foco da pesquisa é a análise para base e sub-base, somente esses serão mostrados. Tais exigências estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Exigências mínimas para as camadas de sub-base e base para pavimento flexível

Camada	Condição
Sub-base	ISC ≥ 20% Expansão ≤ 1%
Base	ISC ≥ 80% Expansão ≤ 0,5% Limite de liquidez ≤ 25% Índice de plasticidade ≤ 6%

Fonte: BRASIL (2006).

Dessa forma, a incorporação do RCC ao solo deve ser analisada com base nesses requisitos, a fim de verificar sua viabilidade técnica como alternativa aos materiais naturais tradicionalmente usados. Contudo, conforme será abordado no item 3.3, que trata sobre a metodologia MCT, existem outros parâmetros e valores de referência que podem ser considerados.

3.2.2 Aterros sanitários

Os aterros sanitários são uma técnica que emprega princípios da engenharia para disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, assegurando uma solução ambientalmente adequada (ABNT,1992). Suas camadas desempenham um papel essencial na proteção ambiental e na segurança do processo.

Para garantir essa eficácia e minimizar riscos, ao longo dos anos, foram desenvolvidas diversas estruturas que compõem o aterro, denominadas elementos de proteção, fundamentais para o seu adequado funcionamento e prevenção de impactos ambientais indesejáveis (Locastro; de Angelis., 2016). De acordo com a Fundação Estadual do Meio Ambiente (de Carvalho; Lanza, 2006), os elementos previstos para compor a operação desses sistemas foram delineados da seguinte forma:

- Impermeabilização de base e laterais, evitando a contaminação do solo;
- Recobrimento diário e cobertura final, reduzindo odores e a proliferação de vetores;
- Coleta e drenagem de líquidos percolados, impedindo a infiltração no solo;
- Coleta e tratamento de gases, minimizando impactos atmosféricos;
- Drenagem superficial, prevenindo erosões e acúmulo de água;
- Tratamento de líquidos percolados, reduzindo riscos ambientais;

- Monitoramento, garantindo a segurança operacional e ambiental.

Esta pesquisa terá como foco a análise das camadas de base, responsáveis pela impermeabilização, e de cobertura do aterro sanitário, com destaque na avaliação da viabilidade da incorporação do RCC ao solo para essas aplicações. A seguir, serão apresentados os requisitos mínimos para essas camadas, que servirão como base para análise proposta.

3.2.2.1 Camadas de base e de cobertura

Por atenderem aos requisitos normativos, solos argilosos compactados são comumente utilizados como barreiras ambientais. No entanto, sua disponibilidade varia entre regiões, o que pode inviabilizar ou encarecer sua aplicação na construção de aterros sanitários (de Araujo; Pejon, 2019). Nesse contexto, a substituição da matéria-prima natural por materiais alternativos tem se mostrado uma solução mais sustentável, sem comprometer a eficácia das barreiras de baixa permeabilidade.

Para viabilizar essa substituição, estudos indicam que a incorporação de RCC pode aprimorar as propriedades dessas barreiras. Da Silva, C. R.; da Silva, T. L. C. (2020) demonstraram que a adição de 25% e 50% de RCC ao solo melhora sua impermeabilização, melhorando seu desempenho em camadas de cobertura. Além disso, Molle; Lukiantchuki (2022) verificou que a incorporação de 50% de RCC reduz a contração volumétrica em solos argilosos. Esse fator é fundamental para evitar o surgimento de trincas superficiais, as quais podem comprometer a eficiência da barreira ao criar caminhos preferenciais para a percolação de líquidos, conforme apontado por Piedade Jr. (2003).

3.2.2.2 Requisitos mínimos

No Brasil, as normas não detalham criteriosamente os requisitos técnicos para a camada de cobertura de aterros sanitários, limitando-se a diretrizes gerais. De forma convencional, essa cobertura é composta por materiais de baixa condutividade hidráulica, com permeabilidade da ordem de 10^{-7} cm/s ou menos, proporcionando maior eficiência na redução da infiltração de líquidos e na contenção de contaminantes (Catapreta, 2008).

Da Silva (2017), realizou um levantamento sobre os critérios de coeficiente de permeabilidade para a camada de base de aterros sanitários e constatou que o valor recomendado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) também é da ordem de 10^{-7} cm/s ou menor, o mesmo adotado para a camada de cobertura. Além disso, de acordo com Palma (2017), os critérios de aceitação para as camadas de impermeabilização incluem parâmetros específicos como condutividade hidráulica, contração volumétrica e resistência à compressão, apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Requisitos mínimos para utilização de solos tropicais em aterros sanitários

Propriedades	**Requisitos**
Permeabilidade	≤ $1x10^{-7}$ cm/s
Resistência à compressão	≥ 200 kPa
Contração	≤ 4%

Fonte: Adaptado de da Silva; Hubner (2023), com base em Palma (2017).

3.3 METODOLOGIA MCT

A metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical), foi desenvolvida por Nogami e Villibor para suprir as limitações da abordagem tradicional na análise de solos para pavimentação, especialmente no que se refere à classificação geotécnica e aos critérios de seleção e dosagem de materiais. As classificações convencionais, como TRB (Transportation Research Board) e SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), foram originalmente desenvolvidas para solos de regiões de clima frio e temperado, o que limita sua aplicabilidade em solos tropicais (Villibor *et al*., 2009).

Diante dessa inadequação, os autores estabeleceram uma sistemática específica para solos tropicais, em virtude de dois principais aspectos:

- Limitação dos métodos tradicionais, uma vez que o uso da granulometria e de limites de consistência, são insuficientes para classificar e distinguir adequadamente os diferentes tipos de solos tropicais, especialmente os lateríticos e saprolíticos (Villibor *et al*., 2009).
- Evidências experimentais da viabilidade estrutural de solos tropicais em bases e sub-bases de pavimentos, demonstrando que solos lateríticos finos ou com elevado teor de finos (quase integralmente permeáveis à peneira de 0,42 mm) apresentaram desempenho satisfatório, apesar de serem considerados inadequados pelas normas tradicionais (Villibor *et al*., 2009).

Para tanto, a seguir serão descritas as classificações dos solos conforme a metodologia MCT, bem como suas aplicações experimentais.

3.3.1 Classificação MCT

Na classificação MCT, os solos são classificados em duas categorias principais: lateríticos (classe L) e não lateríticos ou saprolíticos (classe N) (Villibor *et al.*, 2009). Essas categorias são subdivididas conforme apresentado no Quadro 1.

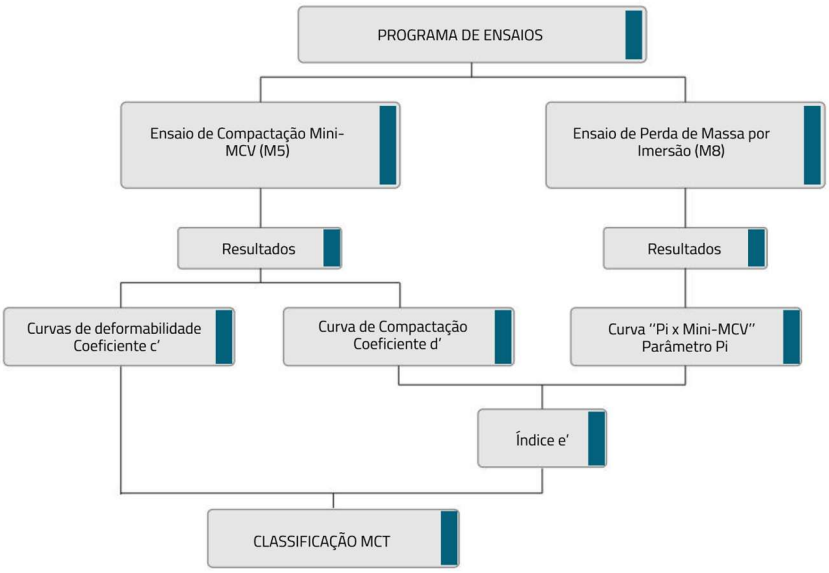
Quadro 1 – Classificação dos tipos de solos conforme metodologia MCT

Grupo	Subdivisão	
L: Lateríticos	LA	Areia laterítica quartzosa
	LA’	Solo arenoso laterítico
	LG’	Solo argiloso laterítico
N: Não lateríticos ou saprolíticos	NA	Areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico
	NA’	Misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico (solo arenoso)
	NS’	Solo siltoso não laterítico
	NG’	Solo argiloso não laterítico

Fonte: Elaborado pela autora (2025), com base em Villibor; Alves (2019).

A determinação da classificação MCT é realizada por meio de um conjunto de ensaios voltados à obtenção de coeficientes e parâmetros específicos (Figura 3).

Figura 3 – Programa de ensaios e resultados para classificação MCT



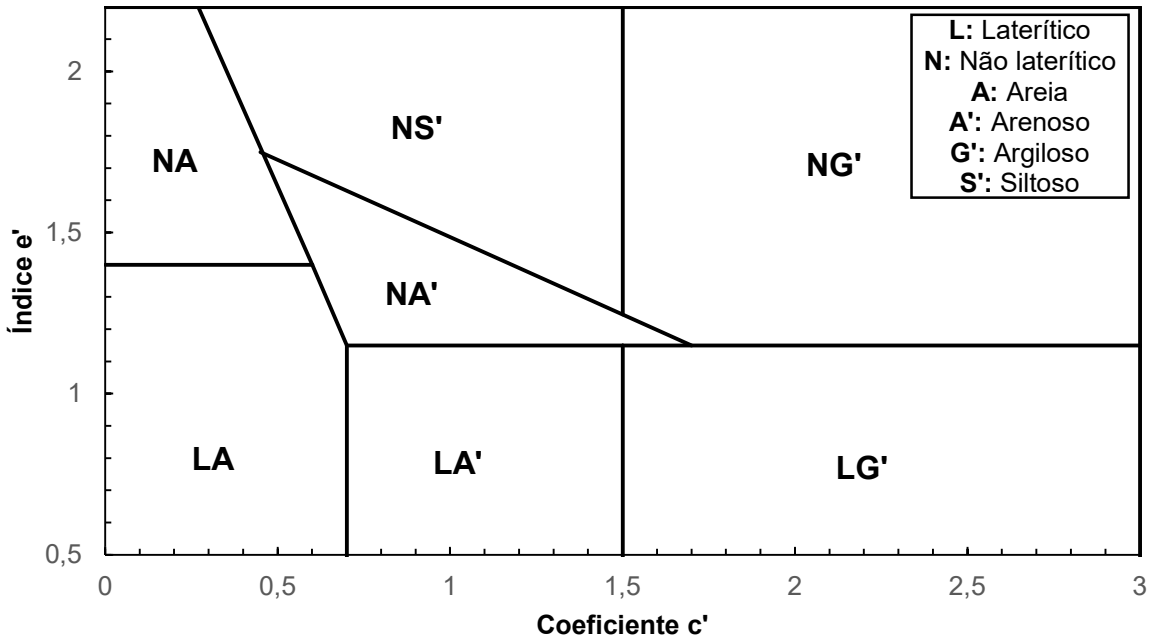
Fonte: Villibor; Alves (2019).

Conforme ilustrado na Figura 3, os ensaios empregados na classificação MCT são o mini-MCV e a Perda de Massa por Imersão, ambos normatizados pelo DNIT 258/2023. O ensaio mini-MCV permite obter as curvas de deformabilidade e compactação do solo, resultando nos coeficientes de argilosidade (c') e d'. Já a Perda de Massa por Imersão fornece o parâmetro Pi, determinado a partir da relação entre Pi e mini-MCV.

Com os valores de d' e Pi, é possível calcular o índice de laterização (e') por meio da Equação 1. Por fim, a classificação do solo na metodologia MCT é definida utilizando a Figura 4.

$$e' = \sqrt[3]{\left(\frac{20}{d'}\right) + \left(\frac{Pi}{100}\right)} \qquad \text{Equação 1}$$

Figura 4 – Gráfico de referência para classificação de solos



Fonte: Adaptado de Nogami; Villibor (1995).

3.3.1.1 Coeficiente c'

O coeficiente c', denominado de coeficiente de argilosidade, está diretamente associado às características granulométricas do solo no processo de compactação. Elementos como tamanho e forma das partículas, além da mineralogia, influenciam sua magnitude. Quando c' ultrapassa 1,5 mm, o solo é classificado como argiloso. Valores inferiores a 1,0 mm, por outro lado, indicam materiais predominantemente

arenosos ou siltes pouco coesivos e não plásticos. Na faixa compreendida entre 1,0 mm e 1,5 mm, enquadram-se solos de diferentes composições, como areias siltosas, areias argilosas, argilas arenosas e argilas siltosas. Esse coeficiente é definido a partir da inclinação da porção retilínea da curva de deformabilidade mais próxima ao mini-MCV igual a 10 (Nogami; Villibor, 1995; Villibor *et al.*, 2009).

3.3.1.2 Coeficiente d'

O coeficiente d' está relacionado à inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação, obtida com 12 golpes no ensaio mini-MCV. Seu valor varia conforme a composição do solo: argilas lateríticas, por exemplo, apresentam d' superior a 20 (kg/m³)/%, enquanto argilas não lateríticas geralmente não alcançam esse patamar, situando-se frequentemente abaixo de 10. No caso das areias, aquelas com predominância de partículas puras tendem a apresentar d' reduzido, ao passo que areias argilosas exibem valores significativamente mais elevados, podendo superar 100 (Nogami; Villibor, 1995; Villibor *et al.*, 2009).

3.3.1.3 Parâmetro Pi

O parâmetro Pi é determinado por interpolação gráfica das curvas que expressam a variação da porcentagem de perda de massa por imersão, correspondente à fração de material desprendida do corpo de prova após, no mínimo, 20 horas de imersão, em função do mini-MCV. Seu valor é definido para mini-MCV 10 ou 15, conforme a massa específica aparente do solo. Quando a altura final do corpo de prova atinge ou supera 48 mm, o solo é classificado como de baixa massa específica aparente, e Pi é obtido para mini-MCV = 10. Por outro lado, se a altura final for inferior a 48 mm, o solo é considerado de elevada massa específica aparente, e Pi é determinado para mini-MCV = 15 (Nogami; Villibor, 1995; Villibor *et al.*, 2009).

3.3.1.4 Índice e'

O índice e', também denominado índice de laterização, representa a correlação entre o parâmetro Pi e o coeficiente d', sendo um critério para diferenciar solos de comportamento laterítico daqueles que não possuem essa característica. A evidência do comportamento laterítico ocorre quando d' ultrapassa 20 (kg/m³)/% e Pi permanece abaixo de 100%, resultando em um valor de e' correspondente a 1,15, que delimita os

solos da classe L e da classe N. Entretanto, em solos com reduzida quantidade de finos, como as areias, há tendência de valores mais altos para Pi e mais baixos para d'. Diante disso, foi estabelecido um critério complementar, fixando o limite de e' em 1,40 (Villibor; Alves, 2019). A Figura 4 ilustra essas relações.

A Tabela 3 a seguir apresenta as relações entre a classificação MCT e suas correspondentes na classificação convencional. Além disso, na seção 3.3.2, serão abordadas as utilizações recomendadas para cada tipo de solo, bem como uma previsão do comportamento dos materiais em cada um dos ensaios.

Tabela 3 – Relação entre a classificação MCT e suas correspondentes na classificação convencional

Classificações tradicionais	**Classificação MCT**						
	Classe N: Não Laterítico				**Classe L: Laterítico**		
	NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
SUCS	SP SM	MS SC ML	SM CL ML MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
TRB	A-2	A-2 A-4 A-7	A-4 A-5 A-7-5	A-6 A-7-5	A-2	A-2 A-4	A-6 A-7-5

Fonte: Adaptado de Nogami; Villibor (1995).

3.3.2 Utilizações recomendadas

De acordo com Villibor *et al.* (2009), a metodologia MCT é amplamente utilizada para classificação de solos, análise de propriedades geotécnicas, definição de critérios para seleção e priorização de materiais para bases, além da dosagem de misturas com solos lateríticos e imprimaduras asfálticas. Os principais ensaios dessa sistemática e seus respectivos métodos estão listados a seguir (Quadro 2):

Quadro 2 – Ensaios da metodologia MCT e seus métodos correspondentes

(continua)

Ensaio	**Métodos**
Compactação (Mini-Proctor)	M1
Mini-MCV	M5
Mini-CBR	M2
Expansão	
Contração	M3

Quadro 2 – Ensaios da metodologia MCT e seus métodos correspondentes

(conclusão)

Ensaio	Métodos
Infiltrabilidade	M4
Permeabilidade	
Penetração da Imprimadura Betuminosa	M6
Mini-CBR em campo	M7
Perda de massa por imersão	M8
Método expedito da pastilha	M9

Fonte: Adaptado de Villibor *et al.* (2009).

Além da descrição feita pelos autores, alguns desses ensaios são normatizados pelo DNIT, como a compactação (Mini-Proctor), conforme a norma DNIT 228/2023 – ME, o mini-MCV e perda de massa por imersão, estabelecidos na norma DNIT 258/2023 – ME e o mini-CBR e expansão, descritos na norma DNIT 254/2023 – ME.

A Tabela 4 abaixo, apresenta as propriedades esperadas na umidade ótima e energia normal para cada tipo de solo, enquanto a Tabela 5 indica a adequação do material para uso como base de pavimento, conforme Nogami; Villibor (1995).

Tabela 4 – Propriedades dos solos de acordo com a classificação MCT

Classificação MCT		NA	NA'	NS	NG'	LA	LA'	LG'
Mini-CBR (%)	sem imersão	4 a 30	12 a 30	4 a 30	12 a 30	12 a 30	> 12	12 a 30
	perda por imersão	≤ 70	< 40	> 70	> 70	< 40	< 40	< 40
Expansão	(%)	< 0,5	< 0,5	> 3	≥ 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Contração	(%)	< 0,5	≤ 3	0,5 a 3	≥ 0,5	< 0,5	≤ 3	≥ 0,5
Coeficiente de permeabilidade	(cm/s)	$\geq 10^{-6}$	$< 10^{-6}$	$\leq 10^{-3}$	$\leq 10^{-3}$	$\leq 10^{-3}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$

Fonte: Adaptado de Villibor; Alves (2019).

