

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

CARLOS EDUARDO MOREIRA UMBUZEIRO

AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE SOLO ESTABILIZADO COM RCC

MANAUS

2026

CARLOS EDUARDO MOREIRA UMBUZEIRO

AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE SOLO ESTABILIZADO COM RCC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof. Dra. Consuelo Alves da Frota

MANAUS

2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

U49a Umbuzeiro, Carlos Eduardo Moreira
 Avaliação Geotécnica de Solo Estabilizado com RCC / Carlos Eduardo
 Moreira Umbuzeiro. - 2026.
 125 f. : il., color. ; 31 cm.

 Orientador(a): Consuelo Alves da Frota.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa
 de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Manaus, 2026.

 1. Resíduo de construção civil. 2. Estabilização de solos. 3. Resistência
 ao cisalhamento. 4. Análise estatística. 5. Sustentabilidade. I. Frota,
 Consuelo Alves da. II. Universidade Federal do Amazonas. Programa de
 Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. III. Título

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

CARLOS EDUARDO MOREIRA UMBUZEIRO

AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE SOLO ESTABILIZADO COM RCC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Linha de pesquisa: Propriedades Físicas, Mecânicas e Modelagem de Materiais.

BANCA EXAMINADORA
APROVADO EM: 17/08/2026

Prof.^a Dr.^a Consuelo Alves da Frota
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (UFAM)
Orientadora e Presidente

Prof.^a Dr.^a Angsula Ghosh
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (UFAM)
Membro Interno

Prof.^a Dr.^a Carla Souza Calheiros
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Membro Externo

Dedico este trabalho ao Pai Celestial. À memória de minha avó, Lídia Aranha, por todo amor, cuidado e ensinamentos que marcaram minha trajetória. À minha esposa, pelo apoio, companheirismo e incentivo em todos os momentos. E aos meus pais, Terezinha Aranha e Paulo Umbuzeiro, pelo amor, exemplo e incentivo permanente à busca pelo conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por Sua infinita bondade, por iluminar meus caminhos, conceder força nos momentos difíceis e permitir a realização de mais esta conquista. Reconheço em Ti a fonte de toda a força e sabedoria que me conduziram até aqui.

À minha avó, Lídia Aranha (in memoriam), que permanece viva em minhas lembranças e em meu coração. Seu amor, seus ensinamentos e sua dedicação foram fundamentais para a pessoa que me tornei. Tenho a certeza de que continua me protegendo, torcendo e vibrando por cada uma de minhas conquistas.

Aos meus pais, Paulo Umbuzeiro e Terezinha Aranha, por todo amor, carinho, cuidado, apoio e ensinamentos ao longo da vida. Obrigado por acreditarem em mim, incentivarem meus sonhos e comemorarem cada vitória como se fosse de vocês.

À minha esposa Madri Bessa, pelo amor, companheirismo, compreensão e apoio incondicional durante toda esta caminhada. Obrigado por estar sempre ao meu lado, pelas conversas de incentivo, por me escutar, especialmente nos momentos mais difíceis, acreditando em mim mesmo quando eu duvidava das minhas próprias capacidades.

À Prof.^a Dr.^a Consuelo Alves da Frota, minha orientadora, pela confiança, paciência, dedicação, ensinamentos e apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa. Sou grato por sua orientação segura, pelos valiosos conhecimentos compartilhados e pela oportunidade de acesso ao Laboratório GEOTEC/UFAM.

Ao Prof. Dr. Hidembergue Ordozgoith da Frota, pelos ensinamentos, orientações e contribuições para minha formação acadêmica e profissional.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), em especial ao Prof. Me. Marcus Raiker Printes Ferreira, pelo apoio, pelo fornecimento do RCC utilizado neste estudo e pela viabilização do acesso ao Laboratório de Mecânica dos Solos do IFAM.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM), em especial ao Prof. Dr. Matheus Pena da Silva e Silva, pelo apoio e pela viabilização do acesso ao Laboratório de Mecânica dos Solos da UFAM.

À Prof.^a Dr.^a Daniela Muniz Guimarães, pela viabilização do acesso ao Laboratório de Pavimentação.

Ao Mestre Carlos Filipe N. Beleza, técnico responsável pelo Laboratório de Pavimentação da UFAM, pela paciência, disponibilidade, dedicação e importante auxílio

na realização dos ensaios experimentais, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu amigo Carlos Magno, pelo fornecimento do solo utilizado neste estudo o que contribuiu diretamente para a realização desta pesquisa, agradeço também à CAPES e à FAPEAM pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista, seja por meio de apoio, incentivo, amizade ou colaboração. A todos, registro meu mais sincero agradecimento.

UMBUZEIRO, Carlos Eduardo Moreira. **Avaliação Geotécnica De Solo Estabilizado Com RCC**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2026.

RESUMO

A crescente demanda por materiais para infraestrutura viária e a necessidade de destinação ambientalmente adequada dos resíduos da construção civil têm impulsionado pesquisas voltadas ao reaproveitamento desses materiais em aplicações geotécnicas. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da incorporação de resíduo de construção civil (RCC) nas propriedades geotécnicas de um solo argiloso da cidade de Manaus-AM, visando analisar seu potencial como material de estabilização física para uso em pavimentação rodoviária. Foram estudados o solo natural e misturas contendo 20% e 35% de RCC, em substituição parcial ao solo, com base na massa seca. Realizaram-se ensaios de caracterização geotécnica, incluindo análise granulométrica, limites de Atterberg, massa específica dos sólidos, classificação geotécnica, compactação, Índice de Suporte Califórnia (CBR) e resistência ao cisalhamento por meio de ensaios de cisalhamento direto. Complementarmente, foram executadas análises estatísticas para interpretação dos resultados obtidos. Os resultados demonstraram que a incorporação do RCC promoveu alterações favoráveis na distribuição granulométrica, redução da plasticidade, aumento da massa específica seca máxima e redução da umidade ótima. Observou-se incremento expressivo da capacidade de suporte, com aumento dos valores de CBR em relação ao solo natural. Nos ensaios de cisalhamento direto em condição não inundada, o solo natural apresentou as maiores resistências médias em todos os níveis de tensão normal avaliados. Entre as misturas investigadas, a composição com 20% de RCC apresentou o comportamento mais favorável em três dos quatro níveis de tensão normal e o maior ângulo de atrito interno, indicando maior participação da componente friccional. As análises inferenciais aplicadas aos resultados da condição não inundada confirmaram diferenças estatisticamente significativas entre os materiais estudados. Os resultados indicam que o RCC apresenta potencial técnico para utilização como material de estabilização física de solos argilosos da região amazônica, contribuindo simultaneamente para a modificação do comportamento geotécnico e para o reaproveitamento sustentável dos resíduos da construção civil.

Palavras-chave: Resíduo de construção civil. Estabilização de solos. Resistência ao cisalhamento. Análise estatística. Sustentabilidade.

UMBUZEIRO, Carlos Eduardo Moreira. **Geotechnical Evaluation of Soil Stabilized with Construction and Demolition Waste**. Master's Dissertation. Graduate Program in Materials Science and Engineering. Federal University of Amazonas. Manaus, 2026.

ABSTRACT

The growing demand for road infrastructure materials and the need for environmentally appropriate disposal of construction and demolition waste have encouraged research into the reuse of these materials in geotechnical applications. In this context, this study aimed to evaluate the influence of construction and demolition waste (CDW) incorporation on the geotechnical properties of a clayey soil collected in Manaus, Amazonas, Brazil, assessing its potential as a physical stabilization material for road pavement applications. Natural soil and mixtures containing 20% and 35% CDW as partial soil replacement, based on dry mass, were investigated. Geotechnical characterization included grain size distribution, Atterberg limits, specific gravity of solids, soil classification, compaction, California Bearing Ratio (CBR), and direct shear tests. Statistical analyses were also performed to support the interpretation of the results. The findings showed that CDW incorporation promoted favorable changes in grain size distribution, reduced plasticity, increased maximum dry density, and decreased optimum moisture content. A substantial increase in bearing capacity was observed, with higher CBR values than those of the natural soil. Under non-flooded direct shear conditions, the natural soil exhibited the highest mean shear strengths at all applied normal stress levels. Among the investigated mixtures, the composition containing 20% CDW showed the most favorable behavior at three of the four normal stress levels and the highest internal friction angle, indicating a greater contribution from the frictional component. Inferential analyses applied to the non-flooded test results confirmed statistically significant differences among the investigated materials. The findings indicate that CDW has technical potential as a physical stabilization material for clayey soils in the Amazon region, contributing both to modifications in geotechnical behavior and to the sustainable reuse of construction and demolition waste.

Keywords: Construction and demolition waste (CDW). Soil stabilization. Shear strength. Statistical analysis. Sustainability.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Relação entre as condições climáticas da Amazônia, os problemas de pavimentação e a estabilização física do solo com RCC	25
Figura 2. Fluxograma do Estudo	37
Figura 3. Mapa de Manaus	38
Figura 4. Preparação das Amostras de Solo para Ensaios Geotécnicos	42
Figura 5. Corpos de Prova Moldados – Cisalhamento Direto	49
Figura 6. Fluxo Metodológico da Análise Estatística	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva granulométrica experimental do solo natural	59
Gráfico 2. Curva granulométrica experimental do RCC	60
Gráfico 3. Curva granulométrica teórica da mistura do solo + 20 % de RCC	61
Gráfico 4. Curva granulométrica teórica da mistura do solo + 35 % de RCC	62
Gráfico 5. Curvas granulométricas experimental do solo natural e do RCC e curvas teóricas estimadas para as misturas solo-RCC	64
Gráfico 6. Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo-RCC.....	70
Gráfico 7. Índice de Suporte Califórnia (CBR) dos materiais estudados.....	73
Gráfico 8. Comparação da tensão cisalhante máxima dos materiais submetidos à tensão normal de 50 kPa	80
Gráfico 9. Comparação da tensão cisalhante máxima, submetidos à tensão normal de 100 kPa	83
Gráfico 10. Comparação da tensão cisalhante máxima, submetidos à tensão normal de 150 kPa	86
Gráfico 11. Comparação da tensão cisalhante máxima, submetidos à tensão normal de 200 kPa	89
Gráfico 12 . Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb, solo natural em condição não inundada.....	91
Gráfico 13 . Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb, mistura solo + 20% de RCC em condição não inundada	92
Gráfico 14. Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb, mistura solo + 35% de RCC em condição não inundada	92
Gráfico 15. Comparação das envoltórias de ruptura para o solo natural e para as misturas contendo RCC na condição não inundada	94
Gráfico 16. Envoltórias de ruptura dos materiais ensaiados em condição inundada	100
Gráfico 17. Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb para o solo natural em condição inundada	101
Gráfico 18. Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb para a mistura solo + 20% de RCC em condição inundada	102

Gráfico 19. Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb para a mistura solo + 35% de RCC em condição inundada	103
Gráfico 20. Comparação das envoltórias de ruptura obtidas nas condições inundada e não inundada para o solo natural e para as misturas contendo RCC	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição do número de corpos de prova - Cisalhamento direto, condição não inundada.....	49
Tabela 2 . Distribuição do número de corpos de prova - Cisalhamento direto, condição inundada.....	50
Tabela 3. Testes estatísticos adotados conforme os pressupostos avaliados	56
Tabela 4. Comparação dos valores de Limite de Liquidez com estudos da literatura ...	65
Tabela 5. Comparação dos valores de Limite de Plasticidade com estudos da literatura	66
Tabela 6. Comparação dos Limites de Atterberg com estudos da literatura	66
Tabela 7. Comparação dos Limites de Atterberg com estudos da literatura com misturas	67
Tabela 8. Valores médios de tensão cisalhante máxima obtidos para cada material em função da tensão normal aplicada.....	76
Tabela 9. Síntese da verificação dos pressupostos estatísticos e definição dos testes inferenciais.....	79
Tabela 10. Comparação dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos na presente pesquisa e em Castro et al. (2019).....	96
Tabela 11. Valores médios de tensão cisalhante máxima obtidos para cada material em função da tensão normal aplicada na condição inundada.....	98
Tabela 12. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos ensaios inundados.....	100
Tabela 13. Comparação entre os resultados experimentais e os requisitos normativos do DNIT.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ANOVA – Analysis of Variance (Análise de Variância)

ASTM – American Society for Testing and Materials

CBR – California Bearing Ratio

CP – Corpo de Prova

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

GC – Grau de Compactação

IG – Índice de Grupo

IFAM – Instituto Federal do Amazonas

IP – Índice de Plasticidade

ISC – Índice de Suporte Califórnia

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

RCC – Resíduo de Construção Civil

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

UFAM – Universidade Federal do Amazonas

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
c	Coesão (kPa)
φ	Ângulo de atrito interno (°)
τ	Tensão cisalhante (kPa)
σ	Tensão normal (kPa)
σ'	Tensão efetiva (kPa)
w	Teor de umidade (%)
w_{ot}	Umidade ótima (%)
ρ_d	Massa específica seca (g/cm ³)
$\rho_{d,máx}$	Massa específica seca máxima (g/cm ³)
G_s	Massa específica dos sólidos
LL	Limite de Liquidez (%)
LP	Limite de Plasticidade (%)
IP	Índice de Plasticidade (%)
CBR	Índice de Suporte Califórnia (%)
R^2	Coeficiente de determinação
CV	Coeficiente de variação (%)
$\tau_{máx}$	Tensão cisalhante máxima (kPa)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo Geral	21
1.2 Objetivos Específicos	21
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Pavimentação Rodoviária	23
2.2 Solos Tropicais da Amazônia e Comportamento Geotécnico	24
2.3 Estabilização de Solos para Pavimentação Rodoviária	26
2.4 Resíduos de Construção Civil (RCC)	27
2.5 Resíduos da Construção Civil na Pavimentação Rodoviária	29
2.6 Caracterização Geotécnica de Solos e Misturas Solo–RCC	31
2.6.1 Caracterização Geotécnica de Solos	31
2.6.2 Misturas Solo–RCC	32
2.7 Resistência ao Cisalhamento dos Solos	34
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Materiais	38
3.1.1 Solo	38
3.1.2 Resíduo de Construção Civil (RCC)	39
3.1.3 Mistura Solo – RCC	40
3.2 Preparação das Amostras de Solo e RCC	41
3.3 Caracterização Geotécnica	43
3.3.1 Análise Granulométrica	44
3.3.2 Limites de Atterberg	45
3.3.3 Massa Específica dos Sólidos	45
3.3.4 Compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR)	46
3.4 Corpos de Prova para os Ensaios Mecânicos	46
3.5 Ensaio de Cisalhamento Direto	47
3.5.1 Ensaios em Condição Não Inundada	48
3.5.2 Ensaios em Condição Inundada	50
3.5.3 Critério de Ruptura e Determinação dos Parâmetros de Resistência	51
3.6 Análise Estatística dos Resultados	52
3.6.1 Estatística Descritiva	53
3.6.2 Verificação da Normalidade dos Dados	54
3.6.3 Homogeneidade das Variâncias	55
3.6.4 Seleção dos Testes Inferenciais	55
3.6.5 Comparações Múltiplas	57
3.6.6 Análise de Regressão Linear e Envoltória de Mohr–Coulomb	57
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 Caracterização Geotécnica dos Materiais	59
4.1.1 Granulometria	59
4.1.2 Limites de Atterberg e Classificação Geotécnica	64

4.1.3 Massa Específica dos Sólidos.....	67
4.2 Caracterização Física do RCC	69
4.3 Compactação	70
4.4 Índice de Suporte Califórnia (CBR)	73
4.5 Resistência ao Cisalhamento Direto: Análise Estatística e Discussão Geotécnica	75
4.5.1 Ensaios de Cisalhamento Direto em Condição Não Inundada.....	75
4.5.1.1 Resultados Experimentais do Ensaio e Estatística Descritiva em Condição Não Inundada	76
4.5.1.2 Verificação dos Pressupostos Estatísticos e Definição dos Testes Inferenciais	78
4.5.1.3 Análise da Resistência ao Cisalhamento sob Tensão Normal de 50 kPa	79
4.5.1.4 Análise da Resistência ao Cisalhamento sob Tensão Normal de 100 kPa	82
4.5.1.5 Análise da Resistência ao Cisalhamento sob Tensão Normal de 150 kPa	85
4.5.1.6 Análise da resistência ao cisalhamento sob tensão normal de 200 kPa..	88
4.5.1.7 Envoltórias de Ruptura de Mohr-Coulomb em Condição Não Inundada	90
4.5.1.8 Discussão Integrada da Condição Não Inundada	94
4.5.2 Ensaios de Cisalhamento Direto na Condição Inundada.....	97
4.5.2.1 Resultados Experimentais do Ensaio e Estatística Descritiva em Condição Inundada.....	98
4.5.2.2 Envoltórias de Ruptura de Mohr-Coulomb em Condição Inundada	99
4.5.2.3 Discussão Integrada da Condição Inundada	103
4.5.3 Comparação entre as Condições Inundada e Não Inundada.....	104
4.6 Discussão Integrada do Comportamento Geotécnico.....	107
4.6.1 Relação entre CBR e Resistência ao Cisalhamento.....	107
4.6.2 Implicações Geotécnicas e Normativas para a Pavimentação.....	108
4.7 Limitações Experimentais da Pesquisa	110
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	113
5.1 Conclusões.....	113
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	115
REFERÊNCIAS	118

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Os pavimentos rodoviários constituem componentes essenciais da infraestrutura de transportes, uma vez que favorecem a mobilidade de pessoas e mercadorias, a integração territorial e o desenvolvimento socioeconômico. O adequado desempenho dessas estruturas está diretamente relacionado às características dos materiais empregados em suas diferentes camadas e às condições ambientais às quais são submetidos durante sua vida útil. Nesse contexto, o subleito exerce função fundamental por constituir a fundação do pavimento e receber as solicitações transmitidas pelas camadas superiores. Quando formado por materiais de baixa capacidade de suporte, elevada deformabilidade ou acentuada sensibilidade à umidade, seu comportamento pode contribuir para o desenvolvimento de deformações excessivas e para a deterioração prematura da estrutura, aumentando as necessidades de manutenção e os custos associados à conservação das vias (Mallick; El-Korchi, 2018).

A utilização adequada dos solos disponíveis in loco representa, portanto, aspecto importante no planejamento e na execução de obras rodoviárias. Entretanto, nem sempre os materiais encontrados nas proximidades das obras apresentam, em seu estado natural, propriedades compatíveis com as exigências estabelecidas para sua utilização em pavimentação. Nessas situações, podem ser necessárias medidas como substituição do material, transporte de solos provenientes de jazidas mais distantes ou adoção de técnicas de estabilização capazes de modificar suas propriedades. A escolha entre essas alternativas deve considerar não apenas o desempenho geotécnico requerido, mas também aspectos relacionados à disponibilidade dos materiais, às condições locais de execução e ao aproveitamento racional dos recursos naturais.

Essa questão assume particular relevância na região amazônica, onde as condições climáticas e os processos pedogenéticos exercem influência significativa sobre a formação e o comportamento dos solos. O clima quente e úmido favorece processos intensos de intemperismo químico, lixiviação e transformação mineralógica, resultando na ocorrência de solos tropicais com características particulares. Esses materiais podem apresentar predominância de partículas finas e composição mineralógica associada à presença de caulinita, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, características relacionadas ao elevado grau de intemperismo observado em diferentes áreas da região (Schaefer, 2023; Pereira *et al.*, 2020; Farias, 2023).

Do ponto de vista geotécnico, a alta concentração de partículas finas e as características mineralógicas e estruturais desses solos podem resultar em elevada plasticidade e comportamento influenciado pelas condições de umidade. Essas propriedades tornam-se importantes quando o solo é empregado como material integrante de estruturas de pavimentos, uma vez que variações no teor de água podem modificar sua consistência, deformabilidade e resistência. Assim, determinados solos disponíveis na região podem apresentar limitações para utilização direta em camadas de pavimentação, tornando necessária a avaliação de alternativas capazes de melhorar ou adequar seu comportamento às condições de serviço.

Entre as técnicas empregadas para essa finalidade encontra-se a estabilização de solos, que pode envolver processos físicos, mecânicos, químicos ou a combinação desses mecanismos. A estabilização física mediante incorporação de materiais granulares busca, principalmente, modificar a distribuição granulométrica e o arranjo entre as partículas do solo, produzindo alterações em propriedades como plasticidade, compactação e resistência. Essa alternativa apresenta interesse particular quando materiais de granulometria podem ser obtidos a partir de resíduos ou subprodutos disponíveis na região, permitindo associar o melhoramento geotécnico ao aproveitamento de materiais que, de outra forma, necessitariam de destinação adequada.

Nesse contexto, os resíduos de construção civil (RCC) constituem uma possibilidade de material alternativo para aplicações geotécnicas. A construção civil consome grandes quantidades de matérias-primas e, com isso, gera grandes volumes de resíduos provenientes de atividades de construção, reforma e demolição. Quando destinados de forma inadequada, esses materiais podem contribuir para ocupação irregular de áreas, sobrecarga dos sistemas de gerenciamento de resíduos e outros impactos ambientais. Por outro lado, quando devidamente selecionados, beneficiados e caracterizados, parte desses resíduos podem apresentar características físicas que possibilitam seu reaproveitamento em obras de infraestrutura.

A utilização do RCC em aplicações geotécnicas também pode contribuir para reduzir a necessidade de utilização exclusiva de agregados naturais, favorecendo estratégias de reaproveitamento de materiais no setor da construção. Khan *et al.* (2024) destacam o potencial de materiais reciclados em aplicações de engenharia, embora seu desempenho dependa de fatores relacionados à origem, composição, processamento e características físicas do resíduo. Dessa maneira, a utilização do RCC não deve ser

considerada de forma generalizada, sendo necessária sua caracterização e a avaliação experimental de seu comportamento quando incorporado aos solos.

Quando utilizado como material granular em misturas com solos de elevada fração fina, o RCC pode alterar a proporção entre as diferentes frações granulométricas e modificar o arranjo das partículas. Estudos relatam que a incorporação de materiais reciclados pode promover redução da influência relativa da fração argilosa e produzir alterações na plasticidade, nos parâmetros de compactação, na capacidade de suporte e na resistência mecânica das misturas. Entretanto, a intensidade e até mesmo a natureza dessas alterações dependem das características do solo, da composição e granulometria do resíduo, da energia de compactação, das condições de umidade e do teor incorporado (Ma *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2019).

A definição do teor de resíduo constitui, portanto, um aspecto relevante na avaliação das misturas solo–RCC. A incorporação progressiva de uma fração predominantemente granular pode reduzir a participação relativa das partículas finas e alterar as relações entre água, sólidos e vazios durante a compactação. Assim, diferentes proporções de RCC podem produzir respostas distintas quanto à umidade ótima, massa específica seca máxima, plasticidade e capacidade de suporte. Dessa forma, não se pressupõe que o aumento do teor de RCC resulte necessariamente em melhoria proporcional de todas as propriedades geotécnicas, uma vez que cada parâmetro pode responder de maneira distinta às modificações promovidas na estrutura da mistura.

Essa consideração também se aplica à resistência ao cisalhamento. A incorporação de partículas provenientes do RCC pode modificar os mecanismos responsáveis pela resistência do material, incluindo o contato e o atrito entre partículas e a contribuição associada à parcela coesiva do solo. Assim, alterações na composição granulométrica podem resultar em mudanças nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, sem que haja comportamento monotônico com o aumento do teor de resíduo. A avaliação desses parâmetros torna-se relevante para compreender o efeito da estabilização física, especialmente quando se pretende analisar o potencial de aplicação das misturas em estruturas submetidas a solicitações mecânicas.

Outro aspecto importante corresponde à ação da água, pois o desempenho de materiais geotécnicos não depende apenas de sua resistência em condições de umidade próximas às empregadas durante a compactação. A exposição à água pode modificar significativamente o comportamento de solos compactados, especialmente em materiais cuja resistência apresenta contribuição relacionada à sucção e às interações entre

partículas. Das e Sobhan (2019) destacam a importância das condições de umidade sobre o comportamento dos solos, enquanto estudos experimentais demonstram que materiais estabilizados podem apresentar respostas diferentes quando submetidos a condições de maior disponibilidade de água.

Essa questão adquire importância adicional em regiões submetidas a condições climáticas caracterizadas por elevada precipitação e umidade. Dessa forma, a avaliação de misturas solo-RCC exclusivamente em condição não inundada pode não representar integralmente seu comportamento diante de situações mais desfavoráveis de umidade. A comparação entre resultados obtidos em condições não inundadas e inundadas permite observar a sensibilidade dos materiais à presença de água e identificar possíveis alterações nos parâmetros de resistência, fornecendo informações complementares para a análise de seu desempenho geotécnico.

A literatura apresenta resultados favoráveis relacionados à incorporação de resíduos de construção civil e outros materiais reciclados aos solos. Ma *et al.* (2022b), Lima (2023) e Vieira (2025), entre outros autores, demonstram que a introdução de materiais granulares reciclados pode produzir modificações relevantes nas propriedades físicas e mecânicas de solos utilizados em aplicações geotécnicas. Trabalhos como os de Galindo (2022), Hidalgo *et al.* (2023) e Barreto (2020) também evidenciam que a resposta das misturas depende das proporções empregadas e das características particulares dos materiais estudados.

Entretanto, os resultados disponíveis não permitem estabelecer um comportamento único para todas as combinações entre solos e RCC. A heterogeneidade do resíduo, sua composição, porosidade, capacidade de absorção e granulometria, juntamente com as propriedades do solo utilizado, influenciam diretamente o comportamento das misturas (Bordoloi *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2019c). Por essa razão, resultados obtidos para determinado solo ou resíduo não devem ser automaticamente extrapolados para materiais de outras origens, reforçando a importância da realização de estudos experimentais considerando as condições locais.

Apesar dos avanços apresentados na literatura, ainda são limitadas as investigações que analisam de maneira integrada a influência da incorporação de RCC sobre diferentes propriedades de solos argilosos representativos da região amazônica. Com isso, torna-se relevante avaliar em conjunto parâmetros relacionados à granulometria, plasticidade, compactação, capacidade de suporte e resistência ao cisalhamento, permitindo compreender não apenas alterações isoladas, mas o

comportamento geotécnico resultante das diferentes proporções entre solo e resíduo. A consideração das condições de umidade nos ensaios de resistência também contribui para ampliar essa análise, tendo em vista a influência da água sobre o comportamento dos materiais.

Diante dessa lacuna, esta pesquisa avalia um solo argiloso coletado na cidade de Manaus-AM e misturas produzidas mediante incorporação de 20% e 35% de RCC. A adoção de dois teores permite analisar diferentes níveis de substituição do solo por uma fração granular proveniente do resíduo e verificar como essa modificação se reflete nas propriedades geotécnicas estudadas. Mais do que buscar um teor universalmente ótimo, pretende-se compreender as respostas apresentadas pelos materiais avaliados e identificar as vantagens e limitações associadas às proporções selecionadas.

A investigação compreende a caracterização geotécnica dos materiais, a avaliação dos parâmetros de compactação e da capacidade de suporte e a determinação da resistência ao cisalhamento. Nos ensaios de cisalhamento direto, também são consideradas condições distintas de umidade, possibilitando comparar o comportamento dos materiais e verificar a influência da presença de água sobre os parâmetros de resistência. Essa abordagem permite relacionar diferentes propriedades e estabelecer uma avaliação mais abrangente do efeito provocado pela incorporação do RCC.

A hipótese científica adotada neste trabalho é que a incorporação de RCC modifica o comportamento geotécnico do solo argiloso em função das alterações produzidas em sua composição granulométrica, com efeitos sobre a plasticidade, a compactação, a capacidade de suporte e a resistência ao cisalhamento, cuja magnitude depende do teor de resíduo e da condição de umidade. Essa formulação não pressupõe que todas as propriedades apresentem melhoria proporcional ao aumento do teor de RCC, mas estabelece como hipótese central a existência de alterações mensuráveis decorrentes da estabilização física.

Além da contribuição técnica, o estudo apresenta relevância ambiental ao investigar uma possibilidade de aproveitamento do RCC em aplicações de engenharia. O emprego de resíduos previamente beneficiados como material complementar aos solos pode contribuir para estratégias de valorização desses materiais e para a redução da necessidade de utilização exclusiva de recursos naturais. Contudo, a possibilidade de utilização deve estar condicionada ao atendimento dos requisitos técnicos correspondentes à aplicação pretendida, razão pela qual a caracterização experimental constitui etapa indispensável antes de qualquer indicação de emprego.

Sob a perspectiva regional, a investigação também contribui para ampliar o conhecimento acerca do comportamento de misturas produzidas com solo de Manaus e RCC, considerando características próprias dos materiais utilizados. A geração de dados experimentais locais pode fornecer subsídios para pesquisas posteriores e para a avaliação de alternativas de estabilização aplicáveis a solos com características semelhantes, respeitando-se as limitações inerentes à origem dos materiais, às condições experimentais adotadas e ao programa de ensaios realizado.

Dessa forma, o estudo busca integrar duas questões relevantes para a engenharia geotécnica e de pavimentos: a necessidade de adequação de solos que apresentam limitações para determinadas aplicações e a possibilidade de aproveitamento de resíduos da construção civil como materiais alternativos. A análise conjunta das propriedades físicas e mecânicas permite avaliar em que medida a incorporação do RCC modifica o comportamento do solo estudado e quais proporções apresentam respostas mais compatíveis com aplicações em pavimentação, sem desconsiderar as limitações técnicas identificadas experimentalmente.

Diante do contexto apresentado e da lacuna identificada na literatura acerca do comportamento de solos argilosos amazônicos estabilizados com resíduos de construção civil, são estabelecidos a seguir o objetivo geral e os objetivos específicos que orientam esta pesquisa.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da incorporação de resíduos de construção civil (RCC) nas propriedades geotécnicas de um solo argiloso da cidade de Manaus–AM, visando analisar seu potencial de utilização como material de estabilização física para aplicações em camadas de pavimentação rodoviária.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar geotecnicamente o solo natural e o resíduo da construção civil (RCC), bem como as misturas produzidas, por meio de ensaios de granulometria, limites de Atterberg e massa específica dos sólidos;

- Avaliar o comportamento mecânico do solo natural e das misturas solo–RCC por meio dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e de cisalhamento direto, determinando sua capacidade de suporte e resistência ao cisalhamento;
- Comparar o comportamento geotécnico do solo natural e das misturas contendo RCC, identificando os efeitos da estabilização física promovida pela incorporação do resíduo;
- Verificar a viabilidade técnica da utilização do RCC como material alternativo para estabilização física de solos destinados à pavimentação rodoviária, contribuindo para o aproveitamento sustentável dos resíduos da construção civil.

Por fim, este trabalho está estruturado em cinco capítulos. Além deste primeiro capítulo, de caráter introdutório, o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, contemplando aspectos relacionados aos solos tropicais, à estabilização de solos, à utilização de resíduos de construção civil em aplicações geotécnicas e aos principais parâmetros empregados na avaliação das misturas solo–RCC. O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados na pesquisa, incluindo a obtenção e preparação dos materiais, a composição das misturas, os procedimentos experimentais e as normas técnicas adotadas. No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados referentes à caracterização geotécnica, compactação, Índice de Suporte Califórnia (CBR) e resistência ao cisalhamento, incluindo a análise das condições não inundada e inundada. Finalmente, o Capítulo 5 reúne as principais conclusões da pesquisa, suas limitações e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimentação Rodoviária

A pavimentação rodoviária constitui um sistema da engenharia essencial para a infraestrutura de transportes. Desempenha papel estratégico no desenvolvimento econômico, na integração territorial e na mobilidade de bens e pessoas. Sua função fundamental consiste em proporcionar uma superfície de rolamento com desempenho adequado ao longo do tempo, garantindo conforto, segurança operacional e eficiência no deslocamento, além de promover a adequada distribuição dos esforços induzidos pelo tráfego às camadas subjacentes (Mallick; El-Korchi, 2018).

