

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

RAFAELA GANZO

**DESEMPENHO DE UMA MISTURA DE SOLO ARGILOSO MELHORADO COM
CIMENTO E RCD PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS**

FLORIANÓPOLIS
2025

RAFAELA GANZO

**DESEMPENHO DE UMA MISTURA DE SOLO ARGILOSO MELHORADO COM
CIMENTO E RCD PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr Fábio Krueger da Silva

Florianópolis
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Ganzo, Rafaela

Desempenho de uma mistura de solo argiloso melhorado com RCD e cimento para aplicação em camadas de pavimentos / Rafaela Ganzo; orientação de Fábio Krueger Da Silva. - Florianópolis, SC, 2026.

63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil. Inclui Referências.


1. RCD. 2. Cimento. 3. Pavimentação. 4. Reciclagem. 5. CBR. I. Krueger Da Silva, Fábio. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Desempenho de uma mistura de solo argiloso melhorado com RCD e cimento para aplicação em camadas de pavimentos.

Rafaela Ganzo


Desempenho de uma mistura de solo argiloso melhorado com cimento e resíduos da construção e demolição (RCD) para aplicação em camadas de pavimentos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina, para obtenção do título de bacharel/ em Engenharia Civil.


Florianópolis, 05 de Dezembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **FABIO KRUEGER DA SILVA**
Data: 18/02/2026 15:12:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Fábio Krueger da Silva

Institu:  Documento assinado digitalmente **FSC)**
FERNANDA SIMONI SCHUCH
Data: 26/02/2026 12:09:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Fernanda Simoni Schuch

Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) Documento assinado digitalmente
 **Murilo da Silva Espíndola**
Data: 19/02/2026 07:36:46-0300
CPF: ***.661.899-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr. Murilo da Silva Espíndola
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Dedico este trabalho a Deus, que me concedeu todas as condições para realizar minha formação com excelência, e também à minha família, que tanto me apoiou nessa etapa, em especial ao meu pai, que incentivou minha trajetória na área desde o início.

RESUMO

A construção civil é um dos setores que mais geram resíduos, com impactos ambientais significativos devido ao descarte inadequado e à extração desenfreada de recursos naturais. Nesse contexto, a reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), especialmente o concreto, surge como uma solução sustentável, reduzindo a demanda por agregados naturais e minimizando a disposição em aterros. A aplicação desses materiais reciclados em pavimentação, no entanto, exige estudos que comprovem seu desempenho técnico, uma vez que suas propriedades podem diferir dos agregados convencionais. Este trabalho avalia o potencial de um solo argiloso melhorado com a substituição de 30% de solo por RCD de concreto e com adição de 4% de cimento para uso em camadas de pavimento. Inicialmente, são caracterizados o solo, o RCD e o cimento por meio de ensaios físicos, concluindo elevada presença de finos no solo tendo em vista valores de LL na ordem de 97% , densidade e absorção do RCD com valor médio de 2,32 g/cm³ e 4,55% para a parte graúda e para a parte miúda, valores na ordem de 2,02 g/cm³ e 13,8% respectivamente. Em seguida, determinou-se a umidade ótima e a densidade máxima aparente da mistura pelo ensaio de compactação Proctor na energia intermediária . Por fim, corpos de prova foram moldados e submetidos ao ensaio CBR após 28 dias de cura e ao ensaio de resistência à compressão aos 7 dias com o objetivo de analisar a influência do RCD na resistência mecânica da mistura. Os resultados indicaram que a adição de cimento reduziu a expansão do material em praticamente 100% e que combinado com o RCD alcançaram valores de CBR na ordem de 20%, não sendo satisfatórios para a aplicação em camadas de sub bases e base que exigem resultados mínimos de 30% e 80% respectivamente de acordo com as normativas. Os valores de resistência à compressão foram inferiores a 1 Mpa, porém não foram levados em consideração para classificação quanto ao uso em camadas, visto que, não são exigidos parâmetros mínimos para sub bases e bases melhoradas com cimento.

Palavras-chave: RCD (Resíduos da Construção e Demolição), cimento, pavimentação, reciclagem, CBR.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 – Distribuição dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....	21
Figura 2 – Principais camadas de um pavimento flexível.....	29
Figura 3 – Limites de Attenberg conforme estados físicos da amostra.....	32
Figura 4 - Amostra coletada para ensaios.....	37
Figura 5 - Imagem de satélite do ponto de coleta do solo.....	38
Figura 6 - Detalhe da região de coleta do solo quanto a litologia.....	39
Figura 7 - Detalhe da região de coleta do solo quanto a declividade	39
Figura 8 - Horizontes geológicos da amostra segundo Guessser(2013).....	40
Figura 9 - Corpos de prova de concreto para obtenção do RCD.....	40
Figura 10 - Ensaio de massa específica do RCD.....	42
Figura 11 - Corpos de prova do ensaio de compactação de solo (a), solo-cimento (b) e solo-cimento-RCD (c) respectivamente.....	45
Figura 12 - Etapas do ensaio de CBR.....	46
Figura 13- Etapas do ensaio de Resistência à compressão das amostras.....	48
Figura 14 - Fluxograma da metodologia da pesquisa.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas granulométricas para material granular em bases estabilizadas..	31
Tabela 2 – Especificações técnicas do CP IV-32 Itambé.....	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Trabalhos similares e seus respectivos resultados.....	33
Quadro 2 – Quantitativo de RCD por dimensões.....	35
Quadro 3 - Determinação do n° de golpes e camadas para ensaio de resistência à compressão.....	46
Quadro 4 - Resultados do ensaio de compactação das misturas.....	52
Quadro 5- Resultados dos ensaios de CBR e Resistência à Compressão das misturas.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Classificação dos RCD no Brasil em 2021.....	22
Gráfico 2 - Faixa granulométrica do RCD e seus limites.....	37
Gráfico 3 - Distribuição granulométrica do solo.....	52
Gráfico 4 - Resultado Limite de liquidez do solo.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
ONU	Organização das Nações Unidas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivos específicos	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 SOLOS RESIDUAIS	23
2.2 MISTURAS SOLO-CIMENTO.....	24
2.3 MISTURA SOLO-CIMENTO-RCD.....	26
2.3.1 Misturas argilosas	27
2.4 ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS	28
2.5 ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	31
2.6 TRABALHOS ACADÊMICOS SIMILARES.....	34
3 MÉTODO DA PESQUISA	36
3.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA.....	36
3.2 ENSAIOS.....	41
3.2.1 Massa específica	42
3.2.2 Limites de Attenberg	43
3.2.3 Granulometria	44
3.2.4 Ensaio de compactação Proctor	44
3.2.5 Índice de Suporte Califórnia	45
3.2.6 Resistência à Compressão	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
6 REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil tem importante participação no desenvolvimento econômico de um país e, no Brasil, contribui, em média, com 10% do PIB total (FIESP, 2023). Esse desempenho expressivo reforça o papel central da engenharia civil, uma vez que é por meio dela que se transformam recursos, materiais e tecnologias em edificações, equipamentos urbanos e obras essenciais. Além disso, a engenharia atua como base para o avanço do setor da infraestrutura nacional, que em 2024 movimentou cerca de 2,22% do PIB em investimentos, evidenciando sua relevância para a expansão e modernização do país (ADBID, 2025).

Dentro desse setor, destaca-se a infraestrutura de transportes, responsável por grande parte do avanço social de uma nação, seja pela facilitação do fluxo de bens e serviços, seja pela promoção da mobilidade de pessoas e da integração entre regiões (SILVEIRA; NÓBREGA, 2005).

A infraestrutura rodoviária, elemento central desse sistema, impacta diretamente a qualidade e a segurança viária. A demanda por obras no setor tem aumentado constantemente, o que inclui um volume crescente de projetos de pavimentação. Essa situação gera pressão sobre os recursos naturais utilizados como matéria-prima na construção civil. A extração de agregados virgens — como areia e brita, amplamente empregados na execução de pavimentos, provoca uma série de impactos ambientais, incluindo a degradação de paisagens, ameaças a recursos naturais e efeitos inerentes aos processos de fabricação (ANEPAC, 2023).

Com o avanço do ramo construtivo, ainda que, positivo economicamente, intensifica o risco de esgotamento dos recursos naturais. Em 2014, das 102.225.000 toneladas de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) produzidos, apenas 20,3% foram recicladas, totalizando 81.473.325 toneladas destinadas a aterros sanitários, aterros de inertes ou outras formas de deposição. Em 2019, esse percentual caiu para 16,1%, resultando em 88.156.666,5 toneladas encaminhadas sem qualquer tipo de reaproveitamento (ABRECON, 2020).

Apesar do grande volume anual, os RCD são classificados pela Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente como resíduos aptos a retornar ao ciclo produtivo próprio ou de outros compostos (CONAMA, 2015). Em suas possíveis aplicações, destaca-se a substituição de agregados naturais — recurso mineral mais consumido no mundo depois da água e representado principalmente pela areia e pela

brita (ANEPAC, 2023). Essa substituição é vista como essencial, uma vez que, segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (2019), o volume de areia consumido globalmente já supera sua taxa de reposição natural. O uso de RCD como agregado, portanto, *“Aumenta a lucratividade do empreendimento e atenua impactos, seja pela diminuição da extração de matéria-prima, seja pela redução da quantidade de resíduos gerados”* (LIMA; PINHEIRO; OLIVEIRA, 2022).

Estes resíduos, popularmente conhecidos como entulho, exigem gestão adequada para mitigar danos ambientais. A compreensão dos materiais e de suas interações é fundamental, sobretudo em misturas desenvolvidas para otimizar o desempenho de camadas de pavimentos. A disposição incorreta de RCD contribui para a proliferação de vetores de doenças, poluição visual, obstrução de vias e assoreamento de cursos d’água, além de reduzir a vida útil de aterros sanitários. A regulamentação do manejo desses resíduos, conforme a Resolução nº 307/2015, estabelece diretrizes para classificação, responsabilidades e incentivo à reciclagem (CONAMA, 2015).

Sob essa perspectiva, a busca por soluções sustentáveis na engenharia torna-se imperativa, exigindo novas abordagens. A incorporação de RCD ao solo enquadra-se como uma técnica de estabilização, cujo objetivo é melhorar suas propriedades geotécnicas e, dessa forma, viabilizar seu uso do material local, aspecto crucial na escolha dos métodos construtivos. O transporte de materiais de empréstimo, muitas vezes provenientes de longas distâncias, pode ser mitigado com o uso de resíduos tratados (BERNUCCI *et al.*, 2022).

A diversidade de solos no Brasil exige estudos específicos para cada condição, incentivando pesquisas voltadas à caracterização e ao desempenho de misturas. Dessa forma, quando incorporamos RCD ao solo – com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas, devemos atender aos requisitos mínimos exigidos pelas normas vigentes. Esse tipo de estabilização envolve processos mecânicos e físicos e pode incluir, por exemplo, a adição de estabilizantes químicos, como o cimento (ORIOLI, 2024).

O cimento Portland é um dos estabilizantes mais utilizados, pois aumenta a resistência dos solos e reduz sua suscetibilidade à água — parâmetro essencial quando se trata de solos argilosos ou siltosos, que apresentam elevada absorção. Essa técnica visa viabilizar a aplicação desses materiais em pavimentação. Misturas solo-cimento são amplamente empregadas na engenharia de pavimentos, em vias

urbanas, pátios industriais e até na produção de tijolos e blocos (BROERING *et al.*, 2019). Sua eficácia reside na capacidade do cimento de aglutinar partículas, conferindo maior resistência mecânica e durabilidade à mistura. A incorporação de RCD como agregado reciclado configura-se como uma extensão dessa técnica (BERNUCCI *et al.*, 2022).

O estudo de Silveira e Nóbrega (2005) demonstrou que misturas solo-cimento com proporções de RCD reciclado podem atender às especificações tecnológicas exigidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Esse resultado reforça o potencial técnico do RCD para substituir solo natural ou agregados convencionais em misturas cimentadas, alinhando-se às diretrizes de gestão de resíduos (CONAMA, 2015) e configurando-se como alternativa promissora para o setor.

1.1 Justificativa

A relevância desta pesquisa, que analisa o desempenho de um solo melhorado com cimento e adição de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para aplicação em pavimentação, fundamenta-se em aspectos ambientais e técnicos. A conscientização sobre práticas construtivas sustentáveis tem aumentado, assim como a necessidade de uma gestão eficiente dos resíduos, tema amplamente discutido em estudos sobre o uso de RCD (SILVEIRA; NÓBREGA, 2005). A busca por materiais alternativos e de menor custo para obras de infraestrutura também impulsiona a investigação de soluções inovadoras, como a proposta neste estudo. Isso vai de encontro com o cenário atual referente aos desastres climáticos no Brasil, que evidenciam a necessidade urgente de soluções de engenharia mais resistentes, sustentáveis e economicamente viáveis. Segundo o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, CEMADEN, apenas nos meses de maio e junho de 2024, mais de 90% dos municípios gaúchos foram afetados, com destruição de rodovias, erosão de taludes e comprometimento de pavimentos em diversas regiões (CEMADEN, 2024). Nesse contexto, estudos como este, que permitem uma análise e avaliação dos materiais disponíveis na região, bem como uma destinação mais adequadas aos resíduos produzidos, são de suma importância para o desenvolvimento técnico e econômico dos lugares com aplicações em potencial desses materiais.