Tabela 5 – Adequação dos solos da classificação MCT para uso em base de pavimento

Classificação MCT	NA	NA’	NS	NG’	LA	LA’	LG’
Base de pavimento	n	4	n	n	2	1	3

A utilização é representada em prioridade de escolha (1, 2, 3, ...), sendo “n” não recomendado.

Fonte: Adaptado de Villibor; Alves (2019).

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia empregada na pesquisa experimental deste estudo, incluindo os materiais utilizados, os procedimentos realizados e as normas técnicas seguidas durante os ensaios laboratoriais.

4.1 MATERIAIS

A escolha das proporções de 75% solo + 25% RCC e 50% solo + 50% RCC baseou-se em estudos anteriores (Barreto; Amorim, 2020; da Silva, C. R.; da Silva, T. L. C., 2020; Molle; Lukiantchuki, 2022), que indicam que a adição de RCC nesses teores pode aprimorar as características geotécnicas do solo sem comprometer sua trabalhabilidade. Além disso, essas proporções permitem uma análise gradual da influência do resíduo no comportamento do material, facilitando a comparação com o solo natural e a avaliação da viabilidade técnica para aplicações em obras geotécnicas e ambientais.

Para essa análise, as misturas foram submetidas a ensaios de caracterização física e mecânica. A seguir, são descritas as fontes de coleta e o armazenamento dos materiais utilizados.

4.1.1 Solo

O solo utilizado neste estudo é predominantemente composto por argila. As amostras foram coletadas nas proximidades do quilômetro 368 da rodovia BR-101, no município de Anchieta, Espírito Santo. O material (Figura 5), já disponível no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LabGeo), da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), foi destorroado, seco em estufa e armazenado em sacos de 20 kg até sua utilização nos ensaios físicos e mecânicos.

Figura 5 – Amostra de solo utilizada na pesquisa

Fonte: Autora (2024).

4.1.2 Resíduo de Construção Civil

Os resíduos de construção civil utilizados neste estudo (

Figura 6) foram produzidos na Unidade de Beneficiamento de Agregados Reciclados (UBAR) e fornecidos pela empresa Vila Recicla (Figura 7), que os classifica como areia reciclada, com base em sua granulometria. No dia 15/05/2024, foi coletado um lote único de aproximadamente 75 kg que, após a coleta, passou pelo processo de quarteamento no laboratório e foi armazenado até sua utilização.

O material apresenta uma distribuição granulométrica que inicia a retenção na peneira de 9,5 mm, com 99,27% do total passando por essa abertura. Sua composição granulométrica se estende até partículas inferiores a 0,0012 mm, sendo que 6,85% do material atravessa essa malha.

Figura 6 – Amostra de RCC utilizada na pesquisa fornecida pela Vila Recicla

Fonte: Autora (2024).

Figura 7 – Unidade de Beneficiamento de Agregados Reciclados (UBAR). (a) Pátio de estoque de agregados; (b) Galpão de triagem

(a) (b)

Fonte: Vila Recicla (2025).

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados com as amostras de solo natural e misturas solo-RCC, conforme descrito na seção 4.1. Para otimizar o uso de materiais e minimizar desperdícios, a avaliação seguiu a metodologia MCT, que permite realizar testes com amostras de tamanho reduzido. A seguir, são detalhados os procedimentos específicos de cada ensaio.

4.2.1 Caracterização física dos materiais

A caracterização do solo natural, do RCC e das misturas 1 e 2 foi realizada conforme os procedimentos normativos citados na Tabela 6.

Tabela 6 – Ensaios de caracterização física realizados

Ensaio	Norma
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181/2016
Massa específica dos grãos	ABNT NBR 6458/2016
Limite de liquidez	ABNT NBR 6459/2016
Limite de plasticidade	ABNT NBR 7180/2016

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Além disso, a preparação dos materiais seguiu as diretrizes da norma ABNT NBR 6457/2016.

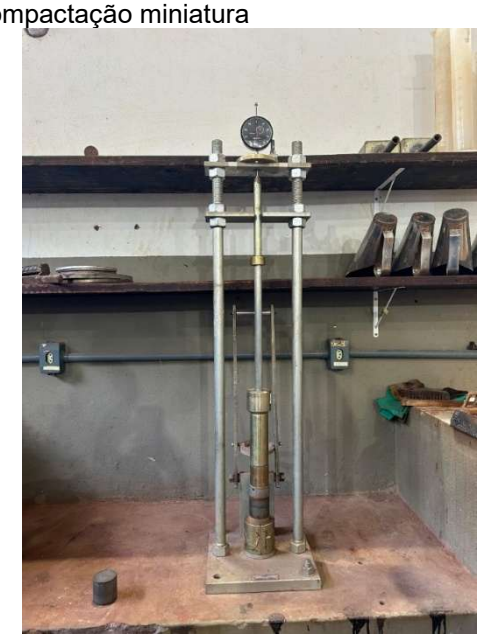
4.2.2 Metodologia MCT

A metodologia MCT foi adotada para caracterizar o solo utilizado neste estudo, sendo baseada nos ensaios normatizados que avaliam a compactação, perda de massa por imersão, capacidade de suporte e expansão desses solos. Cada ensaio segue os parâmetros estabelecidos pelas normas do DNIT, além dos materiais consultados de Nogami; Villibor (1995), Villibor *et al.* (2009) e Villibor; Alves (2019).

4.2.2.1 Compactação em equipamento miniatura

O ensaio de compactação em equipamento miniatura (Figura 8), regulamentado pela norma DNIT 228/2023, tem como objetivo determinar a relação entre o teor de umidade do solo e sua massa específica aparente seca (curva de compactação). Este procedimento é aplicado a solos finos tropicais sob diferentes níveis de energia: normal, intermediária ou outra conforme especificado pelo projetista. Para este estudo, foi adotada a energia normal com a aplicação de 10 golpes – 5 de cada lado do corpo de prova (CP) – utilizando um soquete de 2,270 kg.

Figura 8 – Equipamento de compactação miniatura



Fonte: Autora (2025).

As amostras foram preparadas no dia anterior ao ensaio e homogeneizadas, com variações de umidade de ± 2%, conforme estabelecido pela norma. O critério de aceitação dos corpos de prova exige que a altura final do corpo de prova esteja dentro do intervalo de 50 ± 1 mm. Caso contrário, o procedimento deve ser repetido, ajustando a massa.

4.2.2.2 Mini-MCV e perda de massa por imersão

O ensaio de mini-MCV e perda de massa por imersão, conforme estabelecido pela norma DNIT 258/2023, busca analisar a tendência dos solos finos tropicais à compactação e à perda por imersão. Essas características são fundamentais para a classificação dos solos tropicais como lateríticos ou não lateríticos dentro do sistema de caracterização MCT.

Diferentemente do ensaio de compactação em equipamento miniatura, no mini-MCV a energia aplicada é variável, assim como a altura do corpo de prova (CP), enquanto sua massa permanece constante em 200 g. O ensaio pode ser conduzido por meio de duas séries de golpes: a Série de Parsons e a Série Simplificada. Neste estudo, foi utilizada a Série de Parsons, que aplica golpes cumulativos nas seguintes sequências: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256. O ensaio é realizado nas mesmas umidades da curva de compactação obtida no ensaio descrito no item 4.2.2.1

e as amostras foram preparadas no dia anterior, garantindo um período mínimo de 12 horas antes da execução.

O ensaio é finalizado nas seguintes situações:

- A diferença entre as leituras dos golpes 4n e n for inferior a 2 mm;
- Quando houver intensa exsudação de água no topo e na base do CP;
- Quando o número máximo de golpes atingir 256.

No ensaio de perda de massa por imersão, são utilizados os cinco corpos de prova (CP) do mini-MCV. Após a compactação, com o auxílio de um extrator, é removida uma camada de 10 mm da extremidade que esteve em contato com o soquete (Figura 9). Em seguida, os CPs são completamente submersos em água por um período de 20 horas, garantindo uma lâmina d'água de 10 mm acima da superfície dos cilindros.

Figura 9 – Corpo de prova com camada de 10 mm extraída

Fonte: Autora (2025).

No recipiente, são inseridas cápsulas para coletar o material desprendido ao longo do ensaio (Figura 10). Nos primeiros minutos, devem ser observados e registrados fenômenos como desagregação, liberação de bolhas, inchamento e trincamento. Após o período de imersão, o material acumulado nas cápsulas é seco em estufa para determinação da massa do solo desprendido.

Figura 10 – Corpos de prova submersos com cápsula para recolhimento do material

Fonte: Autora (2025).

4.2.2.3 Mini-CBR e expansão

O ensaio de mini-CBR e expansão de solos compactados visa avaliar a capacidade de suporte dos solos típicos das regiões tropicais, sendo regulamentado pela norma DNIT 254/2023. Para este estudo, o valor do mini-CBR foi determinado com imersão e aplicação de uma sobrecarga padrão de 490 g.

A execução do ensaio segue os seguintes passos: os corpos de prova, mantidos no cilindro, são reaproveitados do ensaio de compactação descrito no item 4.2.2.1 e posicionados em um suporte, ao qual é acoplado um extensômetro (Figura 11).

Figura 11 – Sobrecarga padrão e suporte para ensaio CBR com extensômetro acoplado

Fonte: Autora (2025).

Esse conjunto é inserido em um recipiente contendo água garantindo-se uma lâmina d'água de 5 mm acima do topo do suporte (Figura 12). As leituras são realizadas no início do ensaio início e após 20 horas de imersão.

Figura 12 – Disposição dos corpos de prova durante o ensaio de mini-CBR e expansão. (a) Corpos de prova no suporte com extensômetro submersos; (b) Detalhe de lâmina d'água de 5 mm.

(a)

(b)

Fonte: Autora (2025).

Após esse período, o conjunto é removido do recipiente, desmontado e inclinado levemente para drenagem da água por aproximadamente 15 minutos. O corpo de prova é mantido em repouso por cerca de 1 hora antes da etapa final do ensaio.

Para a determinação do mini-CBR, o corpo de prova é posicionado na prensa com a sobrecarga e elevado até que o pistão entre em contato com sua superfície (Figura 13). O ensaio é conduzido com uma velocidade de penetração de 1,25 mm/minuto e as leituras são registradas para as seguintes profundidades: 0,25 mm, 0,50 mm, 0,75 mm, 1,00 mm, 1,25 mm, 1,50 mm, 2,00 mm, 2,50 mm, 3,00 mm, 3,50 mm, 4,00 mm, 4,50 mm e 5,00 mm.

Figura 13 – Prensa (MP 01) utilizada para o ensaio mini-CBR

Fonte: Autora (2025).

4.2.3 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade de parede flexível com carga constante (Método A) tem como objetivo determinar a permeabilidade de solos saturados, utilizando um permeâmetro de parede flexível sob a condição de carga constante, conforme regulamentado pela norma ASTM D5084-03.

A execução do ensaio segue os seguintes passos: os corpos de prova são compactados conforme a ABNT NBR 7182/2016, utilizando o cilindro pequeno com três camadas e 26 golpes por camada, e são preparados na umidade ótima para garantir que as amostras estejam em suas condições ideias de compactação.

Os corpos de prova são colocados no permeâmetro de parede flexível e a carga constante é aplicada sobre a amostra (Figura 14). A água é conduzida através do solo, e a vazão é medida em intervalos de tempo específicos, enquanto a pressão é monitorada. O ensaio segue até que a vazão de água se estabilize, indicando que o fluxo através da amostra se tornou constante.

Figura 14 – Permeâmetro de parede flexível

Fonte: Autora (2025).

4.2.4 Contração

O ensaio de contração foi realizado conforme o procedimento estabelecido por Molle (2020). Para a avaliação, um suporte foi adaptado com marcações para permitir 8 leituras de altura e 4 leituras de diâmetro dos corpos de prova (Figura 15). Antes de iniciar o ensaio, cada suporte foi calibrado adequadamente para garantir a precisão das medições. As medições de altura, diâmetro e massa foram realizadas nos seguintes tempos: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 24, 32, 48 e 72 horas.

Figura 15 – Suporte adaptado para avaliação de contração

Fonte: Autora (2025).

Os corpos de prova foram moldados utilizando um cilindro de 50 mm de diâmetro e 130 mm de altura, com altura dos corpos de prova ajustada para 20 mm. A compactação seguiu as orientações da norma DNIT 228/2016, sendo realizada na umidade ótima.

Com as medições realizadas, foi possível determinar a contração axial e volumétrica dos corpos de prova. Adicionalmente, a variação do teor de umidade foi avaliada através da alteração da massa dos corpos de prova durante o processo de secagem, sendo estes pesados antes do início de cada ensaio e a cada nova medição até a obtenção do valor final de umidade.

4.2.5 Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples, conforme a norma ABNT NBR 12770/2022, tem como objetivo determinar a resistência do solo à compressão por meio da aplicação de uma carga axial com controle de deformação. Os corpos de prova foram moldados nos mesmos cilindros utilizados nos ensaios da metodologia MCT, com 50 mm de diâmetro e 130 mm de altura. A compactação foi realizada na umidade ótima, conforme a norma DNIT 228/2023, que estabelece a aplicação de 10 golpes em uma única camada (cinco de cada lado). No entanto, para garantir que a relação altura-diâmetro permanecesse dentro do intervalo de 2 a 2,5, como exigido pela norma, foi necessário dividir a compactação em camadas. Para este estudo, foi adotada uma razão de altura-diâmetro de 2, o que resultou em uma altura final de 100 mm para o corpo de prova.

Para preservar a energia de compactação, utilizou-se a Equação 2:

$$E_C = \frac{M \times H \times N \times n}{V} \qquad \text{Equação 2}$$

A Tabela 7 apresenta as características do ensaio de compactação em equipamento miniatura para energia normal.

Tabela 7 – Características do ensaio Mini-Proctor para energia normal

(continua)

Característica		Energia
		Normal
Massa do soquete (M)	(kg)	2,270

Tabela 7 – Características do ensaio Mini-Proctor para energia normal

(conclusão)

Característica		Energia
		Normal
Altura de queda (H)	(cm)	30,5
Número de golpes por camada (n)		10
Número de camadas (N)		1
Diâmetro médio do CP (D_{CP})	(cm)	5,0
Altura média do CP (D_{CP})	(cm)	5,0
Volume do CP (V)	(cm^3)	98,17
Energia de compactação (E_C)	(kgf/cm^2)	7,05

Fonte: Adaptado de DNIT 228/2023.

A energia de compactação, a altura média e o volume do corpo de prova foram mantidos. Para garantir a relação altura-diâmetro, o número de camadas foi ajustado para três, e a quantidade de golpes por camada foi recalculada. Como o valor encontrado foi 3,33 golpes por camada, adotou-se uma distribuição de 4, 3 e 3 golpes, respectivamente.

Imediatamente após a compactação, os corpos de prova foram posicionados na prensa hidráulica (Figura 16), onde a carga foi aplicada a uma velocidade constante de 1,0 mm/min. Durante o ensaio, foram registrados valores de carga, deslocamento e tempo, com o objetivo de construir a curva tensão-deformação. O ensaio foi finalizado quando o corpo de prova apresentou ruptura ou quando o tempo máximo de 15 minutos foi atingido. Caso a ruptura não ocorresse nesse intervalo, o carregamento prosseguia até que a carga aplicada diminuísse com o aumento do deslocamento ou até atingir 15% de deformação axial específica.

Figura 16 – Prensa utilizada para o ensaio de Resistência à Compressão Simples

Fonte: Autora (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo abordará o tratamento e a análise detalhada de cada procedimento experimental descrito no item 4, descrevendo os resultados obtidos ao longo do estudo. Serão discutidos os dados coletados, suas implicações e relação com os objetivos propostos, permitindo uma interpretação crítica das evidências e de suas possíveis aplicações.

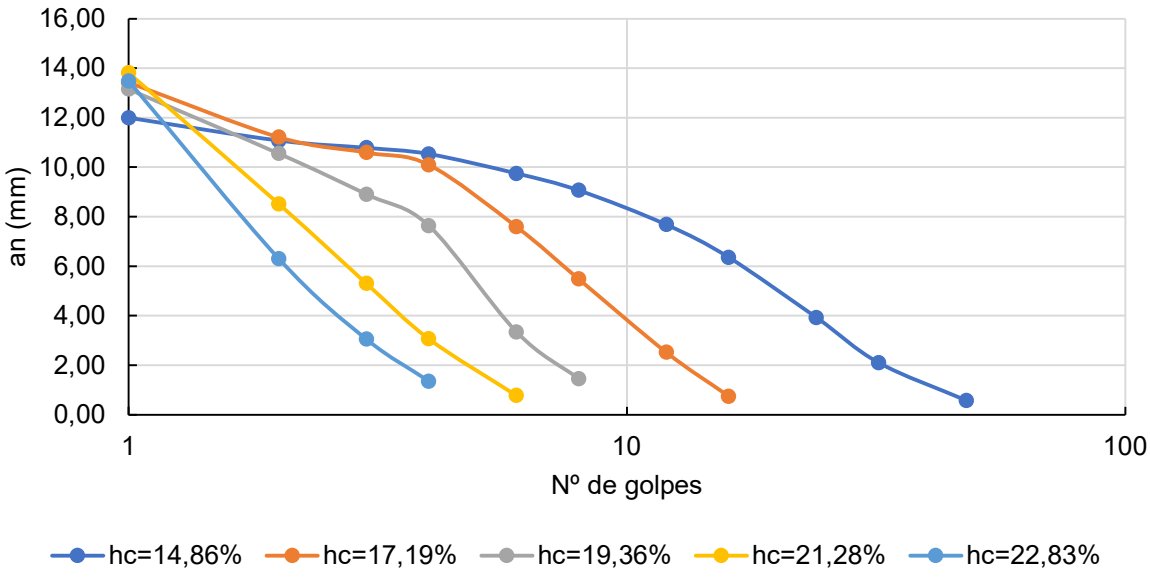
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Serão apresentados inicialmente os resultados da classificação MCT para o solo natural e as misturas. Em seguida, serão mostradas as curvas granulométricas do solo natural, do RCC e de cada mistura, acompanhadas de seus parâmetros físicos (massa específica, limites de liquidez e de plasticidade, e índice de plasticidade), além das classificações conforme os métodos convencionais (SUCS e TRB). Por fim, serão discutidos e analisados os resultados relacionados à classificação física das amostras.