Em regra, os materiais constituintes dos pavimentos são influenciados pela umidade e temperatura, podendo afetar significativamente o comportamento mecânico, sobretudo aqueles constituídos por solos finos. Particularmente em regiões tropicais, a presença de água exerce papel determinante no desempenho dessas estruturas, uma vez que pode alterar as propriedades físicas e mecânicas dos seus componentes e comprometer sua capacidade de suporte (Mallick; El-Korchi, 2018). Além disso, variáveis como teor de umidade, condições de compactação e processo de cura exercem influência direta nas propriedades mecânicas de solos estabilizados, impactando seu desempenho estrutural em aplicações geotécnicas (Das; Sobhan, 2019; Caputo *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a sempre crescente demanda por adequadas infraestruturas tem intensificado o consumo de agregados naturais, motivando a busca por materiais alternativos. Estudos indicam que os agregados reciclados, provenientes de resíduos de construção e demolição (RCC), apresentam propriedades compatíveis com os requisitos técnicos para uso em pavimentação, especialmente em camadas de base e sub-base (Ahmadpour *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2021). Esses materiais podem contribuir para a redução da exploração de jazidas naturais, para o reaproveitamento de resíduos e para a sustentabilidade das obras.

Sob a ótica do comportamento mecânico, Delongui (2016) demonstrou que agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCC) apresentam desempenho satisfatório em aplicações rodoviárias, com módulos resilientes compatíveis com materiais granulares tradicionalmente empregados em pavimentação, além de resposta adequada quanto à resistência ao cisalhamento e à deformação permanente em

pavimentos de baixo volume de tráfego. Esses resultados reforçam a possibilidade de utilização do RCC em camadas de suporte, especialmente quando o material é adequadamente beneficiado e compactado.

Além disso, Barreto (2020) e Vieira (2025) destacam que a utilização de misturas solo-RCC permite o aproveitamento de materiais locais, promovendo ganhos técnicos e econômicos, especialmente em contextos em que o solo natural apresenta limitações geotécnicas. Nesse sentido, a pavimentação rodoviária contemporânea incorpora não apenas critérios estruturais e funcionais, mas também diretrizes de sustentabilidade, racionalização do uso de recursos naturais e reaproveitamento de resíduos.

2.2 Solos Tropicais da Amazônia e Comportamento Geotécnico

Os solos tropicais resultam de processos intensos de intemperismo químico, característicos de regiões de clima quente e úmido, que promovem a decomposição dos minerais primários e a formação de materiais ricos em óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Na região amazônica, essas condições favorecem o desenvolvimento de solos fortemente intemperizados, com características mineralógicas e estruturais típicas dos ambientes tropicais, incluindo a presença de argilominerais de baixa atividade, como a caulinita, além de óxidos de ferro e alumínio (Schaefer, 2023; Pereira *et al.*, 2020).

Do ponto de vista geotécnico, essas características, associadas à condição de umidade, influenciam diretamente a resistência, a deformabilidade e a capacidade de suporte dos materiais, que podem apresentar elevada plasticidade, compressibilidade e sensibilidade às variações hídricas (Das; Sobhan, 2019). Segundo Pinto (2015), o comportamento mecânico dos solos finos está diretamente relacionado ao teor de água, podendo ocorrer redução significativa da resistência ao cisalhamento em condições de saturação. Farias (2023) acrescenta que as variações hídricas podem desestabilizar a estrutura agregada desses solos, comprometendo sua rigidez, sua capacidade de suporte e seu desempenho quando empregados como fundação ou como material de subleito.

Figura 1. Relação entre as condições climáticas da Amazônia, os problemas de pavimentação e a estabilização física do solo com RCC



Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de inteligência artificial generativa (2026).

Solos com elevado limite de liquidez apresentam baixa estabilidade estrutural e elevada deformabilidade, o que limita sua aplicação direta em pavimentação (Ma *et al.*, 2022). Nessas condições, o desempenho do subleito pode ser comprometido, resultando em recalques excessivos, perda de capacidade de suporte e deterioração precoce do pavimento como mostra a Figura 1. Em regiões de elevada pluviosidade, como a Amazônia, esse comportamento se torna ainda mais relevante, em razão da maior suscetibilidade à infiltração de água e à alteração das condições de sucção do solo (Farias, 2023; Das; Sobhan, 2019).

A capacidade de suporte desses solos é frequentemente avaliada por meio do ensaio de CBR, sendo comum a obtenção de valores reduzidos em solos argilosos tropicais. Esse comportamento está associado à elevada fração fina, à alta plasticidade e à baixa resistência ao cisalhamento, características que exigem intervenções para viabilizar seu uso em obras de infraestrutura rodoviária (Wang *et al.*, 2021).

Estudos recentes indicam que a incorporação de materiais granulares, como o RCC, pode promover melhorias significativas no comportamento desses solos. Lima (2023) observou que a adição de RCC altera a estrutura granulométrica do material,

reduzindo a influência da fração argilosa e aumentando a densidade e a capacidade de suporte. De forma complementar, Galindo (2022) verificou que a estabilização de solos tropicais com RCC reciclado promove aumento da densidade seca máxima, redução da umidade ótima e expressivos ganhos de resistência mecânica, inclusive com aumento significativo dos valores de CBR e módulo de resiliência.

Além dos efeitos físicos decorrentes da alteração granulométrica, Galindo (2022) demonstrou, por meio de análises microestruturais, que determinadas misturas solo-resíduo podem apresentar ganho adicional de rigidez e resistência em função da formação de compostos cimentantes, quando há materiais reativos associados. Mesmo quando o foco está na ação predominantemente granulométrica do RCC, os resultados indicam que o reaproveitamento de resíduos pode melhorar substancialmente o comportamento geotécnico de solos tropicais.

Dessa forma, a utilização de solos tropicais em pavimentação rodoviária exige uma abordagem integrada, envolvendo caracterização detalhada, compreensão dos mecanismos de perda de resistência associados à umidade e aplicação de técnicas de melhoria, de modo a garantir desempenho adequado ao longo da vida útil da estrutura.

2.3 Estabilização de Solos para Pavimentação Rodoviária

A estabilização de solos compreende um conjunto de técnicas destinadas a modificar suas propriedades físicas, mecânicas ou hidráulicas, com o objetivo de adequar seu comportamento às exigências de determinada aplicação geotécnica. Na pavimentação rodoviária, essas técnicas são empregadas principalmente quando o solo disponível apresenta capacidade de suporte insuficiente, elevada deformabilidade ou sensibilidade às variações de umidade, características que podem comprometer o desempenho e a durabilidade da estrutura do pavimento (Mallick; El-Korchi, 2018).

Os métodos de estabilização podem ser classificados, de maneira geral, em mecânicos, granulométricos e químicos. A estabilização mecânica ocorre principalmente por meio da compactação, que promove o rearranjo das partículas, a redução do índice de vazios e o aumento da massa específica seca do solo. A estabilização granulométrica consiste na combinação de materiais com diferentes distribuições de tamanho de partículas, buscando formar uma estrutura granular mais estável e com melhor distribuição dos contatos internos (Pinto, 2015; Silva *et al.* 2019b).

A estabilização química, por sua vez, envolve a adição de agentes como cimento, cal ou outros materiais capazes de desencadear reações de cimentação, troca iônica ou formação de compostos responsáveis pelo aumento da resistência e pela redução da suscetibilidade do solo à água. Também podem ser adotados sistemas combinados, nos quais mecanismos mecânicos, granulométricos e químicos atuam simultaneamente, como ocorre em misturas de solo, agregado reciclado e agente cimentante (Das; Sobhan, 2019; Orioli, 2024).

A escolha do método de estabilização deve considerar as características do solo, a função da camada do pavimento, as condições de umidade, as solicitações do tráfego, a disponibilidade de materiais e a viabilidade econômica e ambiental da solução. Assim, não existe um procedimento único aplicável a todos os solos, sendo necessária a realização de ensaios específicos para verificar a eficiência do método selecionado e definir as condições mais adequadas de execução.

2.4 Resíduos de Construção Civil (RCC)

Os resíduos de construção civil (RCC) correspondem aos materiais provenientes de atividades de construção, reforma, manutenção e demolição de edificações e obras de infraestrutura, sendo compostos majoritariamente por fragmentos de concreto, argamassa, materiais cerâmicos, solos e, em menor proporção, materiais metálicos, plásticos e madeira. A geração desses resíduos está diretamente associada ao crescimento urbano e à intensificação das atividades da construção civil, setor que figura entre os maiores geradores de resíduos sólidos no mundo (Khan *et al.*, 2024; Hidalgo *et al.*, 2023).

A disposição inadequada do RCC tem sido reconhecida como um problema ambiental significativo, uma vez que o descarte irregular pode causar impactos como assoreamento de corpos hídricos, contaminação do solo e degradação da paisagem urbana. Nesse contexto, a reutilização desses resíduos em aplicações de engenharia tem sido amplamente incentivada, tanto por aspectos ambientais quanto econômicos. Revisões recentes ressaltam que o reaproveitamento desses resíduos reduz a dependência de materiais naturais, diminui a ocupação de aterros e contribui para estratégias de economia circular em obras geotécnicas e rodoviárias (Bordoloi *et al.*, 2022; Ahmadpour *et al.*, 2025).

Do ponto de vista normativo, a Resolução CONAMA nº 307 estabelece diretrizes para a gestão dos resíduos da construção civil, classificando-os de acordo com seu potencial de reutilização. Os resíduos classificados como Classe A — constituídos por concreto, argamassa, cerâmica e solos — apresentam elevado potencial de reciclagem, podendo ser processados e utilizados como agregados em obras de engenharia (Brasil, 2002).

A reciclagem do RCC envolve etapas como triagem, britagem e peneiramento, com o objetivo de obter materiais com granulometria adequada para aplicações específicas. Após esse processamento, o material resultante apresenta características físicas que o tornam compatível com agregados naturais, especialmente em termos de distribuição granulométrica, forma das partículas e potencial de intertravamento. Além disso, a composição e a variabilidade do RCC estão diretamente relacionadas à origem do resíduo e ao processo de beneficiamento, sendo esse um aspecto central para o desempenho do agregado reciclado em aplicações geotécnicas e de pavimentação (Delongui, 2016).

Estudos indicam que o RCC apresenta propriedades geotécnicas relevantes para uso em pavimentação, incluindo resistência mecânica, capacidade de suporte e comportamento granulométrico adequado (Ahmadpour *et al.*, 2025). Ensaios laboratoriais demonstram que esses materiais podem apresentar valores elevados de CBR, além de desempenho satisfatório em ensaios de compactação e resistência ao cisalhamento. De forma convergente, Delongui (2016) verificou que agregados reciclados de RCC apresentam comportamento mecânico compatível com materiais granulares empregados em base e sub-base, com parâmetros de resistência adequados para determinadas condições de tráfego.

Do ponto de vista microestrutural, o comportamento do RCC está relacionado à presença de partículas angulares e à heterogeneidade de sua composição, fatores que favorecem o intertravamento entre os grãos e contribuem para o aumento da resistência mecânica. Adicionalmente, materiais cimentícios residuais presentes na composição do resíduo podem conferir certa capacidade de ligação entre partículas, influenciando o comportamento mecânico do agregado reciclado. Bordoloi *et al.*, (2022) ressaltam ainda que características como porosidade, absorção de água, fissuras internas e composição mineralógica interferem diretamente no desempenho hidromecânico dos resíduos reciclados.

A incorporação do RCC em misturas com solos finos promove alterações significativas na estrutura do material, especialmente pela substituição parcial da fração argilosa por partículas granulares. Esse processo resulta na redução da plasticidade e na melhoria da estabilidade volumétrica do solo, aspectos fundamentais para aplicações em pavimentação. Barreto (2020) demonstrou que a adição de resíduos de construção civil em solos promove aumento da capacidade de suporte e melhoria do comportamento mecânico. Vieira (2025) observou redução significativa dos limites de plasticidade em misturas solo–RCC, evidenciando a diminuição da atividade da fração argilosa. Lima (2023), por sua vez, verificou que a incorporação de RCC influencia diretamente parâmetros de compactação, promovendo aumento da densidade seca máxima e alterações na umidade ótima, fatores que impactam diretamente o desempenho geotécnico do material.

Sob a perspectiva ambiental, o reaproveitamento do RCC contribui para a redução da exploração de recursos naturais e para a minimização do volume de resíduos destinados a aterros. Adicionalmente, essa prática está alinhada aos princípios da economia circular, promovendo o reaproveitamento de materiais e a redução de impactos ambientais associados à construção civil (Ahmadpour *et al.*, 2025; Khan *et al.*, 2024). Dessa forma, o RCC se apresenta como material de elevado potencial técnico e ambiental para aplicações em engenharia geotécnica, especialmente em pavimentação rodoviária, onde sua utilização pode contribuir significativamente para a melhoria do desempenho dos materiais e para a sustentabilidade das obras.

2.5 Resíduos da Construção Civil na Pavimentação Rodoviária

A utilização de resíduos de construção civil (RCC) em pavimentação rodoviária tem sido investigada como alternativa à substituição parcial ou total de agregados naturais. Após etapas adequadas de triagem, britagem, peneiramento e controle de qualidade, esses materiais podem ser empregados em subleitos melhorados, reforços de subleito, sub-bases e bases, desde que apresentem características compatíveis com os requisitos técnicos estabelecidos para cada aplicação (Wang *et al.*, 2021; Ahmadpour *et al.*, 2025; Delongui, 2016).

A possibilidade de utilização do RCC depende de sua origem, composição e processo de beneficiamento. Resíduos constituídos predominantemente por concreto,

argamassa, materiais cerâmicos e agregados naturais podem apresentar comportamento adequado para aplicações rodoviárias, mas a variabilidade desses constituintes exige controle granulométrico, verificação da presença de materiais contaminantes e determinação de propriedades como absorção de água, resistência à fragmentação e massa específica (Bordoloi *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2024).

Estudos realizados com agregados reciclados demonstram que, quando adequadamente selecionados e compactados, esses materiais podem apresentar desempenho compatível com agregados convencionais empregados em pavimentação. Delongui (2016) verificou a aplicabilidade de agregados reciclados em pavimentos de baixo volume de tráfego, enquanto Hidalgo *et al.* (2023) demonstraram a viabilidade de misturas constituídas por solo e resíduos de construção e demolição em soluções de melhoria do terreno. Ahmadpour *et al.* (2025) também identificaram propriedades geotécnicas compatíveis com o emprego de agregados provenientes de resíduos de demolição em infraestruturas rodoviárias.

Do ponto de vista construtivo e econômico, o aproveitamento do RCC pode reduzir a necessidade de extração e transporte de agregados naturais, principalmente quando os resíduos são beneficiados próximos ao local de utilização. Entretanto, a viabilidade econômica depende de fatores como distância de transporte, disponibilidade regional, custos de beneficiamento e necessidade de controle tecnológico. Portanto, a utilização do RCC não representa necessariamente redução de custos em todas as situações, devendo ser analisada conforme as condições específicas de cada obra (Delongui, 2016; Khan *et al.*, 2024).

Sob a perspectiva ambiental, o uso do RCC em pavimentação contribui para a redução do volume de resíduos destinado a aterros ou depositado irregularmente, além de diminuir a exploração de jazidas de agregados naturais. Essa prática está alinhada aos princípios da economia circular, pois mantém os materiais em uso por um período mais longo e transforma um passivo ambiental em recurso para a construção de infraestrutura (Bordoloi *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2024).

Desse modo, a aplicação do RCC em pavimentação constitui uma alternativa que pode conciliar desempenho técnico, aproveitamento de materiais disponíveis regionalmente e redução de impactos ambientais. Sua utilização, contudo, deve ser precedida de caracterização e controle tecnológico compatíveis com a camada do pavimento e com as condições de serviço previstas.

2.6 Caracterização Geotécnica de Solos e Misturas Solo–RCC

2.6.1 Caracterização Geotécnica de Solos

A caracterização geotécnica dos solos e das misturas solo–RCC constitui etapa indispensável para a compreensão do comportamento dos materiais empregados em pavimentação rodoviária. Trata-se do conjunto de procedimentos laboratoriais e analíticos destinado a identificar propriedades físicas, índices de consistência, parâmetros de compactação e respostas mecânicas do material, de modo a subsidiar sua classificação, prever seu desempenho em campo e verificar sua adequação para uso em subleito, reforço de subleito, sub-base ou base. Em materiais naturais, essa caracterização permite reconhecer limitações associadas à presença de finos, à plasticidade e à sensibilidade à umidade; nas misturas com RCC, permite avaliar em que medida a incorporação do resíduo altera a estrutura granulométrica, a densidade, a deformabilidade e a capacidade de suporte do sistema (Lima, 2023; Delongui, 2016; Ahmadpour *et al.*, 2025).

No contexto da engenharia de pavimentos, a caracterização geotécnica não deve ser entendida apenas como etapa preliminar de classificação, mas como base para interpretação do desempenho estrutural do material. Isso ocorre porque parâmetros aparentemente simples, como granulometria, massa específica dos sólidos, limites de atterberg, umidade ótima e densidade seca máxima, influenciam diretamente resultados de ensaios mecânicos, como CBR, resistência ao cisalhamento, módulo resiliente e deformação permanente. Em outras palavras, a resposta estrutural do material sob carregamento depende fortemente da sua constituição física e do arranjo das partículas após compactação. Essa relação é particularmente importante em misturas solo–RCC, nas quais a introdução de partículas recicladas modifica simultaneamente a distribuição granulométrica, o volume de vazios, a trabalhabilidade e a rigidez do material (Khan *et al.*, 2024; Bordoloi *et al.*, 2022).

De forma geral, a caracterização geotécnica envolve a determinação de parâmetros como composição granulométrica, limites de consistência, massa específica dos sólidos, comportamento de compactação, capacidade de suporte e resistência mecânica. Pinto (2015) ressalta que a identificação dessas propriedades é essencial para qualquer estudo geotécnico, pois são elas que definem a forma como o solo responde à aplicação de tensões e às variações ambientais.

Nesse contexto, a interpretação dos resultados geotécnicos pode ser aprimorada por meio da aplicação de ferramentas estatísticas, que permitem avaliar a variabilidade dos dados experimentais, verificar a significância das diferenças entre materiais e estabelecer relações entre variáveis. A estatística aplicada à engenharia constitui importante instrumento de apoio à análise experimental, possibilitando a descrição, comparação e interpretação de resultados obtidos em laboratório. Segundo Triola (2017), Larson e Farber (2015), Montgomery e Runger (2018), Field (2018) e Hair *et al.* (2019), a utilização de métodos estatísticos adequados contribui para aumentar a confiabilidade das análises, reduzir a subjetividade na interpretação dos dados e fornecer suporte quantitativo para resolução técnicas.

Entre os procedimentos mais empregados destacam-se a estatística descritiva, utilizada para sintetizar e caracterizar conjuntos de dados por meio de medidas de tendência central e dispersão, bem como os testes de verificação de pressupostos, tais como normalidade e homogeneidade das variâncias. Conforme discutido por Field (2018), Montgomery e Runger (2018), Triola (2017), Larson e Farber (2015) e Hair *et al.* (2019), a avaliação desses pressupostos constitui etapa fundamental para a seleção adequada dos métodos inferenciais.

Quando os pressupostos estatísticos são atendidos, podem ser empregados testes paramétricos, como a análise de variância (ANOVA) e os procedimentos de comparações múltiplas. Em situações nas quais tais condições não são satisfeitas, recomenda-se a utilização de métodos robustos ou não paramétricos, como a ANOVA de Welch e o teste de Kruskal–Wallis, seguidos de procedimentos específicos de comparações múltiplas. Outrossim, técnicas de regressão linear são amplamente utilizadas na determinação de parâmetros geotécnicos e na análise de relações entre variáveis experimentais, contribuindo para aumentar a robustez e a confiabilidade das interpretações realizadas (Field, 2018; Hair *et al.*, 2019; Larson; Farber, 2015; Montgomery; Runger, 2018; Triola, 2017).

2.6.2 Misturas Solo–RCC

O comportamento das misturas solo–RCC depende das características do solo natural, da composição e granulometria do resíduo, do teor incorporado, da energia de compactação e das condições de umidade. Por essa razão, a influência do RCC deve ser avaliada por meio de parâmetros capazes de representar as alterações na distribuição

granulométrica, nos limites de consistência, na compactação, na capacidade de suporte e na resistência ao cisalhamento.

A incorporação do RCC geralmente modifica a distribuição granulométrica do solo, reduzindo proporcionalmente a participação da fração fina e aumentando a presença de partículas arenosas ou pedregulhosas. Essa alteração pode favorecer a formação de um esqueleto granular com maior intertravamento entre partículas. A intensidade desse efeito, entretanto, depende da granulometria do resíduo e do teor adicionado. Vieira (2025) observou que a incorporação de RCC em solo argiloso modificou a distribuição granulométrica das misturas, enquanto Barreto (2020) identificou a reorganização da estrutura granular em diferentes tipos de solo. Lima (2023) acrescenta que os efeitos da composição granulométrica devem ser interpretados juntamente com o grau de compactação alcançado pelo material (Hidalgo *et al.*, 2023; Tavakoli *et al.*, 2020).

Os limites de consistência permitem quantificar os efeitos da incorporação do RCC sobre o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP). Em misturas constituídas por solos finos, a substituição parcial da fração argilosa por partículas granulares tende a reduzir principalmente o LL e o IP, indicando menor faixa de comportamento plástico e menor sensibilidade à água. O LP também pode apresentar redução, embora sua resposta dependa das características mineralógicas do solo e da absorção do resíduo. Vieira (2025) identificou reduções no LL, no LP e no IP com o aumento do teor de RCC, enquanto Silva *et al.* (2019a) e Lima (2023) relacionaram a diminuição da plasticidade à alteração da composição granulométrica das misturas.

As alterações granulométricas também influenciam os parâmetros de compactação, particularmente a umidade ótima e a massa específica seca máxima. Estudos relatam que a incorporação de RCC pode reduzir a umidade ótima e aumentar a massa específica seca máxima, em razão da substituição de partículas finas por uma fração granular mais densa. Essa tendência, contudo, não deve ser considerada universal, pois a elevada absorção de água, a porosidade e a massa específica dos agregados reciclados podem modificar a resposta da mistura. Galindo (2022) observou aumento da massa específica seca máxima e redução da umidade ótima em solos tropicais estabilizados com resíduos, enquanto Lima (2023) demonstrou que o comportamento das misturas também varia conforme o grau de compactação. Dessa forma, os resultados devem ser relacionados à energia aplicada e ao estado de densificação alcançado.

O Índice de Suporte Califórnia (ISC/CBR) constitui um dos principais parâmetros para avaliar a capacidade de suporte das misturas destinadas à pavimentação. A literatura

registra aumentos do CBR com a incorporação de RCC, embora a magnitude dos ganhos varie conforme o tipo de solo, o teor de resíduo e as condições de moldagem e imersão. Barreto (2020), Galindo (2022), Wang *et al.* (2021) e Vieira (2025) identificaram melhorias na capacidade de suporte de misturas contendo resíduos reciclados. Esses resultados, entretanto, devem ser comparados aos critérios técnicos correspondentes à camada pretendida, pois o aumento do CBR em relação ao solo natural não assegura, isoladamente, o atendimento aos requisitos de base, sub-base ou reforço do subleito.

A resistência ao cisalhamento permite avaliar os efeitos do RCC sobre a coesão e o ângulo de atrito interno das misturas. A substituição parcial da fração fina por partículas granulares pode aumentar a participação do atrito no mecanismo resistente e, simultaneamente, reduzir a parcela de coesão associada ao solo argiloso. Isso significa que o aumento do ângulo de atrito não implica necessariamente aumento da coesão ou da resistência ao cisalhamento em todos os níveis de tensão normal. Ma *et al.* (2022b), ao investigarem argilas de alto limite de liquidez tratadas com agregados reciclados, observaram aumento da resistência e do ângulo de atrito interno. Hidalgo *et al.* (2023) também identificaram ganhos de resistência e rigidez, enquanto Vieira (2025) relacionou o desempenho mecânico das misturas às alterações granulométricas e à redução da plasticidade. A interpretação desses resultados deve considerar as condições de umidade e compactação, uma vez que elas influenciam diretamente os parâmetros da envoltória de ruptura (ASTM D3080, 2023).

Em síntese, a avaliação das misturas solo–RCC deve integrar a distribuição granulométrica, o LL, o LP, o IP, a umidade ótima, a massa específica seca máxima, o CBR, a coesão e o ângulo de atrito interno. Essa análise conjunta é necessária porque a melhoria de um parâmetro isolado não garante o desempenho global da mistura. A interpretação articulada desses resultados permite identificar os mecanismos associados à incorporação do resíduo e verificar sua viabilidade para a aplicação pretendida em pavimentação rodoviária (Silva *et al.*, 2019a; Ma *et al.*, 2022b; Hidalgo *et al.*, 2023).

2.7 Resistência ao Cisalhamento dos Solos

A resistência ao cisalhamento representa a capacidade do solo de resistir às tensões tangenciais mobilizadas ao longo de um plano potencial de ruptura. Essa propriedade é determinada pela interação entre as partículas e depende da composição mineralógica, da distribuição granulométrica, da massa específica seca, do teor de

umidade, do estado de tensões e das condições de drenagem. Sua determinação é relevante para a análise do comportamento de taludes, fundações, aterros, subleitos e demais estruturas geotécnicas (Das; Sobhan, 2019; Knappett; Craig, 2014).

O comportamento resistente dos solos é frequentemente interpretado por meio do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, segundo o qual a resistência ao cisalhamento resulta da contribuição de dois parâmetros: a coesão (c) e o ângulo de atrito interno (ϕ). A coesão representa o intercepto da envoltória de ruptura e está relacionada às ligações e interações existentes entre as partículas, enquanto o ângulo de atrito interno expressa a contribuição dos mecanismos de atrito e intertravamento mobilizados durante o cisalhamento. A participação relativa desses parâmetros varia conforme o tipo de solo, o estado de compactação e a tensão normal aplicada (Das; Sobhan, 2019; Knappett; Craig, 2014).

A determinação experimental desses parâmetros pode ser realizada por meio do ensaio de cisalhamento direto, no qual o corpo de prova é submetido a uma tensão normal previamente definida e, posteriormente, a uma força tangencial até a mobilização da resistência de pico. A realização do ensaio sob diferentes tensões normais permite ajustar a envoltória de ruptura e determinar os valores de coesão e ângulo de atrito interno. Os procedimentos do ensaio consolidado e drenado são estabelecidos pela ASTM D3080/D3080M-23 (ASTM, 2023; Boszczowski, 2013).

A condição de umidade influencia diretamente a resistência dos solos, sobretudo daqueles compactados e parcialmente saturados. A inundação pode eliminar ou reduzir a sucção matricial, alterar o estado de tensões efetivas e enfraquecer as ligações aparentes formadas na matriz do solo. Em solos tropicais com elevada presença de partículas finas, esses efeitos podem provocar reduções expressivas da coesão aparente e da resistência ao cisalhamento. Assim, a comparação entre as condições não inundada e inundada permite quantificar a sensibilidade do material à presença de água (Das; Sobhan, 2019; Knappett; Craig, 2014; Caputo *et al.*, 2022).

Nas misturas solo-RCC, a substituição parcial da fração fina por partículas granulares modifica o equilíbrio entre as parcelas coesiva e friccional. O RCC pode aumentar a participação do atrito e do intertravamento, mas esse efeito não implica necessariamente aumento da resistência global, pois também pode ocorrer redução da contribuição coesiva da matriz do solo. O resultado depende do teor de resíduo, da granulometria, da compactação e da condição de umidade da mistura (Ma *et al.*, 2022b; Hidalgo *et al.*, 2023).

No contexto regional, Castro *et al.* (2019) avaliaram um solo argiloso típico de Manaus em sua condição natural e misturado com 5% de resíduo de vidro processado em moinho de bolas e em moinho de alta energia. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados conforme a ASTM D3080, sob tensões normais de 49,05, 98,10 e 147,15 kPa, com determinação das resistências última e residual e dos parâmetros da envoltória de Mohr-Coulomb. Na condição última, o solo natural apresentou coesão de 107,48 kPa e ângulo de atrito interno de 35,16°. A mistura com vidro processado em moinho de bolas apresentou $c = 229,49$ kPa e $\phi = 30,44^\circ$, enquanto a composição com vidro pulverizado em moinho de alta energia alcançou $c = 320,06$ kPa e $\phi = 40,39^\circ$. Os resultados demonstram que o tipo de resíduo e a forma de processamento das partículas podem modificar de maneiras distintas as componentes coesiva e friccional. Entretanto, esses valores não podem ser transferidos diretamente para misturas solo-RCC, pois o material incorporado, o teor de adição, o beneficiamento, as tensões normais e as condições de preparação dos corpos de prova foram diferentes.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e a metodologia empregada para a preparação das amostras, caracterização geotécnica e execução dos ensaios laboratoriais. Também são descritos os equipamentos empregados, os critérios de moldagem dos corpos de prova e os métodos utilizados para a análise dos resultados experimentais.

A metodologia foi estruturada de forma a possibilitar a avaliação do comportamento geotécnico do solo natural e das misturas solo–RCC, considerando diferentes condições experimentais e parâmetros relevantes à aplicação em pavimentação. A Figura 2, apresenta o fluxograma metodológico da pesquisa, evidenciando de forma sequencial as etapas desenvolvidas desde a seleção e preparação dos materiais até a análise e interpretação dos resultados.

Figura 2. Fluxograma do Estudo



Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de inteligência artificial generativa (2026).

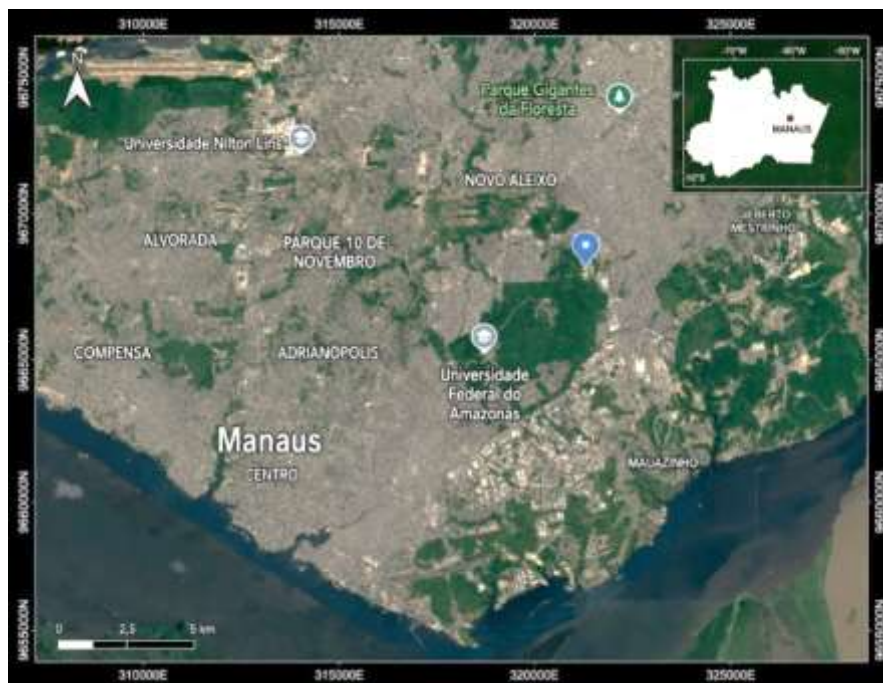
3.1 Materiais

Nesta pesquisa, foram selecionados um solo natural coletado na cidade de Manaus–AM e um resíduo de construção civil (RCC) previamente beneficiado, incorporado às misturas experimentais como agente estabilizante. A seleção desses materiais teve como objetivo avaliar a influência da incorporação do RCC nas propriedades geotécnicas do solo natural, considerando seu potencial de aplicação em camadas de pavimentação. As subseções seguintes apresentam a descrição individual desses materiais, bem como os critérios adotados para definição das composições experimentais.

3.1.1 Solo

O solo natural foi coletado no bairro Novo Aleixo, em Manaus–Amazonas, como mostra na Figura 3, em área representativa da ocorrência de materiais frequentemente utilizados em aplicações geotécnicas regionais.

