



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS CENTRO DE TECNOLOGIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAMPUS A. C. SIMÕES

CURSO ENGENHARIA CIVIL

GIULYAN VITORIA CALDAS CARDOSO

**APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM
PAVIMENTAÇÃO**

Maceió-AL
2025

GIULYAN VITORIA CALDAS CARDOSO

**APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM
PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Alagoas Campus A. C. Simões,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Pinto Fernandes.

Coorientadora: Prof^ª. MSc. Jéssika Cosme

Maceió
2025

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

C268a Cardoso, Giulyan Vitória Caldas.
 Aplicação dos resíduos sólidos da construção civil em pavimentação /
 Giulyan Vitória Caldas Cardoso. – 2025.
 58 f. : il. color.

 Orientador: Daniel Pinto Fernandes.
 Coorientadora: Jéssika Cosme.
 Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil)
 – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2025.

 Bibliografia: f. 57-58.

 1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Resíduos de construção e demolição. 3.
 Agregado reciclado. 4. Pavimentação urbana. I. Título.

CDU: 624 : 628.4.036

Folha de Aprovação

GIULYAN VITORIA CALDAS CARDOSO

APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, com requisito parcial para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil.

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL PINTO FERNANDES**
Data: 03/06/2025 18:25:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Pinto Fernandes / UFAL (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **JESSIKA COSME**
Data: 03/06/2025 18:17:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a MSc. Jéssika Cosme

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ALINE CALHEIROS ESPINDOLA**
Data: 03/06/2025 16:55:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr. Aline Calheiros Espíndola, UFAL

Documento assinado digitalmente
 **LUCIANA CORREIA LAURINDO MARTINS VIEIRA**
Data: 03/06/2025 18:51:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a MSc. Luciana Correia Laurindo Martins Vieira, UFAL

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e aos meus guias, por me dar forças, coragem e serenidade para enfrentar cada desafio com fé e esperança.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Pinto Fernandes, expresso minha mais profunda gratidão por sua dedicação, paciência e sensibilidade durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi essencial não só para o crescimento acadêmico, mas também para meu amadurecimento pessoal. Sua escuta, compreensão e respeito ao meu tempo fizeram toda a diferença.

À professora MSc. Aline Calheiros Espíndola, que me acolheu com empatia e humanidade, oferecendo suporte técnico e emocional quando mais precisei. Sua presença e incentivo foram fundamentais para que eu acreditasse na minha própria capacidade.

Agradeço também a todos os professores, respeitaram minhas particularidades enquanto pessoa autista e compreenderam as dificuldades enfrentadas. Cada gesto de paciência e cada palavra de apoio contribuíram imensamente para que eu chegasse até aqui.

Um agradecimento especial à minha mãe, que esteve ao meu lado desde o início, me segurando nos momentos difíceis e nunca deixando de repetir: *“você vai conseguir, é só ter paciência”*. Foi esse amor incondicional e essa fé constante que me mantiveram firme, mesmo nos dias mais desafiadores.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho, deixo meu mais sincero e emocionado obrigado.

RESUMO

A indústria da construção civil configura-se como uma das principais geradoras de resíduos sólidos urbanos, exigindo abordagens técnico-científicas voltadas para o manejo eficiente e sustentável desses materiais, em conformidade com os preceitos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Dentre esses resíduos, os Resíduos de Construção e Demolição (RCD), majoritariamente classificados como inertes (Classe A, segundo a Resolução CONAMA nº 307/2002), apresentam elevado potencial de reaproveitamento, especialmente na produção de agregados reciclados para a engenharia geotécnica e de pavimentação. A composição dos RCDs é heterogênea e depende de variáveis como o tipo de edificação, o estágio da obra, as técnicas construtivas empregadas e os padrões regionais de urbanização, o que influencia diretamente nas propriedades físicas e mecânicas dos agregados reciclados. Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento geotécnico de agregados reciclados de RCD oriundos das demolições dos bairros do Mutange, Pinheiro e Bebedouro, no município de Maceió/AL, regiões impactadas por subsidência do solo decorrente da lavra de sal-gema em minas subterrâneas, conforme diagnóstico do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). A pesquisa propõe a caracterização física e mecânica de amostras representativas desses resíduos com vistas à sua aplicação como material de reforço de subleito em pavimentos urbanos. A metodologia está fundamentada em ensaios laboratoriais padronizados pela NBR 15.115/2004, contemplando análises granulométricas (peneiramento e sedimentação), determinação dos limites de consistência (liquidez e plasticidade), índice de forma, abrasão Los Angeles, massa específica aparente, compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC). Será analisada a amostra composta 100% de agregado reciclado (AR), espera-se que os agregados reciclados apresentem desempenho técnico compatível com as especificações normativas, possibilitando seu uso como insumo alternativo na pavimentação de vias urbanas de baixo volume de tráfego. A viabilização técnica e ambiental do reaproveitamento desses resíduos, além de contribuir para a mitigação dos impactos decorrentes da destinação inadequada de RCDs, promove a redução da exploração de agregados naturais, a economia de recursos públicos e a inserção dos princípios da economia circular na infraestrutura urbana. A presente pesquisa, portanto, pretende oferecer subsídios técnicos para a pavimentação e práticas sustentáveis de engenharia civil no âmbito municipal e regional.