Apesar de existirem pesquisas promissoras, como a de Silveira e Nóbrega (2005), ainda há lacunas no conhecimento que justificam novas investigações, especialmente diante da diversidade de resíduos que precisam ser classificados. O artigo de Bernucci *et al.* (2022), por exemplo, destaca a “total ausência de estudos anteriores enfocando resíduos de construção e demolição na região de Piracicaba [...] no que concerne à sua aplicação como agregado no compósito solo-cimento” antes daquele trabalho, evidenciando a necessidade de estudos contínuos para ampliar a compreensão do tema. Essa carência de dados específicos pode limitar a aplicação mais ampla de materiais alternativos em pavimentação.

Esse cenário, inclusive, pode ocorrer em outras regiões brasileiras ou em relação a diferentes tipos de RCD e solos, exigindo atenção às diretrizes de gerenciamento de resíduos (CONAMA, 2015). Cada tipo de RCD — seja proveniente de concreto, materiais cerâmicos ou argamassas — e cada tipo de solo apresentam características próprias, que influenciam diretamente o comportamento da mistura final. Essas variações reforçam a importância de obter dados abrangentes e consistentes.

Finalmente, este trabalho propõe-se a contribuir para a disseminação do conhecimento sobre essa alternativa sustentável, incentivando sua adoção por órgãos públicos e empresas dos setores de construção e infraestrutura. A divulgação de resultados de pesquisas envolvendo RCD em misturas de solo melhorado com cimento é fundamental para promover práticas mais sustentáveis, uma vez que a consolidação de dados técnicos pode, inclusive, subsidiar a atualização ou criação de normas específicas para dosagem e aplicação desses materiais.

1.2 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar as propriedades geotécnicas de um solo residual argiloso melhorado com 30% de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) de concreto e 4% de cimento, visando sua aplicação em camadas de pavimentos rodoviários, comparando-o com o solo natural.

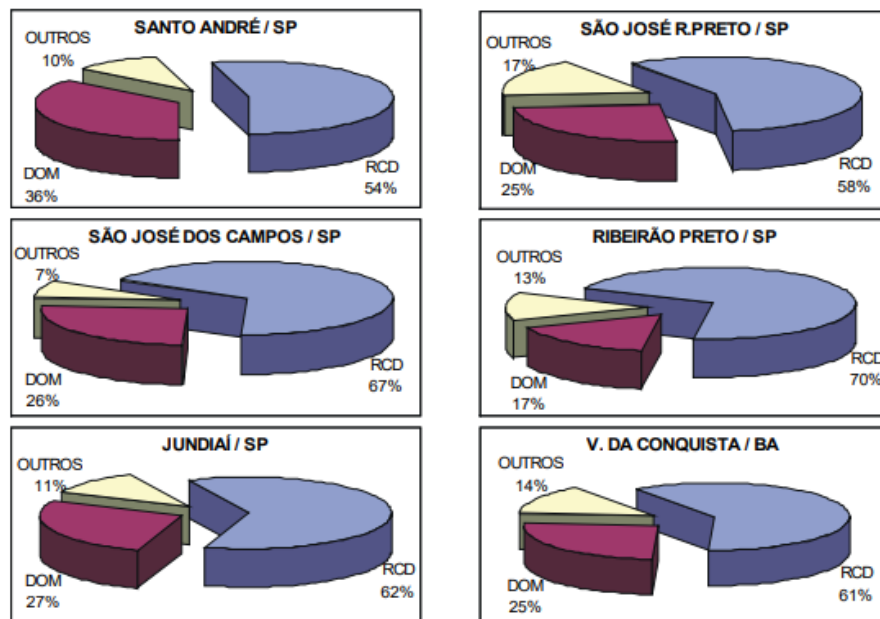
1.2.1 Objetivos específicos

- a) Verificar as melhorias obtidas na capacidade de suporte de um solo melhorado com RCD e cimento através do ensaio de CBR.
- b) Avaliar a resistência à compressão simples de um solo residual melhorado com RCD e cimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), no Brasil, cada habitante gera em média 1,04 kg de resíduos sólidos urbanos (RSU) por dia (2022) e de todo volume gerado 30% é destinado para lixões-disposição essa que, segundo a Lei nº 12.305 de 2010 deveriam ser erradicadas até 2014, contrastando a realidade atual no Brasil com mais de 2.500 lixões em atividade. O restante desse volume é disposto através de aterros sanitários (40%), aterros controlados (28%) e apenas 2,0% é reciclado (SNIS, 2021). Tarcísio de Paulo Pinto (2019) em sua dissertação afirmou que, de todo RSU gerado no Brasil, cerca de 50% a 70% é proveniente do setor da Construção Civil, ilustrado pela figura 1 que mostra o levantamento realizado com diversas cidades brasileiras.

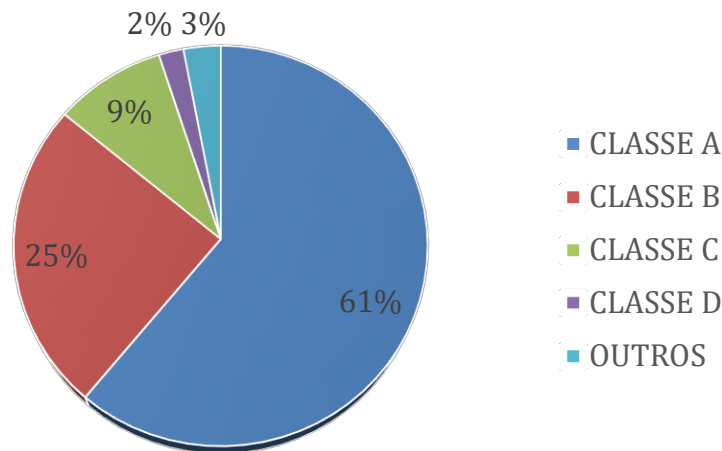
Figura 1: Distribuição dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.



Fonte: Pinto, 1999

De acordo com o relatório anual do SNIS- Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (2021) 85% de todo RCD gerado no Brasil possui potencial de reutilização, ou seja, para voltar pro ciclo de vida do seu próprio ou de outro produto, isso porque se enquadram na classificação de resíduos A e B da Resolução nº 307 do CONAMA (2015), representado pelo gráfico abaixo:

Gráfico 1: Classificação dos RCD no Brasil em 2021.



Fonte: SNIS, 2021

Em paralelo com a problemática da geração de resíduos, têm-se a necessidade de investimento na área de pavimentações. O Relatório anual da Confederação Nacional de Transporte – CNT (2021) afirma que, o modal rodoviário no Brasil é responsável pelo transporte de 61,1% das mercadorias e cerca de 95,3% dos passageiros e atualmente apenas 12,4% da malha rodoviária é pavimentada e dessas, 90% são pistas simples(CNT,2021). Diante desse cenário, se faz necessário estudos que viabilizem cada vez mais esse setor de forma econômica, sustentável e eficiente.

Apesar dessa realidade, o potencial de reutilização do RCD é capaz de melhorar essas proporções drasticamente. Suas aplicações já são consolidadas na construção civil, como nos projetos-piloto realizados nos bairros Cajuru e CIC, em Curitiba, onde grande parte dos agregados naturais foram substituídos por agregados reciclados. Outro exemplo relevante é o Projeto Estrada Sustentável, na via Tabaí, no Rio Grande do Sul, que empregou agregados reciclados de RCD em grande parte de suas camadas de base. Segundo Lima, Pinheiro e Oliveira (2022), a substituição de agregados naturais por reciclados pode reduzir custos de pavimentação em até 40%.

Em suma, dado o elevado volume de resíduos gerados no Brasil e a baixa taxa de reciclagem, torna-se fundamental explorar alternativas de reaproveitamento desse material para promover a sustentabilidade e reduzir os impactos ambientais. A literatura brasileira já aponta caminhos promissores: por exemplo, Silveira (2005)

demonstrou que resíduos de construção e demolição (RCD) podem ser usado como agregado na estabilização de solos residuais melhorados com cimento, atendendo a critérios tecnológicos para aplicação em pavimentos, mitigando não só o problema do descarte inadequado, mas também contribuindo para soluções econômicas e eficientes para pavimentação.

2.1 SOLOS RESIDUAIS

Solos residuais são o produto do intemperismo químico e físico que atua sobre as rochas, sendo assim, herdando para si características físicas e mecânicas de suas origens. Um desses atributos é a estruturação das partículas, que além da herança de origem também é influenciado por agentes que promovem a ligação das mesmas. Entender o comportamento e o potencial do solo, favorecem seu uso para diversas aplicações, uma delas, bem recorrente é no setor rodoviário. (HEIDEMANN *et al.*, 2020).

A utilização de solos em pavimentação possui raízes ancestrais, remontando às estradas romanas do século III a.C., porém a complexidade técnica contemporânea exige domínio aprofundado das propriedades geotécnicas para garantir desempenho adequado (BERNUCCI *et al.*, 2022). No contexto brasileiro, os solos residuais de origem de rochas ígneas do tipo gnaiss apresentam grande potencial para utilização na engenharia mas também desafios intrínsecos como alta sensibilidade à variação hídrica e baixa resistência mecânica, exigindo, em alguns casos, intervenções de estabilização química ou mecânica para viabilizar sua aplicação (IPT, 2019).

Sistemas de classificação como o da norma 143 (DNIT,2020) categorizam solos conforme critérios granulométricos e de plasticidade. Parâmetros como os limites de Attenberg, representados pelo limite de liquidez e limite de plasticidade, que avaliam o comportamento de escoamento do solo conforme adição de água, são fundamentais para determinar em que regiões do pavimento esse solo pode ser aplicado. Solos granulares (areias e pedregulhos) são preferenciais para camadas de base devido à sua elevada permeabilidade e resistência à deformação, enquanto solos finos (argilosos e siltosos) demandam correções significativas para uso em sub-bases (SOUZA, 2005).

A granulometria dos solos residuais aplicados em camadas de pavimentos possui grande influência nas propriedades físicas e mecânicas. De acordo com

Luciano *et al.*(2012) a predominância de finos reduz a massa específica seca máxima porque as partículas lamelares de argila formam uma estrutura floculada altamente porosa, apresentam forte retenção de água devido à elevada superfície específica e possuem peso específico dos sólidos relativamente baixo. Esses fatores dificultam o empacotamento eficiente durante a compactação, resultando em maiores volumes de vazios e, conseqüentemente, densidades secas menores.

Outro fator crucial na análise de solos residuais para aplicação em engenharia é sua composição química. Miranda e Silva (2016) concluíram que, a adição de compostos orgânicos em solos referência, tem grande influência direta com o limite de liquidez e aumentam de forma expressiva o índice de plasticidade do solo, que é definido pela diferença do limite de liquidez pelo limite de plasticidade. Godoi (2014), em sua pesquisa a respeito da análise mineralógica de um solo residual do tipo gnaisse coletado na região de Santo Amaro – SC, evidenciou uma presença predominante de compostos mineralógicos do tipo Quartzo e Caulinita em suas amostras. A presença desses minerais pode influenciar o limite de liquidez (LL) diretamente. Eles possuem valores de LL na ordem de 39% a 59% e refletem nas propriedades do solo. Quando tratamos de compostos mais finos oriundos da argila, como Illita, esses valores podem chegar até 120% (Miranda e Silva, 2016).

2.2 MISTURAS SOLO-CIMENTO

A norma DNIT 143/2010 atribui o conceito dessa composição como sendo *“Material proveniente de mistura de solo, cimento e água em proporções previamente determinadas por processo próprio de dosagem em laboratório, de forma a apresentar determinadas características de resistência e durabilidade”*. Esse recurso de adição com agente cimentício busca melhorar as propriedades de resistência e durabilidade do solo, e surge como uma opção viável para a utilização do solo local. (ORIOLI, 2024).

Os solos residuais, característicos de regiões tropicais, frequentemente apresentam baixa capacidade de suporte e alta susceptibilidade às variações de umidade, limitando seu uso direto em pavimentação (IPT, 2019). A estabilização com cimento é uma técnica eficaz para melhorar suas propriedades geotécnicas, promovendo o aumento da resistência mecânica e redução da sensibilidade à água. Quando o cimento é adicionado ao solo residual, ocorrem reações químicas de

hidratação que formam compostos cimentícios, modificando positivamente sua estrutura e comportamento (DNIT, 2022).

Essa técnica é particularmente vantajosa por reduzir a necessidade de materiais convencionais, como brita e areia, contribuindo para a sustentabilidade na construção civil. Além dos benefícios técnicos, a melhoria de solos residuais com cimento apresenta vantagens econômicas e ambientais. Santos *et al.* (2015) em seus estudos demonstrou que a estabilização pode reduzir em até 8,8% os custos com materiais de pavimentação, quando comparada a soluções convencionais. O processo também minimiza os impactos ambientais associados à extração de recursos naturais e ao descarte inadequado de solos locais.

No entanto, é essencial realizar ensaios de dosagem e caracterização para garantir a eficiência da mistura, considerando fatores como teor de umidade, porcentagem de cimento e tempo de cura (ABNT NBR 16697, 2018). A combinação entre solos residuais e cimento representa, portanto, uma solução tecnicamente viável e ambientalmente responsável para aplicação em pavimentos de baixo volume de tráfego.