5.1.1 Classificação MCT

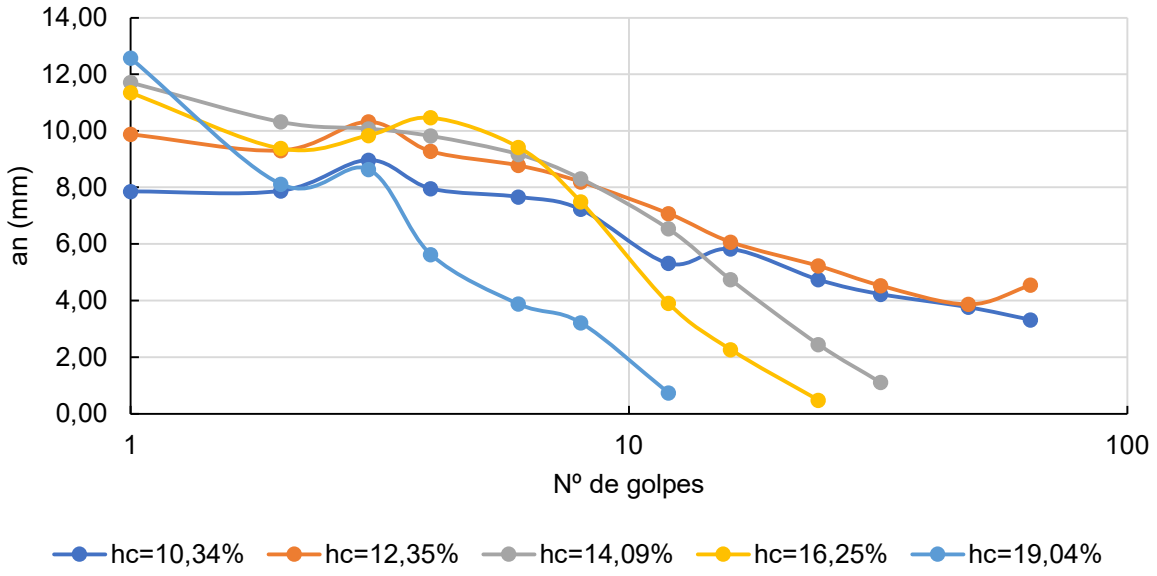
Inicialmente, foi determinada a curva de deformabilidade em função do número de golpes para o solo natural (Gráfico 1), para a mistura 75% Solo + 25% RCC (Gráfico 2).

Gráfico 1 – Curva de deformabilidade em função do número de golpes para o solo natural



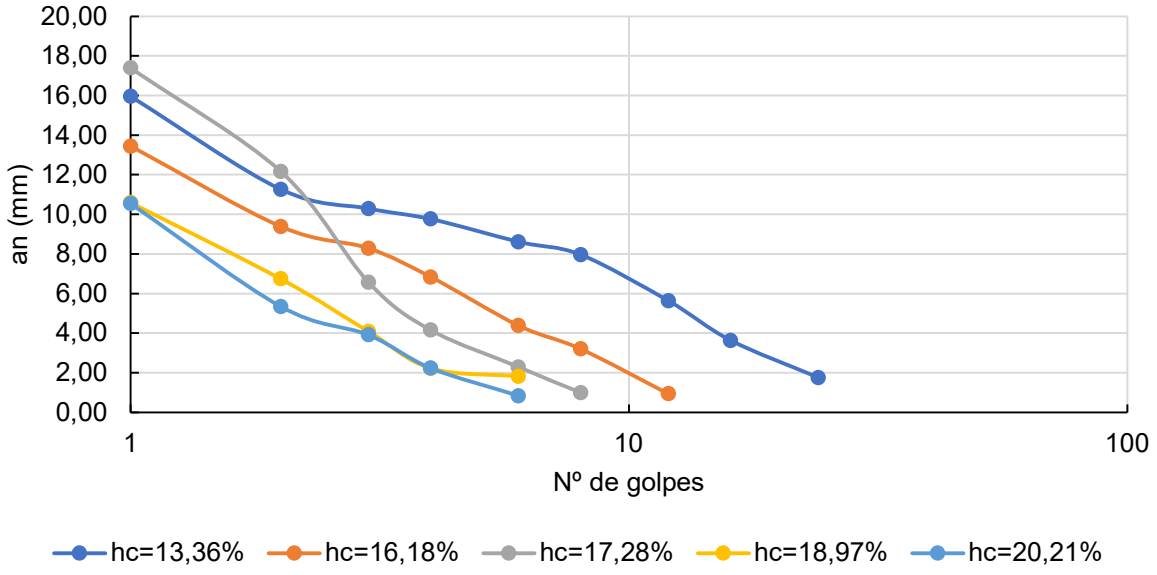
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 2 – Curva de deformabilidade em função do número de golpes para a mistura 75% Solo + 25% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 3 – Curva de deformabilidade em função do número de golpes para a mistura 50% Solo + 50% RCC

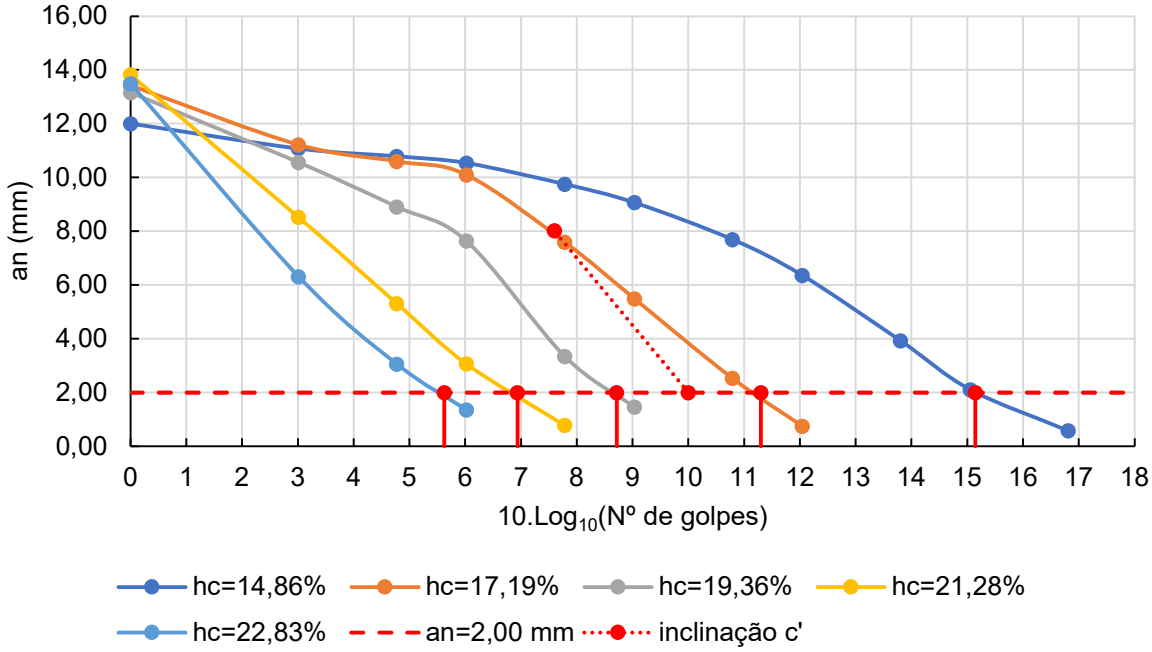


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Em seguida, obteve-se a curva de deformabilidade em função do mini-MCV para o solo natural (Gráfico 4), para a mistura 75% Solo + 25% RCC (Gráfico 5) e para a mistura 50% Solo + 50% RCC (Gráfico 6). Esses dados possibilitaram a altura correspondente ao afundamento de 2,00 para cada curva, bem como a determinação

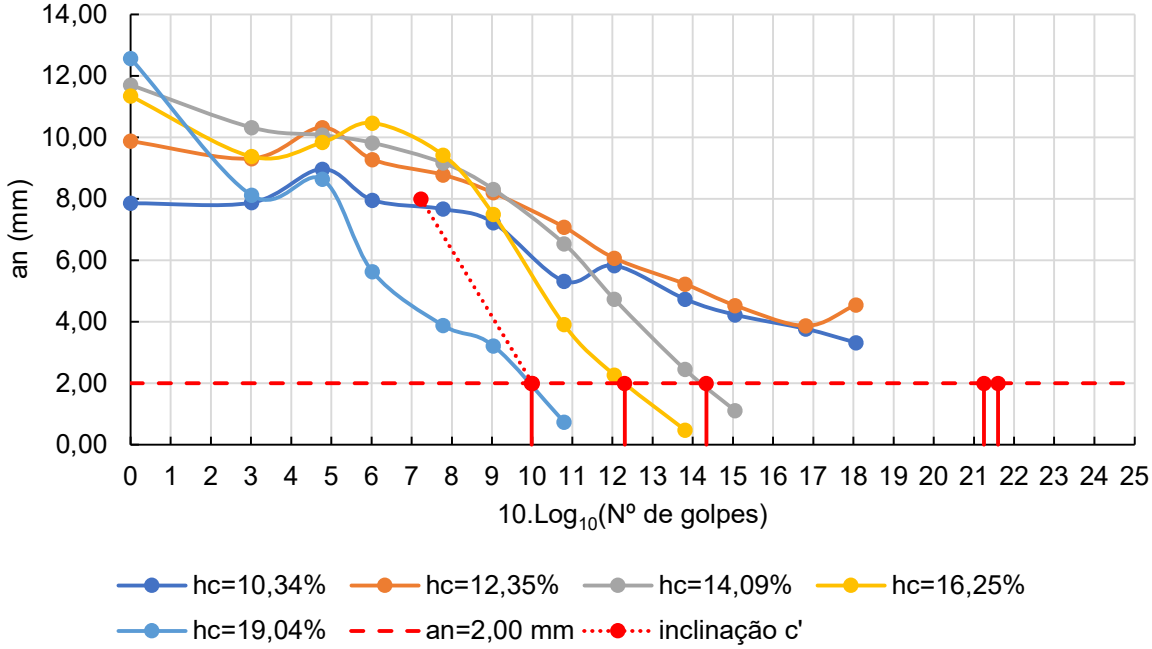
do coeficiente de argilosidade (c'), obtido pela interpolação da curva de maior inclinação para o mini-MCV de 10.

Gráfico 4 – Curva de deformabilidade em função do mini-MCV para obtenção do coeficiente c' para o solo natural



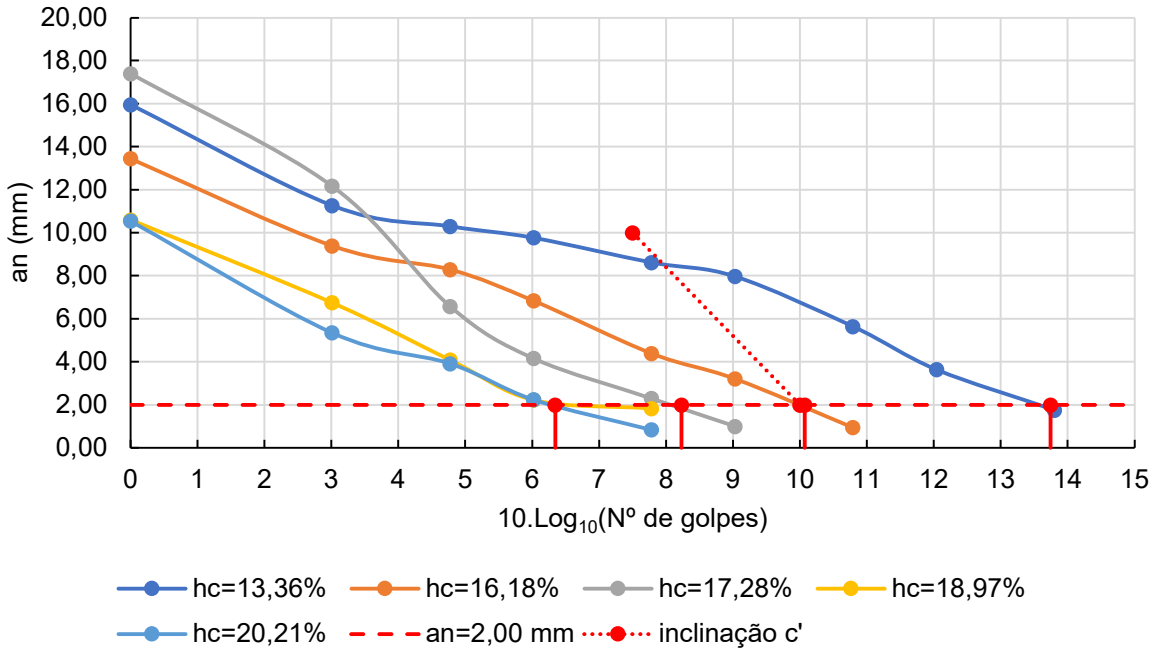
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 5 – Curva de deformabilidade em função do mini-MCV para obtenção do coeficiente c' para a mistura 75% Solo + 25% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

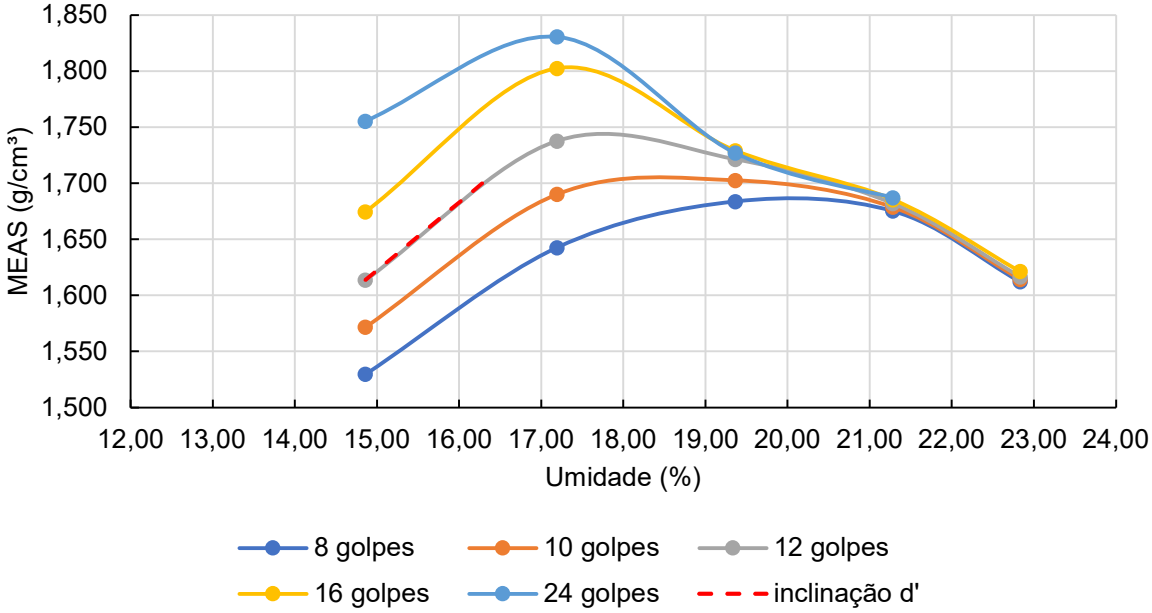
Gráfico 6 – Curva de deformabilidade em função do mini-MCV para obtenção do coeficiente c' para a mistura 50% Solo + 50% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A seguir, foi gerada a curva de compactação para diferentes números de golpes (8, 10, 12, 16 e 24) sendo interpolada a de 10 golpes para determinar o coeficiente d'. As curvas obtidas são apresentadas para o solo natural (Gráfico 7), para a mistura 75% Solo + 25% RCC (Gráfico 8) e para a mistura 50% Solo + 50% RCC (Gráfico 9).