Palavras-chave: Resíduos de Demolição; Agregados Reciclados; Pavimentação Urbana; Reforço de Subleito; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The construction industry stands out as one of the main generators of municipal solid waste, demanding technical and scientific approaches focused on the efficient and sustainable management of these materials, in accordance with the principles of the National Solid Waste Policy (PNRS). Among these materials, Construction and Demolition Waste (CDW), predominantly classified as inert (Class A, according to CONAMA Resolution No. 307/2002), presents significant potential for reuse, particularly in the production of recycled aggregates for geotechnical and pavement engineering. The composition of CDW is heterogeneous and depends on variables such as the type of building, the stage of construction, the construction techniques employed, and regional urbanization patterns, which directly influence the physical and mechanical properties of the recycled aggregates. In this context, the present research aims to evaluate the geotechnical behavior of recycled aggregates from CDW originating from the demolitions in the Mutange, Pinheiro, and Bebedouro neighborhoods, in the municipality of Maceió/AL. These regions were impacted by land subsidence resulting from salt rock mining in underground mines, according to the diagnosis by the Geological Survey of Brazil (SGB/CPRM). The research proposes the physical and mechanical characterization of representative samples of this waste with a view to its application as subgrade reinforcement material in urban pavements. The methodology is based on standardized laboratory tests according to NBR 15.115/2004, encompassing grain size analysis (sieving and sedimentation), determination of consistency limits (liquid and plastic limits), shape index, Los Angeles abrasion, bulk specific gravity, compaction, and California Bearing Ratio (CBR). A sample composed of 100% recycled aggregate (RA) will be analyzed. It is expected that the recycled aggregates will exhibit technical performance compatible with standard specifications, enabling their use as an alternative input material in the paving of low-volume urban roads. The technical and environmental feasibility of reusing this waste, besides contributing to mitigating the impacts arising from the inadequate disposal of CDW, promotes the reduction of natural aggregate exploitation, savings in public resources, and the integration of circular economy principles into urban infrastructure. Therefore, this research intends to offer technical support for paving and sustainable civil engineering practices at the municipal and regional levels.

Keywords: Demolition Waste; Recycled Aggregates; Urban Pavement; Subgrade Reinforcement; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Malha rodoviária brasileira	15
Figura 2 - Etapas de reciclagem	22
Figura 3 - Britador de impacto	23
Figura 4 - Britador de mandíbula	23
Figura 5 - Britador de martelo	24
Figura 6 - Estrutura de camadas de pavimentos	25
Figura 7 - Coleta de RCD pelos municípios nas regiões brasileiras	26
Figura 8 - Metodologia da pesquisa	35
Figura 9 - Ensaio de granulometria do AR	36
Figura 10 - Lavagem do peneiramento grosso do AR	36
Figura 11 - Amostras do AR após peneiramentos grosso	37
Figura 12 - Lavagem do peneiramento fino do AR	38
Figura 13 - Amostras do AR após peneiramentos fino	38
Figura 14 - Ensaio de sedimentação	39
Figura 15 - Dimensões dos grãos a serem medidas	41
Figura 16 - Aparelho de Casagrande	42
Figura 17 - Classificação do solo: A.A.S.H.T.O.	45
Figura 18 - Energias de compactação	47
Figura 19 - Execução do ensaio de compactação	48
Figura 20 - Equipamentos utilizados no ensaio.....	50
Figura 21 - Corpo de prova imerso	50