As normas DNIT 140/2010 e DNIT 142/2022 preconizam uma série de requisitos para a misturas de solo melhorado com cimento com aplicação em sub bases e bases de pavimentos respectivamente, em especial com relação as características geológicas do solo e as propriedades do aglomerante. Dentre esses requisitos, tem-se os limites de de Attenberg, especificando o limite de liquidez-LL, como sendo $\leq 25\%$ (DNER – ME 122/94) e o limite de plasticidade –LP, como sendo $\leq 6,0\%$ (DNER – ME 082/94). Além dessas informações atribui condições mínimas para a mistura de Índice de Suporte Califórnia $ISC \geq 80 \%$ (DNIT 172 – ME) e Expansão máxima de $0,5 \%$ (DNIT 172 – ME) para aplicação em camadas de base e . $ISC \geq 30 \%$ (DNIT 172 – ME) com expansão máxima de $1,0 \%$ (DNIT 172 – ME) para camadas de sub base.

Dentre os solos, existem 3 principais tipos separados conforme sua granulometria, grossos, finos e altamente orgânicos. O Manual de Pavimentações (DNIT,2020) institui que os solos que apresentam pelo menos 50% do seu material retido na peneira 200 são considerados grossos, representado entre outros tipos pelas areias, caso contrário, são considerados finos, com exemplo das argilas. Os solos orgânicos são facilmente identificados a olho nú. (DNIT,2020).

Com base na pesquisa intitulada "Estabilização de Solo – Cimento para Base de Pavimento de Rodovia em São Luís – MA", os autores Santos e Caldeira (2021) realizaram uma investigação laboratorial com foco na estabilização físico-química de solo laterítico utilizando diferentes teores de cimento (3%, 5% e 7%). A principal contribuição do estudo está na demonstração de que o uso do cimento Portland de classe 32 MPa melhora significativamente a capacidade de suporte do solo areno-argiloso analisado, evidenciado pelo aumento no Índice de Suporte Califórnia (CBR) de 12,3% (solo natural) para até 106,8% com 7% de cimento, apresentando resistência à compressão de 1,74 MPa e uma expansão de 0,6%. Os resultados indicaram que a mistura com 5% de cimento apresentou desempenho suficiente para ser utilizada como base de pavimento, com CBR médio de 90,5% e expansão dentro dos limites normativos, embora a resistência à compressão simples (1,52 MPa) tenha ficado abaixo do mínimo exigido para essa finalidade. Já a mistura com 3% de cimento se mostrou adequada apenas como sub-base. Por fim, apesar da mistura com 7% de cimento não atingir os pré requisitos mínimos de resistência à compressão de 2,1 MPa e expansão mínima de 0,5% de acordo com o DNIT (2010), os autores validam sua aplicação para camadas de base em pavimentos justificando ter CBR – parâmetro classificatório, mais elevado e mais indicado e atribuindo o aumento da expansão a adição de cimento, não apresentando potenciais dificuldades em sua implementação em obra.

2.3 MISTURA SOLO - CIMENTO - RCD

A pesquisa conduzida por Oliveira *et al.* (2023) apresenta contribuições significativas ao demonstrar, por meio de uma caracterização técnica detalhada e ensaios laboratoriais rigorosos, o potencial de aplicação de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) em pavimentos urbanos. Os resultados evidenciaram que os agregados reciclados, apesar de apresentarem algumas limitações quando comparados aos agregados naturais, possuem desempenho satisfatório nos parâmetros essenciais para sua utilização em bases e sub-bases de pavimentos. Os resultados e conclusões da pesquisa de Pereira *et al.* (2022), demonstraram que os ensaios triaxiais dinâmicos de uma mistura contendo 70% de solo e 30% de RCD apresentou módulo de resiliência médio de 450 MPa, valor próximo ao obtido pela mistura equivalente de solo-brita (525 MPa), o que indica desempenho mecânico satisfatório. Além disso, por meio do software MeDiNa,

verificou-se que estruturas de pavimento dimensionadas com a mistura solo-RCD 70-30 apresentaram valores de afundamento de trilha de roda (ATR) e área trincada compatíveis com os critérios de projeto, evidenciando seu potencial de substituição dos agregados convencionais.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) reforça, em manuais técnicos como o Manual de Pavimentação (2020), que a estabilização de solos com materiais alternativos, como o RCD, contribui para a redução de impactos ambientais e otimização de recursos, critérios essenciais para projetos de infraestrutura no país (ORIOLI, 2024). Estudos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) demonstram que a reutilização de RCD em pavimentação pode gerar economia de até 30% nos custos de execução, além de minimizar passivos ambientais. Nesse contexto, a combinação de cimento e RCD surge como uma alternativa viável para o setor rodoviário, atendendo tanto às demandas técnicas quanto às exigências de sustentabilidade.

Dessa forma, A incorporação de agregado reciclado atua na estabilização física de solos - siltosos e argilosos, através da modificação da matriz estrutural. Partículas granulares dos agregados funcionam como elementos de reforço, reduzindo a plasticidade e melhorando a distribuição de tensões. A pesquisa de ORIOLI, 2024 evidencia isso através da análise da mistura com adição de 30% de agregado reciclado, que aumentou a massa específica seca máxima (ρ_d máx) em 12% devido à otimização da compactação, reduzindo vazios da mistura e elevando a capacidade de suporte, sendo potencializado em energias de compactação modificadas.

2.3.1 Misturas argilosas

Solos argilosos, por sua alta plasticidade e expansibilidade, demandam abordagens diferenciadas na estabilização com cimento. O DNIT (2020) recomenda dosagens mais elevadas (6% a 10% de cimento) para neutralizar sua sensibilidade à água, com atenção especial ao teor de umidade ótima durante a compactação (ABNT NBR 7182:2025). Os limites de Atterberg (ABNT NBR 6459:2025 e 7180:2025) são parâmetros essenciais para avaliar a redução da plasticidade pós-estabilização, enquanto ensaios de compressão simples (ABNT NBR 12025:2012) verificam o ganho de resistência. A ABNT NBR 12253:2012 estabelece que misturas com argilas devem apresentar resistências superiores a 1,7 MPa para uso em sub-base, com cura mínima de 28 dias para garantir reações químicas completas (IPT, 2019).

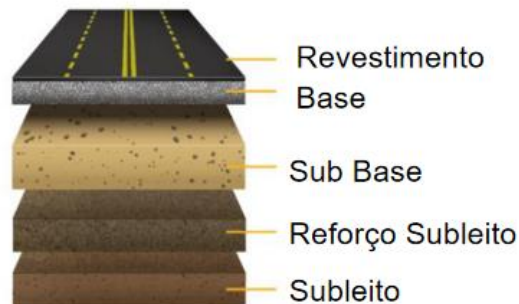
As características expansivas dos solos argilosos exigem controles rigorosos. O ensaio de durabilidade (ABNT NBR 13554:2019) é crítico para verificar a resistência aos ciclos de umidade e secagem, comum em climas tropicais. Segundo o IPT (2019), a presença de minerais expansivos (ex.: montmorilonita) pode exigir aditivos complementares ao cimento, como cal ou pozolanas. A norma ABNT NBR 12253:2022 ainda prevê a análise de retração linear para evitar fissuras pós-cura. Comparados a solos arenosos, os argilosos demandam maior energia de compactação e tempos de cura prolongados (21 a 28 dias), conforme destacado no Manual de Pavimentação do DNIT (2020), mas oferecem maior ganho de resistência a longo prazo quando adequadamente estabilizados.

2.4 ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS

De acordo com o DNIT (2010), o pavimento de uma rodovia representa uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito - a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito. A segurança de um bom pavimento está relacionada a alguns aspectos como suportar os efeitos do mau tempo, permitir deslocamento suave, não causar desgaste excessivo dos pneus nem ruídos altos, ter estrutura forte, resistir ao desgaste, permitir o escoamento das águas (drenagem) e ter boa resistência a derrapagens.

Existem dois principais tipos de pavimentos classificados conforme seus materiais de execução bem como a sua distribuição de esforços. Os pavimentos do tipo rígidos são constituídos por camadas que trabalham essencialmente à tração. Seu dimensionamento é baseado nas propriedades resistentes de placas de concreto, as quais são apoiadas em uma camada de transição, a sub-base (DNIT,2010). Os pavimentos do tipo flexíveis correspondem, segundo Rocha *et al.* (2022), a 95% de toda malha rodoviária pavimentada e atuam através da distribuição de tensões pelas camadas geralmente separadas em subleito, reforço de subleito, sub base, base e revestimento, onde as de melhor qualidade encontram-se mais próximas da carga aplicada, como mostra a figura 2 (DNIT,2010).

Figura 2: Principais camadas de um pavimento flexível.



Fonte: DNIT,2010.

Para cada camada é exigido um material que atenda a determinados pré requisitos, desde características físicas, como granulometria, até características mecânicas, como a resistência a penetração do material e sua capacidade de suporte, exemplificada pelo ensaio de Índice de suporte Califórnia (CBR). A análise desse índice é crucial para classificar a aplicação do material ajudando a dimensionar a espessura das camadas de base, sub-base e subleito. O resultado do CBR é expresso em porcentagem (%) e compara a resistência à penetração do solo analisado com a resistência de um material padrão (pedra britada), que possui um índice equivalente a 100%. O resultado é obtido através da seguinte equação:

$$CBR = \frac{\text{Pressão calculada}}{\text{Pressão padrão}} * 100$$

Onde :

CBR É o Índice de Suporte Califórnia, expresso em %;

Pressão calculada É o maior valor entre as pressões equivalentes a penetração de 2,54 mm e de 5,08mm, expressa em MPa e

Pressão padrão É o valor da pressão tabelada equivalente a respectiva profundidade adotada, expressa em MPa.

De acordo com o DNIT(2010), cada camada deve respeitar um índice de CBR mínimo e uma expansão correspondente do material. A expansão é medida através de um deflectômetro e definida pela seguinte equação:

$$E = \frac{lf - li}{Ho} * 100$$

Onde:

- E É a expansão, expressa em %;
 Lf É a leitura final do deflectômetro, expressa em mm;
 Li É a leitura inicial do deflectômetro, expressa em mm e
 Ho É a altura inicial do corpo de prova.

Para as camadas de subleito é exigido um índice de CBR $\geq 2,0\%$ com sua respectiva expansão $\leq 2,0\%$. Para a camada superior, reforço do subleito, o material constituinte deve apresentar índice de CBR \geq CBR do subleito com expansão $\leq 2,0\%$. Na sequência, na camada de sub base é exigido um material cujo CBR seja $\geq 20\%$ com expansão $\leq 1,0\%$ e por fim, na camada de base, um material com índice CBR $\geq 80\%$ com expansão $\leq 0,5\%$. Para a camada de base, ainda são exigidas características físicas do solo aplicado nessa camada, são elas:

- Limite de liquidez máximo = 25%
- Índice de Plasticidade máximo = 6%
- Equivalente de Areia mínimo = 30%

Além disso, o DNIT(2010) ainda complementa:

“Caso o Limite de Liquidez seja maior que 25% e/ou índice de plasticidade, maior que 6, poderá o solo ser usado em base estabilizada, desde que apresente Equivalente de Areia maior que 30%, satisfaça as condições de Índice Suporte Califórnia e se enquadre nas faixas granulométricas citadas adiante” na tabela 1.

Tabela 1: Faixas granulométricas para material granular em bases melhoradas

TIPOS PENEIRA	I				II	
	A	B	C	D	E	F
	% em peso passando					
2"	100	100	—	—	—	—
1"		75-90	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	...	—
Nº4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
Nº10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25

Fonte: DNIT (2006).

2.5 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

A caracterização dos materiais constituintes da mistura – solo residual, cimento e Resíduos de Construção e Demolição (RCD), é fundamental para avaliar sua viabilidade em pavimentações. Para o solo, os ensaios de caracterização como massa específica, limites de Attenberg e granulometria são requisitos exigidos pela norma DNIT 140/2010. Além desses ensaios, a pesquisa também submeterá apenas o solo aos ensaios de compactação e CBR para fins de comparação do ganho de resistência. O RCD, por sua vez, deve ser analisado quanto à sua distribuição granulométrica, garantindo que esteja dentro dos parâmetros adequados para uso em estabilização. Após a análise isolada, faz-se necessário, os ensaios das misturas. Os critérios de classificação da mistura solo-cimento-RCD quanto ao uso em camadas de pavimentos é determinado pelo ensaio de CBR, normatizado pela NBR 9895:2025. Ele é precedido pelo ensaio de compactação, que determina a umidade ótima da mistura.

a) Massa específica

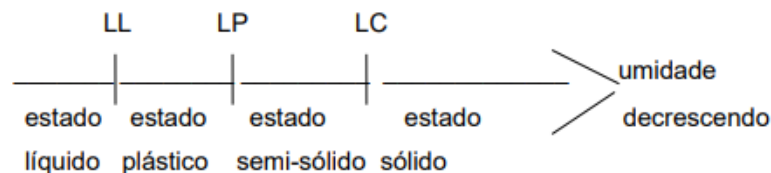
Normatizado para solos, esse ensaio é separado para materiais sólidos que passam ou ficam retido na peneira de 2,0 mm, de acordo com a NBR 17212:2025 e 6458: 2025 respectivamente. Ele determina a relação entre a massa dos sólidos e o volume que eles ocupam sem considerar os vazios, sejam eles, preenchidos por ar ou água. Para o material passante na peneira de abertura 2,0 mm utiliza-se o picnômetro ou balão volumétrico e já para o material retido, o ensaio é realizado com o auxílio de uma balança hidrostática. Para o RCD, ocorre a separação entre a parte

graúda e miúda, regida pelas normas NM 52:2009 e NM 53:2002 respectivamente, onde a parte graúda refere-se ao material que tem suas partículas retidas, na sua grande maioria, na peneira de abertura 4,75 mm e a parte miúda, o material que, em sua grande maioria passa na peneira 4,75 mm e fica retido da peneira de abertura 75 μm .

b) Limites de Attenberg

Esses ensaios são regidos pela ABNT NBR 6459:2025 – para limite de liquidez, e pela ABNT NBR 7180:2025 - para limite de plasticidade, e são aplicados a solos cujo material – exigido pela NBR 6457:2024 de preparação das amostras, passe pela peneira de abertura 0,42 mm e constitua um montante de no mínimo 200g. Esses ensaios avaliam a relação entre o teor de umidade e a consistência do solo, ajudando a prever como o material se comportará em diferentes condições. O ensaio de Limite de liquidez (LL) mensura o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o líquido, ou seja, quando o solo perde resistência e começa a fluir como um fluido viscoso. Já o ensaio de limite de plasticidade, fornece o teor de umidade no qual o solo deixa de ser plástico e passa para o estado semi-sólido, ilustrado pela figura 3, tornando-se quebradiço (Lino, Jackson, & Joviano, 2015). Estudos realizados em 494 jazidas do Ceará demonstraram que solos com Limite de Plasticidade (LP) superior a 25% são inviáveis para sub-base sem tratamento prévio, conforme normativas do DERT/CE (Souza Junior, 2005).