Figura 3. Mapa de Manaus



Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de inteligência artificial generativa (2026).

Em escala regional, grande parte do substrato geológico de Manaus está relacionada à formação Alter do Chão, constituída predominantemente por intercalações de arenitos, siltitos, argilitos e níveis pelíticos, além de horizontes silicificados e ferruginosos descontínuos. Nas áreas de terra firme, o intemperismo prolongado desses materiais está associado ao desenvolvimento de perfis lateríticos, frequentemente recobertos por Latossolos Amarelos, caracterizados pelo elevado grau de intemperização e pela predominância de caulinita e óxidos ou oxi-hidróxidos de ferro e alumínio na fração argila (Ribeiro; Teixeira; Vieira, 2024; Santos *et al.*, 2025; Souza *et al.*, 2025).

Estudos desenvolvidos com solos naturais coletados em Manaus têm identificado materiais com predominância de frações finas, elevada plasticidade e comportamento coesivo, investigados quanto à estabilização e ao emprego em pavimentação (Silva *et al.*, 2019c; Almeida, D. D. A. 2025; Silva, J. R. S. 2025). Esse conjunto de pesquisas evidencia a recorrência e a pertinência geotécnica dos solos argilosos locais para investigações relacionadas ao subleito, ao reforço do subleito e aos processos de estabilização.

A escolha do material coletado no bairro Novo Aleixo está relacionada ao objetivo de avaliar o comportamento de um solo fino tropical de ocorrência local e seu potencial de utilização em camadas de pavimentos. Considerando que a composição mineralógica, a proporção da fração fina e as variações de umidade podem influenciar a consistência, a compactação, a capacidade de suporte e a resistência ao cisalhamento, tornou-se necessária sua caracterização experimental e a investigação dos efeitos da incorporação do RCC como alternativa de estabilização (Das; Sobhan, 2019; Caputo *et al.*, 2022).

3.1.2 Resíduo de Construção Civil (RCC)

O resíduo de construção civil (RCC) é proveniente de atividades de construção, reforma e demolição desenvolvidas na região de Manaus–AM. O material disponibilizado pelo Prof. MSc. Marcos Raiker, do Instituto Federal do Amazonas (IFAM), já previamente beneficiado e selecionado, apresentando granulometria compatível com a fração areia.

O RCC apresentou composição predominantemente constituída por fragmentos de concreto, argamassa e materiais cerâmicos, além de pequenas quantidades de solo aderido e outros constituintes, como fragmentos de vidro e resíduos cimentícios

endurecidos. Essa composição é compatível com a natureza heterogênea dos resíduos da construção civil descrita na literatura (Leite, 2019).

Em razão de sua natureza granular, o RCC foi incorporado às misturas com o solo natural com a finalidade de promover alterações na estrutura granulométrica do sistema. Conforme a literatura, a incorporação de materiais granulares em solos finos pode contribuir para melhorias no comportamento físico e mecânico, especialmente em relação à compactação e à capacidade de suporte (Caputo *et al.*, 2022; Das; Sobhan, 2019).

A escolha do RCC como material de incorporação também se justifica pela capacidade técnica e ambiental associado ao reaproveitamento de resíduos da construção civil, favorecendo alternativas sustentáveis para aplicações em engenharia geotécnica e pavimentação (Ma *et al.*, 2022b; Hidalgo *et al.*, 2023).

3.1.3 Mistura Solo – RCC

As misturas avaliadas neste estudo tiveram como objetivo analisar a influência da incorporação de resíduo da construção civil (RCC) nas propriedades geotécnicas do solo natural, especialmente quanto ao comportamento físico e mecânico relacionado à aplicação em pavimentação.

O programa experimental contemplou três condições, correspondentes ao material de referência e às composições com substituição parcial do solo por RCC, definidas com base na massa seca dos materiais, conforme descrito a seguir:

- Solo natural (0% RCC);
- Solo + 20% de RCC;
- Solo + 35% de RCC.

O solo natural constituiu o material de referência, permitindo a comparação direta com as misturas modificadas.

A definição dos teores de 20% e 35% de RCC foi fundamentada em levantamento da literatura referente à estabilização física de solos com resíduos da construção civil. Verificou-se que diferentes pesquisas empregaram distintos percentuais de incorporação, evidenciando que não existe um teor único de substituição aplicável a todos os materiais, uma vez que sua escolha depende das características geotécnicas do solo, da natureza do

resíduo e dos objetivos da investigação. Entre os estudos utilizados como referência nesta pesquisa, Silva *et al.* (2019c) avaliaram misturas contendo 10%, 20% e 30% de RCC, enquanto Barreto (2020) investigou incorporações de 25%, 50% e 75%, demonstrando que a literatura adota diferentes níveis de substituição para analisar a influência do teor de resíduo no comportamento geotécnico das misturas.

Com base nesse panorama, foram selecionados os teores de 20% e 35% de RCC, por representarem dois níveis distintos de incorporação do resíduo ao solo. O teor de 20% foi escolhido por corresponder a um percentual já investigado na literatura e representar um nível moderado de substituição, enquanto o teor de 35% foi definido como uma condição de maior incorporação, permitindo avaliar a influência do incremento da fração granular reciclada sobre as propriedades físicas e mecânicas do solo. A adoção desses dois níveis experimentais possibilitou verificar se o aumento do teor de RCC promoveria melhorias progressivas no comportamento geotécnico do material ou se incorporações mais elevadas poderiam modificar negativamente determinados parâmetros de desempenho, sem pressupor previamente a existência de um teor ótimo de estabilização.

O RCC utilizado apresentou granulometria, segundo análise visual e tátil, equivalente à fração areia, atuando como material granular corretivo quando incorporado à matriz do solo natural. Conforme Caputo *et al.* (2022) e Das e Sobhan (2019), a introdução de materiais granulares em solos finos tende a modificar a distribuição granulométrica, reduzir a plasticidade, favorecer o intertravamento entre partículas e alterar o comportamento mecânico do sistema.

As proporções estabelecidas foram definidas com base na substituição mássica do solo natural por RCC, sendo as misturas preparadas previamente à execução dos ensaios laboratoriais, conforme os procedimentos descritos no item 3.2. A adoção dessas composições permitiu analisar comparativamente o efeito da incorporação crescente de RCC no comportamento geotécnico do solo, avaliando sua viabilidade técnica como material de estabilização física para emprego em camadas de pavimentação.

3.2 Preparação das Amostras de Solo e RCC

A qualidade dos resultados obtidos em ensaios geotécnicos está diretamente associada à preparação das amostras, etapa responsável por garantir a representatividade e a homogeneidade dos materiais analisados, reduzindo interferências decorrentes de

procedimentos inadequados de manuseio e preparo (Pinto, 2015; Caputo *et al.*, 2022; Das; Sobhan, 2019).

A manipulação do solo natural seguiu as recomendações estabelecidas pela ABNT NBR 6457:2024 – Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, contemplando as etapas de secagem ao ar, destorroamento, quarteamento, peneiramento e homogeneização como mostra na Figura 4.

Inicialmente, o solo coletado permaneceu disposto em bandejas metálicas e mantido em ambiente ventilado, ao abrigo da incidência direta de radiação solar, visando à redução gradual do teor de umidade natural. Após a secagem, ocorreu a triagem manual, com remoção de materiais indesejáveis, como raízes, fragmentos vegetais, matéria orgânica, pedras e resíduos estranhos ao material, seguida do destorroamento manual, conduzido cuidadosamente para evitar a fragmentação artificial das partículas constituintes do solo.

Na sequência, realizou-se o quarteamento da amostra por divisões sucessivas até a obtenção da quantidade necessária para execução dos ensaios laboratoriais, garantindo a representatividade do material. Posteriormente, procedeu-se ao peneiramento em peneiras padronizadas, com destaque para a peneira de 2,0 mm, conforme a aplicabilidade dos ensaios executados (Caputo *et al.*, 2022; Das; Sobhan, 2019).

Figura 4. Preparação das Amostras de Solo para Ensaios Geotécnicos



Fonte: Autor (2026)

Para a preparação das misturas solo–RCC, as proporções foram estabelecidas com base na massa seca dos materiais, adotando-se teores de substituição de 20% e 35% de RCC em relação à massa seca do solo natural, conforme definido no item 3.1.3. A

utilização da massa seca como critério de dosagem elimina a influência da umidade natural dos materiais, permitindo maior controle experimental e assegurando que as proporções de RCC incorporadas ao solo fossem efetivamente aquelas previstas no programa experimental.

Os teores de substituição foram previamente definidos a partir do levantamento da literatura técnica sobre estabilização física de solos com resíduos da construção civil, de modo a representar dois níveis distintos de incorporação do RCC e possibilitar a avaliação da influência do aumento da fração granular reciclada nas propriedades geotécnicas do material.

Após a determinação das massas correspondentes, o solo e o RCC foram pesados individualmente em balança de precisão e misturados manualmente, em estado seco, até a obtenção de uma composição visualmente homogênea, buscando garantir distribuição uniforme das partículas de RCC em toda a massa do solo. Em seguida, procedeu-se ao ajuste do teor de umidade específico para cada ensaio, mediante adição gradual de água, seguida de nova homogeneização, assegurando adequada distribuição da umidade em toda a mistura antes da moldagem dos corpos de prova (Das; Sobhan, 2019).

Dessa forma, a preparação das amostras foi conduzida de maneira padronizada, garantindo representatividade, homogeneidade e reprodutibilidade experimental, fatores essenciais para a confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios geotécnicos subsequentes (Pinto, 2015; Caputo *et al.*, 2022).

3.3 Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica constitui etapa essencial para a compreensão do comportamento do solo e das composições solo–RCC em aplicações de engenharia, caso da pavimentação rodoviária. Por meio dessa etapa, é possível obter a textura, a plasticidade, índices físicos e compactação, subsidiando sua adequada aplicação nas subcamadas de pavimentos (Caputo *et al.*, 2022; Das; Sobhan, 2019), tendo sido determinado análise granulométrica, limites de consistência, massa específica dos sólidos, parâmetros de compactação e o Índice de Suporte Califórnia (CBR).

3.3.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica teve como objetivo determinar a distribuição do tamanho das partículas constituintes dos materiais estudados, parâmetro fundamental para a compreensão do comportamento geotécnico, uma vez que influencia diretamente propriedades como plasticidade, compactação e resistência ao cisalhamento (Caputo *et al.*, 2022; Das; Sobhan, 2019).

A granulometria do solo natural seguiu as recomendações da ABNT NBR 7181:2025, empregando a combinação entre peneiramento mecânico para as frações grossas e sedimentação para as frações finas, método indicado para materiais com presença significativa de partículas silto-argilosas.

Para o resíduo de construção civil (RCC), previamente beneficiado e com predominância granulométrica equivalente à fração areia, a caracterização ocorreu por meio de peneiramento mecânico, considerando sua natureza essencialmente granular e compatível com agregados reciclados miúdos.

As distribuições granulométricas das misturas solo + 20% RCC e solo + 35% RCC foram estimadas por composição granulométrica teórica ponderada em massa, a partir das curvas granulométricas individuais do solo natural e do RCC, considerando as proporções mássicas adotadas na pesquisa.

Para a mistura contendo 20% de RCC, tem-se:

$$\text{Equação (01)} \quad G_{20} = 0,80 \cdot G_S + 0,20 \cdot G_{RCC}$$

Para a mistura contendo 35% de RCC:

$$\text{Equação (02)} \quad G_{35} = 0,65 \cdot G_S + 0,35 \cdot G_{RCC}$$

onde:

- G_{20} = porcentagem passante da mistura solo + 20% RCC;
- G_{35} = porcentagem passante da mistura solo + 35% RCC;
- G_S = porcentagem passante do solo natural;
- G_{RCC} = porcentagem passante do resíduo de construção civil.

Esse procedimento permitiu estimar a distribuição granulométrica das misturas a partir da contribuição proporcional de cada constituinte, possibilitando avaliar a influência da incorporação do RCC na modificação da estrutura granulométrica do material.

3.3.2 Limites de Atterberg

Os limites de consistência do solo foram determinados por meio dos ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), parâmetros amplamente utilizados na caracterização e classificação geotécnica de solos finos, bem como na avaliação do comportamento do material frente às variações de umidade, plasticidade e deformabilidade (Caputo *et al.*, 2022; Das; Sobhan, 2019; Pinto, 2015).

As amostras destinadas a esses ensaios foram previamente preparadas conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 6457:2024, garantindo a homogeneização do material e a obtenção da fração adequada à execução dos ensaios. A determinação do Limite de Liquidez (LL) e do Limite de Plasticidade (LP) foram realizadas, respectivamente, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 6459:2025 e ABNT NBR 7180:2025. Tais resultados foram aplicados na avaliação da plasticidade e classificação geotécnica, aspectos relevantes para a interpretação de seu comportamento em aplicações da pavimentação.

3.3.3 Massa Específica dos Sólidos

A determinação da massa específica dos sólidos constitui etapa relevante, uma vez que esse parâmetro influencia diretamente os índices físicos, o comportamento de compactação e a interpretação das propriedades mecânicas dos materiais estudados (Caputo *et al.*, 2022; Das; Sobhan, 2019).

Para o solo natural e para as misturas solo + 20% RCC e solo + 35% RCC, a determinação da massa específica dos sólidos seguiu os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 17212:2025, considerando a fração passante na peneira de 2,0 mm e adotando-se os valores médios representativos para fins de caracterização.

Para o resíduo de construção civil (RCC), em razão de sua natureza predominantemente granular e comportamento compatível com agregado reciclado

beneficiado, determinaram-se, além da massa específica real dos grãos, a massa específica aparente e a absorção de água, conforme os procedimentos estabelecidos pela DNIT 411/2021-ME – Agregados – Determinação da densidade relativa e da absorção de agregado miúdo. Tais parâmetros apresentam relevância para a caracterização física de materiais aplicados em obras geotécnicas e rodoviárias.

Os parâmetros obtidos subsidiaram a caracterização física dos materiais e contribuíram para a interpretação dos resultados dos ensaios de compactação e desempenho mecânico.

3.3.4 Compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Os ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR/ISC) avaliaram o comportamento do solo natural e das misturas solo–resíduo de construção civil (RCC) quanto à densificação, capacidade de suporte e potencial de expansão, parâmetros fundamentais para aplicação em camadas de pavimentação (Pinto, 2015; Caputo *et al.*, 2022; Das; Sobhan, 2019).

O ensaio de compactação seguiu os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7182:2025, na energia intermediária, possibilitando a determinação da umidade ótima de compactação (w_{ot}) e da massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) para cada material estudado. Realizaram-se três determinações para o solo natural e uma para cada composição solo + 20% RCC e solo + 35% RCC.

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR/ISC) atendeu às prescrições da ABNT NBR 9895:2025, incluindo a determinação da expansão. Os corpos de prova receberam moldagem nas condições correspondentes à umidade ótima e à massa específica seca máxima obtidas no ensaio de compactação.

Os parâmetros obtidos subsidiaram a análise da aptidão dos materiais para aplicação em camadas de pavimentação, especialmente em subleito, sub-base e base, conforme os critérios de desempenho geotécnico aplicáveis.

3.4 Corpos de Prova para os Ensaio Mecânicos

A moldagem e a preparação dos corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos ocorreram de forma padronizada, com o objetivo de garantir condições homogêneas,

reprodutíveis e representativas para a avaliação do comportamento geotécnico do solo natural e das misturas solo–resíduo de construção civil (RCC). A uniformidade na preparação dos espécimes é fundamental para minimizar interferências associadas a variações de umidade, densificação e heterogeneidade interna, fatores que influenciam diretamente os parâmetros mecânicos obtidos experimentalmente (Pinto, 2015; Caputo *et al.*, 2022; Das; Sobhan, 2019).

A moldagem dos corpos de prova seguiu os parâmetros obtidos nos ensaios de compactação, adotando-se, para cada material estudado, os respectivos valores de umidade ótima de compactação (w_{ot}) e massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$).

Inicialmente, determinaram-se as quantidades de solo natural e RCC correspondentes a cada composição experimental, considerando as proporções estabelecidas para o solo natural, solo + 20% RCC e solo + 35% RCC. Após a pesagem, os materiais passaram por mistura manual em condição seca, visando assegurar adequada dispersão do RCC na matriz do solo e evitar segregação granulométrica. Na sequência, procedeu-se à adição controlada de água, calculada com base na umidade higroscópica inicial e na umidade ótima correspondente a cada composição, seguida de nova mistura até completa uniformização do material.

Os espécimes produzidos destinaram-se aos ensaios de cisalhamento direto, adotando-se dimensões padronizadas de 50 mm × 50 mm × 20 mm, assegurando uniformidade geométrica entre todos os corpos de prova. Esses espécimes atenderam tanto aos ensaios em condição não inundada quanto aos ensaios em condição inundada, cujas particularidades operacionais encontram-se descritas nos tópicos subsequentes.

3.5 Ensaio de Cisalhamento Direto

A resistência ao cisalhamento dos materiais foi determinada por meio do ensaio de cisalhamento direto, empregado na engenharia geotécnica para obtenção dos parâmetros de resistência dos solos, quais sejam, a coesão (c) e o ângulo de atrito interno (ϕ), fundamentais para análises e dimensionamento de obras geotécnicas, incluindo camadas de pavimentação (Das; Sobhan, 2019; CAPUTO *et al.*, 2022).

Os ensaios de cisalhamento direto ocorreram no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Faculdade de Tecnologia, vinculado ao Departamento de Engenharia Civil, seguindo os procedimentos estabelecidos pela ASTM D3080/D3080M (2023),

aplicados ao solo natural e às misturas solo–RCC. Durante o ensaio, a força de cisalhamento teve monitoramento por meio de célula de carga, enquanto os deslocamentos horizontal e vertical tiveram registro contínuo por sensores do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer), permitindo o acompanhamento do comportamento deformacional das amostras ao longo do ensaio. A determinação da tensão de cisalhamento ocorreu por meio da relação apresentada na Equação (03).

$$\text{Equação (03)} \quad \tau = \frac{F}{A}$$

onde:

- τ = tensão de cisalhamento (kPa);
- F = força tangencial aplicada (kN);
- A = área da seção de cisalhamento (mm²).

3.5.1 Ensaios em Condição Não Inundada

Os ensaios de cisalhamento direto em condição não inundada constituíram a principal etapa do programa experimental, permitindo a avaliação do comportamento resistente do solo natural e das misturas solo–RCC em condições representativas de compactação sem saturação prévia, situação frequentemente associada ao comportamento de materiais aplicados em camadas de pavimentação. (Pinto, 2015; Caputo *et al.*, 2022).

O programa experimental contemplou o solo natural e as misturas contendo 20% e 35% de RCC, utilizando corpos de prova preparados nas condições correspondentes à umidade ótima de compactação e à massa específica seca máxima previamente determinadas para cada material. As amostras receberam moldagem diretamente na caixa de cisalhamento bipartida, com dimensões padronizadas de 50 mm × 50 mm × 20 mm, garantindo uniformidade geométrica entre todos os corpos de prova ensaiados (Figura 04). O estudo considerou quatro níveis de tensões normais aplicadas (50, 100, 150 e 200 kPa), possibilitando a obtenção da envoltória de resistência ao cisalhamento dos materiais estudados, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição do número de corpos de prova - Cisalhamento direto, condição não inundada

Material	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa	Total
Solo natural	16	16	16	16	64
Solo + 20% RCC	16	16	16	16	64
Solo + 35% RCC	16	16	16	16	64
Total geral	48	48	48	48	192

Fonte: Autor (2026)

Durante os ensaios, a força cisalhante aplicada e os deslocamentos horizontal e vertical dos corpos de prova receberam monitoramento contínuo, possibilitando a obtenção das curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para cada condição experimental analisada. Na condição não inundada, os corpos de prova permaneceram sem saturação prévia, mantendo-se o teor de umidade correspondente às condições de moldagem previamente estabelecidas.

Figura 5. Corpos de Prova Moldados - Cisalhamento Direto

Fonte: Autor (2026)

O programa experimental contemplou múltiplas repetições para cada material e nível de tensão normal, permitindo a análise comparativa do comportamento resistente do solo natural e das misturas solo–RCC, bem como a avaliação estatística dos resultados obtidos.

3.5.2 Ensaios em Condição Inundada

Com o objetivo de avaliar a influência da presença de água no comportamento mecânico dos materiais, foram realizados ensaios de cisalhamento direto em condição inundada, possibilitando a comparação entre as condições não inundada e inundada. O programa experimental contemplou 24 corpos de prova, distribuídos entre o solo natural e as misturas solo–RCC, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 . Distribuição do número de corpos de prova - Cisalhamento direto, condição inundada

Material	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa	Total
Solo natural	2	2	2	2	8
Solo + 20% RCC	2	2	2	2	8
Solo + 35% RCC	2	2	2	2	8
Total geral	6	6	6	6	24

Fonte: Autor (2026)

Os ensaios em condição inundada constituíram uma etapa complementar e exploratória do programa experimental. Em razão do prazo disponível para a conclusão dos ensaios, o tratamento e a interpretação dos dados e a entrega da dissertação à banca examinadora, o número de corpos de prova foi limitado a duas repetições por material e tensão normal. Essa distribuição permitiu avaliar, de forma preliminar, os três materiais sob os quatro níveis de tensão normal, porém resultou em uma base amostral reduzida.

O número de duas repetições por condição não oferece suporte suficiente para a verificação dos pressupostos necessários à aplicação de testes estatísticos inferenciais. Por essa razão, os resultados dos ensaios inundados foram submetidos somente à análise estatística descritiva, mediante apresentação das médias, dos desvios-padrão, dos erros-padrão e dos coeficientes de variação. As diferenças observadas entre os materiais foram interpretadas como tendências experimentais, sem atribuição de superioridade estatisticamente comprovada ou generalização dos resultados para outras condições.

Os corpos de prova foram moldados diretamente na caixa de cisalhamento bipartida, com dimensões padronizadas de 50 mm × 50 mm × 20 mm, mantendo-se as condições geométricas e de compactação adotadas nos ensaios em condição não

inundada. Após a moldagem e o posicionamento do corpo de prova no equipamento, aplicou-se a tensão normal correspondente a cada condição experimental.

Em seguida, realizou-se a inundação do sistema por meio da adição de água à caixa de cisalhamento. Os corpos de prova permaneceram submersos durante 24 horas e submetidos à respectiva tensão normal antes do início do cisalhamento. Esse procedimento teve como finalidade permitir o ingresso de água no material e sua acomodação sob a tensão normal aplicada durante o período estabelecido.

Após a aplicação da tensão normal correspondente, adicionou-se água à caixa de cisalhamento, mantendo-se os corpos de prova submersos durante 24 horas antes do início do cisalhamento. Em seguida, o ensaio foi conduzido conforme o procedimento experimental adotado nesta pesquisa. Assim, os resultados apresentados correspondem à condição inundada, definida pela imersão dos corpos de prova durante o período estabelecido.

3.5.3 Critério de Ruptura e Determinação dos Parâmetros de Resistência

Os ensaios de cisalhamento direto ocorreram sob diferentes níveis de tensão normal, correspondentes a 50, 100, 150 e 200 kPa, definidos com base em condições compatíveis com as solicitações atuantes em camadas de subleito e sub-base de pavimentos rodoviários, conforme observado em estudos experimentais envolvendo materiais solo-RCC (Delongui, 2016; Galindo, 2022). A seleção dessas tensões também está em conformidade com as recomendações da ASTM D3080/D3080M (2023), que orienta a adoção de níveis representativos das condições de campo para definição da envoltória de ruptura dos materiais.

A determinação da resistência dos materiais teve como referência a resistência de pico, correspondente ao valor máximo da tensão cisalhante mobilizada durante o ensaio. Esse critério é amplamente adotado em estudos envolvendo solos compactados e materiais aplicados em pavimentação, por representar a condição de máxima resistência mobilizada antes da degradação estrutural do material (Knappett; Craig, 2014).

Para cada ensaio, determinou-se o valor da tensão cisalhante na ruptura (τ_f), correspondente à resistência de pico obtida experimentalmente. Os valores de τ_f apresentaram correlação com as respectivas tensões normais aplicadas, permitindo o ajuste da envoltória de ruptura segundo o critério de Mohr-Coulomb. (Das; Sobhan, 2019; Caputo et al., 2022), expresso pela Equação (04).

$$\text{Equação (04)} \quad \tau_f = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi)$$

onde:

- τ_f = tensão de cisalhamento na ruptura
- c = coesão
- σ_n = tensão normal
- ϕ = ângulo de atrito interno

A envoltória de ruptura resultou do ajuste linear dos pontos experimentais, sendo a coesão (c) determinada pelo intercepto da reta com o eixo das tensões de cisalhamento e o ângulo de atrito interno (ϕ) definido pela inclinação da reta. Esses parâmetros possibilitaram a caracterização do comportamento resistente do solo natural e das misturas solo–RCC, permitindo a análise comparativa entre os materiais e a avaliação da influência da incorporação do resíduo nas propriedades mecânicas. A determinação de c e ϕ constitui etapa fundamental para a análise geotécnica de materiais aplicados em pavimentação (Das; Sobhan, 2019; Knappett; Craig, 2014).

3.6 Análise Estatística dos Resultados

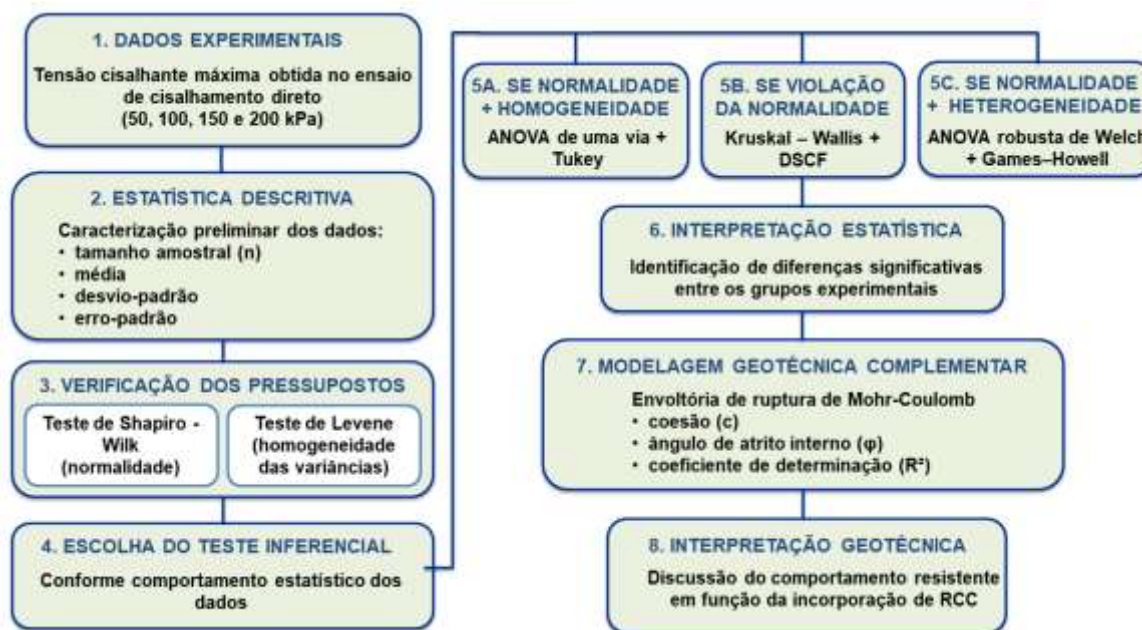
Os dados experimentais obtidos nos ensaios de cisalhamento direto passaram pela análise estatística com auxílio do software Jamovi, ambiente estatístico baseado na linguagem R, manuseado para organização dos dados, obtenção de estatísticas descritivas, verificação de pressupostos e aplicação de testes inferenciais. A aplicação de ferramentas estatísticas teve como finalidade conferir maior confiabilidade à interpretação dos resultados experimentais, permitindo distinguir variações inerentes ao processo experimental de diferenças associadas ao comportamento mecânico do solo natural e das misturas solo–resíduo de construção civil (RCC).

A análise estatística ocorreu considerando os princípios da estatística aplicada à engenharia, segundo os quais a variabilidade dos dados experimentais deve ser descrita, analisada e interpretada por meio de métodos adequados de inferência estatística, especialmente quando se comparam grupos experimentais independentes (Montgomery; Runger, 2018; Triola, 2017; Larson; Farber, 2015). Montgomery e Runger (2018)

destacam a importância da estatística aplicada na análise de dados experimentais em engenharia, incluindo estatística descritiva, testes de hipóteses, regressão e análise de variância.

A estratégia metodológica adotada encontra-se sintetizada na Figura 6, que apresenta o fluxograma da análise estatística aplicada aos resultados experimentais.

Figura 6. Fluxo Metodológico da Análise Estatística



Fonte: Autor (2026)

Os dados foram organizados conforme os grupos experimentais correspondentes ao solo natural, solo + 20% de RCC e solo + 35% de RCC, considerando separadamente os níveis de tensão normal aplicados nos ensaios de cisalhamento direto: 50, 100, 150 e 200 kPa. Em todas as análises estatísticas, adotou-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), critério usual em testes de hipóteses para avaliação da rejeição ou não rejeição da hipótese nula (Triola, 2017; Larson; Farber, 2015).

3.6.1 Estatística Descritiva

Inicialmente, realizou-se análise estatística descritiva dos resultados experimentais, com o objetivo de caracterizar preliminarmente o comportamento dos dados, avaliar sua dispersão e identificar a tendência central dos valores de resistência ao

cisalhamento. Para cada grupo experimental e nível de tensão normal foram determinados:

- média aritmética;
- desvio padrão;
- erro padrão da média;
- coeficiente de variação (CV);
- valores mínimo e máximo.

A estatística descritiva constitui etapa inicial fundamental da análise de dados, pois permite sintetizar numericamente o comportamento das amostras, avaliar a variabilidade experimental e subsidiar a escolha dos procedimentos inferenciais posteriores (Larson; Farber, 2015; Triola, 2017). Larson e Farber (2015) apresentam a estatística descritiva como parte essencial da organização, resumo e interpretação inicial dos dados, incluindo medidas de tendência central e de variação.

3.6.2 Verificação da Normalidade dos Dados

A normalidade dos dados avaliada por meio do teste de Shapiro–Wilk, adotando-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). A aplicação desse teste permitiu verificar a aderência dos dados à distribuição normal, etapa fundamental para a definição dos métodos estatísticos utilizados nas análises subsequentes (Larson; Farber, 2015).

A hipótese nula do teste considera que os dados seguem distribuição normal, sendo interpretada da seguinte forma:

- $p > 0,05$: dados com distribuição normal
- $p \leq 0,05$: dados sem distribuição normal

A verificação da normalidade é importante porque a escolha entre métodos paramétricos e não paramétricos depende, em parte, do atendimento a esse pressuposto. Field (2018) destaca que a análise da normalidade, associada à inspeção de pressupostos estatísticos, é etapa relevante antes da aplicação de modelos lineares, ANOVA e testes de comparação entre grupos.

3.6.3 Homogeneidade das Variâncias

A homogeneidade das variâncias entre os grupos avaliada por meio do teste de Levene, que verifica se as variâncias dos diferentes conjuntos de dados são estatisticamente equivalentes. A hipótese nula considera variâncias homogêneas, sendo interpretada como:

- $p > 0,05$: variâncias homogêneas;
- $p \leq 0,05$: variâncias heterogêneas.

Esse pressuposto é relevante para a aplicação da ANOVA tradicional, uma vez que a comparação entre médias por métodos paramétricos pressupõe, em geral, normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias. Quando esse pressuposto não é atendido, recomenda-se a adoção de procedimentos mais robustos, como a ANOVA de Welch e testes pós-hoc apropriados para variâncias desiguais (Field, 2018; Hair *et al.*, 2019).