Gráfico 7 – Curvas de compactação para obtenção do coeficiente d' para o solo natural



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 8 – Curvas de compactação para obtenção do coeficiente d' para a mistura 75% Solo + 25% RCC

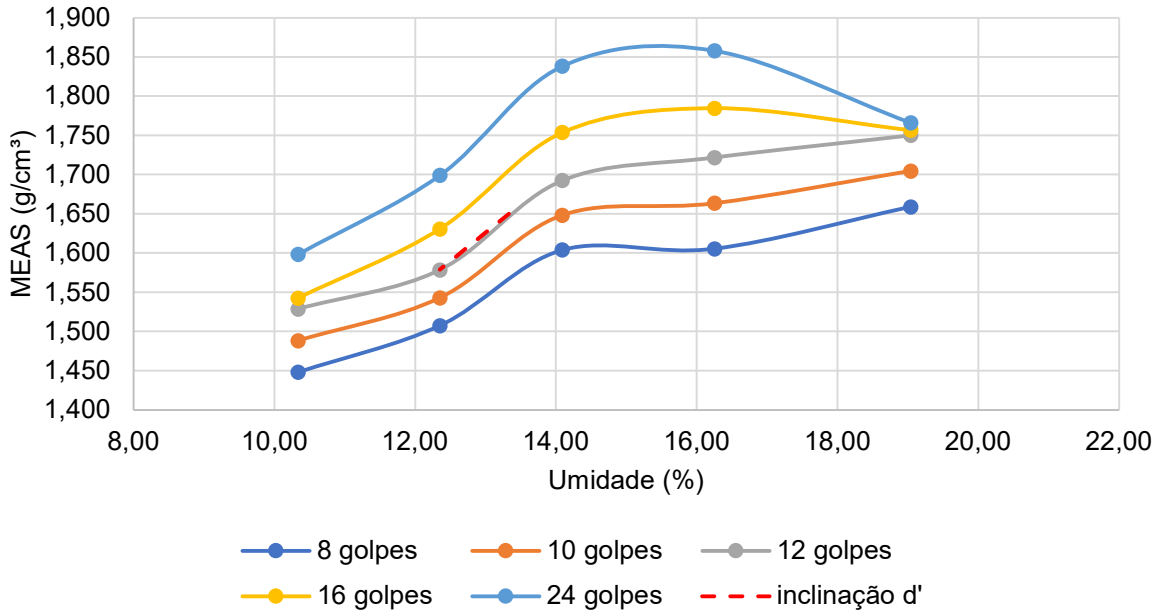
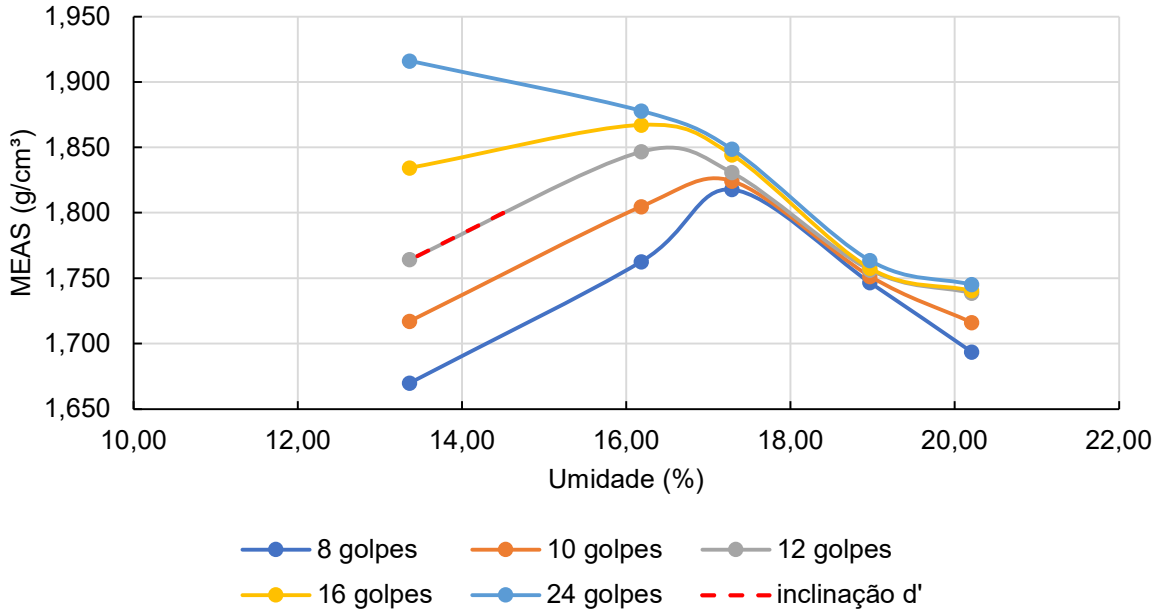
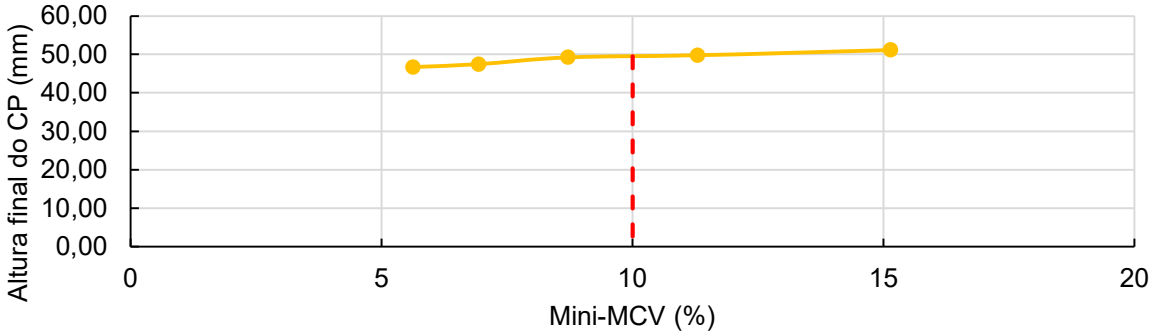


Gráfico 9 – Curvas de compactação para obtenção do coeficiente d' para a mistura 50% Solo + 50% RCC



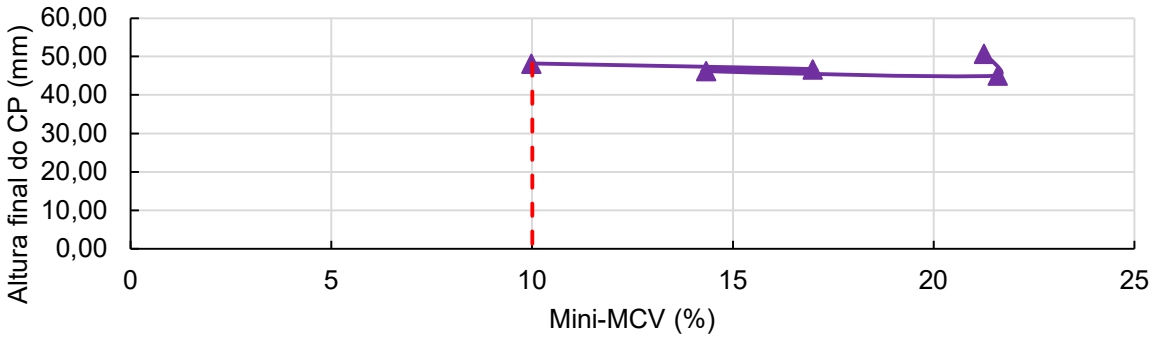
Em seguida, obteve-se a altura final do corpo de prova para o solo natural (Gráfico 10), para a mistura 75% Solo + 25% RCC (Gráfico 11) e para a mistura 50% Solo + 50% RCC (Gráfico 12), conforme ilustrado abaixo.

Gráfico 10 – Mini-MCV x altura final do CP para o solo natural



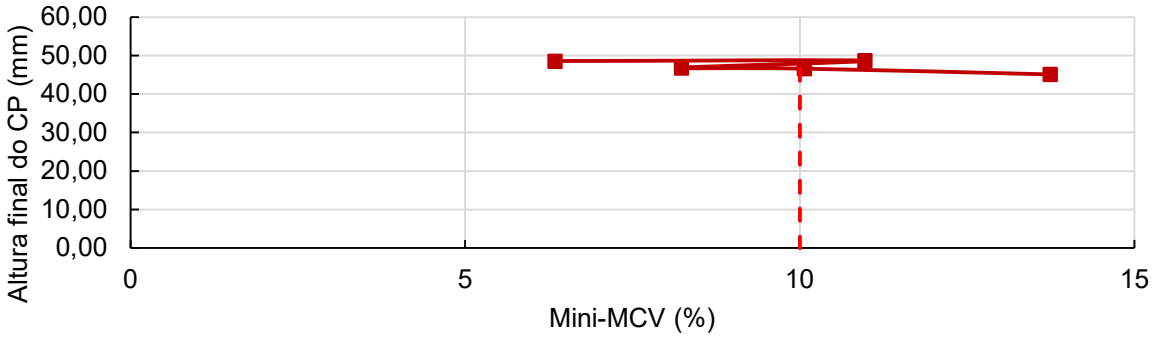
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 11 – Mini-MCV x altura final do CP para a mistura 75% Solo + 25% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

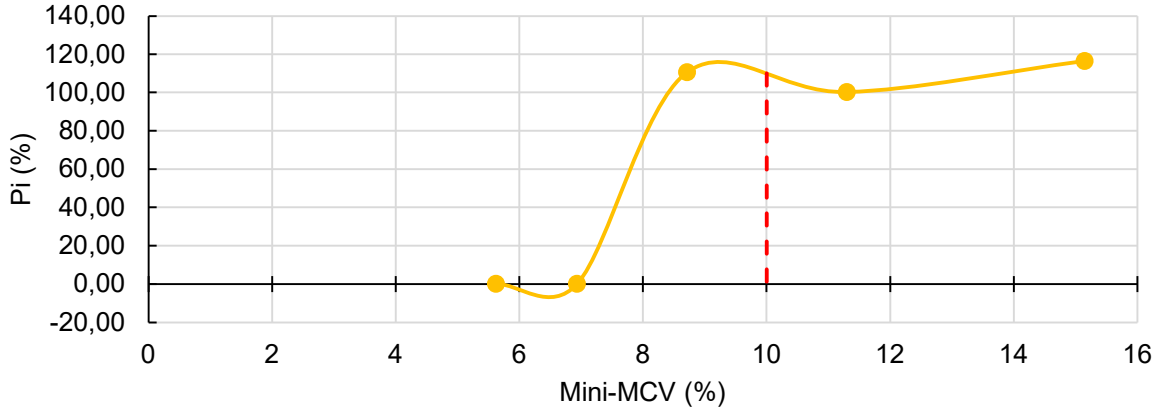
Gráfico 12 – Mini-MCV x altura final do CP para a mistura 50% Solo + 50% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

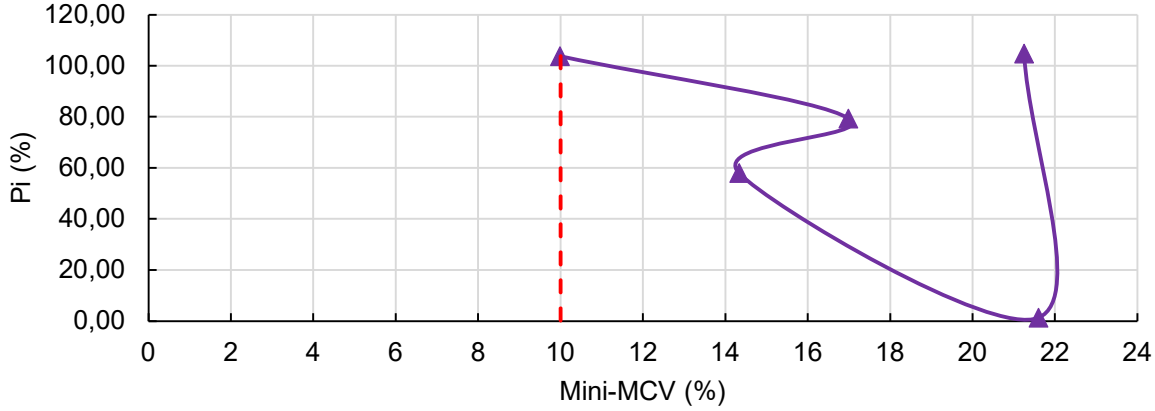
Por fim, conforme descrito no item 3.3.1.3, o parâmetro Pi é determinado a partir do mini-MCV de 10 para solos cuja altura final seja superior a 48 mm, como observado no solo natural (Gráfico 13) e na mistura 75% Solo + 25% RCC (Gráfico 14). Já para alturas inferiores a 48 mm, utiliza-se o mini-MCV de 15, como verificado na mistura 50% Solo + 50% RCC (Gráfico 15). Nesse último caso, o Pi foi obtido por meio da extrapolação da curva.

Gráfico 13 – Mini-MCV x Pi para o solo natural



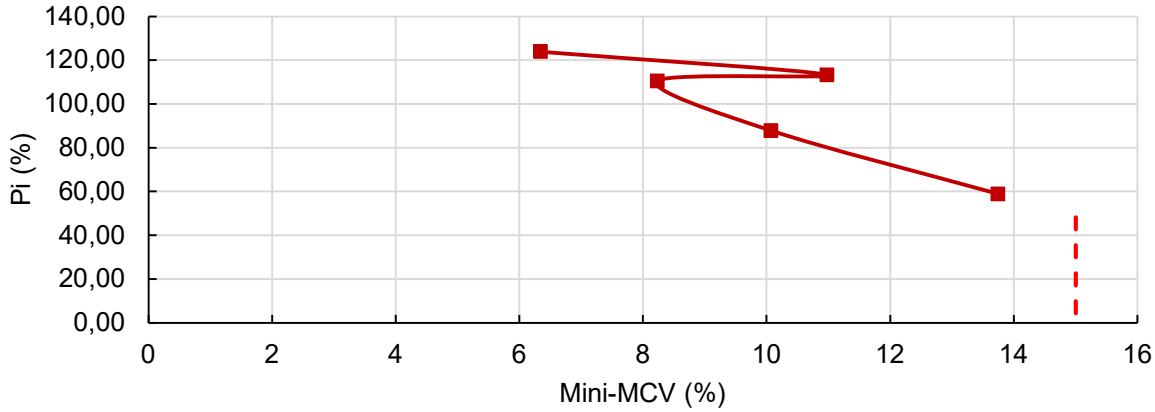
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 14 – Mini-MCV x Pi para a mistura 75% Solo + 25% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 15 – Mini-MCV x Pi para a mistura 50% Solo + 50% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

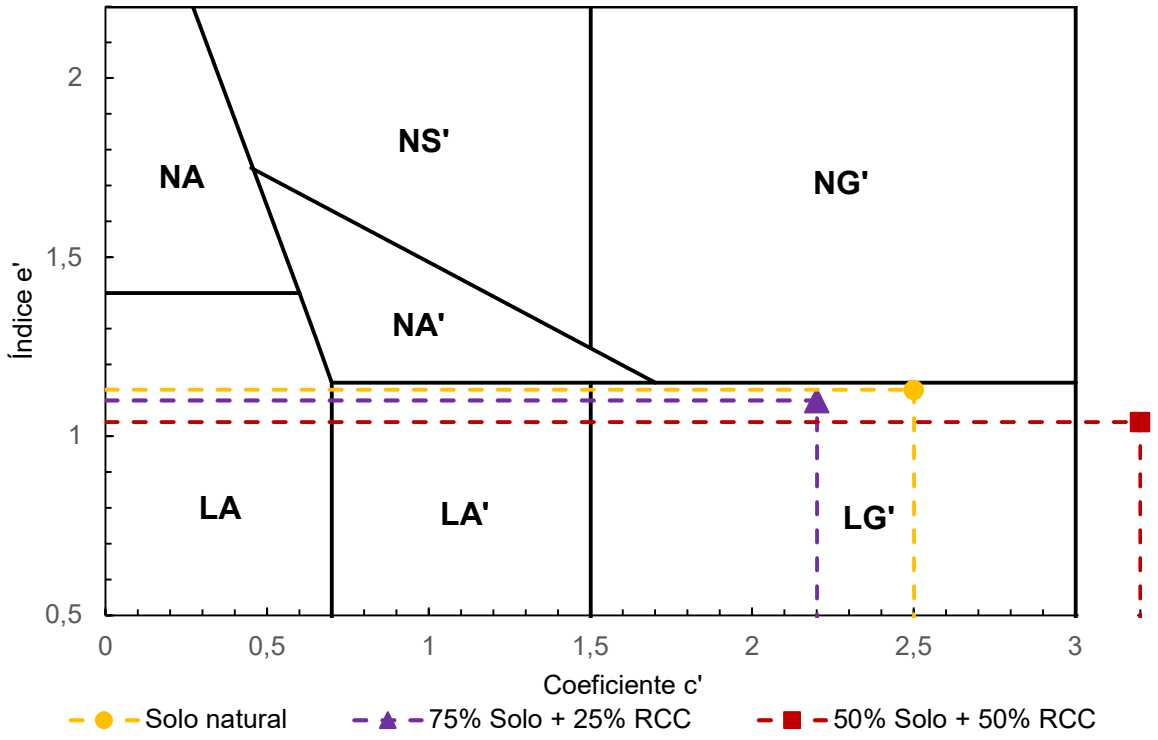
Os resultados obtidos para os coeficientes c’ e d’, o parâmetro Pi e o índice e’, estão apresentados na Tabela 8. Já a Figura 17 exibe o ábaco de classificação MCT, indicando a posição do solo natural e de cada mistura conforme essa classificação.