Figura 3: Limites de Attenberg conforme estados físicos da amostra



Fonte: DNIT (2006).

c) Granulometria

O ensaio de granulometria, para os solos, é separado em peneiramento fino, sedimentação e peneiramento grosso. É normatizado pela ABNT 7181 de 2025 e determina a distribuição do tamanho das partículas de um solo, classificando-as em

frações como pedregulhos, areias, siltes e argilas. Para a aplicação em pavimentação existem requisitos mínimos exigidos para solos de acordo com a norma DNIT 143 e para os agregados reciclados de acordo com a NBR 15115:2004. Para a parte de peneiramento, o material é submetido a uma série de peneiras com aberturas que vão desde 0,075 mm até a 50 mm. Nessa pesquisa, para o solo, vamos limitar o peneiramento grosso até a abertura de 4,8 mm e até 24 mm para o RCD. A parte de sedimentação é realizada para o material que passou na peneira de 2,0 mm. Nessa etapa, o material é misturado com um defloculante para a medição da densidade da mistura em intervalos pré determinados por norma, para se obter o percentual do material pulverulento. Após esse procedimento, o material é despejado na peneira com abertura de 0,075 mm e submetido a secagem para posterior peneiramento fino. (ABNT 7181:2025).

Após a caracterização individual dos materiais, a mistura deve ser submetida a ensaios de compactação (ABNT NBR 7182:2016), resistência à penetração (CBR) (ABNT NBR 9895:2016), fundamentais para dimensionamento de pavimentos.

d) Compactação Proctor

O ensaio de compactação, regido pela NBR 7182:2016, define a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima da mistura, parâmetros críticos para garantir o grau de compactação adequado em campo e a umidade ótima para o máximo empacotamento das partículas. O ensaio consiste na moldagem de um corpo de prova formado por um número determinado de camadas a serem golpeados por um soquete padrão. Ao final desse processo, é necessário separar uma parcela do material para obter a umidade da amostra e por fim, construir um gráfico umidade x massa específica aparente seca, com o objetivo de se obter a umidade ótima da mistura. O número de corpos de prova deve ser o suficiente para contemplar pelo menos 3 pontos no trecho ascendente do gráfico e 2 do trecho descendente. A partir da umidade obtida por esse ensaio é que se molda o corpo de prova para o ensaio de CBR, descrito abaixo.

e) Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O CBR avalia a capacidade de suporte da mistura, indicando sua resistência à deformação sob carregamento constante e padronizado pela NBR 9895:2016. Estudos do DNIT, como a normas 140:2022 e 142:2022 que preconizam as diretrizes para sub bases e bases de solo melhorado com cimento recomendam que as misturas atinjam valores mínimos de CBR de acordo com cada camada, nessa pesquisa, o foco será a aplicação em bases e sub-bases, sendo assim, os valores de CBR devem respeitar os limite de serem >80% e >30% respectivamente.

f) Resistência à Compressão

É um procedimento utilizado para determinar a resistência mecânica do material por meio da aplicação de carga axial crescente em um corpo de prova. O ensaio consiste em submeter a amostra cilíndrica a compressão até a ruptura, registrando-se a tensão máxima suportada. Para solos coesivos, o ensaio em amostras não confinadas é regido pela norma NBR 12770:2022. Quando há a presença de agregados, é necessário que se molde a amostra em um corpo de prova que respeite o limite do diâmetro como sendo, no mínimo, 3x a dimensão máxima do agregado, além de possuir altura equivalente a 2x o diâmetro, como preconiza a NBR 5738:2015, de preparo e cura para amostras de concreto. Para a análise dessa pesquisa, serão levados em consideração esses aspectos.

2.6 TRABALHOS ACADÊMICOS SIMILARES

A utilização de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) associados ao cimento para melhoria de solos em camadas de pavimento tem demonstrado potencial para aumentar a capacidade de suporte e a resistência mecânica de solos locais. Trabalhos anteriores, como os de Nascimento (2024), Orioli (2024), Crippa et. al(2023), avaliaram diferentes proporções de RCD e cimento, obtendo melhorias significativas nos parâmetros geotécnicos, como o Índice de Suporte Califórnia (CBR) e a resistência à compressão simples. Esses estudos reforçam a viabilidade técnica e ambiental da aplicação desse material em pavimentação, destacando também a importância da dosagem ideal para garantir desempenho satisfatório. Abaixo, segue

os principais resultados analisados dessas pesquisas, estabelecendo comparações e identificando lacunas que justificam a continuidade da investigação proposta neste trabalho.

Quadro 1: Trabalhos similares e seus respectivos resultados

TÍTULO, ANO	AUTORES	TEOR DE CIMENTO	TEOR DE RCD	ENSAIOS REALIZADOS	RESULTADOS PRINCIPAIS	LINKS DE ACESSO
Uso de agregado reciclado de resíduos de construção e demolição na estabilização de um solo siltesoso melhorado com cimento para aplicação em base de pavimentos urbanos,2024	MONIGLEICIA ALCALDE ORIOLI	5%	10%	resistência à compressão-7,14,28 microscopia eletrônica de varredura	aumento de 200–300% na resistência à compressão +300–500% no CBR (para sub-base). Redução de 80% na sensibilidade à água	Clique aqui
			20%			
			30%			
Incorporação de resíduos de construção e demolição em misturas compactadas de solo laterítico melhorado com cimento,2024	HENRIQUE ALVES GONDIM DO NASCIMENTO	10%	10%	ensaios de compactação e compressão simples	aumento de 162% na resistência à compressão +400% no CBR (para sub-base). Redução de 64% na sensibilidade à água	Clique aqui
			20%			
			30%			
Desempenho técnico de misturas de solo com rcd para uso em obras de pavimentação,2020	A. C. BARRETO E. F. AMORIM	-	25%	caracterização física, compactação, cbr e análise de quebra dos grãos.	aumento de 433% na resistência à compressão +800% no CBR (para sub-base). Redução de 80% na sensibilidade à água	Clique aqui
			50%			
			75%			
Influência da quantidade de RCD no comportamento mecânico de misturas de solo-cimento,2023	CRIPPA <i>et al.</i>	8%	25%	ensaios de compactação à energia normal, resistência à compressão simples e resistência tração por compressão diametral aos 2 e 7 dias de cura	aumento de 677% na resistência à compressão +1150% no CBR (para sub-base). Redução de 78% na sensibilidade à água	Clique aqui
			50%			
			75%			
DNIT 142,2022	-	2%-4%	-		-	Clique aqui

3 MÉTODO DA PESQUISA

A pesquisa será dividida em três etapas, a parte de revisão bibliográfica e a parte de ensaios e análises dos resultados. Para aprimoramento da redação, organização textual e clareza acadêmica, foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial, como o ChatGPT Plus (OpenAI) e o DeepSeek, empregadas exclusivamente como suporte na revisão linguística e estruturação do texto, sem interferência na análise dos dados, nos resultados ou nas conclusões do estudo.

O objetivo é avaliar o desempenho de um solo melhorado com RCD e cimento para potencial aplicação em camadas de base e sub base em pavimentos, analisando a influência da incorporação isolada do RCD em comparação com uma mistura de solo com cimento, ou seja, os materiais serão caracterizados e para as misturas será analisado os ensaios somente com solo, solo melhorado com cimento e solo melhorado com cimento e RCD. Baseando-se na revisão de artigos similares optou-se para a mistura de solo com cimento, um acréscimo de 4% do ligante e para a mistura solo com RCD, seguiu-se a proporção de 70% e 30% respectivamente mais 4% da massa total de acréscimo de cimento. Os ensaios laboratoriais seguiram as normas técnicas brasileiras vigentes, garantindo metodologia padronizada e resultados confiáveis. As diretrizes da ABNT serão adotadas para cada análise, assegurando conformidade com práticas reconhecidas. Essa abordagem normativa permite a comparação direta com estudos anteriores e validação técnica dos resultados.

3.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Seguindo as diretrizes do DNIT (2006) a mistura de RCD foi elaborada no intervalo pertencente a faixa C de granulometria, para isso foi separou-se quantidades específicas de cada dimensão de agregado reciclado conforme o quadro abaixo.

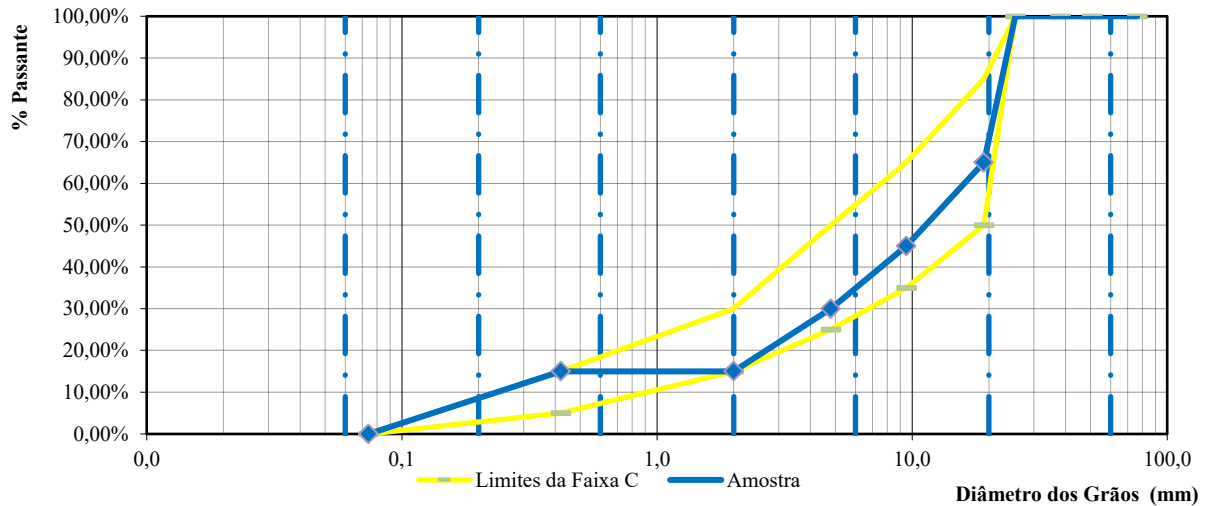
Quadro 2 : Quantitativo de RCD por dimensões

Granulometria RCD- FAIXA C , Dnit (2006)							
Aberturas	1"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°200	Fundo
	25,4 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,00 mm	0,425 mm	0,075 mm	-
Limites exigidos % retido	0%	15–50%	20–50%	10–30%	10–25%	0–10%	-
% retido adotado	0%	35%	20%	15%	15%	10%	5%

Fonte: Autor,2025.

Abaixo segue a curva granulométrica do RCD com os respectivos limites da faixa C.

Gráfico 2: Faixa granulométrica do RCD e seus limites



Fonte: Autor, 2025.