3.6.4 Seleção dos Testes Inferenciais

A escolha do método estatístico inferencial foi realizada individualmente para cada nível de tensão normal analisado, considerando os resultados dos testes de normalidade e homogeneidade das variâncias. Essa estratégia permitiu selecionar o procedimento mais adequado para cada condição experimental, evitando a aplicação indiscriminada de um único teste estatístico.

- Quando os dados apresentaram distribuição normal e homogeneidade das variâncias, utilizou-se a análise de variância a um fator (ANOVA one-way), seguida do teste de Tukey;
- Quando foi observada violação do pressuposto de normalidade, empregou-se o teste não paramétrico de Kruskal–Wallis, seguido do procedimento DSCF;
- Quando os dados apresentaram distribuição normal, porém com heterogeneidade das variâncias, utilizou-se a ANOVA de Welch, seguida do teste de Games–Howell.

A ANOVA é indicada para comparar médias de três ou mais grupos independentes quando os pressupostos paramétricos são atendidos, enquanto o teste de Kruskal–Wallis constitui alternativa não paramétrica para comparação de grupos independentes quando há violação da normalidade (Montgomery; Runger, 2018; Field, 2018; Larson; Farber, 2015). A ANOVA de Welch, por sua vez, é apropriada quando há heterogeneidade das variâncias entre grupos, pois apresenta maior robustez em condições heterocedásticas (Field, 2018).

A hipótese nula considera ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos experimentais avaliados.

- $p > 0,05$: ausência de diferença estatisticamente significativa;
- $p \leq 0,05$: existência de diferença estatisticamente significativa.

Com base nos pressupostos estatísticos observados experimentalmente, foram definidos os testes inferenciais apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Testes estatísticos adotados conforme os pressupostos avaliados

Tensão Normal	Normalidade	Homogeneidade	Teste estatístico adotado
50 kPa	Sim	Sim	ANOVA + Tukey
100 kPa	Não	Sim	Kruskal–Wallis + DSCF
150 kPa	Sim	Não	Welch + Games-Howell
200 kPa	Sim	Não	Welch + Games-Howell

Fonte: Autor (2026)

Essa abordagem permitiu a seleção do método estatístico mais apropriado para cada condição experimental, aumentando a confiabilidade das inferências realizadas e reduzindo o risco de interpretações decorrentes da aplicação inadequada de testes estatísticos aos dados experimentais (Montgomery; Runger, 2018; Field, 2018).

3.6.5 Comparações Múltiplas

Quando identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os grupos experimentais, foram aplicados testes de comparações múltiplas compatíveis com a condição estatística observada. Nos casos em que as condições de normalidade e homogeneidade das variâncias foram atendidos, utilizou-se o teste de Tukey HSD, adequado para comparações par a par entre médias em análises paramétricas.

Nas situações em que os dados apresentaram normalidade, porém variâncias heterogêneas, adotou-se o teste de Games–Howell, recomendado para comparações múltiplas entre grupos independentes quando não se assume igualdade das variâncias. Para os conjuntos experimentais que não atenderam ao pressuposto de normalidade, as comparações múltiplas foram realizadas pelo procedimento Dwass–Steel–Critchlow–Fligner (DSCF), associado ao teste de Kruskal–Wallis.

Esses procedimentos permitiram identificar especificamente quais grupos experimentais apresentaram diferenças estatisticamente significativas em relação à resistência ao cisalhamento obtida nos ensaios realizados, possibilitando uma interpretação mais consistente do efeito da incorporação do RCC no comportamento mecânico dos materiais.

3.6.6 Análise de Regressão Linear e Envoltória de Mohr–Coulomb

Como complemento à análise estatística inferencial, realizou-se regressão linear entre os valores de tensão normal aplicada e tensão cisalhante máxima obtidos experimentalmente, visando à determinação dos parâmetros da envoltória de ruptura segundo o critério clássico de Mohr–Coulomb. A relação entre tensão normal e resistência ao cisalhamento foi interpretada conforme a Equação 05.

$$\text{Equação 05} \quad \tau_f = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi)$$

onde:

- τ_f = tensão de cisalhamento na ruptura
- c = coesão
- σ_n = tensão normal

- ϕ = ângulo de atrito interno

Os ajustes lineares foram conduzidos com auxílio do software OriginPro e complementados pelas análises de regressão no Jamovi, permitindo a obtenção dos coeficientes de determinação (R^2), dos coeficientes angulares das envoltórias resistentes e dos parâmetros geotécnicos de resistência ao cisalhamento.

Com isso, procederam-se a verificações complementares dos pressupostos dos modelos lineares ajustados, incluindo a análise da normalidade dos resíduos e da homogeneidade das variâncias residuais, com o objetivo de avaliar a adequação estatística dos ajustes obtidos. Os elevados coeficientes de determinação observados nos modelos lineares indicaram adequada representação experimental do comportamento resistente dos materiais segundo o critério clássico de Mohr–Coulomb.

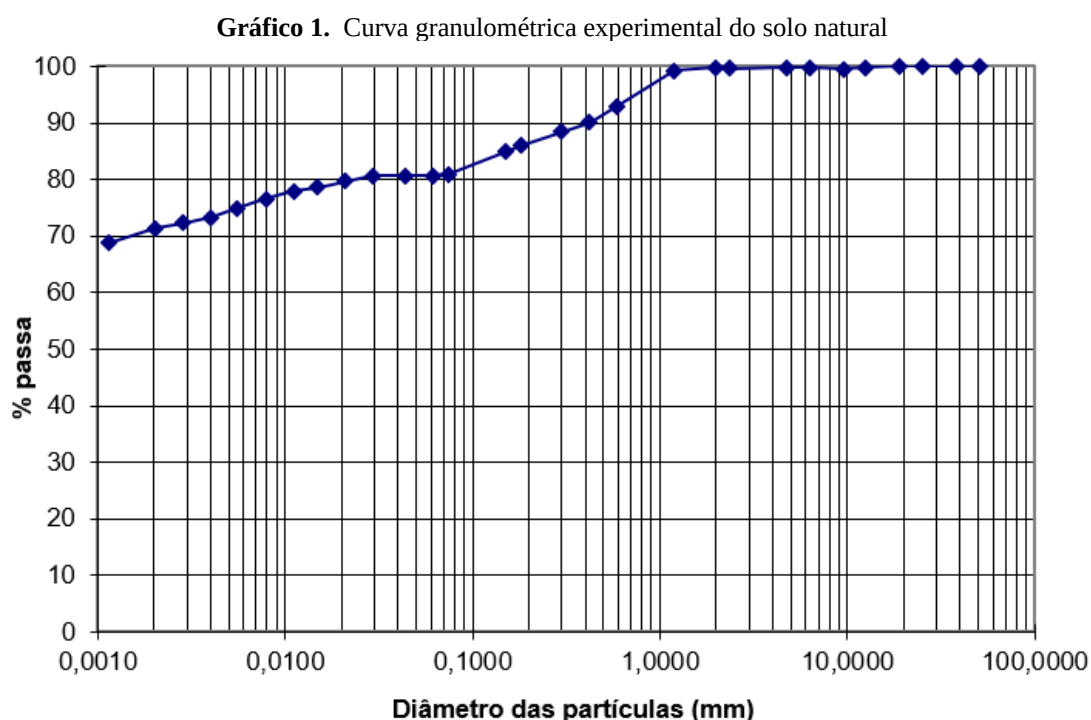
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Geotécnica dos Materiais

4.1.1 Granulometria

A análise granulométrica constitui uma das principais etapas da caracterização geotécnica dos materiais, pois permite avaliar a distribuição das partículas em diferentes faixas de tamanho e compreender sua influência sobre propriedades como plasticidade, compactação, resistência mecânica e capacidade de suporte. Segundo Pinto (2015), Das e Sobhan (2019) e Caputo *et al.* (2022), a composição granulométrica exerce papel fundamental no comportamento dos solos e materiais granulares, pois influencia o arranjo das partículas, a distribuição dos vazios e os mecanismos de interação entre os grãos.

O gráfico 1 apresenta a curva granulométrica experimental do solo natural. Considerando a média dos cinco ensaios realizados, o material apresentou 72,06% de argila, 16,44% de silte e 11,46% de areia total. Esses resultados caracterizam o solo natural como predominantemente fino, com elevada participação da fração argila, seguida pela fração silte e por menor quantidade de partículas arenosas.

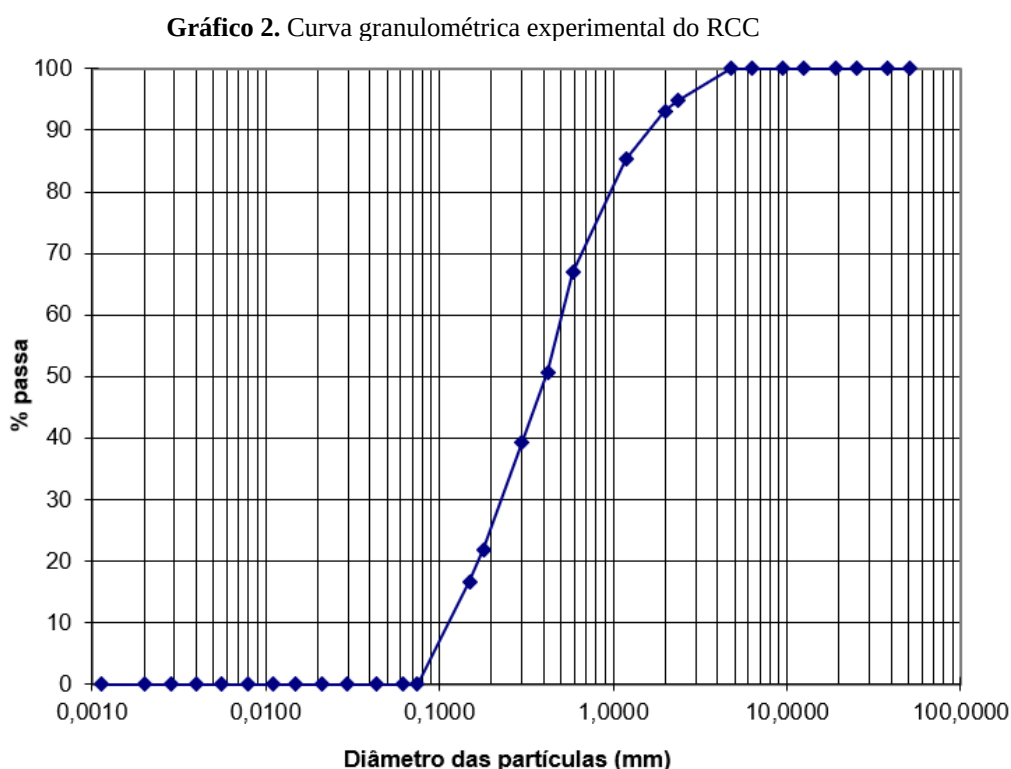


Fonte: Autor (2026)

A predominância de partículas finas é compatível com características frequentemente relatadas para solos da região de Manaus, formados sob processos intensos de intemperismo químico em ambiente tropical úmido. Estudos desenvolvidos por Machado (2019), Almeida, D. D. A. (2025) e Silva, J. R. S. (2025) também identificaram elevada participação de frações finas em solos investigados na região amazônica. A literatura relata a presença frequente de caulinita em solos amazônicos; entretanto, como não foi realizada caracterização mineralógica do solo desta pesquisa, não se pode afirmar diretamente a presença desse argilomineral na amostra estudada.

Sob a perspectiva geotécnica, a elevada participação da fração argila sugere maior superfície específica e capacidade de retenção de água, características normalmente relacionadas a maiores limites de consistência e maior sensibilidade às variações de umidade. Esses aspectos podem influenciar o comportamento mecânico do material, sua capacidade de suporte e sua resposta quando submetido a carregamentos.

O gráfico 2 apresenta a curva granulométrica experimental do RCC utilizado nesta pesquisa. O material apresentou predominância de partículas na faixa correspondente à areia e reduzida participação de materiais finos. Essa distribuição é compatível com a natureza granular do resíduo previamente beneficiado.

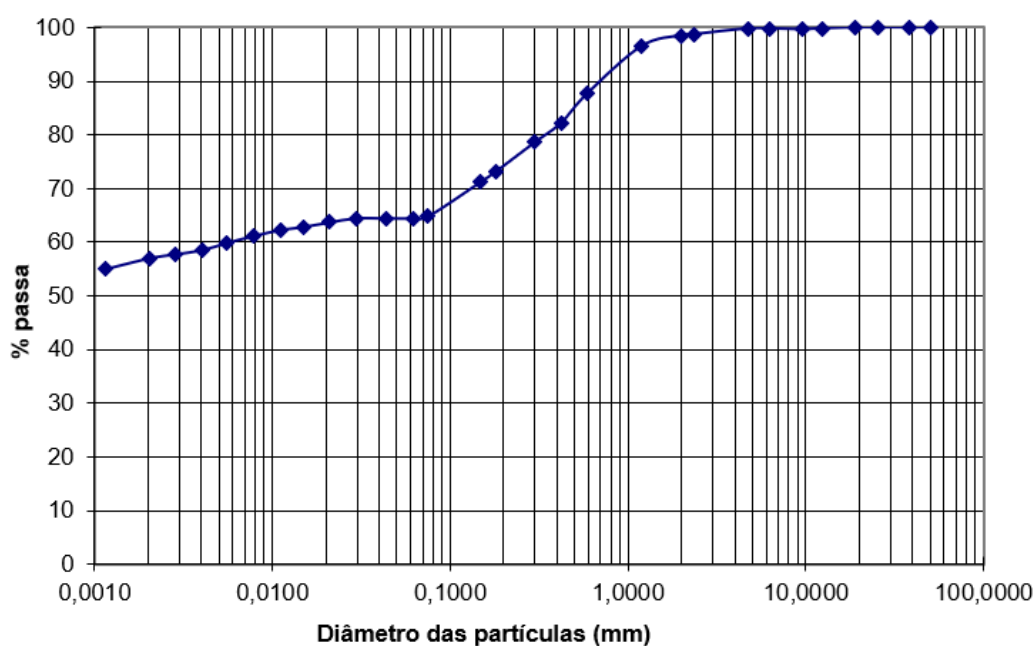


Fonte: Autor (2026)

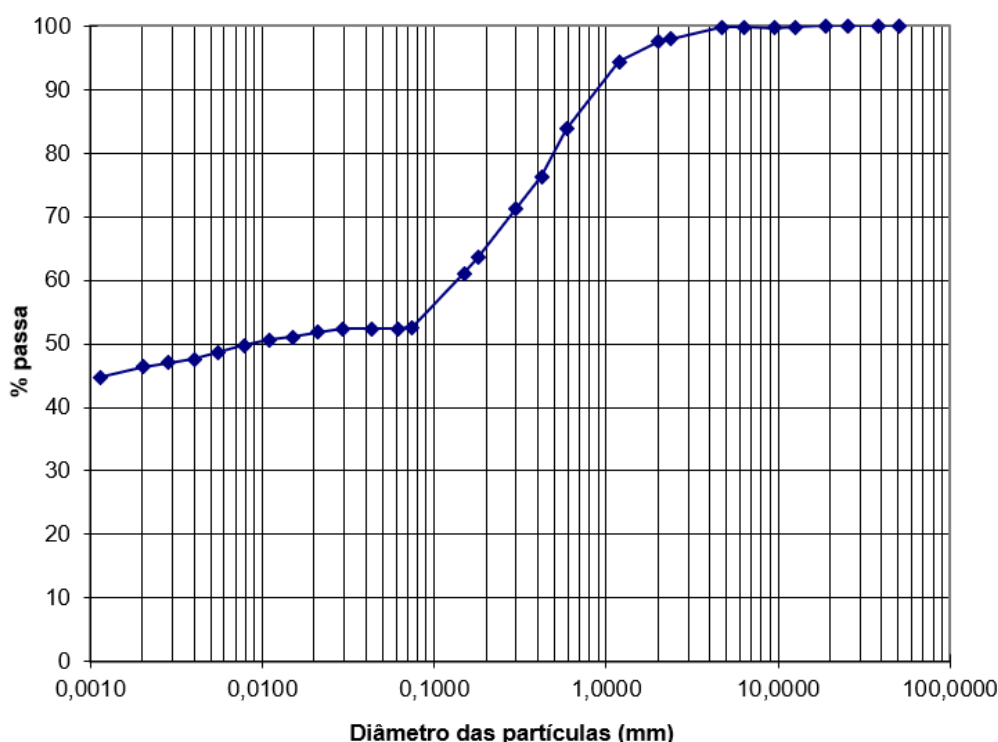
As curvas granulométricas das misturas contendo 20% e 35% de RCC não foram obtidas por ensaios granulométricos diretos. Elas foram estimadas por composição teórica ponderada, com base nas curvas experimentais do solo natural e do RCC e nas respectivas proporções mássicas. Portanto, os gráficos 3 e 4 representam distribuições granulométricas calculadas e não resultados de ensaios realizados diretamente nas misturas.

A composição teórica da mistura com 20% de RCC indicou deslocamento da curva em direção às partículas de maior diâmetro, com redução proporcional da fração fina e aumento da participação da fração arenosa. Para a mistura com 35% de RCC, a estimativa indicou intensificação dessa alteração, em razão da maior substituição mássica do solo natural pelo material granular reciclado.

Gráfico 3. Curva granulométrica teórica da mistura do solo + 20 % de RCC



Fonte: Autor (2026)

Gráfico 4. Curva granulométrica teórica da mistura do solo + 35 % de RCC

Fonte: Autor (2026)

O gráfico 5 reúne as curvas granulométricas experimentais do solo natural e do RCC e as curvas estimadas teoricamente para as misturas. A comparação evidencia que o RCC apresenta maior concentração de partículas na faixa arenosa e menor participação de finos do que o solo natural. Consequentemente, o aumento da proporção de RCC no cálculo das misturas produziu deslocamento progressivo das curvas teóricas em direção às partículas de maior diâmetro.

Com base na composição teórica ponderada, o percentual estimado de material passante na peneira nº 200 diminuiu de 80,98% no solo natural para 64,79% na mistura com 20% de RCC e 52,64% na mistura com 35% de RCC. Esses valores representam estimativas decorrentes das proporções mássicas adotadas e indicam a redução esperada da participação relativa da fração fina com o aumento do teor de RCC. Entretanto, como não foram realizados ensaios granulométricos diretamente nas misturas, essas estimativas não incorporam possíveis variações decorrentes da preparação, da segregação ou da interação física entre os materiais.

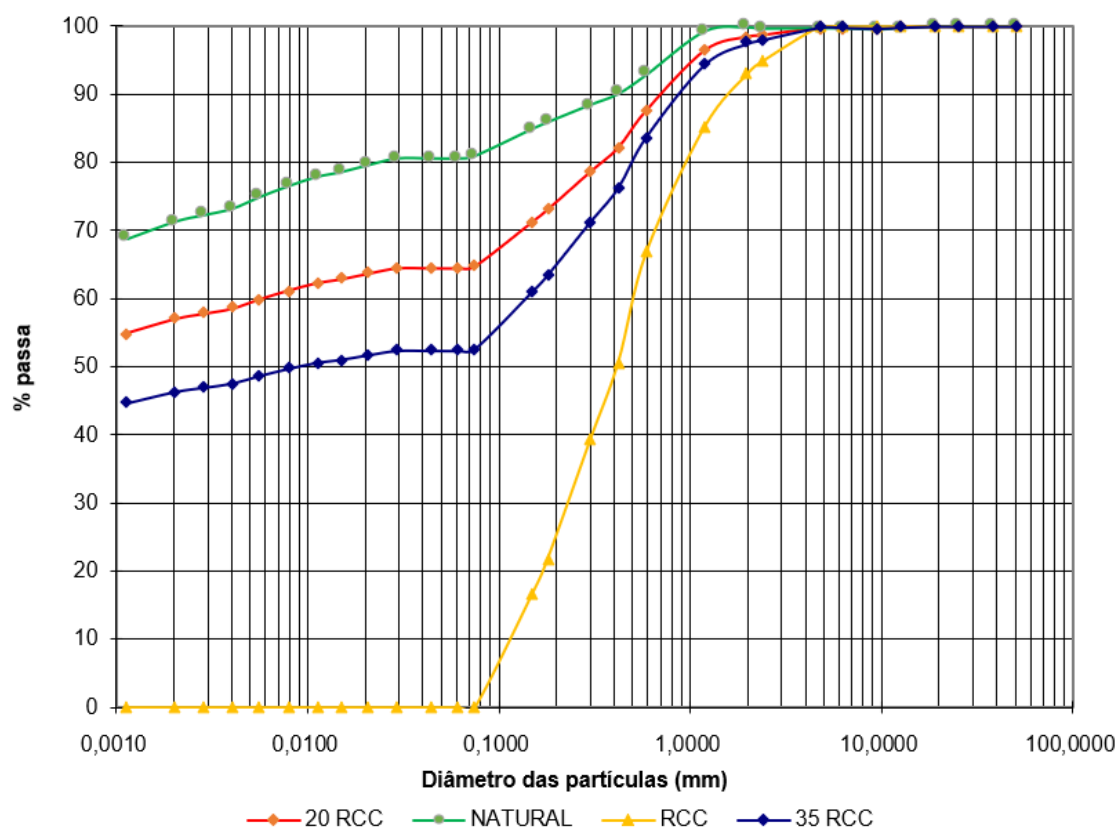
A tendência indicada pelas composições teóricas é coerente com os resultados apresentados por Ma *et al.* (2022b), Hidalgo *et al.* (2023), Ahmadpour *et al.* (2025) e Khan *et al.* (2024), que relacionaram a incorporação de resíduos granulares em solos finos

à redução proporcional da fração fina e ao aumento da participação de partículas de maiores dimensões.

A comparação com Castro *et al.* (2019) evidencia proximidade entre as frações argilosas dos solos naturais estudados em Manaus. Nesta pesquisa, o solo natural apresentou 72,06% de argila, 16,44% de silte e 11,46% de areia, enquanto o material investigado pelos autores apresentou 72,95% de argila, 23,87% de silte e 3,18% de areia. A diferença mais expressiva ocorreu na distribuição entre as frações silte e areia, enquanto a participação da argila permaneceu próxima nos dois materiais.

Após a incorporação de 5% de vidro, Castro *et al.* (2019) obtiveram 92,90% de finos na mistura com vidro processado em moinho de bolas e 93,31% na composição com vidro processado em moinho de alta energia. Nesta pesquisa, os percentuais estimados de material passante na peneira nº 200 foram de 64,79% para a mistura com 20% de RCC e 52,64% para a composição com 35%. A redução mais acentuada estimada para as misturas solo–RCC está relacionada, entre outros fatores, aos maiores teores incorporados e à natureza predominantemente granular do RCC. Essa comparação deve ser considerada contextual, pois as curvas das misturas desta pesquisa foram calculadas por composição teórica ponderada, enquanto Castro *et al.* (2019) realizaram ensaios granulométricos diretamente nas composições com vidro.

Gráfico 5. Curvas granulométricas experimental do solo natural e do RCC e curvas teóricas estimadas para as misturas solo-RCC



Fonte: Autor (2026)

4.1.2 Limites de Atterberg e Classificação Geotécnica

Os resultados do Limite de Liquidez mostraram redução expressiva com o aumento do teor de RCC incorporado às misturas. O solo natural apresentou LL médio de 81,33%, enquanto as misturas contendo 20% e 35% de RCC apresentaram valores de 47,75% e 40,00%, respectivamente. Esses resultados correspondem a reduções aproximadas de 41,3% e 50,8% em relação ao solo natural, evidenciando a influência da substituição parcial da fração fina por um material predominantemente granular.

Resultados semelhantes foram reportados por Machado (2019), que avaliou um solo representativo da região amazônica e encontrou LL igual a 83%. De forma semelhante, Almeida, D. D. A. (2025) e Silva, J. R. S. (2025) também observaram elevados índices de consistência em solos finos da região de Manaus, reforçando o comportamento característico desses materiais tropicais altamente intemperizados. A comparação entre os resultados da presente pesquisa e os valores reportados na literatura é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Comparação dos valores de Limite de Liquidez com estudos da literatura

Autor	Material	LL (%)
Machado (2019)	Solo amazônico	83,00
Almeida, D. D. A. (2025)	Solo de Manaus	82,00
Silva, J. R. S. (2025)	Solo de Manaus	81,00
Presente pesquisa	Solo de Manaus	81,33

Fonte: Autor (2026).

Por outro lado, a incorporação do RCC promoveu redução do Limite de Liquidez, comportamento frequentemente associado à substituição parcial da fração argilosa por partículas de natureza granular. Comparativamente ao solo natural, a mistura contendo 20% de RCC apresentou redução aproximada de 41,3% no valor de LL, enquanto a mistura com 35% de RCC apresentou redução de aproximadamente 50,8%.

No caso do Limite de Plasticidade também os resultados mostram redução progressiva do Limite de Plasticidade com o aumento do teor de RCC incorporado às misturas. O solo natural apresentou LP médio de 41,31%, enquanto as misturas contendo 20% e 35% de RCC apresentaram valores de 36,25% e 28,71%, respectivamente. Em relação ao solo natural, essas reduções correspondem a aproximadamente 12,2% e 30,5%. A diminuição observada no LP está associada à substituição parcial da fração argilosa por partículas predominantemente granulares provenientes do RCC. Como essas partículas apresentam menor superfície específica e menor capacidade de adsorção de água, ocorre redução da umidade necessária para que o material atinja o estado plástico.

Resultados semelhantes foram observados em estudos realizados com solos amazônicos. MACHADO (2019) encontrou LP de 41% para um solo argiloso representativo da região amazônica, enquanto Almeida, D. D. A. (2025) e Silva, J. R. S. (2025) obtiveram valores próximos de 41%, demonstrando comportamento compatível com o observado na presente pesquisa. A comparação entre os resultados é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Comparação dos valores de Limite de Plasticidade com estudos da literatura

Autor	Material	LP (%)
Machado (2019)	Solo amazônico	41,00
Almeida, D. D. A. (2025)	Solo de Manaus	41,00
Silva, J. R. S. (2025)	Solo de Manaus	40,53
Presente pesquisa	Solo de Manaus	41,31

Fonte: Autor (2026).

O Índice de Plasticidade (IP) corresponde à diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade, representando a faixa de umidade na qual o solo apresenta comportamento plástico. Os resultados demonstraram redução do Índice de Plasticidade após a incorporação do RCC. O solo natural apresentou IP médio de 40,02%, enquanto as misturas contendo 20% e 35% de RCC apresentaram valores de 11,50% e 11,29%, respectivamente. Comparativamente ao solo natural, a incorporação de 20% de RCC promoveu redução aproximada de 71,3% no IP, enquanto a mistura contendo 35% de RCC apresentou redução de aproximadamente 71,8%. Observa-se elevada concordância entre os resultados da presente pesquisa e aqueles reportados por Machado (2019), Almeida, D. D. A. (2025) e Silva, J. R. S. (2025). Os valores de IP variaram entre aproximadamente 40% e 42%, evidenciando comportamento típico de solos argilosos altamente plásticos da região amazônica como mostra na Tabela 6.

Tabela 6. Comparação dos Limites de Atterberg com estudos da literatura

Autor	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Machado (2019)	83,00	41,00	42,00
Almeida, D. D. A. (2025)	82,00	41,00	41,00
Silva, J. R. S. (2025)	81,00	40,53	40,47
Autor (2026)	81,33	41,31	40,02

Fonte: Autor (2026).

Partindo dos dados apresentados, referentes aos limites de Atterberg e a granulometria, obteve-se a classificação geotécnica dos materiais pelo sistema TRB/AASHTO, que indicou: Solo Natural e Solo + 20% RCC como A7-5, e Solo + 35% RCC tipificado como A6, segundo Das e Sobhan (2019) e Caputo *et al.* (2022).

Os valores obtidos para o solo natural apresentaram elevada proximidade com os resultados de Castro *et al.* (2019), que também investigaram um solo argiloso de Manaus. Nesta pesquisa, foram obtidos $LL = 81,33\%$, $LP = 41,31\%$ e $IP = 40,02\%$, enquanto os autores registraram $LL = 80,27\%$, $LP = 40,29\%$ e $IP = 39,98\%$. As diferenças absolutas foram de apenas 1,06 ponto percentual no LL , 1,02 ponto percentual no LP e 0,04 ponto percentual no IP , indicando comportamento de consistência semelhante entre os solos naturais.

Apesar dessa proximidade inicial, as misturas apresentaram respostas distintas em função do tipo e do teor de resíduo. Como mostra na Tabela 7, Castro *et al.* (2019) obtiveram IP de 28,51% para a mistura com 5% de vidro processado em moinho de bolas e 24,67% para a composição com vidro pulverizado em moinho de alta energia, correspondendo a reduções de 28,69% e 38,29% em relação ao solo natural. Nesta pesquisa, os valores de IP diminuíram para 11,50% e 11,29% com a incorporação de 20% e 35% de RCC, representando reduções de aproximadamente 71,3% e 71,8%, respectivamente. A maior redução observada nas misturas solo–RCC deve ser interpretada considerando os maiores teores de substituição e as diferenças de granulometria, composição e beneficiamento dos resíduos, não constituindo uma comparação direta de superioridade entre os materiais estabilizantes.

Tabela 7. Comparação dos Limites de Atterberg com estudos da literatura com misturas

Estudo/material	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Presente pesquisa – solo natural	81,33	41,31	40,02
Presente pesquisa – 20% RCC	47,75	36,25	11,50
Presente pesquisa – 35% RCC	40,00	28,71	11,29
Castro <i>et al.</i> – solo natural	80,27	40,29	39,98
Castro <i>et al.</i> – 5% vidro, moinho de bolas	64,52	36,01	28,51
Castro <i>et al.</i> – 5% vidro, alta energia	60,00	35,33	24,67

Fonte: Autor (2026).

4.1.3 Massa Específica dos Sólidos

A massa específica dos sólidos (G_s) constitui um importante parâmetro de caracterização geotécnica, representando a relação entre a massa dos grãos sólidos e a

massa de igual volume de água destilada. Esse parâmetro está diretamente relacionado à composição mineralógica dos materiais e influencia diversos índices físicos utilizados na análise do comportamento geotécnico dos solos. Os resultados mostraram que o solo natural possui massa específica dos sólidos igual a $2,59 \text{ g/cm}^3$, valor compatível com solos argilosos tropicais desenvolvidos sob condições de intenso intemperismo químico. As misturas contendo RCC apresentaram incremento gradual desse parâmetro, alcançando valores de $2,63 \text{ g/cm}^3$ e $2,68 \text{ g/cm}^3$ para os teores de 20% e 35% de RCC, respectivamente.

A massa específica dos sólidos está diretamente associada à constituição mineralógica dos materiais. No caso do solo natural, os valores observados são compatíveis com a presença de minerais tipicamente encontrados em solos tropicais altamente intemperizados, como quartzo, caulinita, gibbsita e óxidos de ferro, cuja ocorrência é frequentemente relatada em solos da região. Segundo Das e Sobhan (2019), a composição mineralógica exerce influência direta sobre a massa específica dos sólidos dos solos, enquanto Pereira *et al.* (2020) destacam a predominância de caulinita, gibbsita e óxidos de ferro em solos tropicais brasileiros. Dessa forma, o valor de massa específica dos sólidos obtido para o solo natural mostra-se compatível com a mineralogia esperada para materiais desenvolvidos sob condições de intenso intemperismo químico.

Os valores encontrados também apresentam concordância com pesquisas desenvolvidas em solos da região amazônica. Machado (2019), ao estudar um solo argiloso representativo de Manaus, observou comportamento compatível com materiais ricos em frações finas e argilominerais típicos da região. Da mesma forma, Almeida (2025) e Silva (2025) reportaram valores de massa específica dos sólidos situados na faixa normalmente observada para solos tropicais altamente intemperizados, evidenciando a similaridade entre o solo desta pesquisa e outros depósitos naturais da Amazônia.

Observa-se ainda que a incorporação do RCC promoveu aumento progressivo da massa específica dos sólidos das misturas. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de partículas provenientes de concreto, argamassa e materiais cerâmicos, os quais apresentam densidades geralmente superiores às da fração argilosa predominante no solo natural. Dessa forma, o aumento do teor de RCC resultou em elevação gradual da densidade relativa dos constituintes sólidos das misturas.