Figura 22 - Curva pressão – penetração	51
Figura 23 - Agregado reciclado utilizado no estudo	52
Figura 24 - Materiais indesejáveis presente na amostra	53
Figura 25 - Curva granulométrica do AR	54
Figura 26 - Classificação granulométrica do AR de Maceió	55
Figura 27 - Forma das partículas do AR	60
Figura 28 - Resultado do ensaio de Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez	61
Figura 29 - Curva de compactação Agregado Reciclado	62
Figura 30 - Curva de ISC do agregado reciclado	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planimetria do plano de proximidades para vias de acesso	16
Tabela 2 - Classificação do formato dos grãos	42
Tabela 3 - Requisitos específicos para agregados reciclados destinado à pavimentação ..	49
Tabela 4 - Resultado Granulometria - Peneiramento Grosso: Amostra AR	55
Tabela 5 - Resultado Granulometria - Peneiramento Fino: Amostra AR	55
Tabela 6 - Resultado Granulometria por Sedimentação: Amostra AR	56
Tabela 7- Resultado Granulometria – Porcentagem Passantes e Retidas: Amostra AR ..	56
Tabela 8 - Massa específica retida na #4,8 mm das amostras de AR.	58
Tabela 9 - Massa específica dos passantes na #4,8 mm das amostras de AR	59
Tabela 10 – Resultado da Determinação do ISC do AR	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo	13
1.1.1	Objetivos Gerais	13
1.1.2	Objetivo Específico	13
1.3	Justificativa	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Definições e Classificações	16
2.2	Composição do RCD e Agregado	18
2.3	Reciclagem de RCD	19
2.3.1	Aspectos históricos e razões do reuso e recuperações	19
2.3.2	Processo de reciclagem	19
2.4	Resíduos da construção e demolição (RCD) em pavimentação	23
2.4.1	Geração de RCDs no Brasil	25
2.4.2	Pavimentação com agregado reciclado no Brasil	25
2.4.3	Normalização internacional e nacional	29
2.4.4	Pavimentação com agregado reciclado: experiência internacionais	30
3	MATERIAIS E METODOLOGIA	33
3.1	Descrição do estudo	33
3.2	Análise granulométrica	34
3.3	Peneira e sedimentação	35
3.4	Massa Específica dos Grãos	38
3.5	Índice de Forma dos Grãos	40
3.6	Limite de Liquidez (LL)	41
3.7	Limite de Plasticidade (LP)	42
3.8	Índice de Plasticidade (IP)	42
3.9	Índice de Grupo (IG)	43
3.10	Classificação A.A.S.T.H.O. (American Association State Highway Officials)	44
3.11	Ensaio de Compactação Proctor Normal	46
3.12	Índice de Suporte Califórnia (ISC)	47
4	RESULTADOS	51
4.1	Composição do Agregado Reciclado	51
4.2	Análise Granulométrica	52
4.2.1	Resultados da Análise Granulométrica	56
4.3	Massa Específica dos Grãos	57
4.4	Forma das Partículas e Índice de Forma	58
4.5	Limite De Atterberg	59
4.6	Índice de Grupo (IG) e Classificação AASHTO	60
4.7	Ensaio de Compactação Proctor Normal	61
4.8	Índice de Suporte Califórnia (ISC)	62
4.9	Cálculo do volume de AR por Quilômetro de Rua Urbana	64
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	65

6	REFERÊNCIAS.....	66
----------	-------------------------	-----------

1. INTRODUÇÃO

A relevância dos assuntos que estão relacionados à conservação ambiental nos diversos segmentos da atividade econômica e políticas governamentais vem crescendo significativamente ao longo dos anos. Neste contexto, os temas associados à geração de resíduos sólidos urbanos constituem atualmente grande preocupação para a humanidade, pressionando toda a sociedade civil em busca de um manejo sustentável. Desde a década de 1970, o gerenciamento dos resíduos representa uma questão prioritária nas áreas urbanas, que a sua geração, descarte e disposição final de forma inadequada causam inúmeros impactos ambientais e sociais.