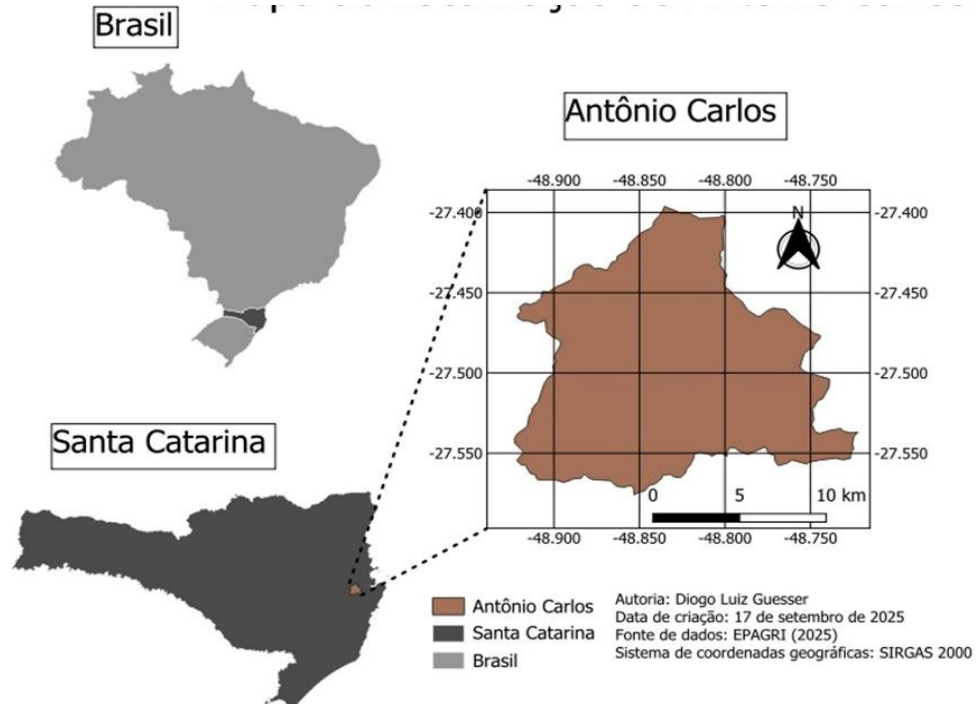
O solo analisado foi coletado na região de Antônio Carlos – Santa Catarina no segundo trimestre do ano de 2025 sob condições climáticas estáveis. Buscando o montante homogêneo a uma profundidade entre 100cm e 180cm, foi extraído um volume na ordem de 100 Litros. Abaixo segue a figura de parte da amostra retirada do local bem como sua localização a partir da imagem de satélite.

Figura 4: Amostra coletada para ensaios.



Fonte : Guessser, 2025.

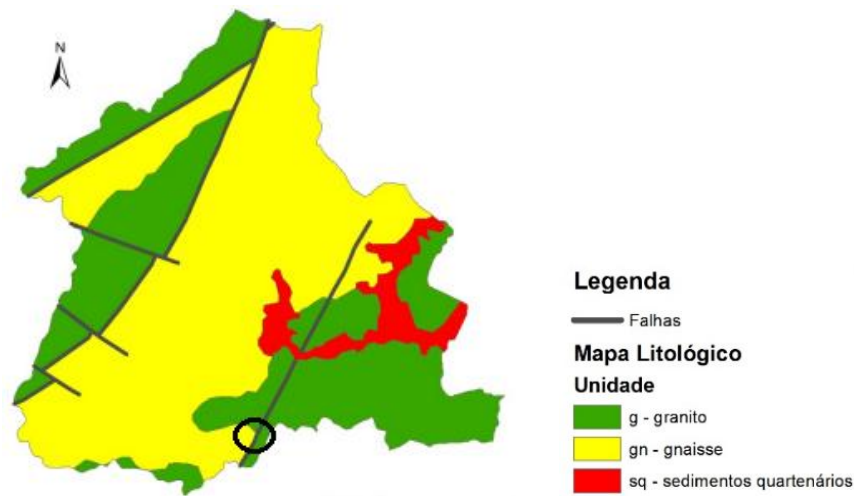
Figura 5: Localização Município de coleta do solo.



Fonte : Guesser, 2025.

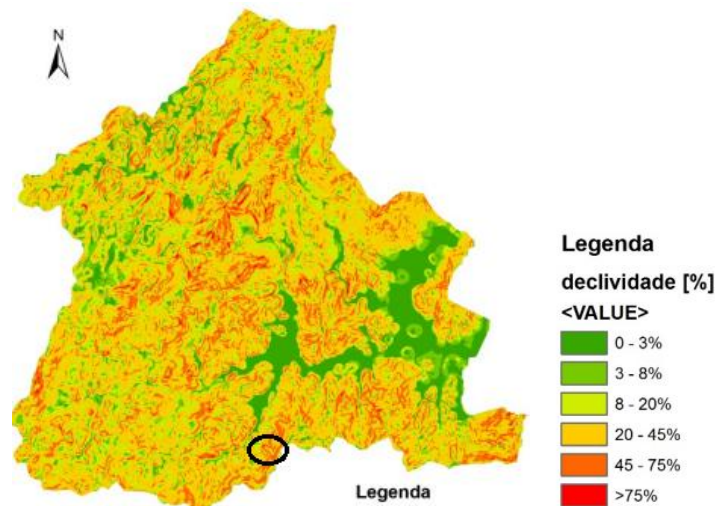
De acordo com Guesser (2013), a geologia predominante da região é composta por variações de granito, gnaiss e rochas sedimentares. O autor também analisa a declividade do município de Antônio Carlos, indicando que, na região onde a amostra desta pesquisa foi coletada, predominam inclinações entre 20% e 45% e entre 45% e 75%. Essas declividades mais elevadas estão associadas, de modo geral, à exposição de rochas do embasamento cristalino, mais especificamente, gnaisses, que apresentam maior resistência aos processos de intemperismo e erosão. Por outro lado, áreas de menor declividade tendem a concentrar materiais retrabalhados e depósitos sedimentares.

Figura 6 : Detalhe da região de coleta do solo quanto a litologia.



Fonte : Adaptado de Guessser, 2013.

Figura 7: Detalhe da região de coleta do solo quanto a declividade.



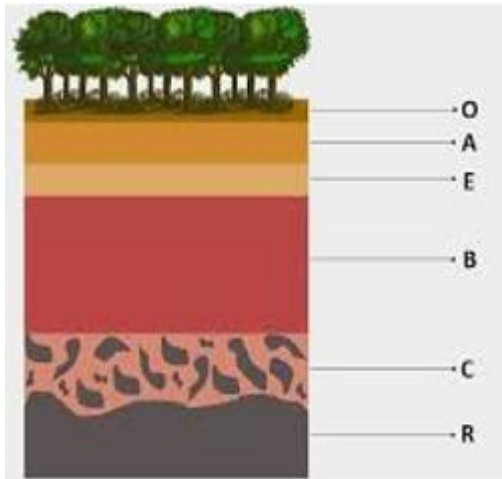
Fonte : Adaptado de Guessser, 2013.

A pesquisa de Guessser (2013) também apresenta propriedades características dos solos da região, como massa específica, ângulo de atrito e coesão. Considerando o ponto de coleta adotado neste estudo, o autor supracitado, definiu para a área, solos com valores de massa específica variando entre 1,53 g/cm³ e 1,67 g/cm³, ângulo de atrito entre 30° e 31°, e coesão entre 10,24 kPa e 11,58 kPa.

Guessser (2013) classifica o solo da região de coleta da amostra desse estudo quanto ao levantamento geológico em Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaíse. São solos característico de zonas de clima úmido e que possuem seus horizontes bem definidos. Um destaque desses materiais é a grande concentração de argilas no horizonte B em comparação com os demais horizontes, configurando a ele,

menor resistência e maior compressibilidade. Tanto o horizonte B quanto o C são bem drenados e apresentam lençol freático profundo, o que permite a sua utilização como absorvente de efluentes domésticos Guessser (2013).

Figura 8: Horizontes geológicos da amostra segundo Guessser (2013).



Horizonte O-A: De 0 a 30 cm. Matéria orgânica com textura média, estrutura granular e cor marrom-escuro;

Horizonte E: De 30 a 80 cm. Derivados de argila com textura arenosa e cor amarelo-claro;

Horizonte B: De 80 a 200 cm. Derivados de argila com textura arenosa e cor vermelho-claro

Horizonte C-R: +200 cm. Rocha sã de Gnaiss/Granito ou pouco intemperizado, com cores variadas.

Fonte : Adaptado de Guessser, 2013.

Para a obtenção das amostras de RCD, foram coletados corpos de prova de concreto provenientes de atividades acadêmicas promovidas no IFSC câmpus Florianópolis, ou seja, não se obteve características quanto ao seu preparo e materiais utilizados. O processo de britagem foi realizado manualmente com o auxílio de marretas até a obtenção de todas granulometrias necessárias.

Figura 9 : Corpos de prova de concreto para obtenção do RCD



Fonte: Autor, 2025.

O cimento utilizado no incremento das misturas foi o CP IV-32, cimento Portland pozolanico. o alto teor de pozolana, entre 15 e 50%, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos (ABCP, 2018). Abaixo segue um exemplo da análise técnica desse material fornecido pela empresa Itambé.

Tabela 2: Especificações técnicas do CP IV-32 Itambé.

Ensaio Químicos			
	SiO ₂	%	29,04
	Fe ₂ O ₃	%	4,2
	CaO	%	44,72
	MgO	%	2,76
	SO ₃	%	2,07
	P. Fogo	%	5,23
	CaO L.	%	1,72
	R. Ins.	%	27,82
	Eq. Alc.	%	1,14
Ensaio Físicos			
Exp.	Quente	mm	0,41
Tempos de	Pega (min)	Início	190
		Fim	240
Cons.	Normal	%	30,6
	Blaine	cm ² /g	4391
#	200	%	0,39
#	325	%	1,74
Resistência à	Compressão (MPa)	1 dia	16,9
		3 dias	29
		7 dias	33,8
		28 dias	46,4

Fonte: Itambé, 2025.

3.2 ENSAIOS

Para avaliar as propriedades fundamentais do material proposto, inicialmente foram realizados ensaios de caracterização, os quais possibilitam compreender melhor o comportamento tanto individual quanto nas misturas. Essa etapa é essencial para definir parâmetros básicos que servirão de referência para a análise do desempenho do material para sua respectiva aplicação.

3.2.1 Massa específica

Esse ensaio nos fornece a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Para o solo, baseou-se na recente norma brasileira NBR 17212:2025. A amostra foi preparada conforme a NBR 6457:2024 que preconiza um material passante na peneira 4,8 mm para esse ensaio e um montante inicial de no mínimo 500 g. Após a repartição por quarteamento utilizou-se, como sugerido para solos argilosos, 60g.

A realização desse ensaio com o RCD seguiu as normas NM 53:2009 para a parte graúda, referente as partículas que ficam retida na sua grande maioria na peneira de abertura 4,75 mm. Além da massa específica, foi obtido a absorção e o índice de forma desse material. Para a parte miúda foi utilizada a NM 52:2002, são amostras em que sua grande maioria passa na peneira 4,75 mm e fica retida da peneira de abertura 75 μm .

Figura 10: Ensaio de massa específica do RCD



Fonte : Autor, 2025

3.2.2 Limites de Attenberg

Essa propriedade contempla dois ensaios normatizados, limite de plasticidade e limite de liquidez, ambos relacionados ao comportamento do solo em seus estados limites de umidade para cada padrão, expressos em %. Obtido os dois valores é possível também, determinar o índice de plasticidade do solo (IP), calculado pela diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP). Quanto maior o IP, mais plástico e compressível o solo tende a ser. Para esse ensaio, a NBR 6459:2025 preconiza no mínimo 200g de material em umidade higroscópica passante da peneira de abertura de 0,42 mm.

O limite de Liquidez é normatizado pela NBR 6459:2025 e avalia a relação da umidade com a plasticidade do solo a medida que uma amostra necessita de um valor x de golpes padrão em um equipamento universal até atingir uma condição de fluidez específica. Ao final é construído um gráfico o no qual as ordenadas (em escala logarítmica) sejam os números de golpes e as abscissas (em escala aritmética) sejam os teores de umidade correspondentes e ajustadas a uma reta de tendência. Obter na reta o teor de umidade correspondente a 25 golpes, que é o limite de liquidez do solo. Na impossibilidade de se conseguir a abertura da ranhura ou o seu fechamento com mais de 25 golpes, considerar a amostra como não apresentando limite de liquidez (NL).

O Limite de Plasticidade é orientado e verificado pela norma ABNT NBR 7180:2016 e avalia a influência da umidade na rigidez do solo. Utiliza como critério de avaliação a modelagem de uma amostra em formato padrão com um gabarito até a iminência de ruptura da mesma. É preciso separar cerca de 100g de solo passante na peneira de abertura de 0,42 mm com umidade higroscópica. O resultado final, média de pelo menos três valores de umidade considerados satisfatórios- sem que haja desvio de pelo menos 5 % dos pontos com relação à média, deve ser expresso em porcentagem, aproximado para o inteiro mais próximo. Na impossibilidade de se obter o cilindro com 3 mm de diâmetro, considerar a amostra como não apresentando limite de plasticidade (NP). Abaixo alguns registros de ambos os ensaios.

3.2.3 Granulometria

O ensaio de granulometria é realizado com o objetivo de avaliar a distribuição dos grãos quanto ao seu diâmetro. Nessa pesquisa é indispensável para classificar tanto o solo quanto o agregado de RCD. Para o solo, a NBR 7181:2025 separa o ensaio em 3 etapas, o peneiramento grosso – submetido ao material retido na peneira de abertura de 2,0 mm, o peneiramento fino e o processo de sedimentação – ambos para o material passante na peneira de 2,0mm. O resultado final será apresentado graficamente, dispondo-se, na abscissa, os diâmetros das partículas, em escala logarítmica, e, na ordenada, as porcentagens das partículas que passa ou retidas referentes aos diâmetros considerados, em escala aritmética. No solo em questão, toda a amostra destorroada passa pela peneira de abertura de 2,0 mm, sendo realizado apenas a etapa de sedimentação e peneiramento fino.

Para o RCD, a análise granulométrica foi obtida respeitando a faixa c de acordo com o DNIT (2009), reduzindo a amostra até os limites correspondentes em cada abertura das peneiras.