4.2 Caracterização Física do RCC

A propriedade física do RCC é fundamental para compreender sua influência no comportamento geotécnico das misturas solo–RCC. Obteve-se para esse resíduo massa específica real média de 2,73 g/cm³, massa específica aparente média de 2,08 g/cm³ e absorção média de água de 11,41%. Tais dados evidenciam que esse material apresenta características físicas típicas de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição.

A diferença entre a massa específica real e a massa específica aparente evidencia a existência de vazios internos acessíveis e não acessíveis à água no interior das partículas recicladas. Segundo Knappett e Craig (2014) e Das e Sobhan (2019), materiais particulados que apresentam elevada porosidade interna tendem a exibir valores de massa específica aparente inferiores à massa específica dos sólidos, comportamento frequentemente observado em agregados reciclados contendo frações de concreto e materiais cerâmicos.

Khan *et al.* (2024), em revisão abrangente sobre a utilização de agregados reciclados em bases e sub-bases de pavimentos, destacam que os materiais oriundos de resíduos de construção e demolição geralmente apresentam menores valores de massa específica aparente e maiores índices de absorção de água quando comparados aos agregados naturais, comportamento diretamente relacionado à sua maior porosidade interna.

A absorção média igual a 11,41% obtida indica a elevada porosidade característica dos agregados reciclados. Esse valor é superior aos normalmente encontrados em agregados naturais utilizados em pavimentação, os quais frequentemente apresentam absorções inferiores a 3%. Segundo Bordoloi, Afolayan e Ng (2022), essa maior capacidade de absorção está associada à presença de argamassa aderida aos fragmentos de concreto, microfissuras geradas durante os processos de britagem e à incorporação de partículas cerâmicas naturalmente mais porosas.

Estudos realizados por Tavakoli Mehrjardi *et al.* (2020) demonstraram que materiais reciclados provenientes de resíduos de construção apresentam propriedades físicas e mecânicas compatíveis com os requisitos exigidos para utilização em camadas de pavimentação, especialmente em aplicações como sub-base e reforço de subleito. De maneira semelhante, Wang *et al.* (2021) verificaram que agregados reciclados empregados como material de preenchimento em obras viárias apresentam

comportamento satisfatório, reforçando seu potencial de utilização em infraestrutura rodoviária.

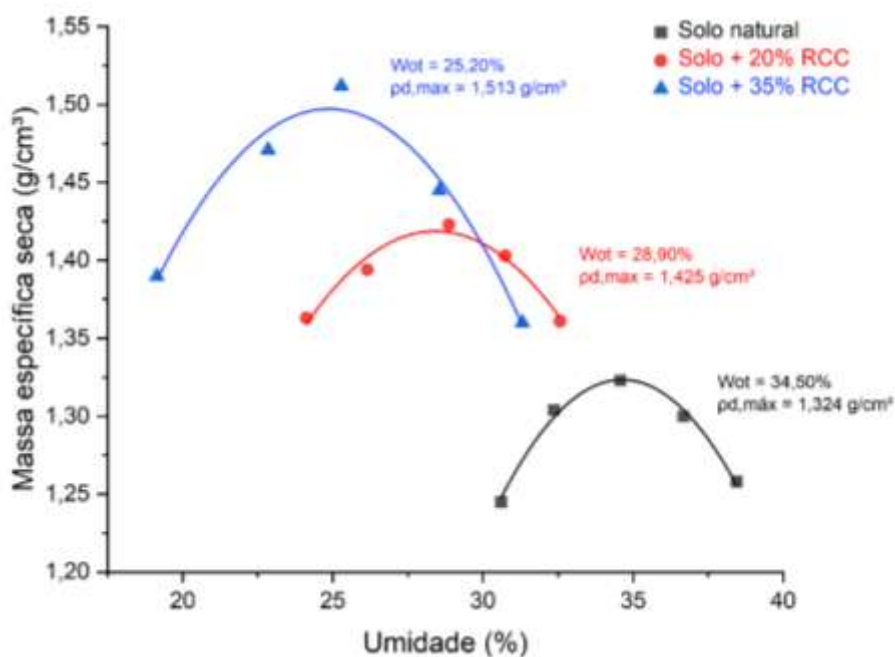
No contexto brasileiro, Silva *et al.* (2019a) observaram que a incorporação de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição promove redução da fração fina dos solos, diminuição da plasticidade e alterações favoráveis nos parâmetros hidromecânicos, indicando que o comportamento do material é fortemente influenciado pelas características físicas dos agregados reciclados utilizados.

Dessa forma, os resultados indicam que o RCC utilizado apresenta características físicas compatíveis com aquelas descritas na literatura para agregados reciclados empregados em obras geotécnicas e rodoviárias.

4.3 Compactação

A compactação representa um dos parâmetros geotécnicos mais importantes para materiais destinados à pavimentação, pois influencia diretamente a densidade do solo, a redução dos vazios, a resistência mecânica e a capacidade de suporte das camadas estruturais. Os ensaios foram realizados segundo os procedimentos da ABNT NBR 7182:2025, empregando-se a energia Proctor Intermediária, cujos resultados estão apresentados no gráfico 6.

Gráfico 6. Curvas de compactação do solo natural e das misturas solo–RCC



Fonte: Autor (2026).

Os resultados evidenciaram que a incorporação do resíduo da construção civil (RCC) promoveu alterações nos parâmetros de compactação das misturas. Verificou-se redução progressiva da umidade ótima, passando de 34,50% para o solo natural para 28,90% na mistura contendo 20% de RCC e 25,20% na mistura contendo 35% de RCC. Paralelamente, observou-se aumento da massa específica seca máxima, que evoluiu de 1,324 g/cm³ no solo natural para 1,425 g/cm³ e 1,513 g/cm³ nas misturas contendo 20% e 35% de RCC, respectivamente.

Segundo Knappett e Craig (2014), os materiais mais granulares tendem a apresentar menores teores de umidade ótima e maiores massas específicas secas máximas quando comparados a solos predominantemente argilosos. Esse comportamento decorre da menor superfície específica das partículas granulares e da maior eficiência de empacotamento entre os grãos durante a aplicação da energia de compactação. A mesma interpretação é apresentada por Das e Sobhan (2019), que destacam que o aumento da fração granular em uma mistura promove melhoria da distribuição granulométrica e favorece o rearranjo das partículas, reduzindo o índice de vazios e elevando a densidade seca máxima alcançada após a compactação. Caputo *et al.* (2022) complementa que solos com elevada fração fina apresentam maior demanda de água para atingir a condição ótima de compactação, em razão da maior área superficial específica e das forças de adsorção associadas aos minerais argilosos. Assim, a substituição parcial da fração argilosa por partículas provenientes do RCC reduz a necessidade de água para lubrificação das partículas durante a compactação, justificando a diminuição observada na umidade ótima.

A evolução da densidade seca máxima observada nas misturas também pode ser associada ao aumento da massa específica dos sólidos, que passou de 2,59 no solo natural para 2,68 na mistura contendo 35% de RCC. De acordo com Knappett e Craig (2014), materiais com maior massa específica dos grãos tendem a apresentar maiores densidades secas após a compactação, desde que a distribuição granulométrica favoreça o empacotamento das partículas.

Os resultados experimentais obtidos neste estudo apresentam correspondência com diferentes pesquisas que avaliam o uso de resíduos da construção civil e agregados reciclados em aplicações geotécnicas e rodoviárias, embora as respostas de compactação possam variar conforme a natureza do solo, a composição do resíduo, o teor incorporado e a energia de compactação empregada. Ma *et al.* (2022), ao investigarem a estabilização de argilas de elevado limite de liquidez com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição, observaram alterações nos parâmetros de compactação e

melhorias no comportamento mecânico, incluindo resistência ao cisalhamento, e CBR. Entretanto, os autores também destacaram que a incorporação dos agregados reciclados reduziu tanto a umidade ótima quanto a densidade seca máxima do solo tratado, indicando que o efeito sobre a compactação não é uniforme para todos os materiais e depende das características da matriz solo-resíduo.

No contexto nacional, VIEIRA (2025) avaliou a estabilização de solo argiloso com RCC para aplicação em base e sub-base de pavimentos e verificou evolução nas propriedades físicas e mecânicas das misturas, incluindo parâmetros de compactação e capacidade de suporte (CBR), evidenciando o potencial do resíduo como material de estabilização para fins rodoviários.

Dessa forma, embora a tendência observada nesta pesquisa, redução da umidade ótima e aumento da massa específica seca máxima com a incorporação do RCC, seja coerente com a atuação do resíduo como corretivo granulométrico do solo estudado, a literatura indica que esse comportamento não deve ser generalizado.

A tendência observada também pode ser comparada aos resultados regionais apresentados por Castro *et al.* (2019). No estudo dos autores, o solo natural apresentou umidade ótima de 33,80% e peso específico aparente seco máximo de 15,0 kN/m³. Com a adição de 5% de vidro processado em moinho de bolas, a umidade ótima diminuiu para 32,68% e o peso específico seco máximo aumentou para 15,1 kN/m³. Na composição contendo vidro processado em moinho de alta energia, a umidade ótima diminuiu para 31,30%, acompanhada de aumento aproximado de 2% no peso específico seco máximo.

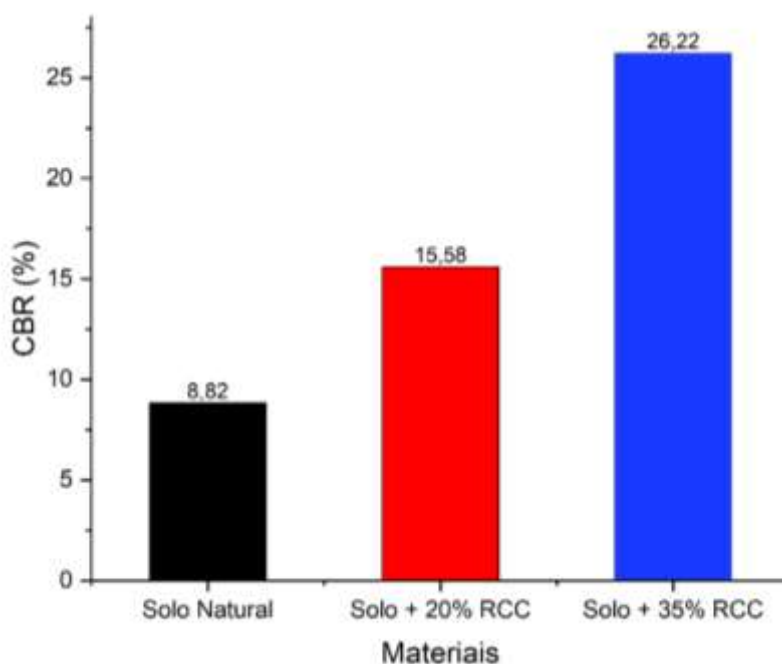
Nesta pesquisa, a umidade ótima diminuiu de 34,50% no solo natural para 28,90% e 25,20% nas misturas com 20% e 35% de RCC, respectivamente. Simultaneamente, a massa específica seca máxima aumentou de 1,324 g/cm³ para 1,425 g/cm³ e 1,513 g/cm³. Os dois estudos apresentaram, portanto, a mesma direção geral de resposta — redução da umidade ótima e aumento da densificação após a incorporação do resíduo —, embora a magnitude das alterações tenha sido diferente. Essa diferença está relacionada aos teores incorporados, à natureza dos resíduos, ao processamento das partículas e às condições de compactação empregadas, não sendo adequada uma comparação direta de desempenho entre as misturas.

4.4 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O Índice de Suporte Califórnia (California Bearing Ratio – CBR) é amplamente utilizado na avaliação da capacidade de suporte de solos destinados à execução de camadas de pavimentação. Esse parâmetro representa a resistência do material à penetração sob condições padronizadas de carregamento, sendo empregado como indicador da aptidão dos solos para utilização em subleitos, reforços de subleito, sub-bases e bases de pavimentos.

Conforme apresentado no gráfico 7, os resultados evidenciaram aumento significativo da capacidade de suporte (CBR) em função da incorporação do RCC. O solo natural apresentou valor médio de três ensaios igual a 8,82%. Esse comportamento é compatível com a elevada fração argilosa identificada na análise granulométrica e com os elevados valores de Limite de Liquidez observados anteriormente, características normalmente associadas a solos de baixa a moderada capacidade de suporte. A adição de RCC promoveu incremento expressivo nos valores de CBR. A mistura contendo 20% de RCC apresentou índice de suporte de 15,58%, enquanto a composição com 35% de RCC atingiu 26,22%. Em relação ao solo natural, esses resultados correspondem a aumentos aproximados de 76,6% e 197,3%, respectivamente.

Gráfico 7. Índice de Suporte Califórnia (CBR) dos materiais estudados



Fonte: Autor (2026).

O ganho observado pode ser atribuído à combinação de diversos mecanismos físicos decorrentes da incorporação do RCC. Conforme discutido nos tópicos anteriores, o resíduo promoveu redução da fração fina, aumento da participação de partículas granulares e melhoria da distribuição granulométrica das misturas. Essas alterações favoreceram o intertravamento mecânico entre as partículas e contribuíram para a formação de uma estrutura mais resistente à aplicação de cargas.

Os resultados de compactação também evidenciaram redução progressiva da umidade ótima e aumento da densidade seca máxima das misturas. A obtenção de estruturas mais densas e com menor índice de vazios favorece a transferência de tensões entre as partículas, contribuindo diretamente para o aumento da capacidade de suporte observado nos ensaios de CBR.

A evolução dos resultados evidencia uma relação direta entre o teor de RCC incorporado e o desempenho mecânico das misturas. Enquanto o solo natural apresentou comportamento típico de um material argiloso de baixa capacidade de suporte, a mistura contendo 35% de RCC atingiu valor de CBR aproximadamente três vezes superior ao do material original, demonstrando a eficiência do resíduo como agente de estabilização física.

Resultados semelhantes foram observados por Ma *et al.* (2022), Hidalgo *et al.* (2023), Ahmadvour *et al.* (2025) e Wang *et al.* (2021), que também reportaram aumentos nos valores de CBR e evolução da capacidade de suporte de materiais tratados com resíduos reciclados da construção civil. Tais autores atribuíram esse comportamento principalmente à correção granulométrica, ao aumento da densidade seca máxima e à redução da plasticidade dos materiais. Dessa forma, Khan *et al.* (2024) destacam o potencial dos agregados reciclados para aplicação em camadas de pavimentação, ressaltando os benefícios técnicos e ambientais associados à reutilização desses materiais.

Sob a ótica da engenharia rodoviária, os resultados obtidos indicam que a incorporação do RCC promoveu avanços relevantes na capacidade de suporte do solo estudado. O aumento progressivo dos valores de CBR demonstra que a estabilização física foi capaz de transformar um material originalmente caracterizado por baixa resistência em misturas com desempenho superior, ampliando seu potencial de utilização em camadas de pavimentação.

4.5 Resistência ao Cisalhamento Direto: Análise Estatística e Discussão Geotécnica

4.5.1 Ensaio de Cisalhamento Direto em Condição Não Inundada

A resistência ao cisalhamento constitui um dos principais parâmetros geotécnicos empregados na avaliação do comportamento mecânico de solos naturais e materiais estabilizados, sendo fundamental para a análise da estabilidade e do desempenho de materiais utilizados em obras de infraestrutura e pavimentação. Segundo Das e Sobhan (2019) e Caputo *et al.* (2022), a resistência ao cisalhamento representa a capacidade do solo resistir às tensões tangenciais aplicadas, constituindo um dos parâmetros mais importantes na Mecânica dos Solos.

No presente estudo, teve-se como objetivo avaliar os efeitos da incorporação do material reciclado sobre o comportamento mecânico do solo natural por meio do ensaio de cisalhamento direto, realizado com o solo natural e com misturas contendo 20% e 35% de resíduo de construção civil (RCC).

Embora os parâmetros da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ), constituam referências clássicas para interpretação geotécnica da resistência ao cisalhamento, a análise estatística inferencial foi conduzida diretamente sobre os valores experimentais de tensão cisalhante máxima obtidos em cada condição de ensaio.

Quando a inferência estatística é realizada exclusivamente sobre parâmetros derivados, como coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ), ocorre redução substancial da quantidade de informações disponíveis para análise, uma vez que tais parâmetros representam estimativas obtidas a partir do ajuste de modelos aos dados experimentais. Em contrapartida, a utilização direta dos valores observados preserva a variabilidade inerente aos ensaios e permite que as comparações estatísticas sejam realizadas sobre um conjunto mais amplo de observações, favorecendo inferências mais robustas (Montgomery; Runger, 2018).

Sob a perspectiva geotécnica, essa escolha também se mostra coerente. Segundo Das e Sobhan (2019), a resistência ao cisalhamento resulta da combinação entre a parcela coesiva e a parcela friccional, cuja mobilização depende diretamente da tensão normal aplicada. Dessa forma, a interpretação baseada diretamente na resposta experimental observada em cada nível de carregamento permite compreensão mais realista do comportamento resistente dos materiais avaliados.

Dessa forma, optou-se por realizar a análise estatística separadamente para cada nível de tensão normal aplicado no ensaio de cisalhamento direto (50, 100, 150 e 200 kPa), comparando-se diretamente o comportamento do solo natural, da mistura solo + 20% RCC e da mistura solo + 35% RCC sob condições equivalentes de carregamento.

A análise estatística inferencial foi conduzida com auxílio do software Jamovi, versão 2.6, adotando-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), conforme recomendações amplamente empregadas em experimentos de engenharia e análises inferenciais (Montgomery; Runger, 2018; Triola, 2017). Inicialmente, foram realizadas análises estatísticas descritivas para caracterização preliminar dos dados experimentais, seguidas da verificação dos pressupostos necessários à escolha do método inferencial mais adequado para cada condição experimental.

4.5.1.1 Resultados Experimentais do Ensaio e Estatística Descritiva em Condição Não Inundada

A Tabela 8 apresenta as estatísticas descritivas dos resultados de tensão cisalhante máxima obtidos para cada material nos quatro níveis de tensão normal aplicada. São apresentados o número de observações, a média, o desvio-padrão, o erro-padrão e o coeficiente de variação, permitindo caracterizar a tendência central e a dispersão dos dados experimentais e subsidiar a escolha dos procedimentos inferenciais subsequentes (Larson; Farber, 2015; Triola, 2017).

Tabela 8. Valores médios de tensão cisalhante máxima obtidos para cada material em função da tensão normal aplicada

Tensão normal (kPa)	Material	n	Média (kPa)	Desvio-padrão	Erro-padrão	CV(%)
50	Solo natural	16	188	8,00	2,00	4,26
50	Solo + 20% RCC	16	140	5,91	1,48	4,22
50	Solo + 35% RCC	16	152	5,45	1,36	3,59
100	Solo natural	16	221	7,07	1,77	3,20
100	Solo + 20% RCC	16	186	8,20	2,05	4,41
100	Solo + 35% RCC	16	175	6,43	1,61	3,67
150	Solo natural	16	242	10,55	2,64	4,36

150	Solo + 20% RCC	15	208	4,07	1,05	1,96
150	Solo + 35% RCC	16	196	12,15	3,04	6,20
200	Solo natural	16	280	10,72	2,68	3,83
200	Solo + 20% RCC	16	243	3,09	0,77	1,27
200	Solo + 35% RCC	16	229	8,51	2,13	3,72

Fonte: Autor (2026)

Os resultados descritivos evidenciaram aumento da resistência média ao cisalhamento com a elevação da tensão normal em todas as composições. No solo natural, as médias aumentaram de 188 kPa, sob tensão normal de 50 kPa, para 280 kPa, sob 200 kPa. Na mistura com 20% de RCC, os valores variaram de 140 a 243 kPa, enquanto, na mistura com 35% de RCC, variaram de 152 a 229 kPa.

O solo natural apresentou as maiores resistências médias em todos os níveis de tensão normal analisados. Sob 50 kPa, foram obtidas médias de 188 kPa para o solo natural, 152 kPa para a mistura com 35% de RCC e 140 kPa para a mistura com 20% de RCC. Portanto, nessa condição, a composição com 35% de RCC apresentou resistência média 12 kPa superior à obtida pela mistura com 20%.

Nas tensões normais de 100, 150 e 200 kPa, a relação entre as misturas foi invertida. Sob 100 kPa, a mistura com 20% de RCC apresentou média de 186 kPa, enquanto a composição com 35% apresentou 175 kPa. Sob 150 kPa, as médias foram de 208 e 196 kPa, respectivamente. Sob 200 kPa, foram obtidos 243 kPa para a mistura com 20% e 229 kPa para a mistura com 35%. Dessa maneira, entre as misturas investigadas, a composição com 20% de RCC apresentou resistências médias superiores às da mistura com 35% em três dos quatro níveis de tensão normal.

Os desvios-padrão variaram de 3,09 a 12,15 kPa, enquanto os erros-padrão ficaram entre 0,77 e 3,04 kPa. Os coeficientes de variação permaneceram inferiores a 10% em todos os grupos, variando de 1,27% a 6,20%, o que indica baixa dispersão relativa entre os resultados. Na mistura com 20% de RCC sob tensão normal de 150 kPa, foram consideradas 15 observações após a exclusão do valor discrepante, conforme detalhado na seção seguinte.

Embora a análise descritiva permita identificar as tendências das médias e da dispersão dos resultados, ela não determina, isoladamente, se as diferenças observadas entre os materiais são estatisticamente significativas. Por essa razão, a seção seguinte

apresenta a verificação dos pressupostos estatísticos e a definição dos testes inferenciais empregados em cada nível de tensão normal.

4.5.1.2 Verificação dos Pressupostos Estatísticos e Definição dos Testes Inferenciais

A escolha do método estatístico inferencial foi realizada a partir da verificação prévia dos pressupostos fundamentais exigidos pelos testes paramétricos, particularmente a normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias entre os grupos experimentais.

A normalidade foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk, amplamente recomendado para a verificação da aderência dos dados à distribuição normal, especialmente em conjuntos experimentais com número moderado de observações (Triola, 2017). Esse procedimento é amplamente empregado para avaliar os pressupostos necessários à aplicação de métodos paramétricos, contribuindo para a seleção adequada dos testes estatísticos subsequentes (Field, 2018; Hair *et al.*, 2019).

A hipótese nula do teste estabelece que os dados seguem distribuição normal, sendo interpretada da seguinte forma: $p > 0,05$ - manutenção do pressuposto de normalidade; e $p \leq 0,05$ - rejeição da normalidade.

A homogeneidade das variâncias foi avaliada pelo teste de Levene, amplamente utilizado para verificar a equivalência estatística entre as dispersões dos grupos experimentais antes da aplicação de testes paramétricos (Montgomery; Runger, 2018). Esse pressuposto é particularmente importante para a aplicação da análise de variância tradicional, uma vez que a homocedasticidade constitui condição necessária para a validade dos resultados inferenciais obtidos por esse método (Field, 2018). Sua interpretação foi conduzida, segundo: $p > 0,05$ - variâncias homogêneas; e $p \leq 0,05$ - heterogeneidade das variâncias. A definição do método inferencial foi realizada individualmente para cada nível de tensão normal, considerando o comportamento estatístico específico de cada conjunto experimental, conforme apresentado na Tabela 9.

Na condição de 50 kPa, os dados atenderam simultaneamente aos pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias. Dessa forma, aplicou-se a análise de variância clássica (ANOVA), seguida do teste *post hoc* de Tukey para comparações múltiplas, por se tratar de procedimento adequado para comparação de médias entre três

ou mais grupos independentes quando atendidos os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias (Montgomery; Runger, 2018; Field, 2018).

Na condição de 100 kPa, verificou-se violação do pressuposto de normalidade, embora as variâncias tenham permanecido homogêneas. Nessa situação, optou-se pela abordagem não paramétrica por meio do teste de Kruskal-Wallis, complementado pelas comparações múltiplas via procedimento Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF), por se tratar de alternativa adequada para comparação entre grupos independentes quando o pressuposto de normalidade não é atendido (Field, 2018; Triola, 2017).

Na condição de 150 kPa, após a exclusão do valor discrepante previamente identificado na mistura solo + 20% RCC, os dados passaram a atender ao pressuposto de normalidade, porém apresentaram heterogeneidade entre as variâncias experimentais. Em razão dessa configuração estatística, adotou-se a ANOVA de Welch, seguida do teste *post hoc* de Games-Howell, abordagem recomendada para comparações entre grupos independentes com variâncias desiguais, por apresentar maior adequabilidade em situações de heterogeneidade das variâncias (Montgomery; Runger, 2018; Field, 2018).

Na condição de 200 kPa, os dados atenderam ao pressuposto de normalidade, porém apresentaram heterogeneidade entre as variâncias, conduzindo igualmente à adoção da ANOVA de Welch, complementada pelo teste de Games-Howell, pelos mesmos critérios metodológicos adotados para a condição de 150 kPa.

Tabela 9. Síntese da verificação dos pressupostos estatísticos e definição dos testes inferenciais

Tensão	Normalidade	Homogeneidade	Teste
50	Sim	Sim	ANOVA + Tukey
100	Não	Sim	Kruskal + DSCF
150	Sim	Não	Welch + Games-Howell
200	Sim	Não	Welch + Games-Howell

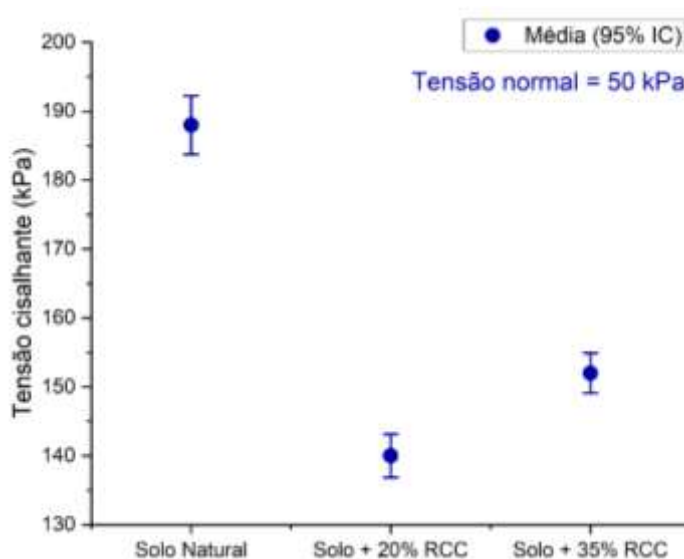
Fonte: Autor (2026)

4.5.1.3 Análise da Resistência ao Cisalhamento sob Tensão Normal de 50 kPa

Na condição de tensão normal de 50 kPa, os valores médios de tensão cisalhante máxima observados foram de 188 kPa para o solo natural, 140 kPa para a mistura solo + 20% RCC e 152 kPa para a mistura solo + 35% RCC, como mostrado no gráfico 8. A

análise de variância clássica (ANOVA) indicou diferença estatisticamente significativa entre os grupos experimentais ($F = 226$; $p < 0,001$).

Gráfico 8. Comparação da tensão cisalhante máxima dos materiais submetidos à tensão normal de 50 kPa



Fonte: Autor (2026)

O teste *post hoc* de Tukey confirmou que todas as comparações apresentaram diferenças estatísticas, demonstrando que a incorporação do RCC alterou de forma a resistência ao cisalhamento dos materiais mesmo sob baixa tensão normal. A ausência de sobreposição relevante entre os intervalos de confiança apresentados na Figura 4.8, reforça a distinção estatística observada entre os grupos experimentais.

Do ponto de vista geotécnico, esse comportamento é compatível com os princípios clássicos da mecânica dos solos. Segundo Knappett e Craig (2014), em baixos níveis de tensão confinante a resistência ao cisalhamento de solos argilosos compactados depende fortemente da contribuição da parcela coesiva, associada à estrutura da matriz fina e às forças de interação entre partículas. Nessa condição, a resistência por atrito ainda não se encontra plenamente mobilizada, fazendo com que a continuidade estrutural da fração argilosa exerça papel predominante no comportamento resistente.

Esse entendimento explica adequadamente o desempenho superior do solo natural, que apresentou resistência média de 188 kPa. Em comparação, as misturas contendo RCC apresentaram resistências médias de 140 kPa e 152 kPa para os teores de 20% e 35%, respectivamente. Em termos relativos, essas reduções correspondem a

aproximadamente 25,5% para a mistura solo + 20% RCC e 19,1% para a mistura solo + 35% RCC, evidenciando que a substituição parcial da matriz argilosa afetou a capacidade resistente do material sob baixo confinamento.

Segundo Das e Sobhan (2019), materiais com comportamento mais granular dependem principalmente da mobilização da resistência por atrito entre partículas, mecanismo cuja eficiência aumenta progressivamente com o incremento da tensão normal aplicada. Em condições de baixa tensão confinante, entretanto, a contribuição friccional ainda é limitada, o que reduz os benefícios associados à incorporação de agregados reciclados e favorece materiais que preservam maior parcela coesiva em sua estrutura.

Os resultados obtidos também encontram respaldo em pesquisas envolvendo a utilização de resíduos de construção e demolição em solos para aplicações geotécnicas. Silva *et al.* (2019a), ao avaliarem misturas contendo 10%, 20% e 30% de agregado miúdo reciclado de RCD, observaram redução das frações finas e da plasticidade do solo. As análises microestruturais mostraram que as partículas finas do solo se agregaram às partículas do resíduo, formando flóculos e grumos de maiores dimensões. Nos ensaios de cisalhamento direto, a incorporação de até 20% de RCD produziu pequenas alterações na coesão e no ângulo de atrito interno, enquanto o teor de 30% resultou em redução da coesão e aumento do ângulo de atrito. Esses resultados demonstram que a incorporação do RCD modifica o equilíbrio entre as parcelas coesiva e friccional, sem implicar necessariamente aumento da resistência global da mistura.

De forma semelhante, Ma *et al.* (2022), avaliando a estabilização de argilas de elevado limite de liquidez com resíduos de construção e demolição, verificaram que o aumento do teor de agregado reciclado promove alterações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Os autores observaram aumento progressivo do ângulo de atrito interno e comportamento variável da coesão, demonstrando que a incorporação de agregados reciclados modifica o equilíbrio entre os mecanismos resistentes coesivos e friccionais.

Outro aspecto relevante refere-se ao fato de a mistura contendo 35% de RCC apresentar resistência média superior à observada para a mistura contendo 20% de RCC nessa condição específica de carregamento. Embora ambas tenham apresentado desempenho inferior ao solo natural, esse resultado sugere que, sob baixa tensão normal, a maior presença de partículas recicladas pode ter favorecido contatos interparticulares e mecanismos locais de intertravamento, contribuindo para uma mobilização parcial da resistência friccional.

Esse comportamento encontra suporte nos resultados apresentados por Hidalgo *et al.* (2023), que verificaram aumento da resistência mecânica de misturas solo-resíduo à medida que os materiais reciclados passaram a contribuir para a formação de uma estrutura granulometricamente mais estável. Os autores destacam que a interação entre partículas finas e granulares pode produzir respostas distintas dependendo da proporção utilizada e do nível de carregamento aplicado.

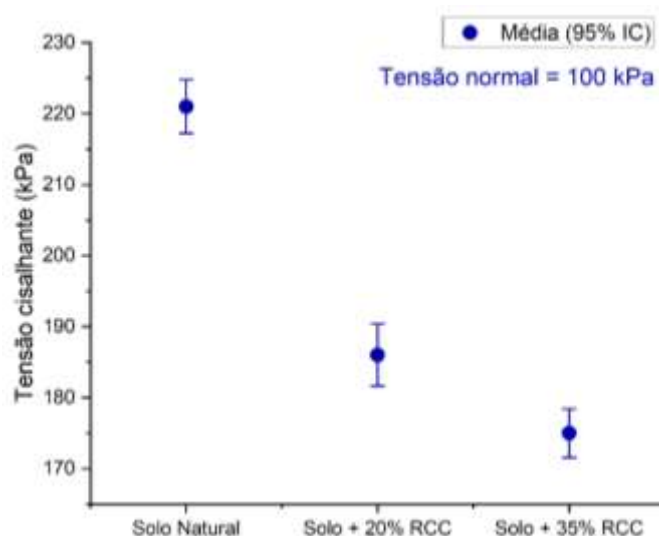
Sob a perspectiva da engenharia de pavimentos, os resultados obtidos para 50 kPa representam uma condição de baixo confinamento, frequentemente associada às regiões mais superficiais das camadas do pavimento ou a situações em que os mecanismos de confinamento ainda não foram plenamente mobilizados. Nesse contexto, a preservação da matriz fina mostrou-se fundamental para o desenvolvimento da resistência ao cisalhamento, justificando o melhor desempenho do solo natural.