Uma das principais causas de degradação ambiental é a geração de resíduos. As formas que procuram mitigar os danos gerados pelos resíduos podem ser divididas em: minimizar sua geração e reutilizá-los ou reciclá-los. Para que essa minimização ocorra torna-se necessário uma análise dos processos produtivos, buscando uma significativa redução dos resíduos (FERNANDES, 2005). A reutilização ou reciclagem passa por uma caracterização completa dos resíduos visando o reuso em determinada finalidade e almejando uma possível redução de custos. Nesse cenário, a diminuição do volume gerado está muitas vezes relacionada aos limites técnico-operacionais difíceis de serem contornados (MASUERO et al., 2001). A reciclagem, por sua vez, constitui uma alternativa com vasto campo de aplicação.

Neste âmbito, a minimização do desperdício, o reuso e a reciclagem de materiais são propostas bastante discutidas no ambiente técnico-científico, pois, contribuem para a preservação do meio ambiente, na medida em que preservam recursos naturais e reutilizam resíduos que estariam dispostos em aterros ou até descartados em locais públicos. Estas discussões são motivadas essencialmente, pela maior consciência ambiental da sociedade e pela legislação ambiental, cada vez mais exigente (RIOS, 2016).

A geração constante de resíduos provoca degradação ambiental, que acarretam problemas sociais e econômicos em diversos continentes. Nesse sentido, alguns países estão tentando mitigar esse problema com pesquisas acadêmicas buscando reciclá-los. Em virtude da dificuldade de encontrar áreas para a disposição regular e da escassez de recursos naturais a busca da economia é cada vez mais assídua (FERREIRA, 2007).

A construção civil é uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento e desde os primórdios da humanidade foi executada de forma artesanal, gerando como subproduto, grande quantidade de resíduos de diversas naturezas. É também responsável pelo consumo excessivo de recursos naturais provenientes de fontes não-renováveis (OLIVEIRA, 2017).

Hoje, a Indústria da Construção Civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social, mas por outro lado, comporta-se ainda como grande geradora de impactos ambientais. A cadeia produtiva da construção civil consome entre 20 e 50% dos recursos naturais de todo o planeta (OLIVEIRA, 2017).

As atividades de construção demandam uma notável quantidade de materiais inertes, tais como areia e cascalho, que usualmente são fornecidos por meio da extração de sedimentos aluviais. A extração desses sedimentos modifica o perfil dos rios e o seu equilíbrio, além de introduzir problemas ambientais como modificação em sua estrutura hidrológica e hidrogeológica. A extração de material inerte de formações rochosas em área acidentadas e montanhosas também é uma danosa atividade ao meio-ambiente, uma vez que altera a paisagem e provoca problemas de instabilidade (BRASILEIRO, 2015).

A destinação adequada dos Resíduos da Construção Civil e Demolição (RCD) é estabelecida pela Resolução CONAMA nº 307 (Brasil, 2002), que indica que os resíduos devem ser destinados de acordo com sua classificação, priorizando a reutilização e a reciclagem. Destacando a importância da gestão e destinação adequada, citando a responsabilidade dos geradores e do poder público foi instituída em 2010 a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Brasil, 2010).

Particularmente, em Maceió um estudo realizado sobre a geração de RCD concluiu que a geração diária seria de 817,59 toneladas, sendo 68% de descarte irregular, 25% de novas edificações e 7% de reformas, acréscimos e demolições (RIBEIRO et.al.2021). Estes valores citados mostram que um grande volume de resíduos da construção civil e demolição tem descarte irregular, mostrando que é de suma importância um estudo para a reciclagem desses materiais, fazendo assim diminuir os impactos ambientais e disposição em aterros sanitários.

Atualmente, são muitas as possibilidades para o reaproveitamento dos RCD's, sejam através da reutilização ou da reciclagem. Cabe salientar que, para as soluções visando o reaproveitamento dos resíduos, existem tecnologias e procedimentos diversos, relativamente sofisticados, mão-de-obra ou capitais intensivos, processos importados ou desenvolvidos no país. Sua escolha, entretanto, deve ser realizada tendo em vista se atingir o aproveitamento ambientalmente adequado, respeitando-se as características socioeconômicas e culturais de cada município (ROCHA et al., 2003).