3.2.4 Ensaio de compactação Proctor

Esse ensaio é responsável por determinar a umidade ótima em que o material apresenta a maior densidade aparente seca, ou seja, define as melhores condições com relação a quantidade de água para o rearranjo das partículas e dos vazios. A norma que prescreve as diretrizes desse ensaio é a NBR 7182:2025. O ensaio foi realizado seguindo suas diretrizes de modo que, o número de golpes e camadas foi definido de acordo com o tamanho do cilindro e a energia aplicada na amostra. Usou-se o cilindro pequeno com energia intermediária, dessa forma, o corpo de prova foi moldado com 3 camadas submetidas a 21 golpes cada. Foi necessário aproximadamente 3,0 kg da amostra preparada conforme a NBR 6457:2024 com reuso do material cujo percentual retido na peneira de abertura 4,8 mm foi menor que 7,0 %. Para cada mistura foram analisados dois corpos de prova .

Utilizando-se coordenadas cartesianas normais, traçou-se uma curva de compactação, marcando-se em abscissas os teores de umidade e em ordenadas as massas específicas aparentes secas correspondentes. A partir dos dados, fez-se uma linha de tendência representada por uma equação de segunda ordem, possibilitando determinar as coordenadas do vértice, de modo a se obter a umidade ótima referente

a máxima densidade aparente seca da mistura. Na figura 11, estão os registros das amostras de cada mistura, só solo (11.a), solo com 4% de cimento (11.b) e solo com substituição de 30% por RCD mais 4% de cimento (11.c)

Figura 11: Corpos de prova do ensaio de compactação de solo



Fonte : Autor, 2025.

3.2.5 Índice de Suporte Califórnia

Esse ensaio é um dos principais parâmetros de classificação do material quanto à aplicação em diferentes camadas de um pavimento. Consiste na moldagem do material em um formato padrão cilíndrico, seguida se uma análise da expansão da amostra durante 4 dias para posterior realização do ensaio de resistência à penetração de um pistão padronizado sobre o corpo de prova. O número de camadas é determinado pela energia de compactação, nessa pesquisa, usando a energia intermediária, a amostra foi moldada com 5 camadas submetidas a 26 golpes cada. Para cada mistura foram analisados dois corpos de prova.

Para a análise a longo prazo, as amostras foram moldadas e deixadas em cura dentro de uma câmara úmida por 28 dias (Fig 12.a) e após esse período colocadas em imersão para a obtenção da expansão por no mínimo 4 dias (Fig 12.b) e depois submetidas ao ensaio na prensa (Fig 12.c).

Figura 12: Etapas do ensaio de CBR



12.a



12.b



12.c

Fonte: Autor, 2025.

3.2.6 Resistência à compressão

Este ensaio foi realizado nas 3 misturas (solo, solo-cimento e solo-RCD-cimento) e aplica-se tanto à determinação em laboratório do teor de cimento para a estabilização do solo quanto ao controle da qualidade na obra. Optou-se por moldar as amostras no molde de cilindro de concreto pois como há a presença de agregados menores ou iguais a 24 mm, o diâmetro do molde deve ter pelo menos 3x o diâmetro máximo correspondente ao agregado, como preconiza a NBR 5738:2015 no item 7.1 que fala sobre os procedimentos para moldagem e cura dos corpos de prova de concreto. No molde, foi adaptado um colarinho para garantir que a altura seja 2x o diâmetro, item discriminado na norma supracitada. E com o objetivo que padronizar os ensaios, as amostras de solo-cimento e solo natural também foram moldadas no cilindro padrão de 10cm de diâmetro com 20 cm de altura.

O número de camadas e golpes foi definido transferindo a energia total do ensaio de compactação proctor para o volume do molde cilíndrico conforme a equação descrita na norma NBR 7182:2025.

Quadro 3: Determinação do n° de golpes e camadas para ensaio de resistência à compressão.

Resistência à compressão						
Curva de compactação						
Energia:	Intermediária					
Cilindro	Pequeno	Volume:	999,026			cm ³
N° camadas	3		Golpes por camada	21		
Soquete:	Grande	4,536	kg	Altura	0,457	M
Energia por golpe:	E = p.g.H	20,31493	J	Energia total	1279,841	J
Molde de concreto						
Dimensões:	Raio	100	mm	Altura	200	Mm
Volume:	0,001570796	m ³				
Energia por volume	814771,809	J/m ³				
Energia necessária	1279,840565	J		n° Camadas	4	
n° Golpes necessários	63	um		n°Golpes por camada	16	

Fonte: Autor, 2025.

Dessa forma, utilizando nossos dados, as amostras foram moldadas em 4 camadas com 16 golpes cada.

A metodologia do ensaio foi baseada na norma NBR 12270:2022, que refere-se a determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo, adotando as condições da amostra e o método de rompimento. As misturas que continham cimento, foram submetidas a uma cura em câmara úmida por 7 dias, antes de serem submetidas ao ensaio na prensa. Adotou-se essa metodologia, visto que, a norma NBR 11798:2012 que fala sobre base de solo-cimento, adota esse intervalo de cura antes do ensaio.

O valor de resistência à compressão não é exigido como parâmetro mínimo para sub bases e bases de solo melhorado com cimento, que se trata do caso dessa pesquisa, misturas com incrementos de cimento em até 4% mas para fins de análise mecânica da influência dos materiais foi adaptado esse ensaio para as amostras. Os corpos de prova foram moldados (Fig 13.a) e mantidos em câmara úmida para cura pelo período descrito após serem submetidos ao ensaio na prensa (Fig 13.b e 13.c).

Figura 13 : Etapas do ensaio de resistência à compressão das amostras.



13.a

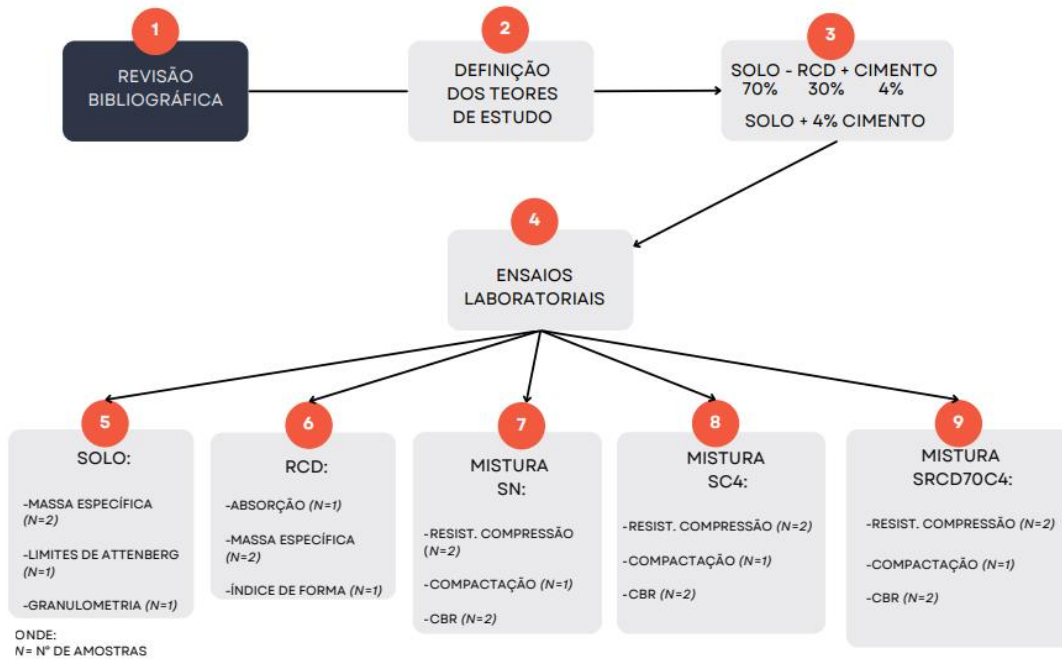
13.b

13.c

Fonte: Autor, 2025.

Para facilitar a identificação das misturas ao longo do trabalho, adotou-se uma nomenclatura padronizada, conforme apresentado no fluxograma metodológico, sendo SN correspondente ao solo natural, SC4 à mistura solo-cimento com 4% de cimento e SR70C4 à mistura solo-RCD-cimento com 70% de RCD e 4% de cimento. Dessa forma, é possível criar um fluxograma dos ensaios conforme a imagem abaixo.

Figura 14 : Fluxograma da metodologia da pesquisa.



Fonte: Autor, 2025.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais realizados com o solo, o resíduo de construção e demolição (RCD) e as misturas de solo-cimento e solo-cimento-RCD. Os resultados foram organizados de forma a permitir a comparação entre o comportamento individual dos materiais e o desempenho das misturas propostas, evidenciando a influência do teor de cimento e da adição de RCD nas propriedades físicas e mecânicas.

Inicialmente, apresentam-se os resultados de caracterização, que fornecem parâmetros fundamentais sobre a natureza dos materiais utilizados. Em seguida, são discutidos os resultados do ensaio de compactação Proctor na energia intermediária, que determina a umidade ótima e a densidade máxima seca das misturas. Por fim, são analisados os resultados do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e de resistência à compressão simples nas amostras de solo natural e solo melhorado.

4.1 Massa específica

Os resultados obtidos nessa pesquisa geraram um valor médio de massa específica de um solo argiloso coletado na região de Antônio Carlos de $2,712 \text{ g/cm}^3$. Esse valor vai de acordo com outras pesquisas que avaliaram solos similares com características predominantes de materiais argilo-siltosos, como o de Dirksen (2018) que determinou uma massa específica de $2,707 \text{ g/cm}^3$ para um material argiloso localizado em Joinville – SC e o de Silva (2019) que determinou em sua amostra de solo residual de Gnaisse predominantemente siltoso um valor equivalente a $2,76 \text{ g/cm}^3$.

Para o RCD, os resultados foram separados conforme instruções normativas em agregados graúdos e miúdos, conforme descrito no item 3.2. Para a parte graúda, foi obtido absorção equivalente a 4,55% e densidade aparente de $2,326 \text{ g/cm}^3$. Na parte miúda, a absorção equivalente foi de 13,80 % e densidade aparente de $2,026 \text{ g/cm}^3$. Os valores de massa específica são inferiores aos encontrados na literatura para agregados naturais, que estão na ordem de $2,39 \text{ g/cm}^3$ a $2,77 \text{ g/cm}^3$ de acordo com Paz (1998). Isso pode ser explicado pela aumento da presença dos poros vindo da argamassa aderida do RCD, diminuindo a massa específica do material. A elevada absorção da parte miúda, não teve uma influência significativa na umidade ótima de acordo com o resultado de compactação. Isso se deve tanto pelo fato de ser uma

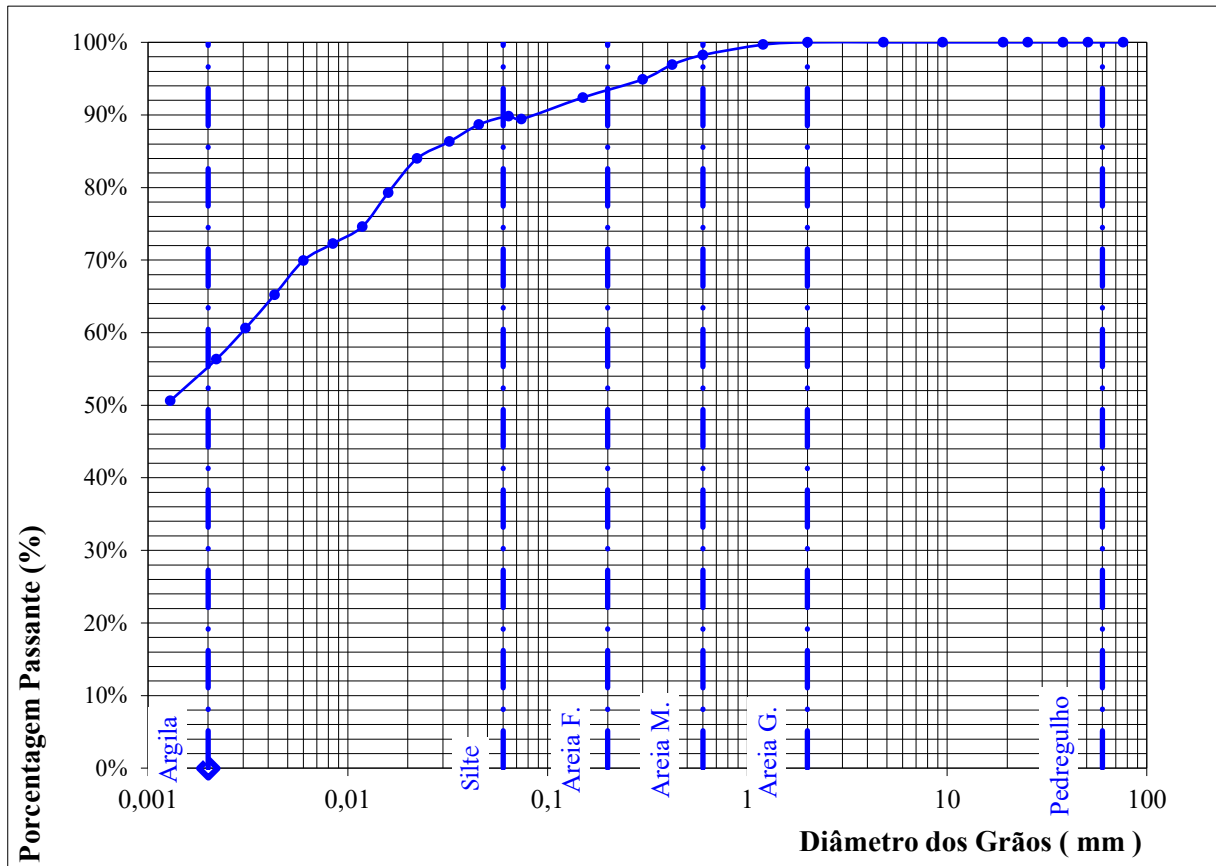
pequena parcela de substituição e também pelas características do solo, que já possuem elevada presença de finos. A substituição do solo pelo RCD na proporção de 30% inclusive diminuiu a umidade ótima da mistura.