Assim, os resultados obtidos sob tensão normal de 50 kPa evidenciam que a incorporação do RCC alterou os mecanismos resistentes mobilizados durante o cisalhamento. Em condições de baixo confinamento, a predominância da contribuição coesiva favoreceu o desempenho do solo natural. Entretanto, o comportamento observado nas misturas indica que a participação dos mecanismos friccionais tende a ganhar importância à medida que a tensão normal aumenta, aspecto que será melhor evidenciado nas análises realizadas para os níveis superiores de carregamento.

4.5.1.4 Análise da Resistência ao Cisalhamento sob Tensão Normal de 100 kPa

Na condição de tensão normal de 100 kPa, os valores médios de tensão cisalhante máxima observados foram de 221 kPa para o solo natural, 186 kPa para a mistura solo + 20% RCC e 175 kPa para a mistura solo + 35% RCC, como mostra o gráfico 9. Como os dados não atenderam ao pressuposto de normalidade, foi adotada abordagem não paramétrica por meio do teste de Kruskal-Wallis, que indicou diferença estatisticamente significativa entre os grupos experimentais ($\chi^2 = 36,6$; $p < 0,001$).

Gráfico 9. Comparação da tensão cisalhante máxima, submetidos à tensão normal de 100 kPa



Fonte: Autor (2026)

As comparações múltiplas realizadas pelo procedimento Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) confirmaram diferenças estatísticas entre todos os pares analisados, incluindo as comparações entre o solo natural e ambas as misturas contendo RCC, bem como entre as duas composições recicladas. Esses resultados demonstram que o aumento da tensão normal para 100 kPa não eliminou as diferenças mecânicas existentes entre os materiais, evidenciando que a incorporação do RCC continuou influenciando o comportamento resistente das misturas.

Do ponto de vista geotécnico, a condição de 100 kPa representa uma etapa intermediária de mobilização da resistência ao cisalhamento, na qual os mecanismos associados ao atrito entre partículas passam a desempenhar papel mais relevante. Segundo Das e Sobhan (2019), o aumento da tensão confinante promove maior área efetiva de contato entre partículas, favorecendo mecanismos de intertravamento e aumentando progressivamente a contribuição da resistência friccional para a resistência global do material.

Esse padrão de resposta mecânica foi observado experimentalmente em todas as composições avaliadas. Comparativamente à condição de 50 kPa, verificou-se incremento da resistência média de aproximadamente 33 kPa para o solo natural, 46 kPa para a mistura solo + 20% RCC e 23 kPa para a mistura solo + 35% RCC. Esses resultados evidenciam que o aumento da tensão normal favoreceu a mobilização da resistência ao cisalhamento em todos os materiais, porém com magnitudes distintas. A mistura contendo 20% de RCC apresentou o maior incremento absoluto de resistência entre as composições

estudadas. Embora sua resistência média (186 kPa) tenha permanecido inferior à observada para o solo natural (221 kPa), o ganho expressivo entre 50 e 100 kPa sugere que a incorporação moderada do RCC favoreceu mecanismos resistentes associados ao atrito e ao intertravamento entre partículas recicladas. Esse comportamento é coerente com a natureza predominantemente granular do RCC utilizado, cuja eficiência mecânica tende a aumentar à medida que a tensão normal aplicada promove maior confinamento das partículas.

Resultados semelhantes foram observados por Ma *et al.* (2022), que verificaram aumento progressivo da contribuição friccional em misturas de argilas estabilizadas com agregados reciclados de resíduos da construção e demolição. Os autores destacam que a incorporação de agregados reciclados altera o equilíbrio entre coesão e atrito, favorecendo gradativamente a mobilização da resistência por atrito conforme aumenta o nível de confinamento aplicado ao material. Essa interpretação é compatível com o comportamento observado para a mistura contendo 20% de RCC no presente estudo.

Assim, Silva *et al.* (2019a) observaram que a adição de agregados reciclados reduz a participação das frações finas e modifica a estrutura interna das misturas compactadas, promovendo alterações nos mecanismos resistentes mobilizados durante o cisalhamento. Segundo os autores, a incorporação controlada de RCD tende a aumentar a participação da resistência friccional sem provocar necessariamente perdas no desempenho mecânico, dependendo do teor incorporado e das características granulométricas dos materiais envolvidos.

Apesar do ganho relativo observado na mistura com 20% RCC, a resistência absoluta permaneceu inferior à do solo natural. Tal resultado evidencia que a contribuição coesiva associada à matriz argilosa ainda exerceu influência predominante sobre a resistência global do sistema. Segundo Caputo *et al.* (2022), solos finos compactados apresentam comportamento resistente fortemente condicionado à continuidade estrutural da matriz argilosa, cuja contribuição permanece relevante mesmo em condições nas quais os mecanismos friccionais passam a ser progressivamente mobilizados.

A mistura contendo 35% de RCC apresentou a menor resistência média entre os materiais avaliados (175 kPa), além de incremento de resistência inferior ao observado para a composição com 20% RCC. Esse comportamento sugere que o aumento excessivo da incorporação promoveu alterações mais expressivas na estrutura resistente da mistura, reduzindo a eficiência da interação entre as partículas e comprometendo parte dos benefícios associados à estabilização granulométrica.

Esse resultado encontra suporte nos estudos de Hidalgo *et al.* (2023), que verificaram que misturas solo-resíduo apresentam evolução mecânica até determinados níveis de incorporação, a partir dos quais o excesso de material granular pode aumentar a heterogeneidade estrutural e reduzir a eficiência resistente do sistema compactado. Os autores ressaltam que o desempenho ótimo normalmente ocorre em teores intermediários de substituição, nos quais há melhor equilíbrio entre as contribuições coesivas e friccionais.

Sob a perspectiva da engenharia de pavimentos, os resultados obtidos para 100 kPa são particularmente relevantes, pois representam níveis de confinamento mais próximos daqueles observados em camadas estruturais submetidas à ação do tráfego. Nesse contexto, o comportamento apresentado pela mistura contendo 20% RCC é tecnicamente promissor, uma vez que demonstrou maior capacidade de mobilização da resistência com o aumento da tensão normal aplicada.

Assim, os resultados obtidos sob tensão normal de 100 kPa demonstram que a contribuição da resistência friccional passou a ser mais expressiva do que na condição de 50 kPa, particularmente para a mistura contendo 20% de RCC. Entretanto, a resistência global do solo natural permaneceu superior, indicando que a contribuição da matriz argilosa ainda exerceu papel determinante no comportamento mecânico dos materiais avaliados.

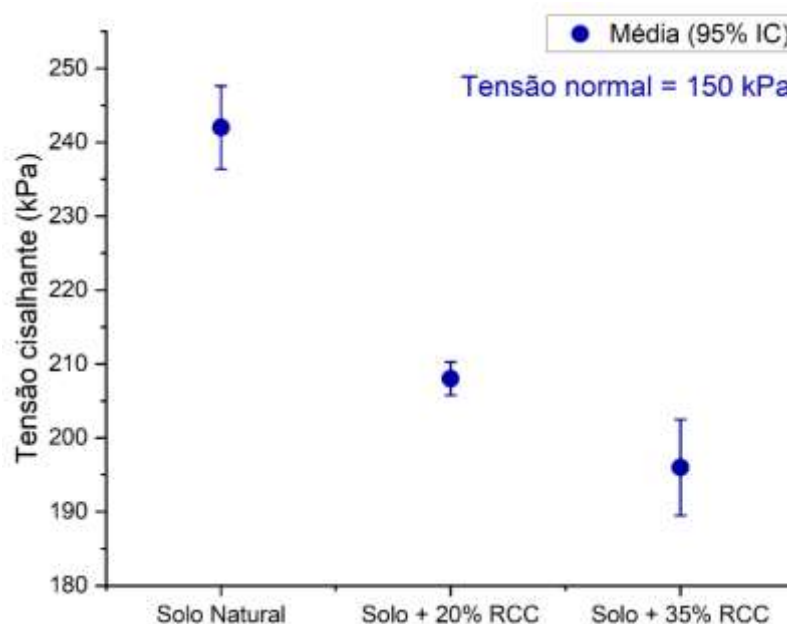
4.5.1.5 Análise da Resistência ao Cisalhamento sob Tensão Normal de 150 kPa

Na condição de tensão normal de 150 kPa, os valores médios de tensão cisalhante máxima observados foram de 242 kPa para o solo natural, 208 kPa para a mistura solo + 20% RCC e 196 kPa para a mistura solo + 35% RCC, como mostra o gráfico 10.

Após a exclusão do valor experimental discrepante previamente identificado na série correspondente à mistura solo + 20% RCC, os dados passaram a atender ao pressuposto de normalidade (Shapiro-Wilk: $W = 0,970$; $p = 0,262$), porém apresentaram heterogeneidade significativa entre as variâncias experimentais (Levene: $F = 5,32$; $p = 0,009$). Em razão dessa configuração estatística, adotou-se a análise de variância de Welch, seguida do teste *post hoc* de Games-Howell, abordagem estatisticamente recomendada para comparação entre grupos independentes quando há violação da

homogeneidade das variâncias. A análise inferencial indicou diferença estatisticamente significativa entre os grupos experimentais (Welch: $F = 82,6$; $gl = 2$ e $24,4$; $p < 0,001$).

Gráfico 10. Comparação da tensão cisalhante máxima, submetidos à tensão normal de 150 kPa



Fonte: Autor (2026)

As comparações múltiplas realizadas pelo teste de Games-Howell confirmaram diferenças estatisticamente significativas entre todos os pares avaliados. As diferenças médias observadas foram de 33,8 kPa entre o solo natural e a mistura solo + 20% RCC, 46,1 kPa entre o solo natural e a mistura solo + 35% RCC e 12,3 kPa entre as duas misturas contendo RCC. Esses resultados demonstram que, mesmo em condição intermediária de confinamento, a incorporação do RCC continuou promovendo alterações na resistência ao cisalhamento dos materiais avaliados.

Sob a perspectiva geotécnica, a condição de 150 kPa representa um nível de tensão normal no qual a contribuição da resistência por atrito passa a assumir papel cada vez mais relevante no comportamento mecânico dos materiais. Segundo Caputo *et al.* (2022), o aumento da tensão confinante promove maior aproximação entre partículas, ampliando a área efetiva de contato e favorecendo a mobilização dos mecanismos de intertravamento e resistência friccional. Nessas condições, a influência exclusiva da parcela coesiva torna-se menos dominante, permitindo que materiais com características mais granulares expressem de forma mais significativa seu potencial resistente.

Comparativamente à condição de 100 kPa, verificou-se incremento absoluto da resistência média de aproximadamente 21 kPa para o solo natural, 22 kPa para a mistura

solo + 20% RCC e 21 kPa para a mistura solo + 35% RCC. A semelhança desses incrementos evidencia que todas as composições responderam positivamente ao aumento do confinamento, confirmando a influência da tensão normal sobre a mobilização da resistência ao cisalhamento.

Entretanto, um aspecto particularmente relevante refere-se ao comportamento da mistura contendo 20% de RCC. Com resistência média de 208 kPa, essa composição apresentou desempenho significativamente superior ao observado para a mistura contendo 35% de RCC e manteve diferença relativamente reduzida em relação ao solo natural. Esse resultado sugere que o teor intermediário de incorporação proporcionou condição mais favorável para o equilíbrio entre os mecanismos resistentes associados à coesão da matriz fina e ao atrito entre partículas recicladas.

Essa interpretação encontra forte respaldo nos resultados obtidos por Ma *et al.* (2022). Os autores verificaram que teores intermediários de incorporação de RCC tendem a promover maior eficiência mecânica, favorecendo o aumento da resistência por atrito sem comprometer excessivamente a contribuição da parcela coesiva. Citam ainda que, a melhoria do desempenho está associada ao desenvolvimento de uma estrutura granulométrica mais equilibrada, capaz de combinar intertravamento granular e estabilidade estrutural.

Resultados semelhantes foram observados por Silva *et al.* (2019), que verificaram que a incorporação controlada de resíduos reciclados modifica a distribuição granulométrica e os mecanismos resistentes mobilizados durante o cisalhamento. Os autores destacam que teores moderados de incorporação tendem a favorecer a interação entre partículas finas e granulares, produzindo comportamento mecânico mais eficiente do que substituições excessivamente elevadas.

Apesar da evolução observada na mistura contendo 20% de RCC, o solo natural manteve o maior valor médio de resistência ao cisalhamento (242 kPa). Esse resultado demonstra que a matriz argilosa compactada continuou desempenhando papel fundamental na resistência global do material. Segundo Caputo *et al.* (2022), solos finos compactados apresentam comportamento resistente fortemente condicionado à continuidade estrutural da matriz coesiva, que permanece contribuindo significativamente mesmo quando a resistência friccional passa a ser intensamente mobilizada.

Por outro lado, a mistura contendo 35% de RCC apresentou novamente o menor desempenho entre os grupos experimentais, com resistência média de 196 kPa. Esse

comportamento reforça a hipótese de que teores elevados de incorporação promovem alterações mais intensas na estrutura resistente da mistura, reduzindo a conectividade da matriz fina e aumentando a heterogeneidade interna do material.

Esse resultado está de acordo com as observações de Hidalgo *et al.* (2023), que verificaram que a substituição parcial do solo por resíduos reciclados tende a gerar melhorias mecânicas até certos limites de mistura. Acima desse limite, o excesso de material granular pode comprometer a eficiência estrutural da mistura, reduzindo a capacidade de transferência de tensões e limitando os ganhos resistentes obtidos pela estabilização granulométrica.

Sob a ótica da engenharia rodoviária, os resultados obtidos para 150 kPa apresentam especial relevância por representarem condição de confinamento compatível com aquela observada em diversas camadas estruturais dos pavimentos submetidas à ação repetida do tráfego. Nesse contexto, a mistura contendo 20% de RCC demonstrou comportamento particularmente promissor, pois apresentou resistência significativamente superior à mistura com 35% de RCC e resposta mecânica mais próxima daquela observada para o solo natural.

Assim, os resultados obtidos para a condição de 150 kPa indicam que o aumento da tensão normal intensificou a participação da resistência friccional em todas as composições avaliadas. Entretanto, os resultados também evidenciam a existência de um teor de incorporação mais eficiente do ponto de vista mecânico, representado pela mistura contendo 20% de RCC, que apresentou desempenho intermediário entre o solo natural e a mistura com 35% de RCC. Esse padrão experimental reforça a hipótese de que a incorporação moderada do resíduo promove melhor equilíbrio entre as contribuições coesivas e friccionais responsáveis pela resistência ao cisalhamento das misturas estudadas.

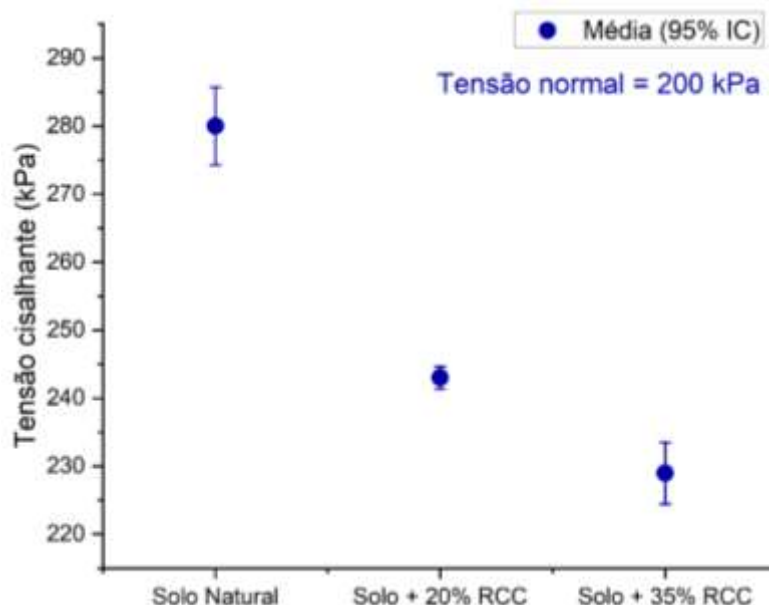
4.5.1.6 Análise da resistência ao cisalhamento sob tensão normal de 200 kPa

Na condição de tensão normal de 200 kPa, os valores médios de tensão cisalhante máxima foram de 280 kPa para o solo natural, 243 kPa para a mistura com 20% de RCC e 229 kPa para a mistura com 35% de RCC, conforme apresentado no gráfico 11.

Embora os dados tenham atendido ao pressuposto de normalidade, verificou-se heterogeneidade significativa entre as variâncias experimentais. Por esse motivo, aplicou-se

se a ANOVA de Welch, seguida do teste post hoc de Games-Howell. A análise indicou diferença estatisticamente significativa entre os grupos ($F = 112$; $p < 0,001$).

Gráfico 11. Comparação da tensão cisalhante máxima, submetidos à tensão normal de 200 kPa



Fonte: Autor (2026)

As comparações múltiplas realizadas pelo teste de Games-Howell confirmaram diferenças estatisticamente significativas entre todos os pares experimentais. Portanto, mesmo sob o maior nível de tensão normal avaliado, os materiais apresentaram respostas resistentes distintas.

A tensão normal de 200 kPa correspondeu à condição de maior confinamento do programa experimental. Nessas circunstâncias, os mecanismos associados ao contato e ao atrito entre as partículas tendem a apresentar maior participação na resistência ao cisalhamento. Segundo Das e Sobhan (2019), o aumento da tensão normal promove maior aproximação entre as partículas, ampliando a mobilização da componente friccional.

Em comparação com os resultados obtidos sob 150 kPa, foram observados incrementos médios de aproximadamente 38 kPa para o solo natural, 35 kPa para a mistura com 20% de RCC e 33 kPa para a mistura com 35% de RCC. O solo natural manteve a maior resistência média, atingindo 280 kPa. Esse comportamento pode estar relacionado à atuação conjunta das componentes coesiva e friccional desenvolvidas na estrutura compactada do material. Conforme Knappett e Craig (2014), a resistência ao cisalhamento dos solos compactados resulta da interação entre esses mecanismos e é influenciada pela organização estrutural da matriz do solo.

A mistura com 20% de RCC apresentou resistência média de 243 kPa, valor inferior ao do solo natural, porém superior ao resultado da composição com 35% de RCC. Esse comportamento sugere que, nessa tensão normal, a mistura com 20% mobilizou de maneira mais favorável a componente friccional associada aos contatos entre partículas granulares e à contribuição remanescente da matriz fina.

A mistura com 35% de RCC apresentou resistência média de 229 kPa. Sob 200 kPa, esse foi o menor valor entre os materiais avaliados. Entretanto, esse resultado não deve ser generalizado para todos os níveis de tensão normal, uma vez que, sob 50 kPa, a mistura com 35% apresentou resistência média superior à composição com 20% de RCC.

Estudos como os de Ma *et al.* (2022b) e Hidalgo *et al.* (2023) indicam que o comportamento mecânico de misturas solo–resíduo depende do teor incorporado, das características dos materiais e do nível de confinamento. A incorporação de partículas granulares pode modificar o equilíbrio entre as componentes coesiva e friccional, sem produzir necessariamente uma evolução linear da resistência com o aumento do teor de resíduo. Essas referências contribuem para a interpretação da tendência observada, mas não permitem transferir diretamente para esta pesquisa os teores considerados mais adequados em outros materiais.

Na tensão normal de 200 kPa, foi observada a seguinte ordem de resistências médias: solo natural, mistura com 20% de RCC e mistura com 35% de RCC. Entre as misturas investigadas, a composição com 20% apresentou o comportamento mais favorável sob 100, 150 e 200 kPa, enquanto a mistura com 35% foi superior sob 50 kPa. Como foram avaliadas somente as composições com 0%, 20% e 35% de RCC, os resultados não permitem determinar um teor ótimo de incorporação.

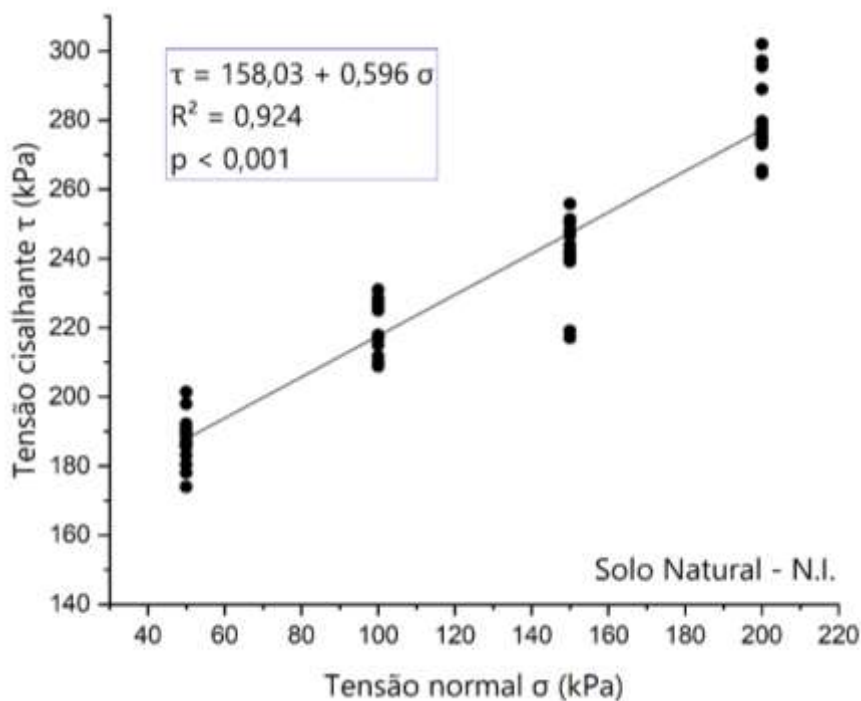
4.5.1.7 Envoltórias de Ruptura de Mohr-Coulomb em Condição Não Inundada

Embora a análise estatística inferencial tenha sido conduzida diretamente sobre os valores experimentais de tensão cisalhante máxima, a interpretação geotécnica dos resultados requer sua integração com os parâmetros da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb. Conforme Boszczowski (2013), esse procedimento permite determinar os parâmetros de resistência dos solos por meio da regressão linear entre a tensão normal aplicada e a tensão cisalhante máxima, conforme a equação: $\tau = c + \sigma_n \tan(\phi)$. Os seguintes parâmetros foram obtidos:

- Solo natural: $c = 158,03 \text{ kPa}$ e $\phi = 30,8^\circ$
- Solo + 20% RCC: $c = 111,97 \text{ kPa}$ e $\phi = 33,4^\circ$
- Solo + 35% RCC: $c = 124,69 \text{ kPa}$ e $\phi = 26,8^\circ$

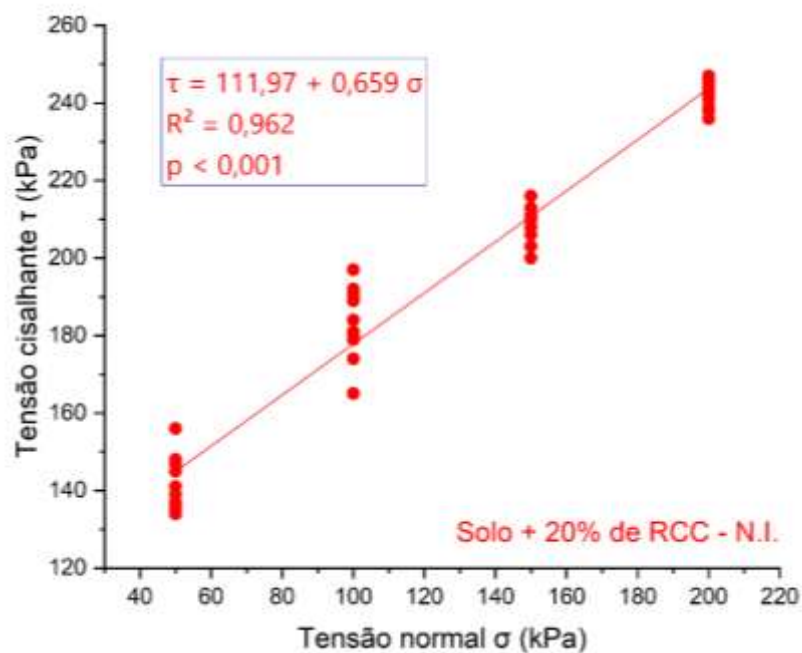
Os modelos lineares ajustados apresentaram coeficientes de determinação de $R^2 = 0,924$ para o solo natural, $R^2 = 0,962$ para a mistura com 20% de RCC e $R^2 = 0,912$ para a mistura com 35% de RCC. Esses valores indicam que, no intervalo de tensões normais investigado, as envoltórias ajustadas representaram adequadamente a tendência crescente da resistência ao cisalhamento dos materiais. As representações gráficas são apresentadas nos gráficos 12, 13 e 14.

Gráfico 12 . Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb, solo natural em condição não inundada



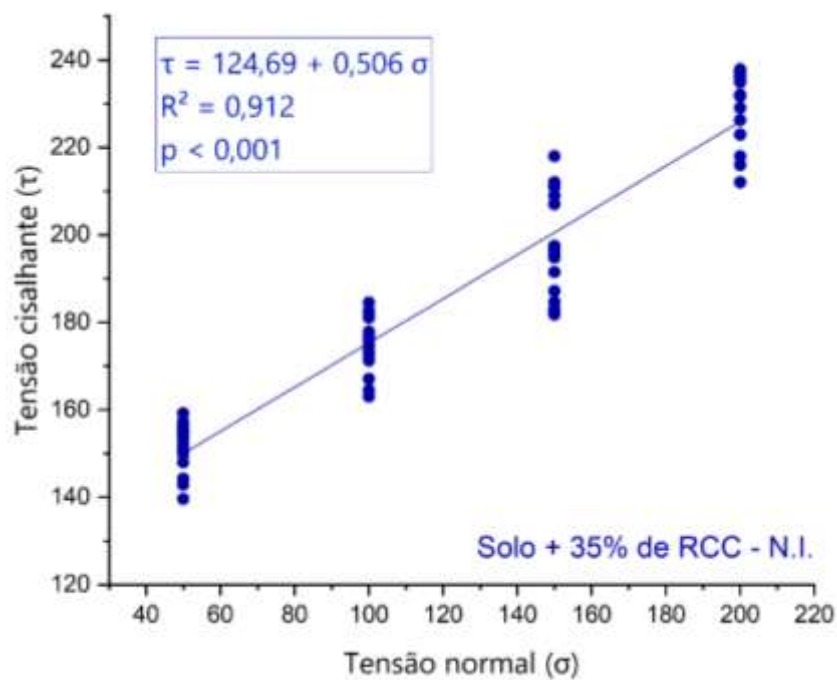
Fonte: Autor (2026)

Gráfico 13 . Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb, mistura solo + 20% de RCC em condição não inundada



Fonte: Autor (2026)

Gráfico 14. Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb, mistura solo + 35% de RCC em condição não inundada



Fonte: Autor (2026)

O solo natural apresentou o maior intercepto coesivo, de 158,03 kPa, e ângulo de atrito interno de 30,8°. A maior contribuição do intercepto coesivo foi acompanhada pelas maiores resistências médias ao cisalhamento em todos os níveis de tensão normal avaliados.

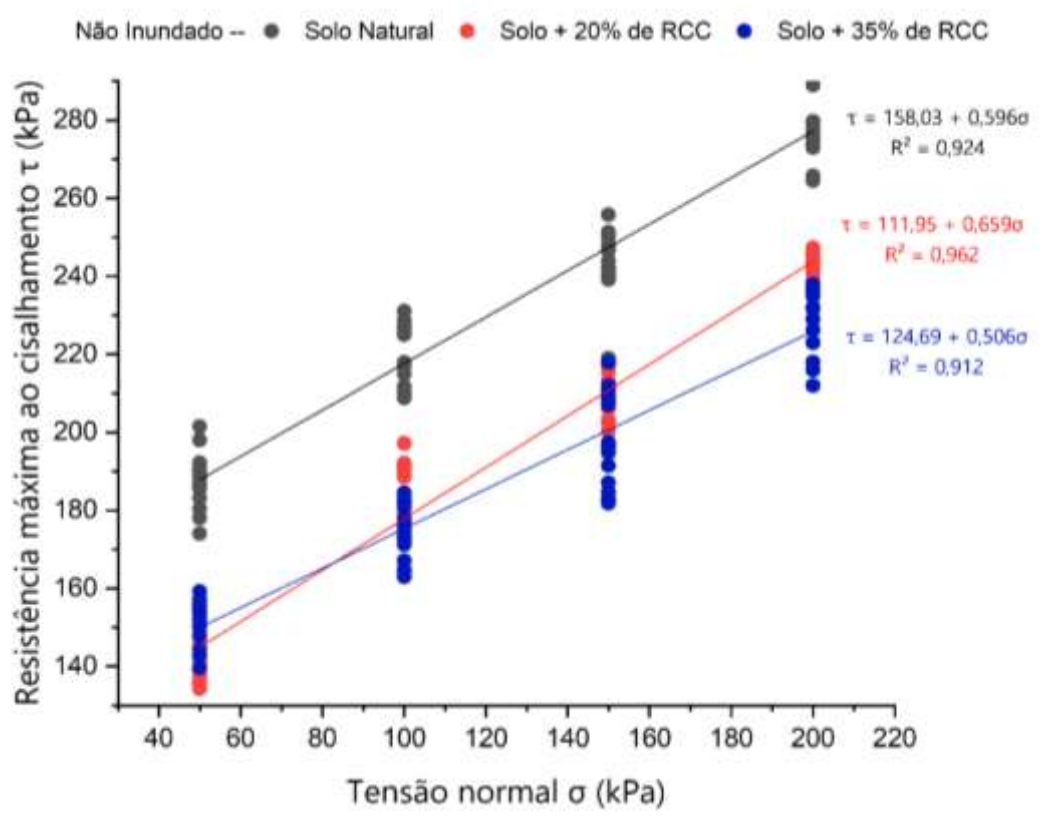
Na mistura com 20% de RCC, o intercepto coesivo diminuiu para 111,97 kPa, enquanto o ângulo de atrito interno aumentou para 33,4°, o maior entre os três materiais. Esse resultado indica maior participação da componente friccional na inclinação da envoltória. Entretanto, o aumento do ângulo de atrito não compensou integralmente a redução do intercepto coesivo, pois as resistências médias permaneceram inferiores às do solo natural.

A mistura com 35% de RCC apresentou intercepto coesivo de 124,69 kPa, superior ao obtido para a mistura com 20%, e o menor ângulo de atrito interno, de 26,8°. A combinação desses parâmetros ajuda a explicar a inversão observada entre as misturas. Sob 50 kPa, a composição com 35% apresentou resistência média de 152 kPa, superior aos 140 kPa da mistura com 20%. Nas tensões normais de 100, 150 e 200 kPa, a maior inclinação da envoltória da mistura com 20% favoreceu resistências superiores às obtidas para a composição com 35%.

Segundo Caputo *et al.* (2022), materiais com maior participação granular tendem a depender mais intensamente da tensão normal para mobilizar a resistência por atrito, enquanto solos com maior componente coesiva podem apresentar resistência expressiva mesmo sob tensões normais menores. No presente estudo, os parâmetros obtidos indicam que a incorporação do RCC modificou o equilíbrio entre as componentes coesiva e friccional, sem promover aumento uniforme da resistência ao cisalhamento.