Tabela 8 – Parâmetros obtidos a partir da classificação MCT

Parâmetro		Solo natural	75% Solo + 25% RCC	50% Solo + 50% RCC
c'	(mm)	2,5	2,2	3,2
d'	(kg.m³/%)	60,563	72,449	31,579
Pi	(%)	110,00	103,77	48,30
e'		1,13	1,10	1,04

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 17 – Ábaco com as classificações do solo natural, mistura 75% Solo + 25% RCC e mistura 50% Solo + 50% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

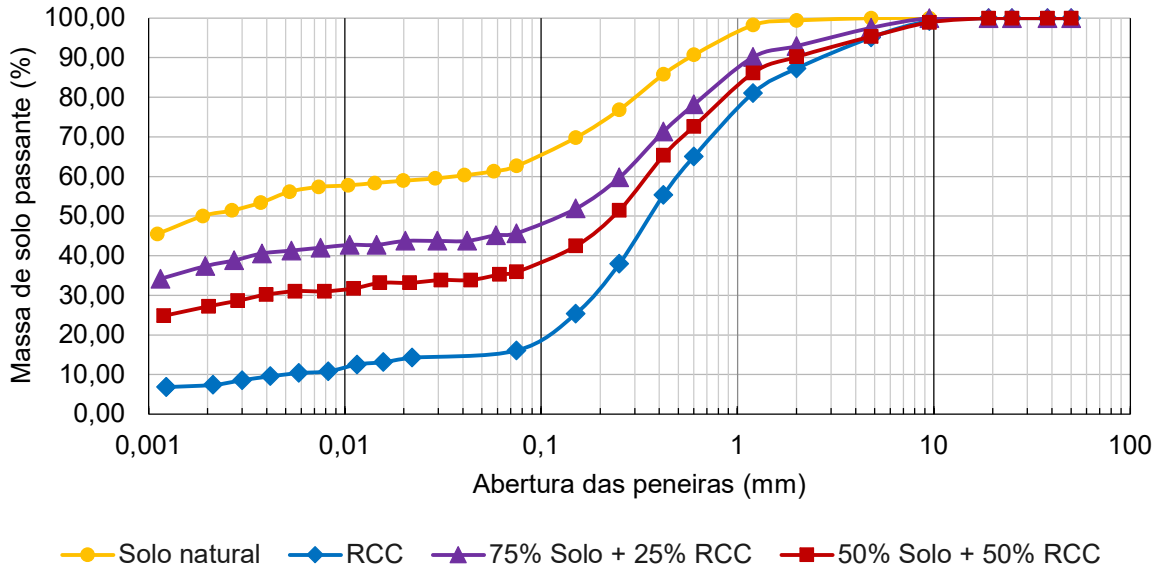
Com a incorporação de 25% do resíduo, verificou-se uma redução no coeficiente c’, indicando menor argilosidade, o que é coerente com a expectativa, uma vez que o material tende a se tornar mais granular. No entanto, ao adicionar 50% do resíduo, o coeficiente c’ aumentou, superando o valor do solo natural. Esse comportamento sugere um aumento da argilosidade, o que contradiz a tendência esperada, pois,

teoricamente, a maior quantidade de resíduo incorporado deveria resultar em um material ainda mais granular, e não o contrário.

5.1.2 Classificação convencional

O Gráfico 16 ilustra as curvas granulométricas obtidas para o solo natural, o RCC e as misturas, fornecendo uma visão comparativa das distribuições de partículas.

Gráfico 16 – Curvas granulométricas das amostras.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Com base nas curvas granulométricas e nos parâmetros físicos analisados (massa específica real dos grãos, limites de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade), as amostras de solo natural, RCC e as misturas foram classificadas de acordo com os sistemas convencionais SUCS e TRB, descritos na Tabela 9. Além disso, os resultados da classificação MCT também estão descritos nessa tabela.

Tabela 9 – Parâmetros físicos das amostras

(continua)

Parâmetro	Solo natural	RCC	75% Solo + 25% RCC	50% Solo + 50% RCC
Massa específica real dos grãos (g/cm³)	2,682	2,734	2,658	2,675

Tabela 9 – Parâmetros físicos das amostras

(conclusão)

Parâmetro		Solo natural	RCC	75% Solo + 25% RCC	50% Solo + 50% RCC
Limite de liquidez (%)		42	NL	33	26
Limite de plasticidade (%)		23	NP	21	16
Índice de plasticidade (%)		19	0	12	10
Classificação do solo	SUCS	CL	SM-SC	SC	SC
	TRB	A-7-5	A-2	A-6	A-4
	MCT	LG’	-	LG’	LG’

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados indicam que a massa específica real dos grãos das misturas foi reduzida em relação ao solo natural, o que é inesperado, pois o RCC possui uma massa específica superior. A expectativa seria que a incorporação do RCC aumentasse a massa específica das misturas, mas essa redução pode estar associada à heterogeneidade e composição química do RCC.

5.1.3 Considerações sobre as classificações

No que se refere às classificações do solo e das misturas, as obtidas pelos sistemas SUCS e TRB, são coerentes, uma vez que esses métodos consideram apenas a granulometria e os limites de consistência. Essa correspondência pode ser confirmada no ANEXO A. Já a classificação MCT revelou algumas discrepâncias. Tanto o solo natural quanto as misturas foram enquadrados como LG’ (laterítico argiloso), o que sugere um comportamento similar entre eles. No entanto, ao comparar com a Tabela 3, que correlaciona as classificações MCT e convencionais, observa-se que, enquanto o solo natural e a mistura 75% Solo + 25% RCC mantêm compatibilidade com a classificação TRB, a mistura 50% Solo + 50% RCC apresenta divergências.

Ao se analisar o solo pela classificação TRB, percebe-se que o solo natural (A-7-5) não é indicado para camada de pavimentação. Ao se adicionar RCC, verifica-se uma melhora gradual do material com o aumento do seu teor, sendo a mistura 75% Solo +

25% RCC classificada como A-6 e, a mistura 50% Solo + 50% RCC, como A-4, isso pode ser confirmado a partir do ANEXO B.

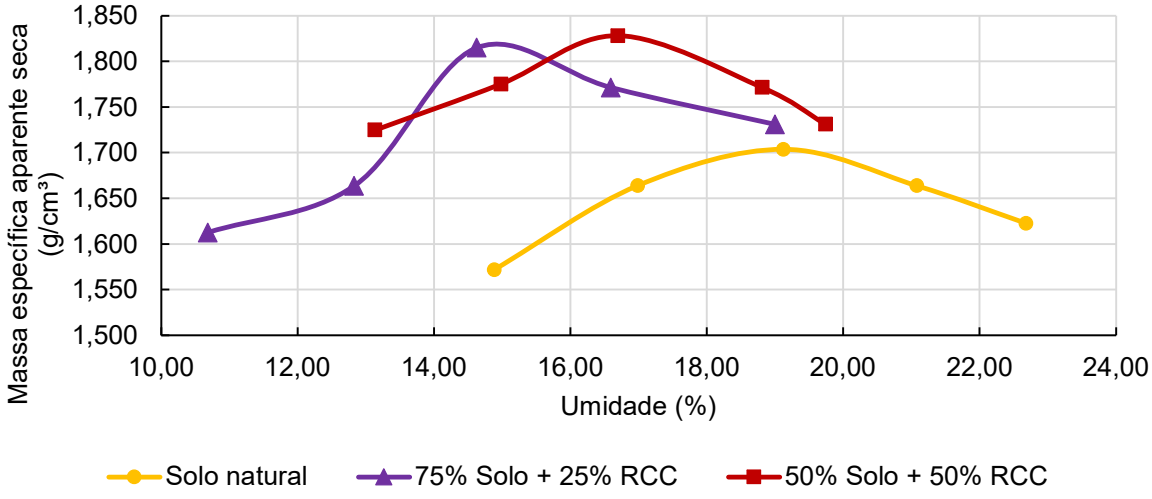
A classificação LG' (laterítico argiloso) atribuída tanto ao solo natural quanto às misturas na metodologia MCT indica um potencial de uso semelhante para esses materiais. De acordo com a Tabela 5, esse tipo de solo pode ser empregado em base de pavimentação, mas com menor preferência, sendo classificado no terceiro nível de indicação. Isso sugere que existem alternativas mais adequadas para essa aplicação. Para uma avalição mais precisa do seu desempenho, serão realizados ensaios de caracterização mecânica, permitindo verificar sua viabilidade técnica para essa finalidade.

5.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

5.2.1 Compactação

O Gráfico 17 apresenta as curvas de compactação das amostras analisadas. As umidades ótimas encontradas para o solo natural, a mistura 75% Solo + 25% RCC e a mistura 50% Solo + 50% RCC foram, respectivamente, 19,12%, 14,62% e 16,70%. Da mesma forma, as massas específicas aparentes secas correspondentes a essas amostras foram 1,704 g/cm^3, 1,815 g/cm^3 e 1,828 g/cm^3.

Gráfico 17 – Curva de compactação das amostras



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Além disso, a Tabela 10 apresenta todos os resultados obtidos para as curvas de compactação de cada amostras, evidenciando os valores de umidade e massa específica aparente seca.

Tabela 10 – Resultados obtidos no ensaio de compactação

Amostra	CPs	Umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm^3)
Solo natural	CP 1	14,88	1,572
	CP 2	16,99	1,664
	CP 3	19,12*	1,704
	CP 4	21,08	1,664
	CP 5	22,68	1,623
75% Solo + 25% RCC	CP 1	10,68	1,612
	CP 2	12,83	1,664
	CP 3	14,62*	1,815
	CP 4	16,59	1,771
	CP 5	19,00	1,731
50% Solo + 50% RCC	CP 1	13,14	1,725
	CP 2	14,98	1,775
	CP 3	16,70*	1,828
	CP 4	18,81	1,771
	CP 5	19,74	1,731

*Umidade ótima

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

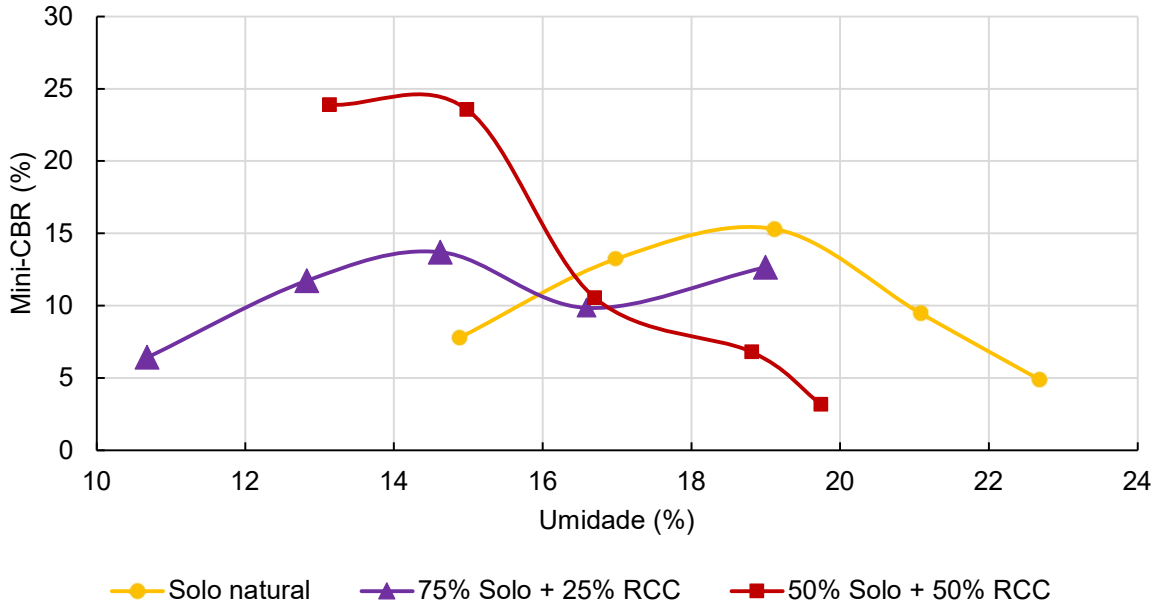
Foi observado que a umidade ótima inicialmente diminui, enquanto a massa específica seca aumenta com a incorporação do RCC no teor de 25%. Esse comportamento era esperado, uma vez que está alinhado com a natureza granulométrica do RCC, classificado como SM-SC, ou seja, composto por materiais mais granulares. No entanto, ao elevar a proporção de RCC para 50%, verificou-se um comportamento distinto, com aumento simultâneo da umidade ótima e da massa específica aparente seca. Para essa mistura, esperava-se um menor valor de umidade ótima.

5.2.2 Mini-CBR

Os ensaios de mini-CBR foram realizados utilizando os mesmos corpos de prova do ensaio de compactação. Da mesma forma, o ensaio de expansão, cujos resultados

serão discutidos no item 5.2.3, também aproveitou essas amostras. Consequentemente, o grau de compactação foi de 100% para todas as amostras. O Gráfico 18 apresenta a relação entre os valores de mini-CBR, obtidos com energia de compactação normal, e as respectivas umidades do solo natural (referência) e das misturas. A Tabela 11 detalha os resultados obtidos para cada amostra, enquanto o Gráfico 19 apresenta a relação entre os valores de mini-CBR obtidos para as misturas comparados ao solo natural, na umidade ótima.

Gráfico 18 – Curvas obtidas pelo ensaio de mini-CBR



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 11 – Resultados obtidos no ensaio de mini-CBR

(continua)

Amostra	CPs	Umidade (%)	Mini-CBR (%)	Grau de compactação (%)
Solo natural	CP 1	14,88	7,80	100,00
	CP 2	16,99	13,25	
	CP 3	19,12*	15,30	
	CP 4	21,08	9,49	
	CP 5	22,68	4,91	
75% Solo + 25% RCC	CP 1	10,68	6,43	100,00
	CP 2	12,83	11,74	
	CP 3	14,62*	13,71	
	CP 4	16,59	9,85	
	CP 5	19,00	12,67	

Tabela 11 – Resultados obtidos no ensaio de mini-CBR

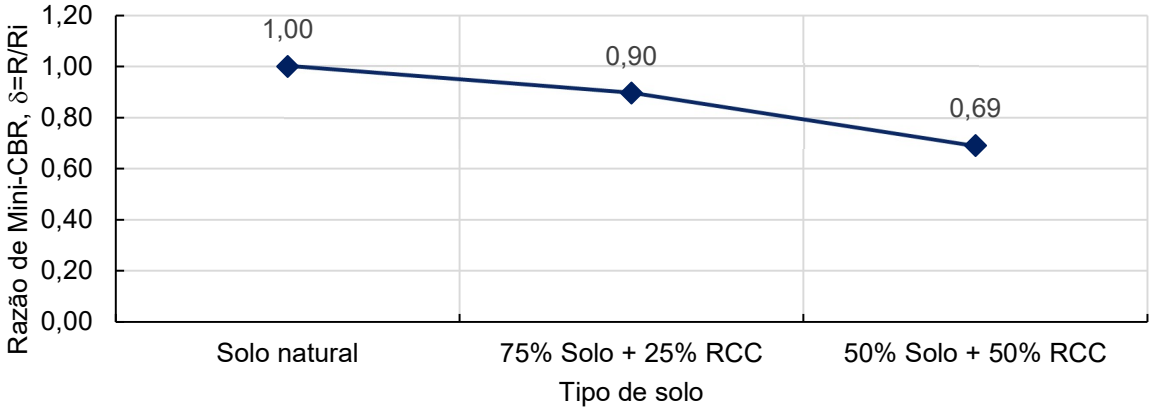
(conclusão)

Amostra	CPs	Umidade (%)	Mini-CBR (%)	Grau de compactação (%)
50% Solo + 50% RCC	CP 1	13,14	23,90	100,00
	CP 2	14,98	23,58	
	CP 3	16,70*	10,56	
	CP 4	18,81	6,81	
	CP 5	19,74	3,19	

*Umidade ótima

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 19 – Relação entre o mini-CBR das misturas e o solo natural na umidade ótima



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A análise dos resultados de mini-CBR para a umidade ótima de cada amostra indica que a incorporação de RCC apresentou redução no índice de suporte em relação ao solo natural, utilizado como referência. Os valores da Tabela 4 correspondem ao mini-CBR sem imersão e com perda por imersão. No entanto, como o ensaio foi realizado com imersão e sobrecarga, representando a condição mais crítica, não há uma referência direta para comparação. Diante disso, foi adotado o limite mais restritivo, para o tipo de solo LG’, de 12% a 30%, para avaliar os resultados.

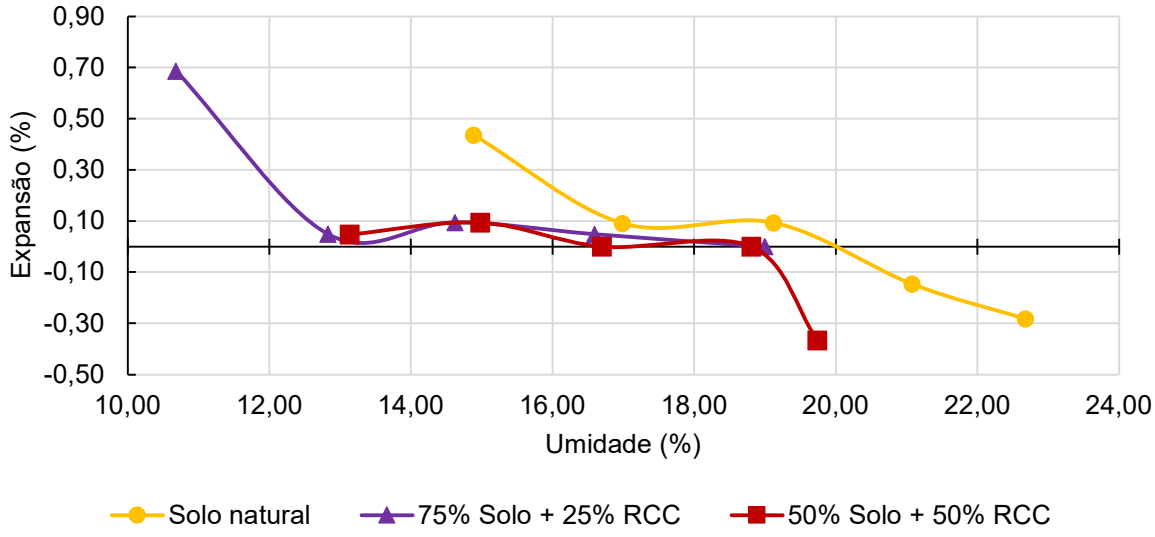
Nesse contexto, tanto o solo natural (15,30%) quanto a mistura 75% Solo + 25% RCC (13,71%) se enquadram nesse intervalo. Por outro lado, a mistura 50% Solo + 50% RCC apresentou um valor inferior (10,56%). No entanto, no ramo seco, essa mesma composição exibiu valores de mini-CBR superiores a 23%, superando o solo natural.

Isso pode indicar que, na condição de mini-CBR sem imersão e na umidade ótima, essa mistura atingiria o valor de referência.

5.2.3 Expansão

O Gráfico 20 apresenta as curvas obtidas no ensaio de expansão, com os resultados detalhados na Tabela 12. Por sua vez, o Gráfico 21 mostra a relação entre os valores de expansão obtidos para as misturas comparados ao solo natural.