Para a amostra de RCD, foi executado o ensaio de índice de forma seguindo a NBR 7809:2009, chegando a um resultado de 1,429 para resíduos oriundos de concreto. De acordo com a análise de Geyer *et al* (2020), que se baseou em estudos nacionais e internacionais, a amostra se enquadra na condição cúbica ($<1,8$), partículas que possuem as três dimensões semelhantes e pouca variação entre suas dimensões. Os autores, concluíram que a tendência dessa geometria nos grãos proporciona um melhor empacotamento da mistura, contribuindo para um aumento na resistência à compressão e diminuição de vazios quando comparado com as outras geometrias, alongada, lamelar e alongada-lamelar. Isso pôde ser evidenciado através do ensaio de compactação, que revelou o aumento da massa específica da mistura de solo melhorado com cimento e RCD em comparação com a mistura de solo melhorado apenas com cimento. Esse comportamento é atribuído não à massa específica dos constituintes isolados, mas ao efeito combinado da melhoria da distribuição granulométrica, da geometria mais cúbica das partículas do RCD e da formação de um esqueleto granular que reduz a porosidade da mistura e favorece o empacotamento durante a compactação

4.2 Granulometria

Conforme normativa, a análise de granulometria do solo foi executada em três etapas, peneiramento grosso, fino e sedimentação para posterior elaboração do gráfico de distribuição. Os dados seguem abaixo.

Gráfico 3 : Distribuição granulométrica do solo.



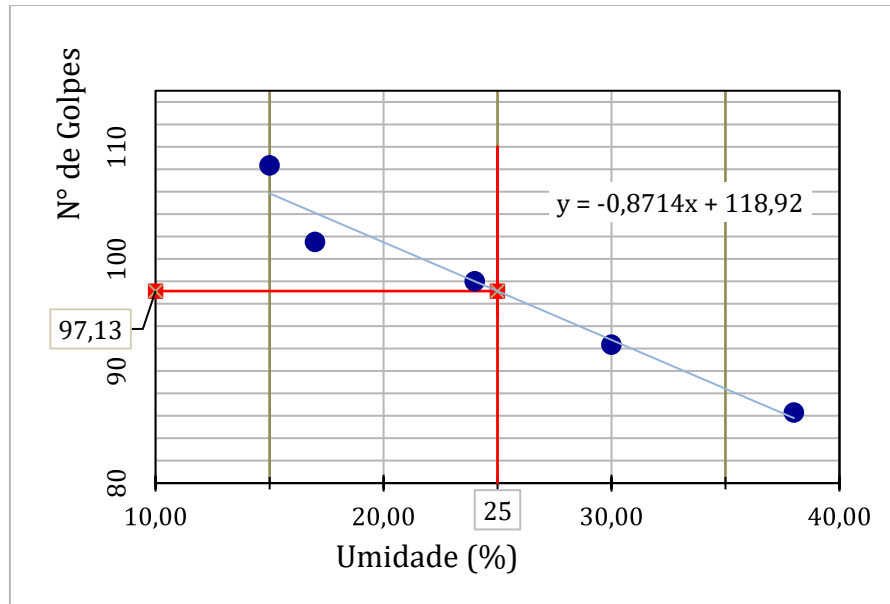
Fonte: Autor, 2025.

Pela distribuição, é evidente se tratar de um material fino, predominantemente argilo-siltoso, com percentuais distribuídos em 50,59% de argila, 38,07% de silte, 3,73% de areia fina, 5,86% de areia média e 1,75% de areia grossa segundo a NBR 6502:1995. A adição de cimento tende a conferir à mistura, maior rigidez, diminuindo a variação volumétrica da mistura quando em contato com a água, efeito que se intensifica com a presença do RCD, que corrige a deficiência granulométrica do solo fino, produzindo uma mistura mais equilibrada e adequada ao uso em pavimentação.

4.3 Limites de Attenberg

Abaixo estão apresentados os resultados referentes aos limite de plasticidade e limite de Liquidez, que retratam como o solo se comporta quanto ao seu escoamento conforme ganha ou perde água.

Gráfico 4 : Resultado Limite de Liquidez do solo



Fonte: Autor, 2025.

Através dos resultados obtidos pelo gráfico, o limite de liquidez para a amostra de solo argiloso foi de 97,13%. Esse valor elevado pode ser justificado pela grande presença de silte e argila na amostra, tendo em vista que esses compostos têm influência direta com o limite de liquidez e aumentam de forma expressiva o índice de plasticidade, que é definido pela diferença do limite de liquidez pelo limite de plasticidade.

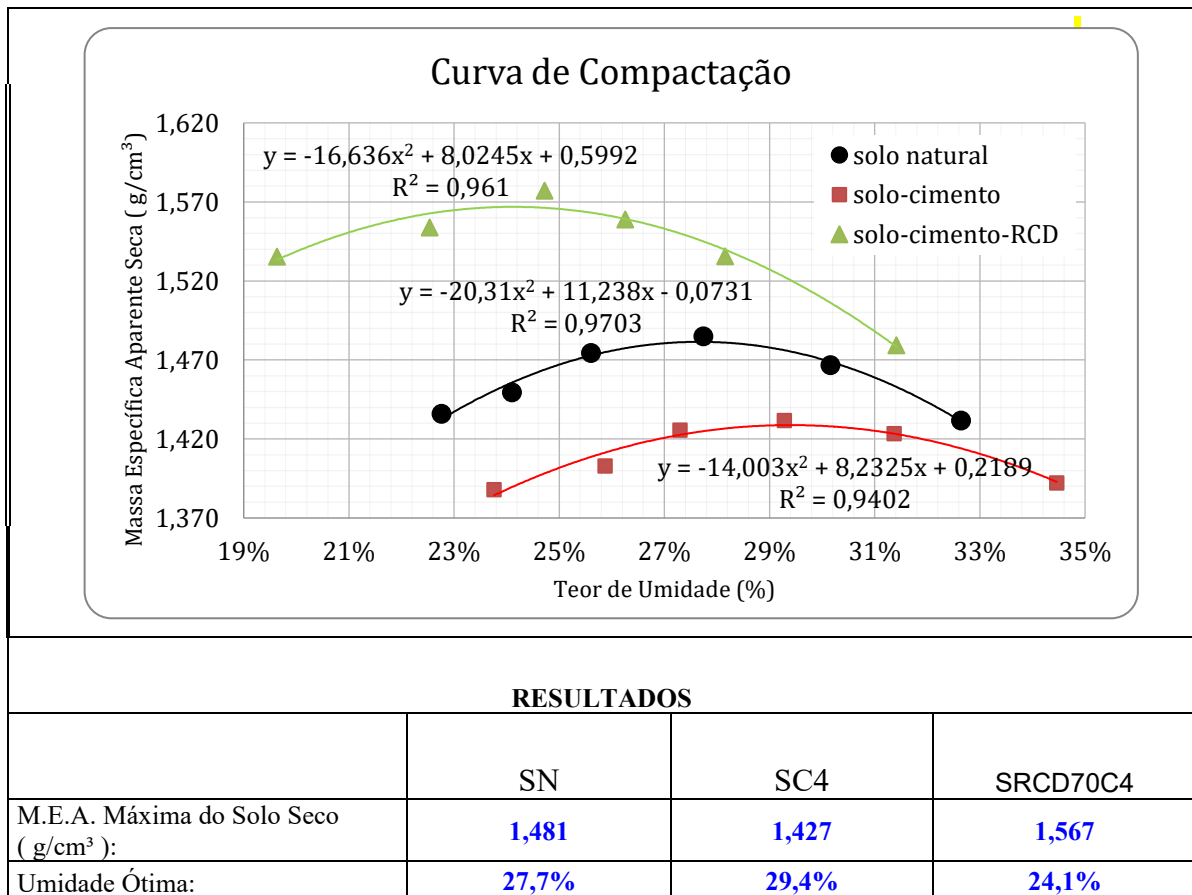
O resultado do ensaio de Limite de Plasticidade de 56,81%, conferiu à amostra de solo natural um Índice de Plasticidade de 40,32%. Esses resultados, vão de acordo com os solos residuais argilosos estudados por Conte (2016), coletados na região de Santo Amaro da Imperatriz/SC. Os valores de IP obtidos por ele, variam de 20% a 36%. O índice obtido pela amostra dessa pesquisa evidencia um material com elevado percentual de finos, ou seja, quanto menor são as partículas, maior é a área de superfície específica e conseqüentemente, maior deve ser a lubrificação dos grãos para atingir tais condições físicas. Materiais com essas características tendem a apresentar alta variação volumétrica, por conta da absorção de água, podendo apresentar propriedades limitantes para o uso em camadas de base e sub base, que devem ter limites de expansão inferiores a 0,5% e 1% respectivamente. A amostra com apenas o solo foi a que obteve os maiores resultados de umidade ótima pelo ensaio de compactação e maior expansão quando submersa no protocolo do ensaio de CBR. De acordo com a norma da AASHTO, que se trata de um sistema de

classificação de solos de aplicação rodoviária baseado nos limites de Atterberg e na granulometria, a amostra se enquadra como um material siltoso e argiloso da classe A 7-5, altamente plástico com comportamento geral para camadas de subleito do tipo fraco a pobre. Isso reforça a necessidade da adição de materiais no solo para viabilizar seu emprego em finalidades que dependem de baixos índices de variação volumétrica como no caso de camadas de pavimentos.

4.4 Compactação Proctor

Esse ensaio é primordial para a determinação da densidade máxima aparente seca, além de fornecer o percentual ótimo de água respectivo para esse melhor empacotamento. Abaixo segue o gráfico com as três curvas de compactação referentes as amostras em análise.

Quadro 4 : Resultados do ensaio de compactação das misturas.



Fonte: Autor, 2025.

Através desses valores pode-se concluir que, solos com muitos finos (argila e silte) retêm mais água e exigem maior umidade para atingir a compactação ótima. Isso se refletiu na influência isolada do cimento, que aumentou a umidade com relação a mistura de referência.

Já a adição de RCD, diminuiu a presença de finos, tornando a mistura mais graduada com uma densidade superior com relação as outras misturas. Esse comportamento indica melhora no empacotamento das partículas e menor dependência da umidade para atingir densificação, características típicas de materiais mais granulares e adequados para camadas estruturais do pavimento, como sub-base ou base estabilizada.

O comportamento isolado do cimento na mistura conferiu maior rigidez entretanto ocorre uma perda na densidade, ou seja, gera um comportamento mais frágil na moldagem mas melhora resistência com o tempo, propriedade que o ensaio de compactação proctor não mede.

A partir do ensaio de compactação, podemos concluir que, a composição e granulometria do RCD conferiu à mistura um aumento de 10% na densidade máxima seca e diminuiu em 13% a umidade ótima quando comparada com o solo melhorado apenas com cimento.

4.5 CBR e Resistência à Compressão

Nessa etapa estão os resultados dos ensaios que analisam o comportamento do material até um determinado nível de deformação ou até a ruptura, medindo a resistência mecânica, através dos ensaios de CBR e a análise de compressão através da resistência ao esmagamento das misturas. O quadro abaixo identifica os principais valores referente a esses ensaios.

Quadro 5 : Resultados dos ensaios de CBR e Resistência à Compressão das misturas.

	SN		SC4		SRCD70C4	
Amostras	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Expansão (%)	2,380	2,889	0,000	0,000	0,000	0,000
Valor médio (%)	2,634		0,000		0,000	
CBR - 28 dias (%)	9,987	7,249	17,156	16,914	20,176	20,136
Valor médio (%)	8,618		17,035		20,156	
Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	0,300	0,510	0,520	0,580	0,750	0,700
Valor médio (MPa)	0,405		0,550		0,725	

Fonte: Autor, 2025.

A análise conjunta dos parâmetros de expansão, CBR e resistência à compressão simples evidencia diferenças marcantes no comportamento mecânico e volumétrico das três misturas avaliadas. O solo natural apresentou expansão média de 2,634%, comportamento diretamente associado ao elevado teor de finos e à estrutura floculada típica de solos argilosos, que possuem alta capacidade de retenção de água e predisposição à variação volumétrica (Conte, 2016). Conseqüentemente, os valores obtidos de CBR para o solo natural (8,618%) e resistência à compressão simples (0,405 MPa) também foram os menores entre as misturas, o que caracteriza o material como inadequado para utilização em camadas estruturais de pavimentos.