O gráfico 15 apresenta a comparação entre as envoltórias ajustadas para o solo natural e para as misturas contendo RCC em condição não inundada. Em todas as composições, a resistência ao cisalhamento aumentou com a elevação da tensão normal, mas as diferenças entre os interceptos e as inclinações produziram respostas distintas entre os materiais.

Gráfico 15. Comparação das envoltórias de ruptura para o solo natural e para as misturas contendo RCC na condição não inundada



Fonte: Autor (2026)

A comparação das envoltórias mostra que o solo natural apresentou as maiores resistências ao cisalhamento em todos os níveis de tensão normal avaliados. Entre as misturas, a composição com 35% de RCC foi superior sob 50 kPa, enquanto a mistura com 20% apresentou resistências superiores sob 100, 150 e 200 kPa, além do maior ângulo de atrito interno. Portanto, não foi mantida uma única hierarquia entre as misturas durante todo o programa experimental, e os resultados não permitem definir um teor ótimo de RCC.

4.5.1.8 Discussão Integrada da Condição Não Inundada

A análise integrada mostrou que o solo natural apresentou os maiores valores médios de resistência ao cisalhamento em todas as tensões normais avaliadas, evidenciando a expressiva contribuição de sua matriz argilosa compactada para a resistência global. Entre as misturas contendo RCC, entretanto, não foi observada uma

hierarquia única em todos os níveis de carregamento. Sob 50 kPa, a mistura com 35% de RCC apresentou resistência superior à composição com 20%, com valores médios de 152 e 140 kPa, respectivamente. Nas tensões normais de 100, 150 e 200 kPa, essa relação foi invertida, e a mistura com 20% apresentou resistências superiores às obtidas para o teor de 35%.

Os parâmetros das envoltórias de Mohr-Coulomb contribuíram para explicar esse comportamento. O solo natural apresentou coesão aparente de 158,03 kPa e ângulo de atrito interno de $30,8^\circ$, enquanto a mistura com 20% de RCC apresentou $c = 111,97$ kPa e $\phi = 33,4^\circ$, e a mistura com 35%, $c = 124,69$ kPa e $\phi = 26,8^\circ$. Portanto, a resistência mais elevada do solo natural esteve associada principalmente à sua maior contribuição coesiva. A mistura com 20% destacou-se pela maior componente friccional, ao passo que a composição com 35% apresentou intercepto coesivo superior ao da mistura com 20%, mas menor ângulo de atrito interno.

A combinação desses parâmetros também esclarece a mudança de comportamento das misturas com o aumento da tensão normal. Sob 50 kPa, o maior intercepto coesivo da mistura com 35% contribuiu para que sua resistência superasse a da composição com 20%. Com a elevação da tensão normal, a maior inclinação da envoltória da mistura com 20%, representada pelo ângulo de atrito de $33,4^\circ$, proporcionou maior mobilização da parcela friccional, resultando em resistências superiores às da mistura com 35% sob 100, 150 e 200 kPa. Dessa maneira, o desempenho das misturas dependeu não apenas do teor de RCC, mas da interação entre as parcelas coesiva e friccional e do nível de tensão normal aplicado.

A incorporação do RCC modificou o equilíbrio entre esses mecanismos resistentes. A substituição parcial da matriz fina por partículas granulares favoreceu a participação do atrito e do intertravamento, mas a elevação do teor de resíduo não produziu aumento contínuo da resistência. Esse comportamento é coerente com a compreensão de que o desempenho dos solos compactados depende da compatibilização entre a matriz fina e a organização granulométrica do sistema (Pinto 2015). Também está de acordo com Hidalgo *et al.* (2023), que relacionaram a resposta mecânica de misturas solo-resíduo ao teor incorporado e à interação entre as partículas recicladas e o solo de origem. De forma convergente, Silva *et al.* (2019c), ao avaliarem um solo argiloso de Manaus com incorporação de resíduo cerâmico, identificaram alterações nos parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno em função do teor adicionado. Embora o material reciclado investigado pelos autores apresente composição distinta do RCC utilizado nesta

pesquisa, os resultados reforçam que a incorporação de partículas residuais modifica o equilíbrio entre as parcelas coesiva e friccional do solo. Contudo, os resultados desta pesquisa não permitem definir um teor ótimo, pois foram avaliadas somente as composições de 0%, 20% e 35% de RCC.

Tabela 10. Comparação dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos na presente pesquisa e em Castro *et al.* (2019)

Estudo/material	Condição comparada	c (kPa)	ϕ (°)
Presente pesquisa – solo natural	não inundada	158,03	30,80
Presente pesquisa – 20% RCC	não inundada	111,97	33,40
Presente pesquisa – 35% RCC	não inundada	124,69	26,80
Castro <i>et al.</i> – solo natural	sem inundação	107,48	35,16
Castro <i>et al.</i> – 5% vidro, moinho de bolas	sem inundação	229,49	30,44
Castro <i>et al.</i> – 5% vidro, alta energia	sem inundação	320,06	40,39

Fonte: Autor (2026), com dados de Castro *et al.* (2019).

A comparação com Castro *et al.* (2019) demonstra que a incorporação de materiais residuais em solos argilosos de Manaus não produz uma resposta única nos parâmetros de Mohr-Coulomb. Na presente pesquisa, o solo natural apresentou $c = 158,03$ kPa e $\phi = 30,8^\circ$. A incorporação de 20% de RCC reduziu a coesão aparente para 111,97 kPa e elevou o ângulo de atrito interno para $33,4^\circ$, enquanto a mistura com 35% apresentou $c = 124,69$ kPa e $\phi = 26,8^\circ$.

No estudo de Castro *et al.* (2019), o solo natural apresentou $c = 107,48$ kPa e $\phi = 35,16^\circ$ na condição última. A adição de 5% de vidro processado em moinho de bolas elevou a coesão para 229,49 kPa, mas reduziu o ângulo de atrito para $30,44^\circ$. Para o vidro processado em moinho de alta energia, foram obtidos $c = 320,06$ kPa e $\phi = 40,39^\circ$, correspondendo aos maiores parâmetros entre as composições avaliadas pelos autores como mostra na Tabela 10.

As respostas distintas observadas nos dois estudos mostram que os efeitos da estabilização dependem da natureza do resíduo, da granulometria, do teor incorporado e do processamento das partículas. Enquanto o vidro pulverizado investigado por Castro *et al.* (2019) promoveu aumento expressivo da coesão última, o RCC utilizado nesta pesquisa reduziu a contribuição coesiva em relação ao solo natural e modificou a componente friccional de maneira não linear. Entre as misturas solo–RCC, somente a

composição com 20% apresentou ângulo de atrito superior ao do solo natural, sem, contudo, superar sua resistência média ao cisalhamento nos níveis de tensão normal avaliados.

Essa comparação não estabelece equivalência direta entre os resultados. Castro *et al.* (2019) utilizaram 5% de vidro processado, tensões normais de 49,05, 98,10 e 147,15 kPa e corpos de prova com altura de 3,60 cm, enquanto esta pesquisa avaliou 20% e 35% de RCC sob 50, 100, 150 e 200 kPa em corpos de prova com 2,00 cm de altura. Os resultados fornecem, portanto, uma referência quantitativa regional e demonstram que o desempenho do solo estabilizado está associado às características específicas de cada sistema solo-resíduo.

Entre as misturas investigadas, o teor de 20% apresentou o comportamento mais favorável na condição não inundada, por combinar o maior ângulo de atrito interno com resistências superiores às da mistura com 35% em três dos quatro níveis de tensão normal. Esse desempenho, entretanto, não superou a resistência global do solo natural. Assim, o RCC demonstrou capacidade de modificar os mecanismos resistentes e apresentou potencial de reaproveitamento geotécnico e ambiental, mas sua viabilidade para pavimentação deve ser determinada mediante análise conjunta da resistência ao cisalhamento com a granulometria, a plasticidade, a compactação, o CBR, a expansão e os requisitos normativos aplicáveis.

4.5.2 Ensaios de Cisalhamento Direto na Condição Inundada

Os ensaios de cisalhamento direto em condição inundada foram realizados para avaliar a influência da presença de água sobre o comportamento mecânico do solo natural e das misturas contendo 20% e 35% de RCC. Após a aplicação da tensão normal correspondente a cada condição experimental, adicionou-se água à caixa de cisalhamento, mantendo-se os corpos de prova submersos durante 24 horas antes do cisalhamento. Esse procedimento representou uma condição crítica de umedecimento pertinente ao contexto de Manaus.

4.5.2.1 Resultados Experimentais do Ensaio e Estatística Descritiva em Condição Inundada

A Tabela 11 apresenta as estatísticas descritivas dos resultados de tensão cisalhante máxima obtidos para os três materiais em condição inundada. São apresentados o número de observações, a média, o desvio-padrão, o erro-padrão e o coeficiente de variação. Em todas as composições, as resistências médias aumentaram com a elevação da tensão normal. No solo natural, as médias variaram de 33 kPa, sob tensão normal de 50 kPa, a 107 kPa, sob 200 kPa. Na mistura com 20% de RCC, os valores variaram de 30 a 108 kPa, enquanto, na mistura com 35% de RCC, variaram de 44 a 108 kPa.

Tabela 11. Valores médios de tensão cisalhante máxima obtidos para cada material em função da tensão normal aplicada na condição inundada

Tensão normal (kPa)	Material	n	Média (kPa)	Desvio-padrão	Erro-padrão	CV (%)
50	Solo natural	2	33	1,44	1,02	4,36
50	Solo + 20% RCC	2	30	2,12	1,50	7,19
50	Solo + 35% RCC	2	44	5,66	4,00	12,86
100	Solo natural	2	66	1,41	1,00	2,14
100	Solo + 20% RCC	2	67	2,83	2,00	4,22
100	Solo + 35% RCC	2	63	6,36	4,50	10,17
150	Solo natural	2	81	6,66	4,71	8,25
150	Solo + 20% RCC	2	85	5,66	4,00	6,66
150	Solo + 35% RCC	2	80	6,08	4,30	7,64
200	Solo natural	2	107	2,61	1,85	2,44
200	Solo + 20% RCC	2	108	6,36	4,50	5,92
200	Solo + 35% RCC	2	108	11,31	8,00	10,48

Fonte: Autor (2026)

Sob tensão normal de 50 kPa, a mistura com 35% de RCC apresentou a maior resistência média nessa condição, com 44 kPa, enquanto o solo natural e a mistura com 20% de RCC alcançaram 33 e 30 kPa, respectivamente. Como foram realizadas apenas duas repetições por material e tensão normal, esses valores representam uma tendência descritiva e não demonstram superioridade estatística entre os materiais.

Nas tensões normais de 100 e 150 kPa, as diferenças entre as médias foram numericamente pequenas. Sob 100 kPa, foram obtidos 66 kPa para o solo natural, 67 kPa para a mistura com 20% de RCC e 63 kPa para a mistura com 35% de RCC. A amplitude entre a maior e a menor média foi de 4 kPa. Sob 150 kPa, as médias foram de 81, 85 e 80 kPa, respectivamente, com amplitude de 5 kPa entre os materiais.

Sob tensão normal de 200 kPa, os valores médios apresentaram aproximação acentuada. O solo natural alcançou 107 kPa, enquanto as duas misturas contendo RCC apresentaram média de 108 kPa. Portanto, a diferença entre a maior e a menor média foi de apenas 1 kPa nessa condição.

Os desvios-padrão variaram de 1,41 a 11,31 kPa, enquanto os erros-padrão ficaram entre 1,00 e 8,00 kPa. Os coeficientes de variação variaram de 2,14% a 12,86%. Os maiores valores de CV foram observados na mistura com 35% de RCC sob 50, 100 e 200 kPa. Entretanto, como cada grupo foi constituído por apenas duas observações, as medidas de dispersão apresentam estabilidade limitada e devem ser interpretadas com cautela.

Diante do reduzido número de repetições, os resultados da condição inundada foram analisados exclusivamente de forma descritiva e exploratória, sem aplicação de testes estatísticos inferenciais. Assim, as diferenças entre as médias não devem ser interpretadas como diferenças estatisticamente comprovadas nem utilizadas isoladamente para estabelecer relações causais entre o teor de RCC e a resistência ao cisalhamento. A seção seguinte apresenta as envoltórias de ruptura ajustadas a partir das médias obtidas nas quatro tensões normais.

4.5.2.2 Envoltórias de Ruptura de Mohr-Coulomb em Condição Inundada

As envoltórias de ruptura foram ajustadas a partir das médias de tensão cisalhante máxima nas quatro tensões normais. Os parâmetros apresentados na Tabela 12, evidenciam bom ajuste ao modelo linear, com R^2 de 0,971 para o solo natural, 0,961 para a mistura com 20% de RCC e 0,935 para a mistura com 35%. Embora todos os coeficientes sejam elevados, o valor ligeiramente menor da mistura com 35% é coerente com a maior dispersão observada em parte de seus resultados.

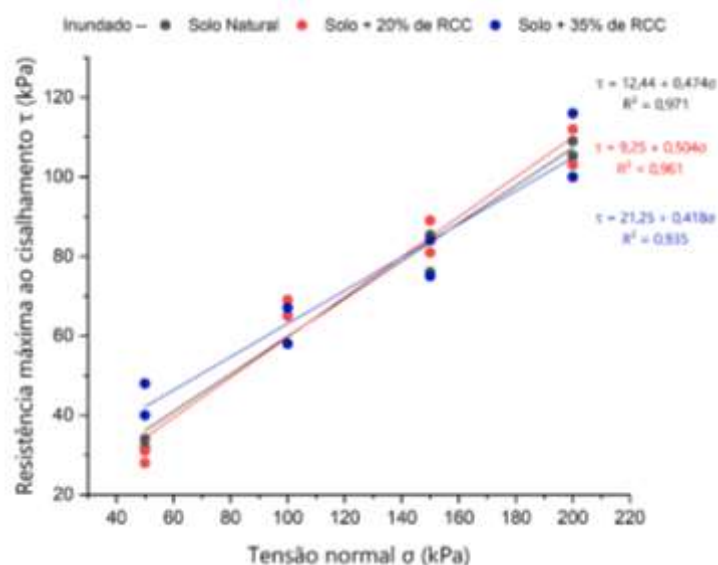
Tabela 12. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos ensaios inundados.

Material	c (kPa)	ϕ (°)	R ²
Solo natural	12,44	25,37	0,971
Solo + 20% RCC	9,25	26,75	0,961
Solo + 35% RCC	21,25	22,69	0,935

Fonte: Autor (2026)

Segundo Knappett e Craig (2014), a resistência ao cisalhamento de solos compactados resulta da contribuição simultânea da coesão aparente e do atrito interno mobilizado entre partículas. Entretanto, a presença de água modifica significativamente esse equilíbrio, reduzindo a estabilidade estrutural formada durante a compactação e aumentando a dependência dos mecanismos associados ao contato entre partículas. De forma semelhante, Das e Sobhan (2019) destacam que o aumento do teor de água reduz a sucção matricial e a parcela de coesão aparente, podendo alterar o estado de tensões efetivas e a resistência dos solos com elevada participação de finos.

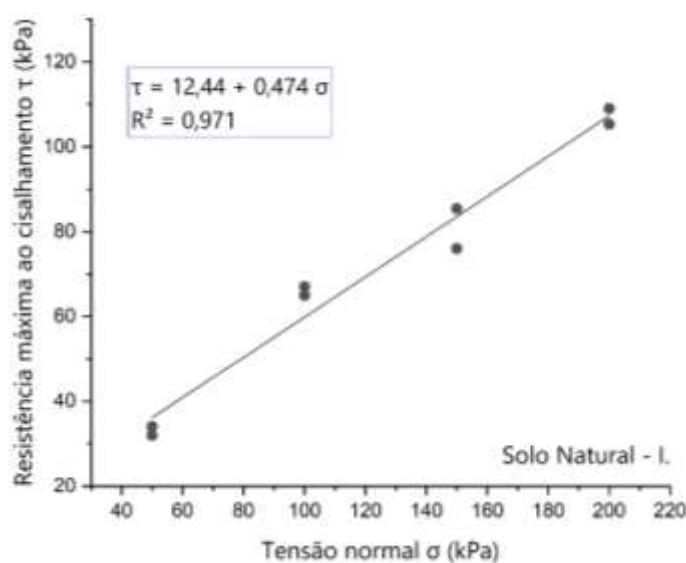
O gráfico 16, apresenta a comparação das envoltórias de ruptura obtidas para os materiais ensaiados em condição inundada. Observa-se que todas as composições apresentaram comportamento compatível com o aumento progressivo da resistência ao cisalhamento em função da elevação da tensão normal aplicada, indicando que o modelo de Mohr-Coulomb representou adequadamente os resultados obtidos.

Gráfico 16 . Envoltórias de ruptura dos materiais ensaiados em condição inundada

Fonte: Autor (2026)

O solo natural apresentou coesão de 12,44 kPa, como mostra no Gráfico 17 e ângulo de atrito interno de 25,37°. Esses valores mostram que, após a inundação, o material ainda preservou intercepto coesivo mensurável, mas sua resposta tornou-se muito menos dependente da coesão aparente observada na condição não inundada. O ângulo de atrito permaneceu responsável por parte expressiva do aumento da resistência com a tensão normal.

Gráfico 17. Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb para o solo natural em condição inundada

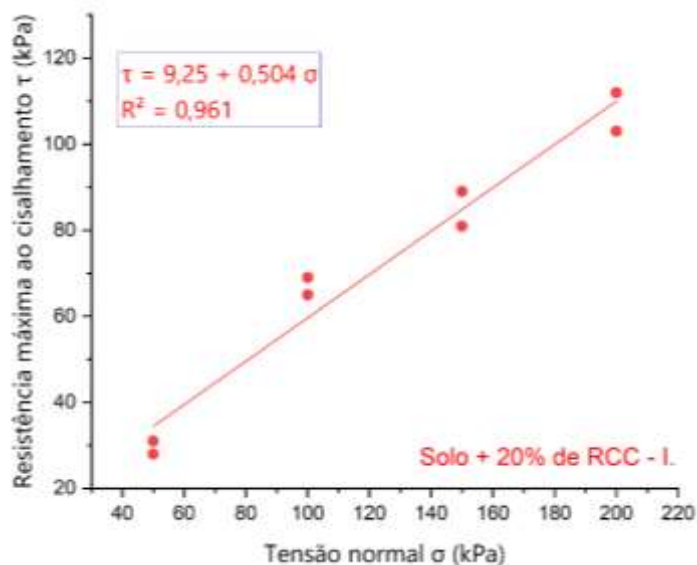


Fonte: Autor (2026)

A mistura com 20% de RCC apresentou coesão de 9,25 kPa como observado no Gráfico 18 e ângulo de atrito de 26,75°. Comparativamente ao solo natural na mesma condição, houve redução do intercepto coesivo e aumento de 1,38° no ângulo de atrito. Esse resultado indica redistribuição da resistência em favor da componente friccional, compatível com a incorporação de partículas mais granulares e com a redução da continuidade da matriz fina.

Essa tendência é qualitativamente semelhante com Silva *et al.* (2019b). Na condição reportada como saturada, os autores obtiveram $c = 5,5$ kPa e $\phi = 28^\circ$ para o solo, enquanto a mistura com 30% de RCD apresentou $c = 0$ kPa e $\phi = 29^\circ$. Em ambos os estudos, portanto, uma mistura contendo resíduo apresentou menor coesão e maior ângulo de atrito que o respectivo solo natural sob ação da água. Essa convergência sustenta a interpretação proposta para a mistura com 20% de RCC, ainda que os valores não sejam idênticos.

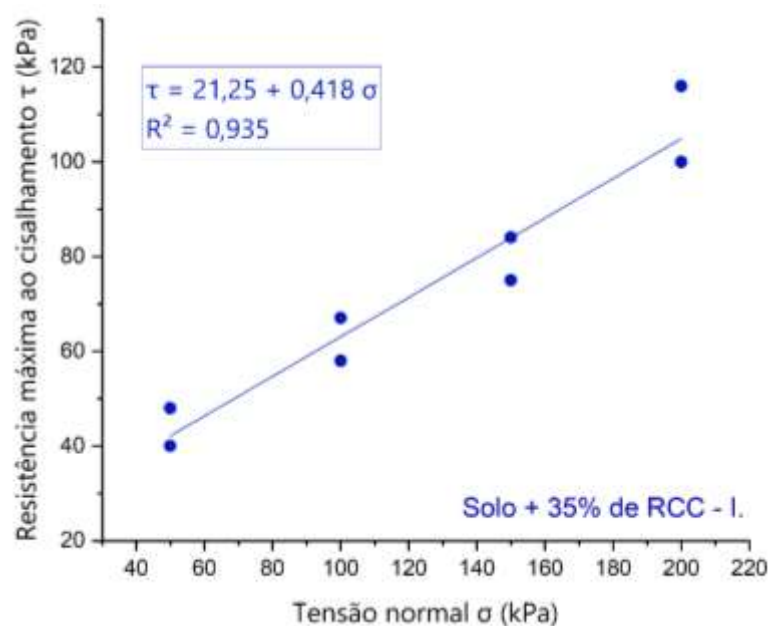
Gráfico 18. Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb para a mistura solo + 20% de RCC em condição inundada



Fonte: Autor (2026)

A mistura com 35% de RCC apresentou coesão de 21,25 kPa como mostra no Gráfico 19 e ângulo de atrito de 22,69°. O maior intercepto coesivo não deve ser interpretado isoladamente como maior coesão mineralógica, pois o parâmetro resulta da extrapolação da envoltória linear e pode incluir efeitos da estrutura compactada, do arranjo das partículas e da dispersão experimental. Simultaneamente, o menor ângulo de atrito mostra que o aumento do teor de RCC não produziu crescimento contínuo da componente friccional. Assim, os teores de 20% e 35% mobilizaram combinações distintas de coesão aparente e atrito.

Gráfico 19. Envoltória de ruptura ajustada pelo critério de Mohr-Coulomb para a mistura solo + 35% de RCC em condição inundada



Fonte: Autor (2026)

A variabilidade da resposta em função do solo e do teor de resíduo também aparece em Munoz Perez *et al.* (2023). O estudo apresenta quatro solos argilosos e teores de 10% a 25% de concreto reciclado, coesões aproximadamente entre 0,12 e 0,34 kg/cm², equivalentes a cerca de 12 a 33 kPa, e ângulos de atrito em torno de 19° a 37°. Os parâmetros inundados desta pesquisa, c entre 9,25 e 21,25 kPa e ϕ entre 22,69° e 26,75°, situam-se dentro ou próximos dessas faixas gráficas. A comparação confirma a plausibilidade da ordem de grandeza dos resultados, mas não uma equivalência estrita, pois os solos, os teores e as condições de cisalhamento são diferentes.

4.5.2.3 Discussão Integrada da Condição Inundada

A presença de água nos vazios pode reduzir a sucção matricial e enfraquecer parte da estrutura desenvolvida durante a compactação, sobretudo em materiais com elevada participação de frações finas. Consequentemente, a parcela de coesão aparente tende a diminuir, e a resistência passa a depender proporcionalmente mais dos mecanismos de contato, atrito e intertravamento entre partículas (Knappett; Craig, 2014; Das; Sobhan, 2019). Os resultados descritivos também mostraram aproximação das resistências dos três materiais com o aumento da tensão normal, culminando na convergência observada sob

200 kPa. Essa tendência sugere que, sob maior tensão normal, o contato e o atrito mobilizados entre as partículas passaram a exercer maior influência sobre a resposta resistente global.

A inundação durante 24 horas reduziu de forma expressiva a resistência ao cisalhamento dos três materiais, com efeito mais intenso sobre a coesão aparente do que sobre o ângulo de atrito. Na condição inundada, o solo natural apresentou $c = 12,44$ kPa e $\phi = 25,37^\circ$; a mistura com 20% de RCC, $c = 9,25$ kPa e $\phi = 26,75^\circ$; e a mistura com 35%, $c = 21,25$ kPa e $\phi = 22,69^\circ$. A mistura com 20% destacou-se pela maior componente friccional, enquanto a mistura com 35% apresentou o maior intercepto coesivo e a maior resistência sob 50 kPa.

Os resultados são corroborados qualitativamente e em ordem de grandeza pela literatura. Munoz Perez *et al.* (2023) empregaram procedimento semelhante de imersão durante 24 horas após a aplicação da tensão normal e obtiveram parâmetros situados em faixas próximas. Silva *et al.* (2019b), utilizando as mesmas tensões normais desta pesquisa, confirmaram a redução das tensões cisalhantes em condição saturada e observaram, para a mistura com RCD, menor coesão e maior ângulo de atrito que o solo natural, padrão também verificado na mistura com 20% de RCC. Portanto, os valores obtidos são tecnicamente plausíveis e compatíveis com as tendências da literatura, embora a magnitude das perdas e a resposta da mistura com 35% sejam específicas dos materiais e das condições experimentais desta pesquisa.

Como o programa inundado contou com duas repetições por material e tensão normal, a indicação de menor sensibilidade relativa das misturas deve permanecer como conclusão exploratória. Como o programa experimental inundado contou com duas repetições por material e tensão normal, a indicação de menor sensibilidade relativa das misturas deve permanecer como conclusão exploratória. Estudos futuros devem ampliar o número de corpos de prova e aprofundar a avaliação do comportamento mecânico das misturas sob condição inundada.

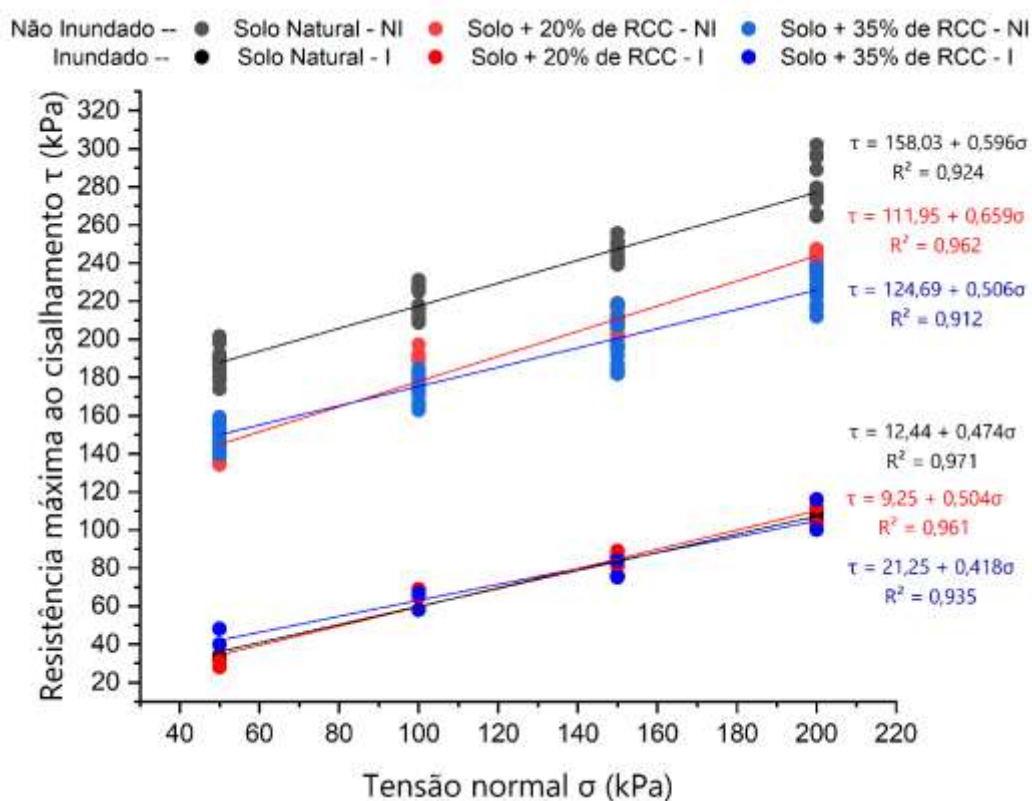
4.5.3 Comparação entre as Condições Inundada e Não Inundada

A comparação das envoltórias mostra deslocamento acentuado para níveis inferiores de resistência após a inundação. A coesão do solo natural diminuiu de 158,03 para 12,44 kPa, correspondendo a redução de 92,13%. Na mistura com 20% de RCC,

passou de 111,97 para 9,25 kPa, redução de 91,74%; na mistura com 35%, diminuiu de 124,69 para 21,25 kPa, redução de 82,96%.

Os ângulos de atrito apresentaram reduções proporcionalmente menores. No solo natural, ϕ passou de $30,8^\circ$ para $25,37^\circ$, correspondendo a 17,63% de redução. Na mistura com 20%, passou de $33,4^\circ$ para $26,75^\circ$, redução de 19,91%; na mistura com 35%, de $26,8^\circ$ para $22,69^\circ$, redução de 15,34%. Assim, a inundação afetou principalmente o intercepto coesivo, enquanto a componente friccional foi parcialmente preservada.

Gráfico 20. Comparação das envoltórias de ruptura obtidas nas condições inundada e não inundada para o solo natural e para as misturas contendo RCC



Fonte: Autor (2026)

A maior sensibilidade do intercepto coesivo à presença de água pode estar associada à redução da sucção matricial e às alterações na estrutura formada durante a compactação. Com a entrada de água nos vazios, as forças capilares e outras interações responsáveis por parte da resistência aparente podem ser reduzidas, provocando a queda acentuada do intercepto da envoltória. Essa interpretação deve ser considerada com cautela, uma vez que a sucção matricial não foi medida diretamente nesta pesquisa. A

componente friccional, por depender mais diretamente do contato e da mobilização do atrito entre as partículas, apresentou perdas proporcionalmente menores.

Esse comportamento apresenta convergência parcial com os resultados de Silva *et al.* (2019b), em trabalho apresentado no REGEO/Geossintéticos 2019. Os autores avaliaram um solo areno-argiloso e uma mistura contendo 30% de RCD, em relação à massa seca do solo, por meio de ensaios de cisalhamento direto em condição não inundada e em condição reportada como saturada, utilizando as mesmas tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa empregadas nesta pesquisa. No solo investigado pelos autores, a coesão diminuiu de 10 para 5,5 kPa, enquanto o ângulo de atrito interno passou de 29° para 28°. Na mistura com 30% de RCD, a coesão permaneceu nula e o ângulo de atrito diminuiu de 32° para 29°. A direção geral dessas alterações foi semelhante à observada nesta pesquisa, principalmente quanto à redução da resistência e à menor variação proporcional da componente friccional. No solo natural estudado por Silva *et al.* (2019b), o intercepto coesivo foi proporcionalmente mais afetado; na mistura com RCD, entretanto, esse parâmetro permaneceu nulo nas duas condições.

Apesar dessa convergência, os resultados não estabelecem equivalência metodológica nem validam diretamente o procedimento de inundação adotado neste estudo, pois os materiais, a geometria dos corpos de prova e as condições de compactação foram diferentes. Além disso, Silva *et al.* (2019b) não detalharam suficientemente o procedimento utilizado para alcançar a condição reportada como saturada. Dessa forma, o estudo fornece suporte comparativo quantitativo e qualitativo para a tendência observada, mas não permite estabelecer equivalência estrita entre os resultados.

Munoz Perez *et al.* (2023) não apresentaram pares de resultados nas condições não inundada e inundada que permitissem calcular a perda percentual provocada pela presença de água. Sua principal contribuição para esta comparação é metodológica, uma vez que os corpos de prova foram compactados na condição ótima, submetidos à tensão normal e imersos durante 24 horas, sequência semelhante à adotada nesta pesquisa. Portanto, o estudo contribui para contextualizar o procedimento experimental, mas não permite uma comparação quantitativa direta das perdas de resistência.

A relação entre as resistências médias nas condições inundada e não inundada aumentou com a tensão normal. No solo natural, a proporção de resistência preservada variou de 17,6% a 38,2%; na mistura com 20% de RCC, de 21,4% a 44,4%; e, na mistura com 35% de RCC, de 28,9% a 47,2%. Em todos os níveis de tensão normal, as misturas conservaram uma proporção maior da resistência inicialmente medida do que o solo

natural. Esse resultado sugere uma menor sensibilidade relativa das misturas à inundação, especialmente sob maiores níveis de confinamento. Contudo, em razão da realização de apenas duas repetições por condição inundada, essa interpretação deve ser apresentada como uma tendência experimental a ser confirmada por um programa de ensaios mais amplo.