O aproveitamento dos RCD diminui a extração de recursos naturais, contribuindo para a conservação dos biomas, reduzindo os custos para aquisição de agregados naturais e aumentando a vida útil dos aterros. O RCD tem uma versatilidade na sua aplicação e algumas

dessas aplicações são difundidas no meio acadêmico, tais como, utilização na confecção de blocos de concreto, argamassa para revestimentos, em camadas de reforço e sub-base de pavimentos, na produção de concretos magros sem fins estruturais, sistemas de drenagem e sistemas de cobertura de aterros, entre outros. A reutilização, redução e reciclagem são opções de destinação adequada para os RCD, inserida nos princípios da sustentabilidade e da ecoeficiência na construção civil regulamentadas pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010).

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Gerais

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), visa analisar laboratorialmente aspectos físicos e de comportamento mecânico de agregados reciclados de resíduo da construção civil e demolição para aplicação em camadas de reforço do subleito, em substituição aos materiais convencionalmente utilizados, com enfoque em vias urbanas.

1.1.1.1. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos previstos no Trabalho de Conclusão de Curso são:

- Analisar o comportamento mecânico dos agregados reciclados (AR), com base no índice de suporte e compactação.
- Avaliar a conformidade dos AR com os critérios estabelecidos na norma ABNT NBR 15115/2004, estabelecendo parâmetros de desempenho compatíveis com os requisitos técnicos normativos;

1.3 Justificativa

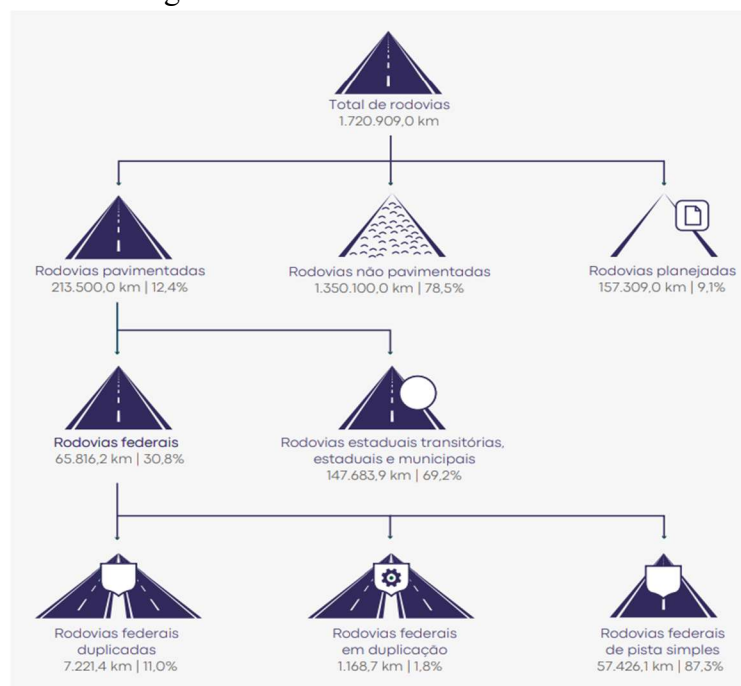
No Brasil, a preocupação com os elevados volumes de resíduos de construção vai além, devido a um agravante: a disposição irregular desses materiais. Esse descarte inadequado ocorre principalmente em locais como ruas, rios, córregos, terrenos baldios e áreas de mananciais, contribuindo para a degradação urbana (MOTTA, 2005).

Um dos atrativos do reaproveitamento de materiais provenientes de RCD (Resíduos de Construção e Demolição) na pavimentação é o aspecto econômico, pois esses resíduos têm sido comercializados por valores significativamente inferiores aos dos agregados de origem natural.

Além disso, a utilização de agregado reciclado contribui para a redução dos custos de gerenciamento dos resíduos, com uma economia de até 67% em comparação ao valor dos agregados naturais (BRASILEIRO e MATOS, 2015).