Gráfico 20 – Curvas obtidas pelo ensaio de expansão



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 12 – Resultados obtidos no ensaio de expansão

(continua)

Amostra	CPs	Umidade (%)	Expansão (%)	Grau de compactação (%)
Solo natural	CP 1	14,88	0,44	100,00
	CP 2	16,99	0,09	100,00
	CP 3	19,12*	0,09	100,00
	CP 4	21,08	-0,15	100,00
	CP 5	22,68	-0,28	100,00
75% Solo + 25% RCC	CP 1	10,68	0,69	100,00
	CP 2	12,83	0,05	100,00
	CP 3	14,62*	0,09	100,00
	CP 4	16,59	0,05	100,00
	CP 5	19,00	0,00	100,00

Tabela 12 – Resultados obtidos no ensaio de expansão

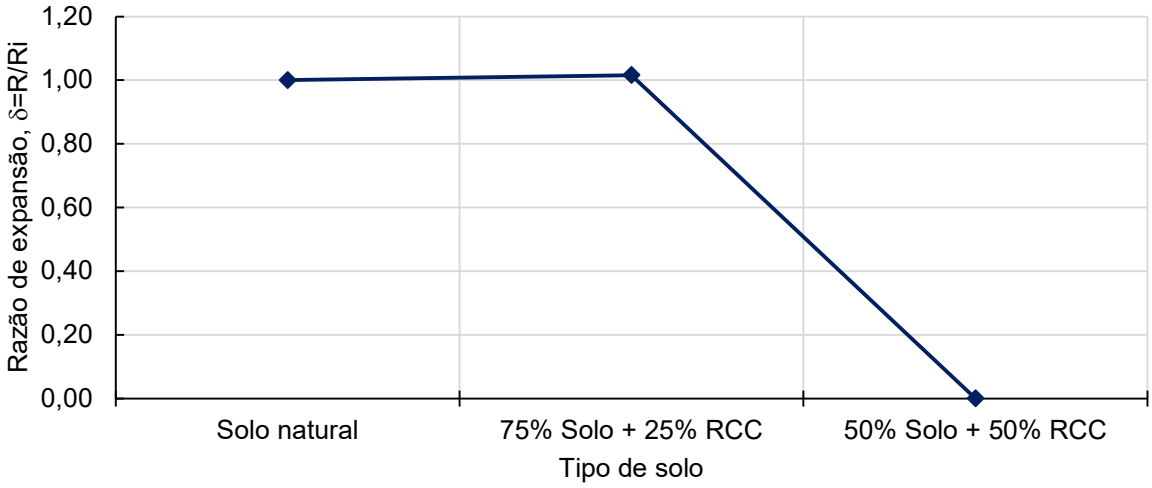
(conclusão)

Amostra	CPs	Umidade (%)	Expansão (%)	Grau de compactação (%)
50% Solo + 50% RCC	CP 1	13,14	0,05	100,00
	CP 2	14,98	0,09	100,00
	CP 3	16,70*	0,00	100,00
	CP 4	18,81	0,00	100,00
	CP 5	19,74	-0,37	100,00

*Umidade ótima

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 21 – Relação entre a expansão das misturas e o natural na umidade ótima



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ao avaliar os resultados na umidade ótima e compará-los com o solo natural, observa-se que a mistura 75% Solo + 25% RCC manteve um valor de expansão de 0,09%, enquanto a mistura 50% Solo + 50% RCC apresentou uma redução para 0,00%.

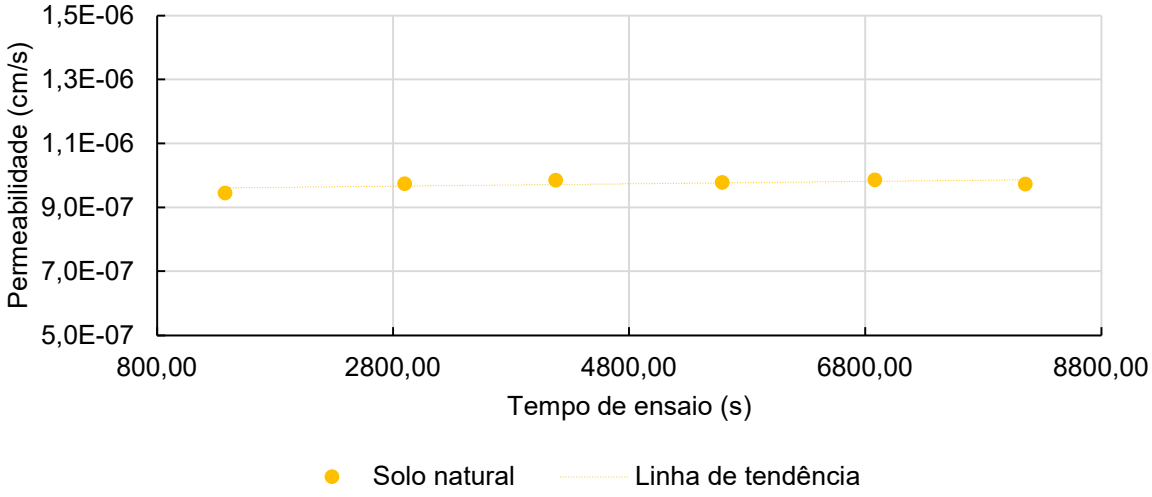
Em todas as composições, os valores de expansão permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela metodologia MCT para solos classificados como LG’, que exigem valores inferiores a 0,5%.

5.2.4 Permeabilidade

Com base nos ensaios realizados, foi possível analisar o comportamento das amostras em relação ao coeficiente de permeabilidade e o grau de compactação. O

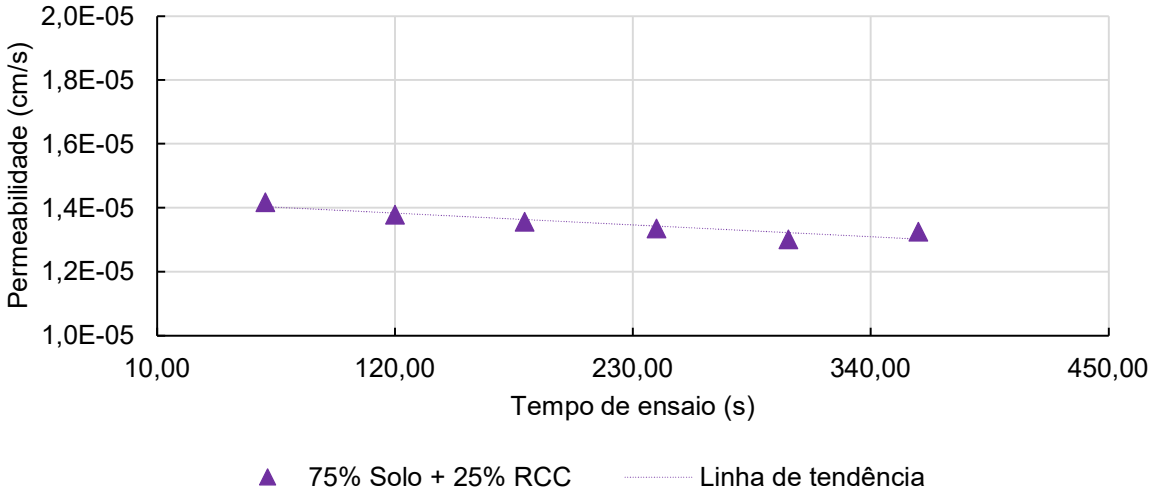
Gráfico 22, o Gráfico 23 e o Gráfico 24, ilustram o comportamento dessa relação para o solo natural, a mistura 75% Solo + 25% RCC e a mistura 50% Solo + 50% RCC, respectivamente.

Gráfico 22 – Coeficientes de permeabilidade obtidos para o solo natural



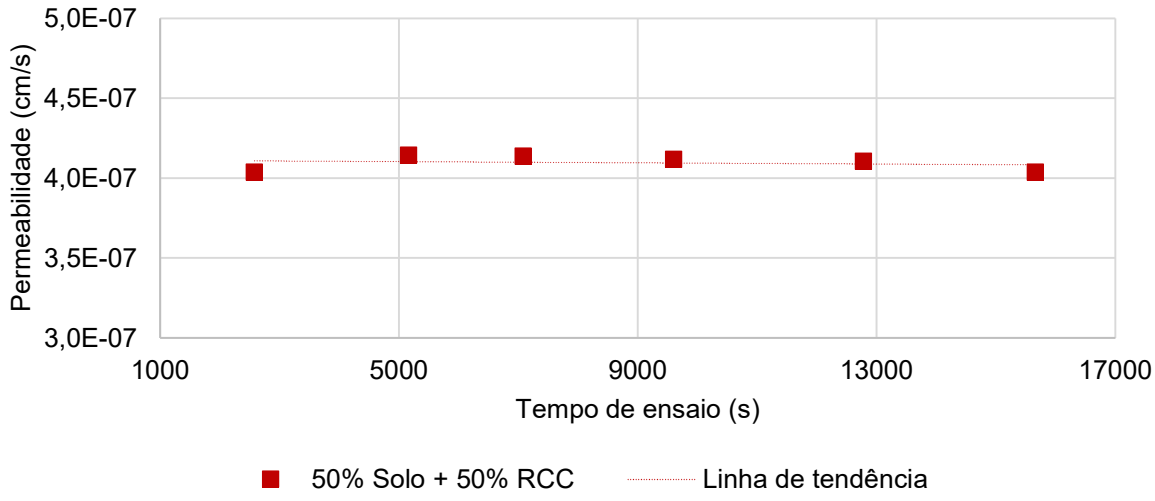
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 23 – Coeficientes de permeabilidade obtidos para a mistura 75% Solo + 25% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 24 – Coeficientes de permeabilidade obtidos para a mistura 50% Solo + 50% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Tabela 13 apresenta um resumo dos valores de coeficiente de permeabilidade para cada amostra testada, apresentando também a relação entre os coeficientes obtidos para as misturas comparados ao solo natural, na umidade ótima

Tabela 13 – Resumo dos valores obtidos do coeficiente de permeabilidade para cada amostra

Amostra	**Umidade (%)**	**Coeficiente de permeabilidade (cm/s)**	**Grau de compactação (%)**	**δ (R/Ri)**
Solo natural	19,13	$9{,}74 \times 10^{-7}$	96,20	1,00
75% Solo + 25% RCC	15,75	$1{,}35 \times 10^{-5}$	93,34	13,89
50% Solo + 50% RCC	17,22	$4{,}10 \times 10^{-7}$	95,45	0,42

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

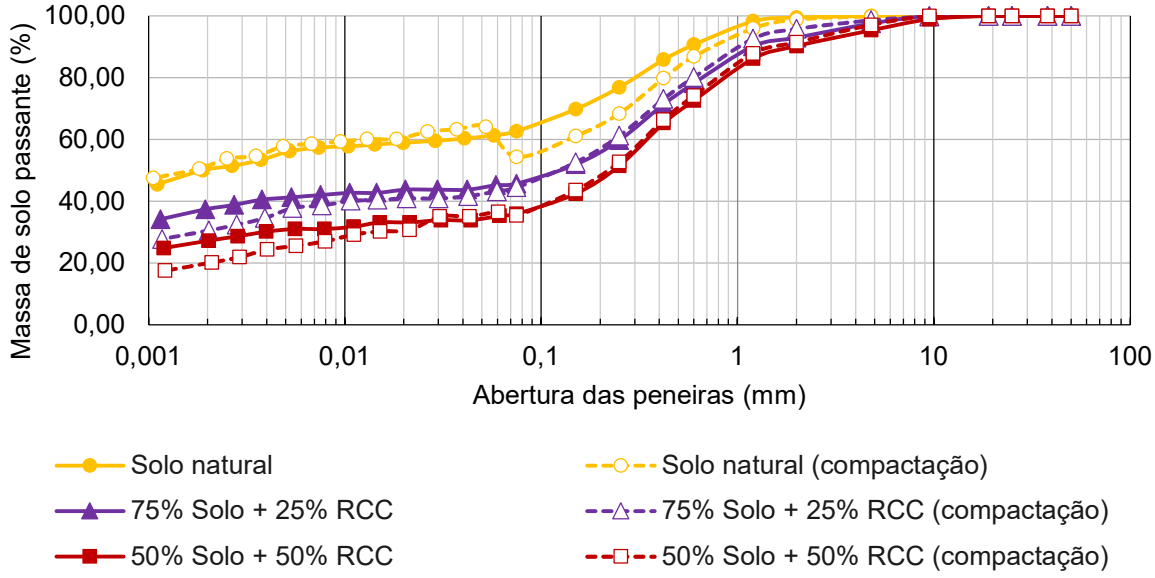
O solo natural apresentou um coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-7} cm/s, dentro do limite estabelecido pela metodologia MCT para solos classificados como LG' (inferior a 10^{-6} cm/s). Em contrapartida, as misturas com RCC apresentaram comportamentos distintos.

A mistura 75% Solo + 25% RCC obteve um coeficiente da ordem de 10^{-5} cm/s, um valor significativamente maior que o solo natural e acima do limite esperado de 10^{-6} cm/s. Já a mistura 50% Solo + 50% RCC apresentou um coeficiente na faixa de 10^{-7} cm/s, dentro do intervalo esperado pela metodologia MCT.

Considerando os requisitos mínimos estabelecidos no item 3.2.2.2, cujo critério é de 10^{-7} cm/s para aplicação em aterro sanitário, observa-se que tanto o solo natural quanto a mistura com 50% de RCC atendem às exigências para esse uso.

No entanto, embora os resultados da mistura 50% Solo + 50% RCC sejam satisfatórios em termos de permeabilidade para aterros sanitários, eles não corresponderam às expectativas iniciais. Esperava-se que a adição de um maior teor de material granular aumentasse a permeabilidade, mas ocorreu o contrário. Para investigar essa discrepância, foi realizada uma análise granulométrica após o ensaio de permeabilidade, a fim de verificar a possível quebra dos grãos. Mas, a partir da distribuição granulométrica mostrada no Gráfico 25 foi possível concluir que as amostras permaneceram com as mesmas classificações convencionais, isto é, CL/A-7-5 para o solo natural, SC/A-6 para a mistura com 25% de RCC e SC/A-4 para a mistura com 50% de RCC.

Gráfico 25 – Curvas granulométricas após ensaio de permeabilidade



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Além disso, foram estabelecidas as aberturas 0,1 mm, 0,01 mm e 0,001 mm para comparar a porcentagem de partículas passantes após a realização do ensaio de permeabilidade em relação as curvas granulométricas iniciais do solo e das misturas, para verificar a possibilidade de quebra dos grãos no processo de compactação. Os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Percentual de passantes nas aberturas distintas

Amostra	0,1 (mm)	0,01 (mm)	0,001 (mm)
Solo natural	86,99	101,63	100,87
75% Solo + 25% RCC	103,05	93,88	92,30
50% Solo + 50% RCC	105,46	81,07	70,07

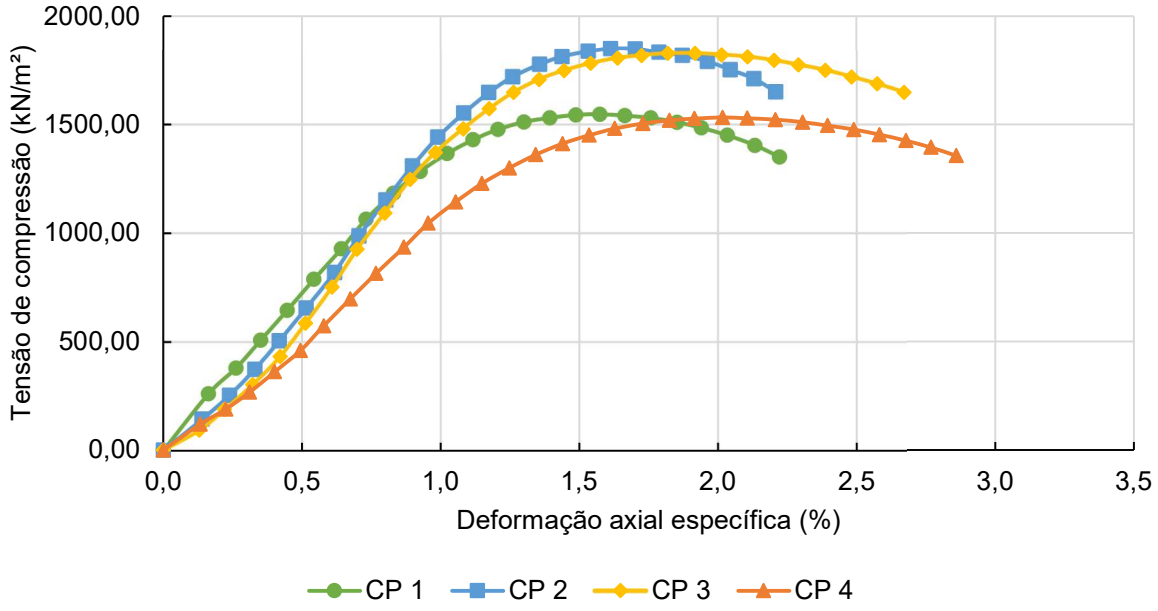
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para o solo natural e para a mistura 75% Solo + 25% RCC as alterações não foram significativas. No entanto, na abertura de 0,1 mm, para o solo natural, houve uma quebra maior e isso pode ser justificado pela forma como o material foi destorroado após o ensaio de permeabilidade. Contudo, para a mistura 50% Solo + 50% RCC nas aberturas de 0,01 mm e 0,001 mm houve uma quebra de 18,93% e 29,33%, respectivamente, o que indica um aumento expressivo nos finos e pode justificar o comportamento dessa mistura nos resultados do ensaio de permeabilidade.