A mistura de solo melhorado com 4% de cimento eliminou totalmente a expansão e apresentou aumento significativo tanto no CBR (17,035%) quanto na resistência à compressão (0,550 MPa). Esses resultados indicam que o cimento foi capaz de promover aglomeração das partículas finas, reduzir a atividade plástica e aumentar a rigidez da matriz. Ainda assim, apesar do incremento de desempenho, a mistura não atingiu os parâmetros mecânicos mínimos exigidos para as camadas de sub base e base, sendo indicado apenas para reforço do subleito (DNIT, 2006).

A mistura composta por 70% de solo com 30% de RCD e acréscimo de 4% de cimento apresentou o melhor desempenho entre todas as combinações testadas. A adição de RCD reduziu a fração de finos e introduziu partículas de caráter granular, favorecendo o empacotamento e diminuindo a dependência da umidade para densificação, como citado anteriormente. Isso se refletiu diretamente nos valores mais elevados de CBR (20,156%) e resistência à compressão simples (0,725 MPa), além de expansão nula. A combinação entre um esqueleto granular mais eficiente e a cimentação proporcionada pelo ligante resultou em uma matriz mais rígida e estável, compatível com materiais empregados em sub-bases estabilizadas para pavimentos de baixo e médio tráfego, conforme o Manual de pavimentações (DNIT, 2006) que exige um CBR $\geq 20\%$. Entretanto, a norma 140/2022 do DNIT que fala sobre Sub-base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço, exige um CBR $\geq 30\%$, além de um solo com valores referente ao índice de plasticidade $\leq 18\%$ e limite de liquidez $\leq 40\%$, valores em que a amostra desse estudo extrapola os limites, sendo 40,3% e 97,13% respectivamente. Como o ensaio de resistência à compressão foi adaptado para padronizar a moldagem para todas as misturas, sendo executado no molde de concreto 10 cm x 20 cm, afim de comparar pela mesma metodologia a influência da adição dos materiais, não foi levado em consideração para fins de classificação quanto ao uso das camadas.

A análise do solo-cimento serviu como referência para avaliar a influência da incorporação do RCD na mistura. Observou-se que a substituição de 30% de solo por RCD com acréscimo de 4% de cimento proporcionou uma melhora consistente nos parâmetros mecânicos e de suporte, demonstrando que o RCD contribui positivamente para o desempenho do material. Apesar de apresentar desempenho superior às demais composições estudadas, ainda não atinge os requisitos mínimos para aplicação em camadas de sub-base e base de pavimentos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo principal analisar o desempenho de uma mistura composta por 70% solo e 30% de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) de concreto com 4% de cimento, visando sua aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. A partir da caracterização individual dos materiais e da execução dos ensaios de compactação, CBR e resistência à compressão, foi possível avaliar de forma integrada o comportamento físico e mecânico da mistura proposta.

Os resultados obtidos demonstraram que, a adição de RCD promoveu melhorias significativas na massa específica seca máxima da mistura, evidenciando um melhor arranjo estrutural das partículas. A introdução do cimento contribuiu para o aumento da resistência e redução da expansão, parâmetros essenciais para aplicação em camadas de pavimentação conforme diretrizes do DNIT.

Entretanto, os valores de CBR não apresentaram desempenho satisfatório para aplicação em bases e sub-bases. Dessa forma, conclui-se que, nas proporções analisadas, a mistura apresenta potencial de uso principalmente em camadas de reforço de subleito, podendo ser tecnicamente aplicada como alternativa sustentável, no que tange uma proposta de destinação mais adequada e ambientalmente vantajosa.

Além disso, a pesquisa reforça a viabilidade do uso de RCD como agregado reciclado na pavimentação, alinhando-se às demandas atuais por práticas construtivas eficientes. A aplicação de materiais reciclados constitui uma estratégia de reaproveitamento e redução dos impactos ambientais, promovendo economia de recursos naturais e ampliação da vida útil de aterros sanitários.

Assim, o estudo contribui para o avanço da literatura e da prática geotécnica voltada ao uso de resíduos reciclados em camadas de pavimentação, ao fornecer uma base de dados para misturas com solo argiloso da região melhorado com RCD e cimento em determinadas proporções a fim de orientar e contribuir futuros trabalhos que almejam a aplicação de práticas similares.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Tendo em vista os resultados, este estudo abre espaço para diversas investigações complementares capazes de ampliar o entendimento sobre a mistura solo-cimento-RCD e sua aplicação em pavimentos. Sugere-se:

- Avaliar diferentes proporções de RCD e cimento, a fim de identificar uma combinação que maximize o ganho de resistência mecânica sem comprometer a trabalhabilidade e a viabilidade econômica.
- Investigar o comportamento de misturas sob energias de compactação distintas, incluindo Proctor modificado, para verificar possíveis incrementos de densidade e CBR.
- Caracterizar diferentes tipos de RCD (cerâmicos, argamassas ou mistos) e suas influências sobre o comportamento das misturas, uma vez que a heterogeneidade do resíduo pode impactar significativamente os resultados.

O aprofundamento dessas linhas de pesquisa permitirá ampliar o uso de materiais reciclados na pavimentação, fortalecendo soluções mais sustentáveis e tecnicamente consistentes para a infraestrutura rodoviária.

7. REFERÊNCIAS

ABRECON. (2020). **PESQUISA SETORIAL ABRECON 2020**. Disponível em : https://abrecon.org.br/?jet_download=967c76994296d6cb8fa8faa3cc68e61b9ecba2b0. Acesso em Abril 2025.

ABCP. 2018. **PSQ DE CIMENTO PORTLAND**. Disponível em :< https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2019/10/PBQP-H_Cimento-Fev2018.pdf>. Acesso em Abril 2025.

ADBID. 2025. **INVESTIMENTOS EM INFRAESTRUTURA**. Disponível em :< <https://www.abdib.org.br/investimentos-infraestrutura/>>. Acesso em Outubro 2025.

AMORIM, E.F., BARRETO, A.C.2020. **DESEMPENHO TÉCNICO DE MISTURAS DE SOLO COM RCD PARA USO EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO**. Disponível em :< <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/download/9696/pdf/28885>>. Acesso em Abril 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: solo - determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: SOLOS E ROCHAS - TERMINOLOGIA**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: solo - determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: solo - ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: solo - determinação do índice de suporte Califórnia (CBR)**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724: informação e documentação - trabalhos acadêmicos - apresentação**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: cimento Portland - requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11798 : Materiais para base de solo-cimento — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253 :Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12270 : Solo — Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ANEPAC. (2023). Fonte: **AUTO REGULACÃO NO SETOR DE AGREGADOS**: <https://anepac.org.br/wp-content/uploads/2023/08/Apresentacao-ANTERO-2023-CONCRETESHOW-VF.pdf>. Acesso em Abril 2025.

BERNUCCI *et al.* 2022. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA**. Disponível em : <https://triumfotransbrasiliiana.com.br/wp-content/uploads/2022/07/PA-Completo-2022.pdf>. Acesso em Maio 2025.

CEMADEN. 2024. **BOLETIM DE IMPACTOS**. Disponível em :< <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/monitoramento/boletim-de-impactos>>. Acesso em Outubro 2025.

CRIPPA, *et al.* 2023. **INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE RCD NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO**. Disponível em :< https://www.researchgate.net/publication/388457516_Influencia_da_quantidade_de_RCD_no_comportamento_mecanico_de_misturas_de_solo-cimento>. Acesso em Maio 2025.

CNT, 2021. **RELATÓRIO ANUAL DA CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES**. Disponível em :< <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/#>>. Acesso em Abril 2025.

CONTE, M. 2016. **AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DA RUPTURA DE UM TALUDE EM UM SOLO RESIDUAL MIGMATÍCO DO LESTE DE SANTA CATARINA.** Acesso em Outubro 2025.

CONAMA. (2015). Fonte: **RESOLUÇÃO N°307**. Disponível em : https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=35. Acesso em Abril 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). 2006. **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**. 3. ed. Brasília, Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/manuais-e-normas/manuais/manual-de-pavimentacao> . Acesso em maio 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **142 : PAVIMENTAÇÃO – BASE DE SOLO MELHORADO COM CIMENTO – ESPECIFICAÇÃO DE SERVIÇO** . Espírito Santo , 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **140 PAVIMENTAÇÃO – SUB-BASE DE SOLO MELHORADO COM CIMENTO – ESPECIFICAÇÃO DE SERVIÇO**. Espírito Santo , 2022.

DIRKSEN, S. 2018. **CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS DA BACIA DO RIO PIRAÍ NAS ADJACÊNCIAS DA ÁREA DE IMPLANTAÇÃO DO CAMPUS DA UFSC JOINVILLE**. Disponível em : https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188054/TC%20FINAL%20SOPHIA%20SCHARF%20DIRKSEN.pdf?isAllowed=y&sequence=1&utm_source=chatgpt.com. Acesso em Outubro 2025.

FIESP. (2023). **FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO**. Disponível em: <https://inteligenciadadosapp.fiesp.com.br/construcao>. Acesso em Abril 2025. Acesso em Abril 2025.

GUESSER, L. 2013. **ELABORAÇÃO DO MAPA GEOTÉCNICO PRELIMINAR E MAPA DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE MASSA DO MUNICÍPIO DE ANTÔNIO CARLOS-SC**. Disponível em : [file:///C:/Users/Cliente/Downloads/Trabalho%20de%20Conclus%C3%A3o%20do%20Curso%20Luiz%20Henrique%20Guesser%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Cliente/Downloads/Trabalho%20de%20Conclus%C3%A3o%20do%20Curso%20Luiz%20Henrique%20Guesser%20(1).pdf). Acesso em Abril de 2025.

GODOI, C. 2014. **CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM SOLO RESIDUAL DE GNAISSE – SANTO AMARO DA IMPERATRIZ, SANTA CATARINA**. Disponível em :<

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/129338/328152.pdf?sequence=1&isAllowed=y> . . Acesso em Abril de 2025.

HEIDMANN, M. 2011. **CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE UM SOLO RESIDUAL DE GRANULITO ENVOLVIDO EM UMA RUPTURA DE TALUDE EM GASPAR-SC.** Disponível em :
https://www.abge.org.br/img/biblioteca/15_Heidemann_2011.pdf Acesso em Abril 2025.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 2019. **GEOFÍSICA APLICADA EM OBRAS DE ENGENHARIA.** Disponível em : <https://escriba.ipt.br/pdf/176350.pdf> .
São Paulo, 2019. Acesso em Abril 2025.

LIMA, J. L., PINHEIRO , E. C., & OLIVEIRA, R. P. 2022. **RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL REAPROVEITADOS EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO DE VIAS.** Disponível em:
<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/download/53508/9748132194>. Acesso em Abril 2025. Acesso em Abril 2025.

LUCIANO, R. V.; *et al.* 2012. **ATRIBUTOS FÍSICOS RELACIONADOS À COMPACTAÇÃO DE SOLOS SOB PLANTAS EM AMBIENTE TROPICAL.** Disponível em : <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/MqQmF3MRXRqnScycQCCQ/Cwq/?format=pdf> . Acesso em Abril 2025.

MINISTÉRIO DO TRANSPORTE, 2025. **INVESTIMENTO EM RODOVIAS E FERROVIAS NO BRASIL É FUNDAMENTAL PARA A SEGURANÇA ALIMENTAR GLOBAL.** Disponível em :
<https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2025/03/investimento-em-rodovias-e-ferrovias-no-brasil-e-fundamental-para-a-seguranca-alimentar-global>. Acesso em Abril 2025.

MIRANDA, J; SILVA, M. 2016. **A MATÉRIA ORGÂNICA E SUA INFLUÊNCIA NAS FRAÇÕES GRANULOMETRICAS DO SOLO E NOS LIMITES DE ATTERBERG.** Disponível em :<
<https://www.academia.edu/download/89572798/fe6e686363177da3e75b24265617823eb805.pdf>>. Acesso em Abril 2025.

NASCIMENTO, H. 2024. **INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM MISTURAS COMPACTADAS DE SOLO LATERÍTICO MELHORADO COM CIMENTO.** Disponível em :<
<https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/10930>>. Acesso em Abril 2025.

ORIOLO, M. A. 2024. **USO DE AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO.** Disponível em:
https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/34606/1/agregadorecicladopavimento_surbanos.pdf. Acesso em Abril 2025.

PAZ, M. 1998. **CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS DA GRANDE FLORIANÓPOLIS E SUA UTILIZAÇÃO EM CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA**. Disponível em :<
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/77488/171301.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em Outubro 2025.

PINTO, T. D. (1999). Fonte: **METODOLOGIA PARA A GESTÃO DIFERENCIADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO URBANA**:
<http://www.casoi.com.br/hjr/pdfs/GestResiduosSolidos.pdf>. Acesso em Abril 2025.

SANTOS,D; CALDEIRA,P. 2021. **ESTABILIZAÇÃO DE SOLO –CIMENTO PARA BASE DE PAVIMENTO DE RODOVIA EM SÃO LUÍS –MA**. Disponível em :
<https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/17065/209209214185>. Acesso em Abril 2025.

SILVEIRA, P.E.M; NÓBREGA, C.A,2006. **APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM SOLO – CIMENTO**. Disponível em :
<https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/download/320/282>. Acesso em Maio 2025.

SNIS. (2021). **RELATÓRIO NACIONAL DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. Disponível em : <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/rs>. Acesso em Maio 2025.

SOUZA JUNIOR, J. D. 2005. **O EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO EM PROPRIEDADES DOS SOLOS UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO DO ESTADO DO CEARÁ**. 2005. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza,. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/4860>. Acesso em jun. 2025.