Outro fator relevante é a malha rodoviária não pavimentada brasileira, de acordo com dados do Sistema Nacional de Viação (SNV), a malha rodoviária brasileira abrange 1,7 milhão de quilômetros, dos quais apenas 12,4% são pavimentados, somando 213,5 mil quilômetros. A Figura 1 a seguir mostra a distribuição da malha rodoviária conforme o tipo de superfície e a jurisdição (CNT, 2023).

Figura 1 – Malha rodoviária brasileira



Fonte: CNT, 2023

As vias não pavimentadas totalizam cerca de 1,4 milhão de quilômetros, ou 78,5% da malha. Tal condição restringe as conectividades entre regiões, fazendo com que haja a necessidade de deslocamentos mais longos para que ocorra o desvio dos trechos sem pavimentação, assim comprometendo o conforto e a segurança do usuário. Ao analisar os dados, observa-se que o Brasil possui aproximadamente 25,1 quilômetros de rodovias pavimentadas para cada mil quilômetros quadrados de território. Esse índice coloca o país em desvantagem em comparação com seus vizinhos, como Uruguai, Argentina e Equador (CNT, 2023).

O uso de RCD em camadas dos pavimentos tem-se mostrado viável diante a disponibilidade deste material e da tecnologia de reciclagem. A utilização de agregados reciclados em pavimentos, tem mostrado que seus resultados são satisfatórios, sendo uma

alternativa interessante na substituição de materiais naturais, principalmente na pavimentação de vias de baixo volume de tráfego (HORTEGAL et al., 2009). Na Tabela 1, é possível observar a planimetria do plano de proximidades para vias de acesso.

Tabela 1 – Planimetria do plano de proximidades para vias de acesso

Classes	Zona Urbana	%	Zona Rural	%	Área Total	%
Pavimentadas	10.541,22	90,15%	1.151,21	9,85%	11.692,43	24,02%
Não Pavimentadas	872,65	19,26%	3657,99	80,74%	4530,65	9,31%
Distante das vias de acesso	8.432,45	25,98%	24.030,58	74,02%	32.463,03	66,68%
TOTAL	19.846,32	40,76%	28.839,78	59,24%	48.686,10	100,00%

Fonte: COUTO, 2023

No município de Maceió, podemos observar, na Tabela 1, que as vias de acesso pavimentadas aproximadamente 90,15% estão na zona urbana, enquanto que, das áreas próximas de vias não pavimentadas, 80,74% se encontram na zona rural. No entanto, o dado mais expressivo se refere às áreas distantes destas vias principais, sejam elas pavimentadas ou não, elas representam 66,68% da área do município (COUTO,2023).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÕES

A norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10004/2004, define resíduo sólido como sendo o resultado de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

O resíduo da construção e demolição é definido como sobra e rejeitos provenientes de obras de construção novas ou de reformas e de demolições (Barros, 2005). Resíduo de construção e demolição é definido pela Resolução CONAMA nº 307/2002, por resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Para um melhor entendimento do tema a resolução CONAMA nº 307/2002, descreve algumas outras definições no Art.2 pertinentes para o entendimento do tema como:

- I. Geradores: são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos definidos nesta Resolução;*
- II. Transportadores: são as pessoas, físicas ou jurídicas, encarregadas da coleta e do transporte dos resíduos entre as fontes geradoras e as áreas de destinação*
- III. Agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;*
- IV. Gerenciamento de resíduos: é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias a006F cumprimento das etapas previstas em programas e planos;*
- V. Reutilização: é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo;*

VI. Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo após ter sido submetido à transformação;

VII. Beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo à operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto.

Complementando essa linha de definições que ajudam no entendimento do tema no Art. 2 da Resolução CONAMA 448 de 2012, segue definições complementares:

IX. Aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros: é a área tecnicamente adequada onde serão empregadas técnicas de destinação de resíduos da construção civil classe A no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente e devidamente licenciado pelo órgão ambiental competente;

X. Área de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e resíduos volumosos (ATT): área destinada ao recebimento de resíduos da construção civil e resíduos volumosos, para triagem, armazenamento temporário dos materiais segregados, eventual transformação e posterior remoção para destinação adequada, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e a segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

XI. Gerenciamento de resíduos sólidos: conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010;

XII. Gestão integrada de resíduos sólidos: conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável.

Segundo Oikonomou Orioli (2018) o setor da construção civil é responsável pelo consumo de 50% de matérias-primas da natureza. De acordo com Orioli (2018) os agregados reciclados de RCD podem ser utilizados para substituir agregados naturais e isso vem se

mostrando, além de uma alternativa sustentável, economicamente viável. Os resíduos, de maneira geral, podem ser classificados, em 4 diferentes classes, de acordo com a resolução CONAMA 307:

- Classe A - São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados.
- Classe B - São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros.
- Classe C - São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou sua recuperação.
- Classe D - São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos enquadrados como classe I da ABNT NBR 10004.