5.2.5 Resistência à compressão simples

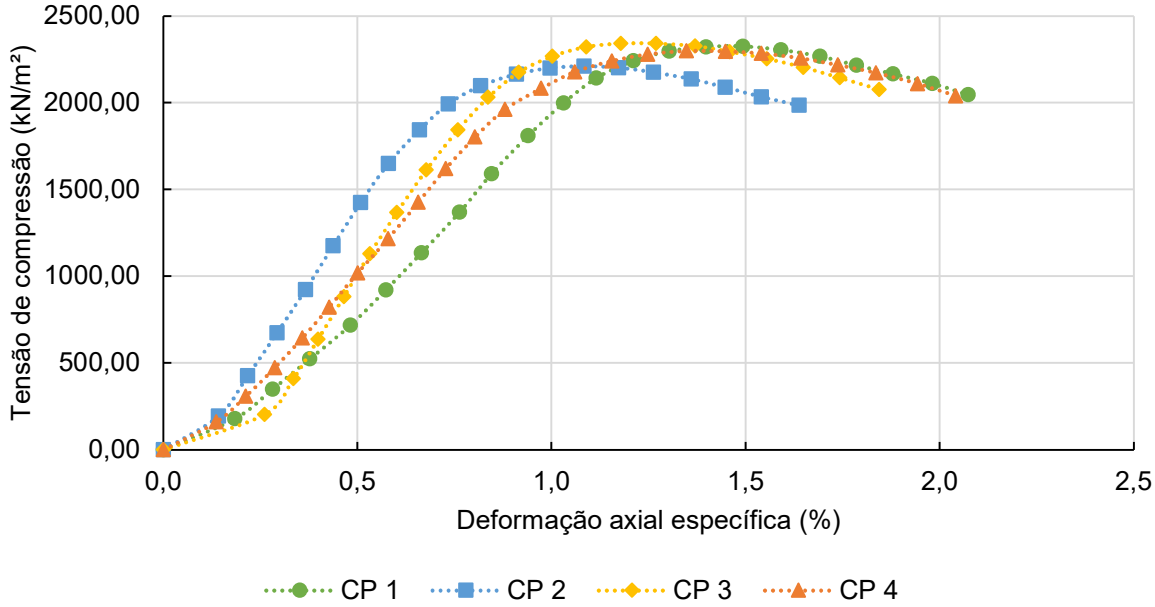
A seguir, estão apresentados os gráficos que ilustram o comportamento da resistência à compressão das amostras compactadas na umidade ótima (Gráfico 26, Gráfico 27 e Gráfico 28).

Gráfico 26 – Curvas de resistência à compressão para os CPs de solo natural



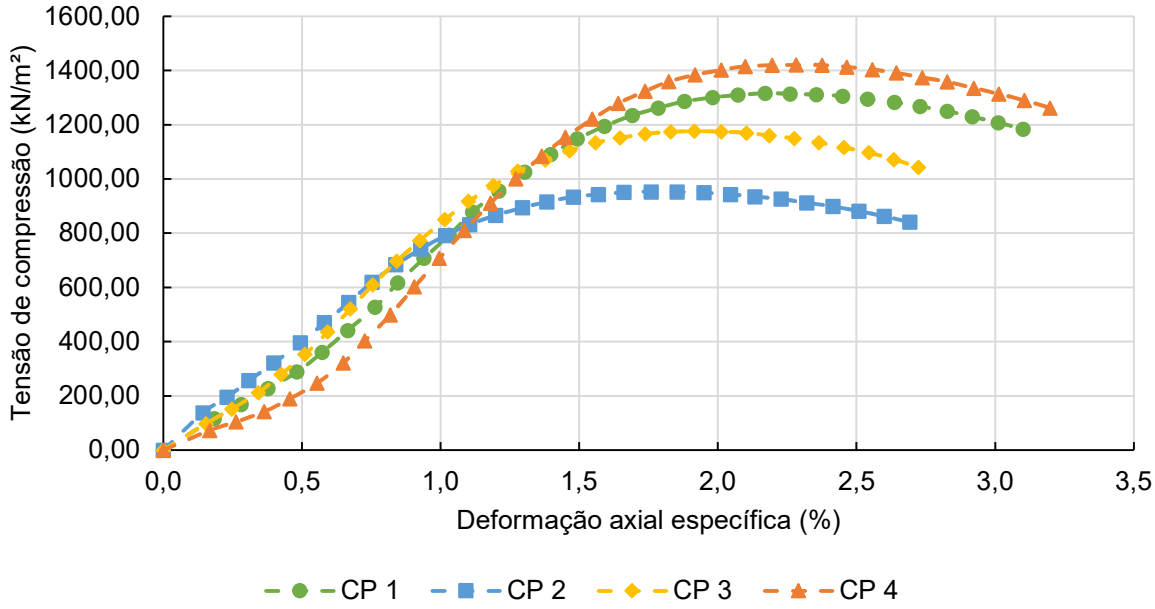
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 27 – Curvas de resistência à compressão para os CPs da mistura 75% Solo + 25% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 28 – Curvas de resistência à compressão para os CPs da mistura 50% Solo + 50% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que a resistência média do solo natural foi de 1690,00 kPa. A mistura com 25% de RCC apresentou um valor superior, atingindo 2294,21 kPa, o que indica um efeito positivo da incorporação do resíduo nessa propriedade. Por outro lado, a mistura composta por 50% de solo e 50% de RCC exibiu um comportamento distinto, com resistência média de 1217,01 kPa,

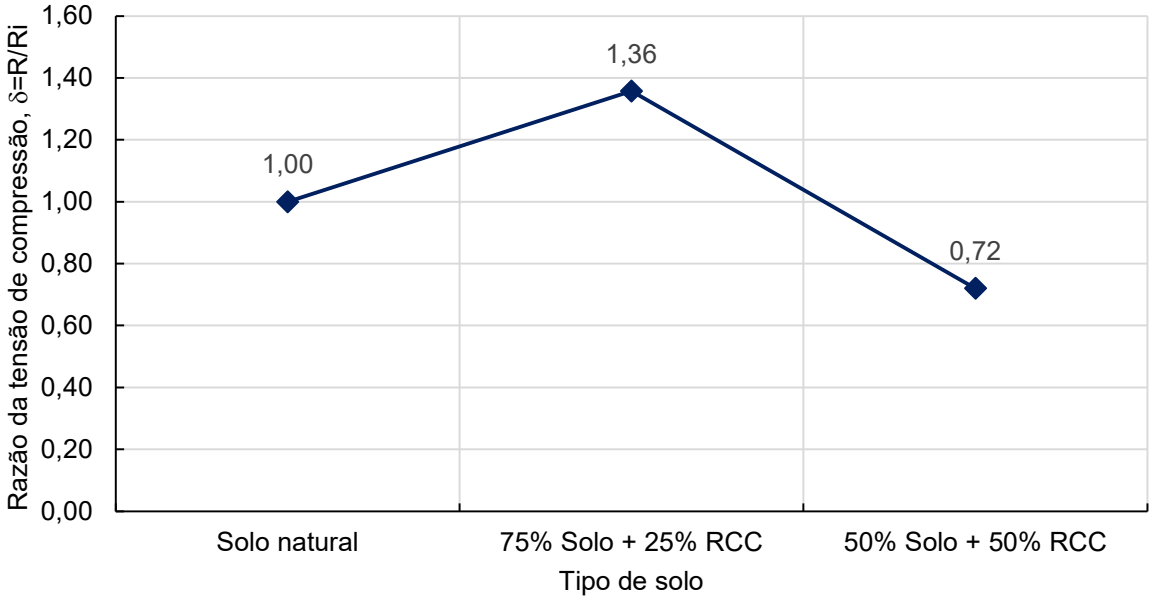
significativamente inferior às demais amostras. Esse comportamento também foi observado nos ensaios de permeabilidade, possivelmente devido à quebra dos grãos. O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 15, enquanto o Gráfico 29 ilustra a relação entre a tensão de compressão das misturas e do solo natural, na umidade ótima.

Tabela 15 – Resumo dos resultados obtidos no ensaio de compressão simples

Amostra	CPs	Umidade (%)	Tensão de compressão (kPa)	Grau de compactação (%)
Solo natural	CP 1	18,75	1548,01	96,55
	CP 2	19,32	1850,59	93,90
	CP 3	19,72	1828,20	95,34
	CP 4	19,44	1533,21	95,64
	Média (kPa)			1690,00
	Desvio padrão (kPa)			149,70
	CV (%)			8,86
75% Solo + 25% RCC	CP 1	16,24	2325,57	92,20
	CP 2	14,74	2210,81	92,05
	CP 3	15,65	2341,95	92,90
	CP 4	15,28	2298,53	93,52
	Média (kPa)			2294,21
	Desvio padrão (kPa)			50,59
	CV (%)			2,21
50% Solo + 50% RCC	CP 1	17,52	1316,80	100,26
	CP 2	17,10	953,35	100,28
	CP 3	16,84	1176,70	100,79
	CP 4	16,74	1421,20	102,60
	Média (kPa)			1217,01
	Desvio padrão (kPa)			175,21
	CV (%)			14,40

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 29 – Relação entre a tensão de compressão das misturas e o natural na umidade ótima



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

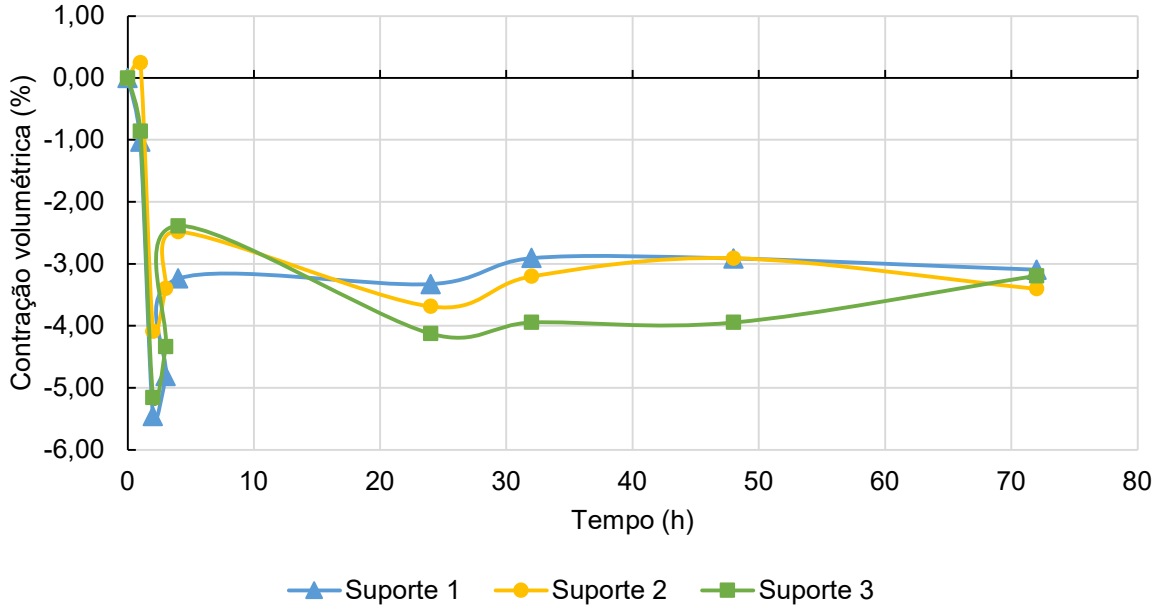
Para avaliar a dispersão dos valores em relação às médias foram analisados o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV). O solo natural apresentou um desvio padrão de 149,70 kPa e um CV de 8,86%, indicando uma variação relativamente baixa entre os valores obtidos. A mistura 75% Solo + 25% RCC, demonstrou a menor dispersão, com desvio padrão de 50,59 kPa e CV de 2,21%, o que evidencia maior homogeneidade nos resultados dessa composição. Por outro lado, a mistura 50% Solo + 50% RCC apresentou maior variabilidade, com desvio padrão de 175,21 kPa e CV de 14,40%, refletindo uma dispersão significativa nos valores obtidos.

Com relação aos requisitos mínimos de resistência à compressão estabelecidos para a utilização de solos em aterros sanitários, a Tabela 2 define um valor mínimo de 200 kPa. Todas as amostras analisadas superaram amplamente esse critério, garantindo que, do ponto de vista da resistência à compressão, qualquer uma das composições avaliadas poderia ser empregada nessa finalidade.

5.2.6 Contração

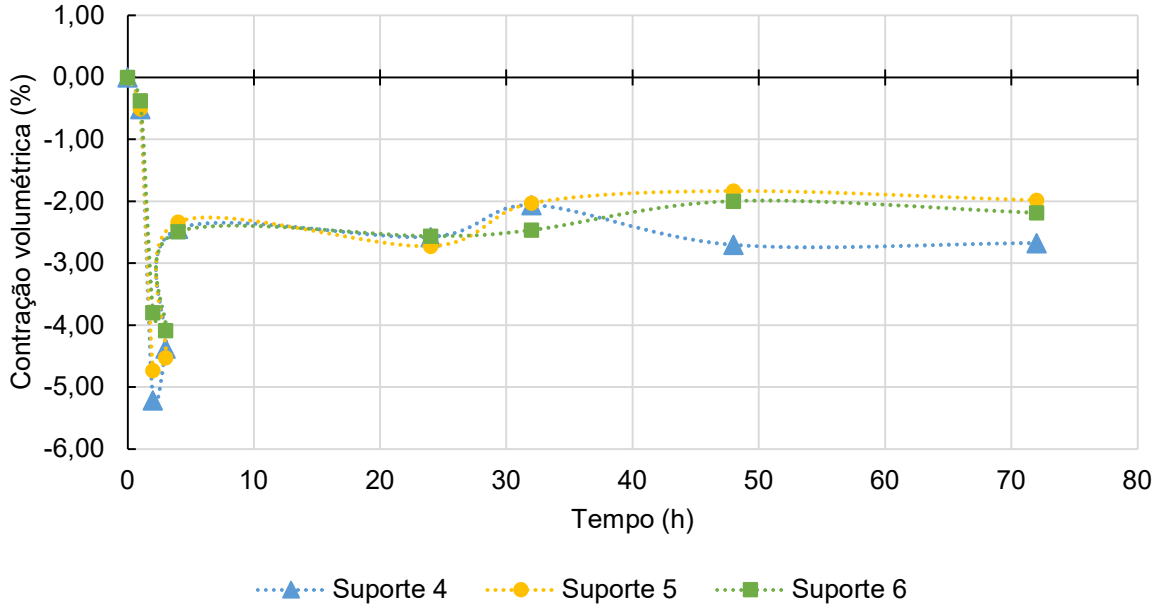
O Gráfico 30, o Gráfico 31 e o Gráfico 32, ilustram o comportamento da contração volumétrica para as diferentes composições analisadas: solo natural, mistura 75% Solo + 25% RCC e mistura 50% Solo + 50% RCC, respectivamente.

Gráfico 30 – Contração volumétrica do solo natural



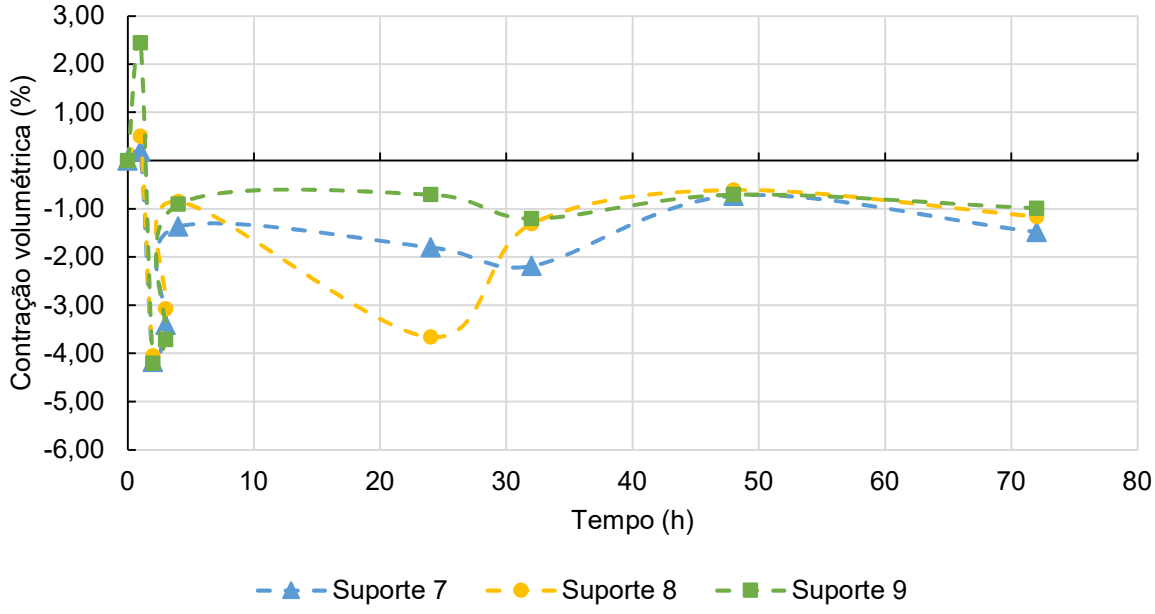
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 31 – Contração volumétrica da mistura 75% Solo + 25% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Gráfico 32 – Contração volumétrica da mistura 50% Solo + 50% RCC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A partir dos resultados obtidos, apresentados na Tabela 16, observa-se que a incorporação de RCC ao solo reduziu progressivamente a contração volumétrica do material. O Gráfico 33 ilustra a relação entre a contração volumétrica da mistura e do solo natural, na umidade ótima.