4.6 Discussão Integrada do Comportamento Geotécnico

4.6.1 Relação entre CBR e Resistência ao Cisalhamento

Os ensaios de Índice de Suporte Califórnia e de cisalhamento direto avaliam respostas mecânicas complementares, porém distintas. O CBR constitui um índice empírico de resistência à penetração, obtido em corpo de prova compactado e confinado no molde, sendo tradicionalmente empregado na avaliação de materiais destinados às camadas de pavimentos. Seu resultado é influenciado conjuntamente pela distribuição granulométrica, plasticidade, massa específica seca, arranjo e intertravamento das partículas. O ensaio de cisalhamento direto, por sua vez, mobiliza a ruptura ao longo de um plano previamente definido, sob diferentes tensões normais, permitindo determinar a resistência de pico e estimar os parâmetros da envoltória de Mohr-Coulomb, representados pela coesão aparente e pelo ângulo de atrito interno (Caputo *et al.*, 2022; Das; Sobhan, 2019; Pinto, 2015).

Os resultados desta pesquisa evidenciaram que o aumento do CBR não correspondeu a um aumento simultâneo e proporcional dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. O CBR aumentou de 8,82% no solo natural para 15,58% na mistura com 20% de RCC e 26,22% na mistura com 35%. Em contrapartida, na condição não inundada, os ângulos de atrito interno foram de 30,8° para o solo natural, 33,4° para a mistura com 20% e 26,8° para a mistura com 35% de RCC. As coesões aparentes foram, respectivamente, 158,03, 111,97 e 124,69 kPa. Portanto, a mistura com 35% apresentou o maior CBR, enquanto a composição com 20% apresentou a maior componente friccional entre os materiais avaliados.

O melhor desempenho da mistura com 35% no CBR pode ser associado à redução da fração fina, à diminuição da plasticidade e ao aumento da massa específica seca máxima, fatores que favoreceram a formação de uma estrutura granular mais resistente à

penetração. Entretanto, o maior teor de RCC também modificou o equilíbrio entre as parcelas coesiva e friccional da resistência. A mistura com 20% parece ter proporcionado uma proporção mais favorável entre a matriz fina compactada e os contatos granulares introduzidos pelo resíduo, favorecendo a mobilização do atrito interno. Na mistura com 35%, a substituição mais intensa da fração fina pode ter aumentado a heterogeneidade dos contatos e reduzido a eficiência do intertravamento ao longo do plano de cisalhamento imposto pelo ensaio. Essa interpretação deve ser considerada uma hipótese baseada no comportamento experimental, uma vez que não foram realizadas análises microestruturais que permitissem confirmar diretamente esses mecanismos.

Na condição inundada, também não se observou superioridade uniforme de uma única composição. A mistura com 20% apresentou o maior ângulo de atrito interno, de 26,75°, enquanto a mistura com 35% apresentou a maior coesão aparente, de 21,25 kPa, e maior resistência sob a tensão normal de 50 kPa. Esses resultados confirmam que a resposta das misturas depende do mecanismo resistente mobilizado, da tensão normal aplicada e da condição de umidade representada pela imersão dos corpos de prova durante 24 horas.

Assim, não existe contradição entre os resultados dos dois ensaios. O teor de 35% de RCC foi mais eficiente para aumentar a resistência à penetração e, conseqüentemente, o CBR, enquanto o teor de 20% proporcionou resposta friccional mais favorável no cisalhamento direto. O aumento da capacidade de suporte não implica, necessariamente, elevação simultânea da coesão aparente e do ângulo de atrito interno, pois cada ensaio mobiliza mecanismos e condições de sollicitação diferentes. Considerando conjuntamente granulometria, plasticidade, compactação, CBR, expansão e resistência ao cisalhamento, os resultados sustentam a utilização mais prudente das misturas em subleito ou reforço do subleito, condicionada ao controle de compactação, à drenagem e ao atendimento integral aos requisitos normativos aplicáveis.

4.6.2 Implicações Geotécnicas e Normativas para a Pavimentação

Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam que a incorporação de resíduos de construção civil (RCC) promove modificações relevantes no comportamento geotécnico do solo argiloso estudado. A redução da plasticidade, a melhoria da distribuição granulométrica, o aumento da massa específica seca máxima e o incremento da capacidade de suporte indicam que a estabilização física com RCC constitui uma

alternativa promissora para melhorar o desempenho de solos tropicais empregados em obras de pavimentação.

Com o objetivo de relacionar os resultados experimentais aos critérios técnicos empregados em pavimentação rodoviária, apresenta-se uma comparação entre as propriedades determinadas nesta pesquisa e os requisitos previstos nas especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), como observado na Tabela 13. Essa comparação tem caráter exclusivamente indicativo e não substitui o dimensionamento geotécnico do pavimento nem a verificação de todos os parâmetros exigidos para cada aplicação.

Tabela 13. Comparação entre os resultados experimentais e os requisitos normativos do DNIT

Aplicação	Requisitos normativos	Solo natural	Solo +20% RCC	Solo +35% RCC	Situação
Base (DNIT 141/2022-ES)	$\text{CBR} \geq 60\%$ (ou 80%), $\text{LL} \leq 25\%$, $\text{IP} \leq 6\%$, $\text{Exp.} \leq 0,5\%$	Não atende	Não atende	Não atende	Nenhum material atende
Sub-base (DNIT 139/2010-ES)	$\text{CBR} \geq 20\%$, $\text{IG} = 0$, $\text{Exp.} \leq 1\%$	Não atende	Não atende	Atende ao CBR	Depende do projeto
Reforço do subleito	Conforme dimensionamento do projeto	Possível	Possível	Mais favorável	Depende do projeto
Subleito	Conforme projeto geotécnico	Possível	Possível	Possível	Depende do projeto

Fonte: Autor (2026)

A comparação evidencia que nenhum dos materiais investigados apresentou, com base apenas nos resultados obtidos nesta pesquisa, características suficientes para justificar sua utilização direta em camadas de base. Embora a incorporação do RCC tenha promovido melhorias expressivas nas propriedades físicas e mecânicas do solo, a avaliação normativa para aplicações em pavimentação depende da verificação conjunta

de todos os critérios estabelecidos pelas especificações técnicas vigentes, bem como das condições específicas de projeto.

Entre as misturas avaliadas, a composição contendo 35% de RCC apresentou o maior incremento na capacidade de suporte (CBR), enquanto a mistura com 20% apresentou o comportamento mais favorável entre as misturas nos ensaios de cisalhamento em condição não inundada, destacando-se pelo maior ângulo de atrito interno e pelas maiores resistências em três dos quatro níveis de tensão normal analisados. Esses resultados demonstram que diferentes propriedades podem ser favorecidas conforme o teor de RCC empregado, reforçando a necessidade de seleção do material em função da finalidade da camada do pavimento.

Sob o ponto de vista geotécnico, os resultados indicam maior potencial de aplicação das misturas em obras de melhoria ou reforço do subleito, onde os ganhos observados na capacidade de suporte e as alterações promovidas na plasticidade podem contribuir para o desempenho da estrutura do pavimento. Entretanto, a utilização em camadas estruturalmente mais solicitadas deve ser precedida da verificação dos requisitos normativos aplicáveis e da realização de estudos complementares, contemplando aspectos como comportamento sob carregamentos repetidos, durabilidade e desempenho em condições representativas de campo.

Além dos aspectos técnicos, a incorporação do RCC apresenta benefícios ambientais ao favorecer o reaproveitamento de resíduos da construção civil e reduzir a demanda por materiais naturais. Dessa forma, os resultados desta pesquisa indicam que a estabilização física de solos argilosos com RCC representa uma alternativa tecnicamente promissora e ambientalmente sustentável, desde que sua aplicação seja compatibilizada com as exigências normativas e com as condições específicas de cada projeto de pavimentação.

4.7 Limitações Experimentais da Pesquisa

Os resultados desta pesquisa permitiram avaliar a influência da incorporação de RCC nas propriedades geotécnicas do solo estudado. Entretanto, algumas limitações do programa experimental devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Essas limitações não invalidam as evidências obtidas, mas delimitam o alcance das conclusões e indicam aspectos que podem ser aprofundados em estudos futuros.

A primeira limitação refere-se ao número de repetições dos ensaios de cisalhamento direto em condição inundada. Nessa etapa, foram realizadas duas repetições por material e nível de tensão normal. Conforme apresentado na seção 3.5.2, essa quantidade decorreu da restrição temporal do cronograma disponível para a conclusão da etapa experimental, o tratamento e a interpretação dos resultados e a entrega da versão final da dissertação à banca examinadora. Por essa razão, os ensaios em condição inundada foram desenvolvidos em caráter complementar e exploratório. O número de observações não forneceu base amostral suficiente para a aplicação de testes estatísticos inferenciais com a robustez necessária. Assim, os resultados dessa etapa foram analisados por meio de estatística descritiva, e as diferenças observadas entre os materiais foram interpretadas como tendências experimentais válidas para as condições avaliadas.

Outra limitação está relacionada às curvas granulométricas das misturas contendo 20% e 35% de RCC. Essas curvas foram estimadas por composição teórica ponderada, com base nas curvas granulométricas obtidas experimentalmente para o solo natural e para o RCC e nas respectivas proporções mássicas. Embora esse procedimento permita estimar a distribuição granulométrica das misturas, ele não substitui a realização de ensaios granulométricos diretamente sobre cada composição. Consequentemente, os resultados relativos à granulometria das misturas representam distribuições teoricamente calculadas e não contemplam eventuais variações decorrentes da preparação e da homogeneização dos materiais.

A caracterização do RCC contemplou propriedades físicas relevantes para sua avaliação geotécnica, incluindo massa específica real, massa específica aparente e absorção de água. Entretanto, não foram determinadas quantitativamente as proporções de concreto, argamassa, materiais cerâmicos e demais componentes presentes no resíduo. A identificação desses constituintes permaneceu qualitativa, sem separação e quantificação gravimétrica. Também não fizeram parte do programa experimental análises químicas, mineralógicas e microestruturais aprofundadas, como fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Dessa forma, as interpretações dos mecanismos relacionados ao comportamento das misturas foram fundamentadas nos resultados geotécnicos e na literatura consultada, sem confirmação direta por meio dessas técnicas complementares.

A pesquisa foi realizada com um solo coletado no bairro Novo Aleixo, em Manaus-AM, e com RCC proveniente de uma única origem. Como o comportamento das misturas solo-RCC depende das propriedades do solo e das características do resíduo

empregado, os resultados representam especificamente os materiais investigados. A verificação das tendências identificadas em solos com outras características ou em RCCs provenientes de diferentes fontes requer a realização de estudos complementares.

O programa experimental contemplou duas proporções de incorporação, correspondentes a 20% e 35% de RCC, além do solo natural utilizado como referência. A avaliação desses teores permitiu identificar diferenças entre as composições investigadas, mas não possibilitou estabelecer uma curva completa de resposta em função do percentual de resíduo nem determinar um teor ótimo de incorporação. Portanto, qualquer indicação de comportamento mais favorável deve permanecer restrita à comparação entre as misturas efetivamente estudadas. A determinação de uma faixa de incorporação mais adequada exige a avaliação de teores adicionais, inclusive em intervalos intermediários.

Também não foram realizados ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente. Os ensaios de caracterização, compactação, CBR e cisalhamento direto forneceram informações relevantes sobre o comportamento geotécnico dos materiais. Contudo, a avaliação da resposta das misturas aos carregamentos repetidos decorrentes do tráfego e sua aplicação em métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento de pavimentos requerem ensaios complementares específicos.

Os efeitos da durabilidade em longo prazo também não fizeram parte do programa experimental. Não foram avaliados ciclos sucessivos de molhagem e secagem, variações prolongadas de umidade, degradação das partículas recicladas ou alterações das propriedades mecânicas ao longo do tempo. A investigação desses aspectos representa uma etapa importante para estudos futuros, especialmente diante das condições climáticas características da região amazônica.

Diante dessas limitações, as conclusões da pesquisa são aplicáveis ao solo, ao RCC, aos teores de incorporação, às condições de compactação e aos procedimentos laboratoriais efetivamente investigados. Os resultados fornecem evidências relevantes sobre a plasticidade, a compactação, a capacidade de suporte e a resistência ao cisalhamento dos materiais, bem como sobre as tendências granulométricas estimadas para as misturas. A extrapolação dessas conclusões para outros solos, resíduos, condições ambientais ou aplicações rodoviárias deve ser acompanhada de estudos complementares de validação.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

A presente pesquisa avaliou a influência da incorporação de 20% e 35% de resíduo da construção civil (RCC) nas propriedades geotécnicas de um solo argiloso de Manaus–AM, considerando seu potencial como material de estabilização física para pavimentação rodoviária. Com base nos resultados obtidos, o objetivo geral e os quatro objetivos específicos foram atendidos, respeitadas as condições experimentais e as limitações apresentadas nesta pesquisa.

Em relação ao primeiro objetivo específico, a caracterização geotécnica demonstrou que o solo natural possui predominância de partículas finas e elevada plasticidade, enquanto o RCC apresenta maior participação de partículas granulares. As curvas granulométricas das misturas, estimadas por composição teórica ponderada, indicaram redução progressiva da fração fina com o aumento do teor de RCC. Os ensaios de limites de Atterberg confirmaram a redução da plasticidade das misturas, e a massa específica dos sólidos aumentou com a incorporação do resíduo. Nos ensaios de compactação, verificaram-se redução da umidade ótima e aumento da massa específica seca máxima, demonstrando que a adição do RCC modificou as características físicas e o comportamento de compactação do solo estudado.

Quanto ao segundo objetivo específico, relacionado à avaliação da capacidade de suporte e da resistência ao cisalhamento, o CBR aumentou expressivamente com a incorporação do RCC. O solo natural apresentou CBR médio de 8,82%, enquanto as misturas com 20% e 35% alcançaram, respectivamente, 15,58% e 26,22%. Portanto, entre os materiais investigados, a mistura com 35% de RCC apresentou o maior valor de CBR, aproximadamente três vezes superior ao do solo natural.

Os resultados de cisalhamento direto, entretanto, não apresentaram a mesma ordem observada no CBR. Na condição não inundada, o solo natural apresentou as maiores resistências médias em todos os níveis de tensão normal. Entre as misturas, a composição com 35% de RCC superou a mistura com 20% somente sob 50 kPa. Nas tensões normais de 100, 150 e 200 kPa, a mistura com 20% apresentou resistências superiores às da mistura com 35%. A composição com 20% também apresentou o maior ângulo de atrito interno entre os materiais investigados, enquanto o solo natural

apresentou a maior coesão aparente. Esses resultados mostram que a incorporação do RCC alterou o equilíbrio entre as componentes coesiva e friccional, mas não produziu aumento generalizado da resistência ao cisalhamento em relação ao solo natural.

Na condição inundada, ocorreu redução da resistência ao cisalhamento em relação à condição não inundada para todos os materiais. Não foi identificada superioridade uniforme de uma única composição: a mistura com 35% apresentou a maior resistência média sob 50 kPa; a mistura com 20% apresentou os maiores valores sob 100 e 150 kPa; e, sob 200 kPa, os resultados das três composições foram próximos. Em razão do número reduzido de repetições nessa etapa, essas diferenças representam tendências experimentais fundamentadas em estatística descritiva, sem comprovação por testes inferenciais.

Em resposta ao terceiro objetivo específico, a comparação entre o solo natural e as misturas mostrou que os efeitos da estabilização física dependeram da propriedade avaliada. A incorporação do RCC reduziu a plasticidade, diminuiu a umidade ótima, aumentou a massa específica seca máxima e elevou o CBR. Entretanto, nos ensaios de cisalhamento direto em condição não inundada, as misturas não superaram o solo natural em resistência média. Entre as composições com RCC, o teor de 35% foi mais favorável ao aumento da capacidade de suporte, enquanto o teor de 20% apresentou o comportamento mais favorável em três dos quatro níveis de tensão normal na condição não inundada e o maior ângulo de atrito interno. Dessa forma, os resultados não permitem estabelecer uma hierarquia única entre as misturas para todas as propriedades nem definir um teor ótimo de RCC.

Quanto ao quarto objetivo específico, os resultados indicam potencial técnico para o aproveitamento do RCC na estabilização física do solo estudado. Entretanto, essa indicação deve ser limitada às condições e aos materiais avaliados. Considerando conjuntamente a granulometria, a plasticidade, a compactação, o CBR, a expansão e a resistência ao cisalhamento, a aplicação mais prudente das misturas corresponde ao emprego em subleito ou reforço do subleito, condicionada ao controle tecnológico da compactação, à drenagem adequada e ao atendimento integral das especificações aplicáveis. A utilização em sub-base ou em outras camadas estruturalmente mais solicitadas depende da verificação completa dos requisitos normativos e da realização de ensaios complementares, especialmente de módulo de resiliência, deformação permanente e durabilidade.

Como contribuição científica, a pesquisa apresenta resultados sobre o comportamento de misturas constituídas por solo argiloso amazônico e RCC, incluindo a avaliação do CBR e da resistência ao cisalhamento nas condições não inundada e inundada. Os resultados também demonstram que o aumento do CBR não corresponde necessariamente ao aumento da resistência ao cisalhamento, pois os ensaios mobilizam mecanismos resistentes distintos. Como contribuição técnica, o estudo fornece parâmetros experimentais que auxiliam na seleção de teores de RCC e na definição de aplicações geotécnicas compatíveis com o desempenho observado. Sob a perspectiva ambiental, a incorporação do RCC representa uma possibilidade de reaproveitamento desse resíduo e de redução parcial do consumo de materiais naturais, embora a quantificação desses benefícios dependa de avaliação ambiental e econômica específica.

Conclui-se, portanto, que a incorporação do RCC modificou o comportamento geotécnico do solo estudado e produziu resultados favoráveis principalmente na redução da plasticidade, nos parâmetros de compactação e no aumento da capacidade de suporte. No cisalhamento direto, os efeitos dependeram do teor de RCC, da tensão normal e da condição de ensaio, sem que as misturas apresentassem superioridade geral em relação ao solo natural. Assim, o RCC apresenta potencial como material de estabilização física, desde que sua aplicação seja definida de acordo com a propriedade requerida, os critérios normativos e as condições específicas da obra.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciaram a importância do emprego do RCC como material de estabilização de solos para aplicações em camadas de pavimentação de baixo volume de tráfego. Entretanto, algumas limitações metodológicas identificadas durante o desenvolvimento do estudo indicam oportunidades para o aprofundamento das investigações.

Inicialmente, recomenda-se que pesquisas futuras realizem uma caracterização mais abrangente do resíduo de construção civil utilizado nas misturas. Embora tenham sido determinadas propriedades físicas relevantes, como massa específica real, massa específica aparente e absorção de água, não foram quantificadas as proporções de concreto, argamassa, materiais cerâmicos e demais constituintes presentes no RCC. A realização da separação e quantificação gravimétrica desses componentes poderá

contribuir para uma melhor compreensão da influência da composição do resíduo sobre o comportamento geotécnico das misturas.

Também se recomenda a incorporação de técnicas avançadas de caracterização química, mineralógica e microestrutural, como fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Essas análises permitiriam identificar a composição mineralógica dos materiais, a presença de produtos cimentícios remanescentes, a interface entre solo e partículas de RCC e possíveis mecanismos de interação responsáveis pelas alterações observadas nas propriedades físicas e mecânicas das misturas.

Outra perspectiva importante consiste na investigação de um número maior de teores de incorporação de RCC, abrangendo intervalos inferiores e superiores aos avaliados neste estudo, visando identificar faixas de dosagem mais adequadas para diferentes condições de solo, níveis de solicitação e aplicações em pavimentação.

Recomenda-se, ainda, a ampliação do programa experimental mediante a utilização de diferentes tipos de solos tropicais e resíduos provenientes de distintas usinas de reciclagem, permitindo avaliar a influência da variabilidade mineralógica e granulométrica dos materiais na resposta geotécnica das misturas e ampliar a possibilidade de generalização dos resultados. No que se refere aos ensaios mecânicos, sugere-se a realização de estudos envolvendo módulo de resiliência, deformação permanente, resistência à fadiga e durabilidade possibilitando uma avaliação mais completa do desempenho das misturas sob condições representativas de campo.

Para os ensaios de cisalhamento direto em condição inundada, recomenda-se a utilização de um número maior de corpos de prova por condição experimental, possibilitando a aplicação de análises estatísticas inferenciais e aumentando a confiabilidade dos parâmetros de resistência obtidos. Da mesma forma, a determinação direta do grau de saturação, da sucção matricial e o controle das condições de drenagem durante os ensaios poderão fornecer informações mais consistentes sobre os mecanismos envolvidos na redução da resistência à condição inundada.

No âmbito da aplicação em pavimentação, recomenda-se aprofundar a avaliação do enquadramento normativo das misturas conforme as especificações do DNIT. Embora este estudo tenha realizado uma análise preliminar baseada nos parâmetros de Índice de Suporte Califórnia (CBR), Índice de Plasticidade (IP), Limite de Liquidez (LL), expansão e Índice de Grupo (IG), não foi desenvolvido um estudo específico acerca dos procedimentos normativos necessários para determinação completa e interpretação desses

parâmetros no contexto do dimensionamento de pavimentos. Assim, investigações futuras poderão aprofundar a aplicação das especificações do DNIT, especialmente das normas DNIT 139/2010-ES e DNIT 141/2022-ES, incluindo a determinação detalhada do Índice de Grupo, análises complementares dos critérios de enquadramento dos materiais e estudos de dimensionamento estrutural que permitam definir, de forma mais precisa, a viabilidade de utilização das misturas em camadas de subleito, reforço do subleito, sub-base e base.

Por fim, recomenda-se a execução de trechos experimentais em campo, acompanhados por programas de instrumentação e monitoramento de longo prazo, visando comparar o comportamento observado em laboratório com o desempenho das misturas sob condições reais de carregamento, variações climáticas e solicitações de tráfego, contribuindo para consolidar a aplicação do RCC como alternativa sustentável na infraestrutura rodoviária brasileira.

REFERÊNCIAS

AHMADPOUR, Majid; AKBARIMEHR, Davood; RAHAI, Mohammad; MOMENI, Ali. *Characterization of Recycled Aggregates from Building Demolition Waste for Use in Road Infrastructures*. *Infrastructures*, v. 10, p. 167, 2025.

ALMEIDA, Daniel Damião Almeida de. *Análise do comportamento mecânico de solo reforçado com geogrelhas fabricadas por impressão 3D para potencial aplicação em pavimentos*. 2025. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Manaus, 2025.

ALMEIDA, Y. T. N. et al. *A importância da reciclagem dos resíduos de construção civil: uma revisão sistemática*. *Revista de Gestão e Secretariado (GeSec)*, São José dos Pinhais, v. 16, n. 2, p. 1–22, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6502:2022: Solos e rochas: terminologia*. Rio de Janeiro, 2022.

_____. *NBR 6458:2025: Solos: determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm*. Rio de Janeiro, 2025.

_____. *NBR 6457:2024: Solos: preparação de amostras para ensaios de compactação e caracterização*. Rio de Janeiro, 2024.

_____. *NBR 6459:2025: Solos: determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 2025.

_____. *NBR 7180:2025: Solos: determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 2025.

_____. *NBR 7181:2025: Solos: análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 2025.

_____. *NBR 7182:2025: Solos: ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 2025.

_____. *NBR 9895:2025: Solo: índice de suporte Califórnia (ISC) – método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2025.

_____. *NBR 17212:2025: Solos — Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm*. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D3080/D3080M-23: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. West Conshohocken, 2023.

BARRETO, Alisson Cabral. *Desempenho técnico de misturas de diferentes tipos de solos com RCD para uso em obras de pavimentação*. 2020. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2020.

BORDOLOI, S.; AFOLAYAN, O. D.; NG, C.W.W. *Feasibility of construction demolition waste for unexplored geotechnical and geo-environmental applications - a review*. *Construction and Building Materials*, v. 356, p. 129230, 2022.

BOSZCZOWSKI, Roberta B. (org.). *Laboratório de mecânica dos solos: ensaios especiais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil*. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2002. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/conama/res/res02/res30702.htm. Acesso em: 13 mar. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 13 mar. 2026.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros; ALBUQUERQUE, Paulo José Rocha de; GARCIA, Jean Rodrigo. *Mecânica dos solos: Teoria e Aplicações*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

CASTRO, Carlos Eduardo Neves de; SILVA, Roberto Rosselini Ferreira da; SANTOS, Lucas Fernandes; MENDES, André Sales; LIMA, Cláudio Augusto de Paula; FROTA, Consuelo Alves da. Comportamento mecânico de solo argiloso estabilizado com resíduo de vidro pulverizado em moinho de alta energia e de bolas. *Revista Matéria*, v. 24, n. 2, e-12356, 2019. DOI: 10.1590/S1517-707620190002.0671.

DAS, Braja M.; SOBHAN, K. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. Tradução da 9ª edição norte – americana. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

DELONGUI, Lucas. *Determinação de parâmetros mecânicos para dimensionamento de pavimentos com resíduos de construção e demolição*. 2016. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 137/2010-ES: *Pavimentação – Regularização do subleito – Especificação de serviço*. Brasília, DF: DNIT, 2010.

_____. DNIT 138/2010-ES: *Pavimentação – Reforço do subleito – Especificação de serviço*. Brasília, DF: DNIT, 2010.

_____. DNIT 139/2010-ES: *Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço*. Brasília, DF: DNIT, 2010.

_____. DNIT 141/2022-ES: *Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço*. Brasília, DF: DNIT, 2022.

_____. DNIT 411/2021-ME: *Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio*. Brasília, DF: DNIT, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Brasil recicla menos de um quarto dos resíduos da construção civil, apesar do potencial técnico e econômico*. 30 out. 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/104186497/brasil-recicla-menos-de-um-quarto-dos-residuos-da-construcao-civil-apesar-do-potencial-tecnico-e-economico>. Acesso em: 13 mar. 2026.

FARIAS, Manoel Leandro Araújo e. *Estudo e classificação de solos lateríticos finos, arenosos e pedregulhosos naturais e melhorados com ligantes hidráulicos para utilização em camadas de pavimentos flexíveis*. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

FIELD, A. *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. 5. ed. London: Sage Publications, 2018.

GALINDO, José Roberto Fernandes. *Estabilização de solos tropicais com resíduos da construção civil e escória de aciaria para uso em pavimentação*. 2022. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. *Multivariate Data Analysis*. 8. ed. Andover: Cengage Learning, 2019.

HIDALGO, C. et al. *Ground improvement by construction and demolition waste (CDW) soil mixture replacement*. *Buildings*, v. 13, n. 3, p. 779, 2023.

KHAN, Zainul Abedin; BALUNAINI, Umashankar; COSTA, Susanga; NGUYEN, Nhu H.T. *A review on sustainable use of recycled construction and demolition waste aggregates in pavement base and subbase layers*. *Cleaner Materials*, v. 13, p. 100266, 2024.

KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. *Mecânica dos solos*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

LARSON, R.; FARBER, B. *Estatística aplicada*. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

LEITE, João Alex Garcia. *Gestão dos resíduos de construção civil procedentes de pequenas construções no município de Belém-PA*. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

LIMA, Naiara de. *Comportamento geotécnico de mistura RCC/solo arenoso sob diferentes graus de compactação*. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Bauru, 2023.

MA, Q.; HU, Z.; HU, Z.; LI, J. *Strength characteristics and micro-scale mechanism of high liquid limit clay treated by recycled construction and demolition wastes (CDW) aggregates*. *Construction and Building Materials*, v. 332, p. 127367, 2022b.

MACHADO, Ariadne Pimentel. *Estudo avaliativo sobre a corrosividade de solos amazônicos por meio de análises geotécnicas, químicas e microbiológicas*. 2019. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

MALLICK, R. B.; EL-KORCHI, T. (ed.). *Pavement Engineering: Principles and Practice*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

MUNOZ PEREZ, S. P.; SALAZAR PRETEL, T. M.; VILLENA ZAPATA, L. I. *Mechanical properties of a soil improved with recycled demolition concrete for the construction of shallow foundations*. *Materials Physics and Mechanics*, v. 51, n. 1, p. 168-178, 2023. DOI: 10.18149/MPM.5112023_14.

NETO, C. A.; BAHIA, V. E. A. G.; MELO, M. C. de; MONTEIRO, V. E. D.; PAIVA, W. de. *Modelos de previsão da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos: Models for predicting the shear strength of municipal solid waste*. Revista de Geociências do Nordeste, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 825–840, 2025. DOI: 10.21680/2447-3359.2025v11n1ID37289. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/37289>. Acesso em: 21 mar. 2026.

ORIOLO, Monigleicia Alcalde. *Uso de agregado reciclado de resíduos de construção e demolição na estabilização de um solo siltoso melhorado com cimento para aplicação em base de pavimentos urbanos*. 2024. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.

PEREIRA, T. T. C. et al. *A mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação com o uso e manejo*. Geonomos, Belo Horizonte, v. 28, n. 1, p. 1–14, 2020. DOI: 10.18285/geonomos.v28i1.29650.

PINTO, Carlos de Sousa. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. 3. ed., 4. reimp. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

RIBEIRO, Diogo Ferreira; TEIXEIRA, Juliana dos Santos; VIEIRA, Antonio Fábio Sabbá Guimarães. Análise geomorfológica do entorno da rodovia AM-010, entre os municípios de Manaus e Itacoatiara/AM. *Revista Contexto Geográfico*, v. 9, n. 20, p. 13–34, 2024. DOI: 10.28998/contegeo.9i.20.17661.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos et al. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. Disponível em: [Embrapa – SiBCS 2025](#).

SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). *The Soils of Brazil*. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2023. (World Soils Book Series). DOI: 10.1007/978-3-031-19949-3.

SILVA, Aline Cátia da; FUCALE, Stela; FERREIRA, Silvio Romero de Melo. *Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso*. *Revista Matéria*, v. 24, n. 2, 2019a.

SILVA, Aline Cátia da; FUCALE, Stela; FERREIRA, Silvio Romero de Melo; SILVA, Fábio Ferreira da. Caracterização geotécnica de uma mistura solo-RCD com ênfase na resistência ao cisalhamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 9.; CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 8., 2019, São Carlos. Anais [...]. São Carlos: IGS-Brasil/ABMS, 2019b.

SILVA, José Rodrigo Sevalho da. *Investigação do desempenho solo-geogrelha com elementos de ABS fabricados por manufatura aditiva: um estudo para pavimentos*. 2025. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Manaus, 2025.

SILVA, Matheus Pena da Silva e; SANTOS, Lucas Fernandes; SILVA, Antônio Cleiton Lopes da; FROTA, Consuelo Alves da. *Shear strength of a typical soil from Manaus, Brazil, stabilized with ceramic residue additive*. *Revista Matéria*, v. 24, n. 2, 2019c.

SOUZA, Bruno Silva de et al. Lithological characterization of the Alter do Chão Aquifer using geophysical well logging in Manaus, Amazonas, Brazil. *Acta Amazonica*, v. 55, e55gs24094, 2025. DOI: 10.1590/1809-4392202400942.

TAVAKOLI MEHRJARDI, Gholamhosein; AZIZI, Alireza; HAJI-AZIZI, Amanj; ASDOLAFARDI, Gholamreza. *Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction*. *Transportation Geotechnics*, v. 23, p. 100349, 2020.

TRIOLA, M. F. *Introdução à estatística*. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

VIEIRA, Gabrielle Souza. *Análise da estabilização de solo argiloso com resíduos de construção civil (RCC) para aplicação em base e sub-base de pavimentos*. 2025. 81 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) – Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2025.

WANG, Q. et al. *Study on performance tests and the application of construction waste as subgrade backfill*. *Materials*, v. 14, n. 9, p. 2381, 2021.