Tabela 16 – Resultados obtidos no ensaio de contração volumétrica

(continua)

Amostra	Suporte	Umidade (%)	Contração volumétrica (%)	Grau de compactação (%)
Solo natural	Suporte 1	17,49	-3,09	102,94
	Suporte 2	21,32	-3,40	99,60
	Suporte 3	17,42	-3,19	102,58
		Média (%)		-3,23
		Desvio padrão (%)		0,13
		CV (%)		-3,96
75% Solo + 25% RCC	Suporte 4	13,02	-2,67	101,27
	Suporte 5	13,51	-1,98	101,63
	Suporte 6	13,30	-2,18	100,92
		Média (%)		-2,28
		Desvio padrão (%)		0,29
		CV (%)		-12,69

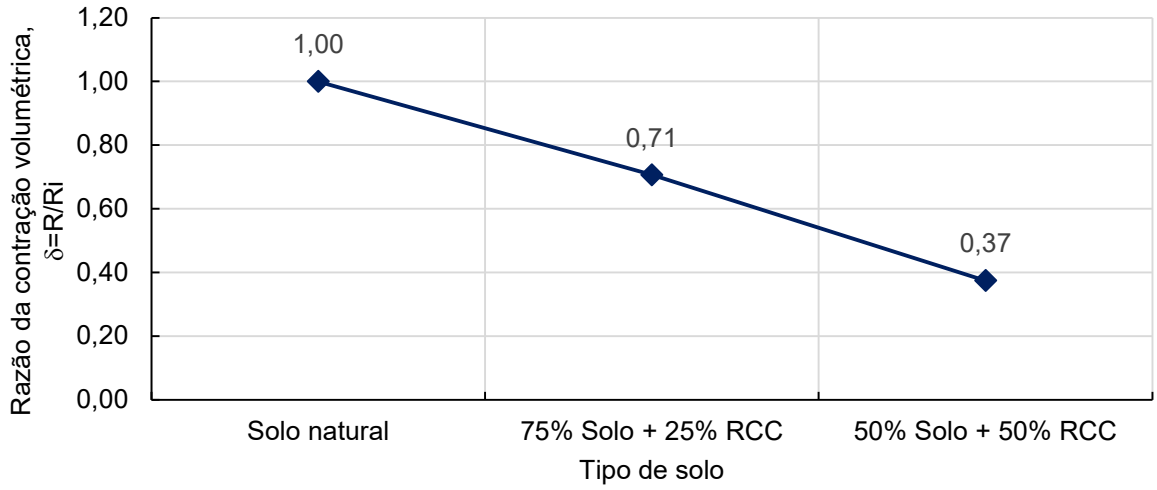
Figura 16 – Resultados obtidos no ensaio de contração volumétrica

(conclusão)

Amostra	Suporte	Umidade (%)	Contração volumétrica (%)	Grau de compactação (%)
50% Solo + 50% RCC	Suporte 7	14,87	-1,48	102,27
	Suporte 8	15,48	-1,16	101,33
	Suporte 9	15,30	-0,99	102,36
	Média (%)			-1,21
	Desvio padrão (%)			0,20
	CV (%)			-16,93

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Gráfico 33 – Relação entre a contração volumétrica das misturas e o natural na umidade ótima



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O solo natural apresentou uma contração volumétrica média de -3,23%, com desvio padrão de 0,13% e CV de -3,96%. A mistura 75% Solo + 25% RCC demonstrou uma redução na contração volumétrica, atingindo -2,28%, com maior dispersão dos dados, evidenciada pelo desvio padrão de 0,29% e CV de -12,69%. Já a mistura 50% Solo + 50% RCC apresentou o menor valor de contração volumétrica, -1,21%, com desvio padrão de 0,20% e CV de -16,93%. Diante disso, os resultados demonstram que todas as amostras atenderam ao critério estabelecido para aterros sanitários, que exige uma contração volumétrica igual ou inferior a 4% (Tabela 2).

5.3 DISCUSSÕES FINAIS

O Quadro 3 sintetiza o potencial de utilização dos materiais analisados, levando em consideração suas propriedades mecânicas e hidráulicas.

Quadro 3 – Resumo do potencial de utilização dos materiais estudados

Aplicação geotécnica e ambiental	**Propriedades**	**Solo natural**	**75% Solo + 25% RCC**	**50% Solo + 50% RCC**
Pavimentação	Mini-CBR	✓	✓	×
	Expansão	✓	✓	✓
Aterro sanitário	Coeficiente de permeabilidade	✓	×	✓
	Resistência à compressão	✓	✓	✓
	Contração	✓	✓	✓

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Com base nesses dados, verifica-se que o solo natural apresenta potencial para aplicação em obras geotécnicas e ambientais, sendo adequado tanto pavimentação quanto para aterros sanitários. A mistura 75% Solo + 25% RCC se mostra viável para pavimentação, indicando uma aplicação eficiente nesse contexto. Por outro lado, a mistura 50% Solo + 50% RCC é indicada para uso em aterros sanitários.

Além disso, apesar dos resultados satisfatórios para aterros sanitários, a mistura 50% Solo + 50% RCC apresentou um comportamento mecânico e hidráulico atípico e divergente do esperado. Como discutido anteriormente, sua classificação MCT indicou um alto valor de c’, o que sugere um comportamento mais argiloso. No entanto, esse resultado é incoerente, uma vez que o resíduo incorporado ao solo é mais granular.

Outro comportamento inesperado foi observado na curva de compactação. Com a adição de um resíduo mais granular, era esperado que houvesse uma redução da umidade ótima, contudo, verificou-se um aumento desse parâmetro em relação à mistura com 25% de RCC. Por outro lado, o aumento da massa específica era uma resposta prevista.

Em termos de desempenho mecânico, a mistura apresentou redução nos valores de mini-CBR e resistência à compressão. Já em relação à permeabilidade, o coeficiente

obtido foi da mesma ordem do solo natural, indicando um comportamento argiloso. Esses resultados também contrariam o esperado da adição do resíduo mais granular.

Diante disso, foi realizada a análise da quebra de grãos e os resultados demonstraram uma quebra significativa nos diâmetros de 0,01 mm e 0,001, aumentando expressivamente o teor de finos na mistura.

Da Silva *et. al.* (2018), também identificaram um comportamento semelhante em seu estudo, no qual avaliaram a quebra de grãos em RCC induzida pelo processo de compactação. Os autores observaram que a fração inferior a 0,42 mm apresentou a maior fragmentação, sendo a de menor tamanho entre as analisadas, e atribuíram essa ocorrência à constituição mineralógica do material.

No presente estudo, a quebra de partículas foi analisada após o ensaio de permeabilidade, ou seja, em uma etapa posterior à compactação. Embora a composição mineralógica dos materiais não tenha sido investigada, os resultados indicam que a fragmentação dos grãos também ocorreu de forma significativa, aumentando o teor de finos da mistura. Esse fenômeno pode estar diretamente relacionado às alterações observadas no comportamento mecânico e hidráulico do material.

6 CONCLUSÃO

A pesquisa realizada sobre a avaliação do potencial de incorporação de resíduos da construção civil em solo revelou importantes conclusões que podem impactar diretamente sua aplicação em obras geotécnicas e ambientais, particularmente em pavimentação e aterros sanitários.

Os resultados dos ensaios de compactação indicaram que a incorporação do RCC alterou a umidade ótima mostrando um comportamento distinto dependendo da proporção de RCC. A mistura 75% Solo + 25% RCC apresentou uma redução na umidade ótima e um aumento na massa específica, enquanto a mistura 50% Solo + 50% RCC exibiu aumento da umidade ótima, o que sugere que a maior proporção de RCC pode modificar significativamente as propriedades do solo.

Nos ensaios de mini-CBR, verificou-se que a incorporação do RCC resultou em uma redução do índice de suporte em comparação ao solo natural. Entretanto, no que se refere à pavimentação, é importante ressaltar que, embora o solo natural e a mistura com 25% de teor de RCC tenham atendido aos parâmetros exigidos para o tipo de solo, eles não são a indicação prioritária.

Em relação ao ensaio de expansão, as misturas apresentaram comportamentos satisfatórios, com a mistura 50% Solo + 50% RCC mostrando uma melhoria significativa na expansão, mantendo-se dentro dos critérios exigidos. A redução da expansão na mistura com maior teor de RCC sugere um comportamento mais estável, especialmente na umidade ótima. Contudo, a elevada variabilidade observada na mistura 50% Solo + 50% RCC destaca a necessidade de uma análise mais aprofundada para avaliar os fatores que influenciam essa característica. Além disso, a classificação MCT pode ser mais adequada para solos naturais, podendo não ser a abordagem mais precisa para misturas de solo com RCC.

O coeficiente de permeabilidade, um fator crucial para a utilização em aterros sanitários, apresentou um comportamento contrastante. A mistura 75% Solo + 25% RCC não atendeu ao critério esperado, com um coeficiente superior a 10^{-6} cm/s, enquanto a mistura 50% Solo + 50% RCC apresentou valores compatíveis com as exigências. Esses resultados indicam que a combinação adequada de solo e RCC

pode ser uma solução viável para impermeabilização de aterros, dependendo da proporção de RCC incorporado.

Nos ensaios de resistência à compressão simples, as amostras contendo RCC apresentaram resistência superior ao solo natural, especialmente a mistura 75% Solo + 25% RCC, que superou o solo natural em resistência. Por outro lado, a mistura 50% Solo + 50% RCC apresentou resistência inferior. O comportamento apresentado para a resistência à compressão e para a permeabilidade nessa mistura, pode ser explicado pela alteração nas propriedades granulométricas associadas à quebra dos grãos.

Por fim, a análise de contração volumétrica mostrou que a incorporação de RCC contribuiu para a redução da contração volumétrica das misturas. Todas as misturas atenderam ao critério estabelecido para aterros sanitários, o que sugere uma maior estabilidade volumétrica.

Com base nesses resultados, conclui-se que o solo natural e as misturas de solo com RCC apresentam características distintas e complementares para diferentes aplicações. O solo natural é adequado para ambas as finalidades (pavimentação e aterros sanitários), enquanto a mistura 75% Solo + 25% RCC se destaca em pavimentação, devido à sua capacidade de suporte, e a mistura 50% Solo + 50% RCC se mostrou mais adequada para aterros sanitários devido ao seu comportamento favorável em termos de permeabilidade e contração volumétrica. Percebe-se que, com o aumento do resíduo, existe um limite na adição de RCC para a melhoria das propriedades mecânicas e hidráulicas. No geral, as misturas com RCC oferecem uma alternativa sustentável e viável para a utilização em diversos projetos de engenharia civil, com potencial de otimização das propriedades geotécnicas dos solos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, algumas direções para pesquisas futuras podem ser sugeridas. Essas investigações podem ampliar o entendimento sobre as misturas e seus comportamentos, além de possibilitar a otimização do uso de resíduos nas obras de engenharia.

- Avaliar mini-CBR sem imersão e sem sobrecarga;
- Analisar diferentes lotes do resíduo de construção civil;
- Realizar a composição química tanto do resíduo quanto das misturas;
- Avaliar a microestrutura de escaneamento por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para as misturas compactadas;
- Investigar a incorporação de um teor intermediário de RCC;
- Estudar a combinação do RCC com outros aditivos, como cimento, cal e bentonita.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5084-03: Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter.** Wst Conshohocken, PA, 2003.

ÂNGULO, S. C.; OLIVEIRA, L. S.; MACHADO, L. C. **Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil.** Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 2022. DOI: https://doi.org/10.11606/9786589190103 Disponível em: < www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/839>. Acesso em: 07 abr. 2024.

ÂNGULO, Sérgio Cirelli. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12770: Solo – Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo.** Rio de Janeiro, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2016.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182: Solos – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, 1992.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiental (ABREMA). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2023.** Disponível em: < https://abrema.org.br/pdf/Panorama_2023_P1.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2024.

BARRETO, A. C.; AMORIM, E. F. Avaliação do desempenho técnico de diferentes misturas de solo com resíduos de construção (rcd) para uso em obras viárias. **HOLOS**, *[S. l.]*, v. 7, p. 1–20, 2020. DOI: 10.15628/holos.2020.9696.

BATISTA, Marcelo Lopes. Gestão de resíduos na construção civil: ênfase no desenvolvimento sustentável. **Brazilian Journal of Development,** *[S. l.],* v.8, n.4, p. 23356-23373, 2022. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-042. Disponível em: < https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/45992>. Acesso em: 08 abr. 2024.

BERNUCCI, L. B.; DA MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros.** 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2022.

BRASIL, Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 307,** 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 17 de julho de 2002.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 228/2023 – ME: Solo – Ensaio de compactação em equipamento miniatura – Método de ensaio.** Brasília, 2023.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 258/2023 – ME: Solos – Compactação em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão – Método de ensaio.** Brasília, 2023.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 254/2023 – ME: Solos – Compactação em equipamento miniatura – Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio.** Brasília, 2023.

BRASILEIRO, L. L.; de MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, p. 178-189, 2015.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. 2008. 337 f. **Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)** – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

Confederação Nacional do Transporte (CNT). **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas.** 2022a. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/Inicial>. Acesso em: 01 mai. 2024.

Confederação Nacional do Transporte (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2022.** Relatório Gerencial. Brasília. CNT: SEST SENAT, 2022b.

DA FONSECA, Janayna de Lourdes Gomes. **Estudo da gestão e principais aplicações dos resíduos da construção civil.** 2020. 48 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

DA SILVA, C. R.; DA SILVA, T. L. C. Estudo do comportamento geotécnico de misturas de solo argiloso e resíduos da construção civil para aplicação como barreira hidráulica em áreas degradadas. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc-CIVILTEC**, v. 3, n. 1, p. 59-75, 2020.

DA SILVA, N. M.; ISHIDA, H. Y.; LUKIANTCHUKI, J. A.; DOS REIS, J. H. C.; DA SILVA, C. F. Quebra do grão em Resíduos de Construção Civil (RCC) induzida pelo processo de compactação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 281-298, jan./mar. 2018.

DA SILVA, T. F. **Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários.** 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2017.

DE ARAUJO, I. B.; PEJON, O. J. **Avaliação da condutividade hidráulica e da capacidade de troca catiônica de misturas de solo arenoso, cimento e argila e seu potencial de uso como barreiras ambientais de fundo em aterros sanitários.** 2018, Anais.. São Paulo, SP: ABGE, 2018.

DE CARVALHO, A. L.; LANZA, V. C. V. Orientações básicas para a operação de aterro sanitário. **Belo Horizonte: FEAM**, 2006.

DE SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V.; DE ANDRADE, A. C. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente construído**, v.4, n. 4, p. 33-46, 2004.

DOS SANTOS, Eder Carlos Guedes. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.** 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FURIERI, Elaine Cristina. **Avaliação em laboratório e em campo por meio de simulador linear de tráfego móvel de solos estabilizados com coproduto KR, cimento Portland e Blindasolo®**. 2019. 231f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2018.

LINTZ, R. C. C. *et al*. Study of the reuse of construction residues in concrete employed by blocks manufacture. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, p. 166-181, 2012.

LOCASTRO, J. K.; DE ANGELIS, B. L. D. Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 200-210, 2016.

MATUELLA, Matheus Ferreira. **Efeitos da composição de resíduos de construção e demolição em seu comportamento mecânico para utilização em pavimentação.** 2017. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MOLLE, I. H. D.; LUKIANTCHUKI, J. A. **Análise da contração em um solo argiloso laterítico estabilizado granulometricamente através da incorporação de resíduos**. In: **XX COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 2022, Campinas. Campinas, 2022.

MOREIRA, E. B. **Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Misturado com Resíduos de Construção e Demolição para utilização em Pavimentação.** 2018. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

NAGALLI, André. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Vilibor, 1995. 240 p.

ODA, S., DE ABREU, V. H. S., FERNANDES, S. D. de S., SÁ, T. S. W. Utilização de rejeitos de mineração na construção de pavimentos rodoviários. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 29, n. 2, p. e20240142, 2024.

PALMA, M. M. (2017). **Estudo de solos tropicais utilizados em camada de cobertura de aterros sanitários utilizando a metodologia de Daniel e Wu.** Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 53 p.

PIEDADE JR., C. R. C. (2003). **Análise da potencialidade de alguns solos não lateríticos para utilização em barreiras impermeáveis.** São Carlos. Dissertação de Mestrado. 123 p. Escola de Engenharia São Carlos. Universidade de São Paulo.

SILVA, L. P.; HUBNER, P. L. **Caracterização de um solo da Grande Vitória pela metodologia MCT para aplicações em obras geotécnicas**. 2023. 62 f. Projeto de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023.

Sistema Nacional de Informação sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR). **Relatório Estadual de Resíduos Sólidos: Espírito Santo.** 2019. Disponível em: < https://sinir.gov.br/relatorios/estadual/>. Acesso em: 07 abr. 2024.

VILA RECICLA. **Unidade de Reciclagem.** 2025. Disponível em: <https://www.vilarecicla.com.br/>. Acesso em: 01 mar. 2025.

VILLIBOR, D. F.; ALVES, D. M. L. **Pavimentação de baixo custo em regiões tropicais: projeto e construção – novas considerações.** Florianópolis: Tribo da Ilha, 2019.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J. R.; SERRA, P. R. M.; ZUPPOLINI NETO, A. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas: bases alternativas com solos lateríticos, gestão de manutenção de vias urbanas.** 2. ed. Arte&Ciência, 2009. 196 p.

ANEXOS

ANEXO A – Interrelações entre a classificação unificada e TRB

SUCS	TRB		
	Mais provável	**Possível**	**Possível, mas improvável**
GW	A-1-a		A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GP	A-1-a	A-1-b	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6	A-4, A-5, A-6, A-7, A-7-6, A-1-a
GC	A-2-6, A-2	A-2-4, A-6	A-4, A-7-6, A-7-5
SW	A-1-b	A-1-a	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SP	A-3, A-1-b	A-1-a	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6, A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
SC	A-2-6, A-2-7	A-2-4, A-6, A-4, A-7-6	A-7-5
ML	A-4, A-5	A-6, A-7-5	—
CL	A-6, A-7-6	A-6, A-7-5, A-4	—
OL	A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6	—
CH	A-7-6	A-7-5	—
OH	A-7-5, A-5	—	A-7-6
PT	—	—	—

Fonte: BRASIL (2006).

ANEXO B – Classificação dos solos conforme classificação TRB

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: BRASIL (2006).