Assim, os resíduos de construção e demolição podem ser classificados como material do tipo Classe A, já que podem ser utilizados como agregados para diferentes finalidades. Porém, “ao utilizar materiais reciclados, vários aspectos complementares de projeto e execução devem ser analisados. Devido à heterogeneidade desses materiais, podem ser necessárias adequações de dosagem e projeto, ressaltando a importância de um controle tecnológico (BENNERT et al. 2000). Segundo Orioli (2018) no Brasil ainda não há norma técnica para regulamentar a dosagem das misturas com agregado reciclados, no entanto, há normas nacionais e internacionais que procuram enquadrar os materiais em uma curva granulométrica, garantindo adequada distribuição das partículas, que permita o preenchimento dos vazios da mistura.

2.2 COMPOSIÇÃO DO RCD E AGREGADO

O RCD possui características físicas variadas, mas com padrão de partículas sólidas apresentando dimensões e geometrias compatíveis com os materiais de construção ou com formato e dimensões diferentes como plásticos, metais, argamassas, concretos, pedaços de madeira (ZORDAN, 2001).

Dessa forma, entende-se que os RCDs podem ser distribuídos em:

- Componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento e outros);
- Argamassa e concreto;
- Resíduos de processo de preparo e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios e outros) produzidos nos canteiros de obras.

Diversos fatores influenciam diretamente a composição do RCD de acordo com Barros (2005):

- Tipo de obra;
- Desenvolvimento econômico e cultural;
- Tipo de material predominantes na região;
- Tipo de arquitetura das edificações;
- Técnicas de construção e demolição empregadas;

As grandes edificações influenciam diretamente nesses quantitativos pois contribuem de maneira mais significativa devido a sua grande produção de resíduos. Dessa forma impõem alterações na composição e no quantitativo do RCD (CARNEIRO et al., 2001).

Através da caracterização feita em Fortaleza/CE por (CABRAL e LIMA, 2013), cumprindo as recomendações da ABNT com a NBR 10.004/2004, coletando as amostras em áreas licenciadas, encontrou que as areias e solos juntos de materiais cimentícios e cerâmicos somando 80% dos RCD's produzidos estando distribuídos da seguinte forma: 24,6% de areia e solo, 22% em argamassa, 15,6% de concreto, 10,4% de tijolo branco, o grupo cerâmica vermelha e cerâmica de revestimento tiveram 14,4% e 6,3%, respectivamente. A presença de gesso variou entre 4,9% e 5,1%, os outros 1,6% foram resíduos de classes C e D.

Estes valores foram encontrados em proporções diferentes em Vitória/ES por (RAMOS, 2007), porém os materiais mais influentes nesses quantitativos continuam distribuídos entre areias, materiais cimentícios e materiais cerâmicos com a seguinte distribuição, solo e areia o percentual varia de 22,9% a 44%, argamassas apresentaram variações entre 10% e 23,2%, concreto apresentou de 4,6% a 18,1% do total, material cerâmico de até 9,2%, rocha e brita encontrado na amostra foi de 0,8% a 5,8% respectivamente.

Evidenciando a ideia que os materiais cimentícios e os cerâmicos estão sempre em evidência nos RCD em Salvador foi encontrada a composição do RCC com 53% para concreto e argamassa, 22% de solo e areia, 14% de material cerâmico, 5% de rocha, 4% de plástico e 2% de materiais em outras proporções como gesso (CARNEIRO et al., 2001).

2.3 RECICLAGEM DE RCD

2.3.1 Aspectos históricos e razões do reuso e recuperação

O histórico de reaproveitamento de resíduos de construção e demolição apontam que esta prática vem sendo exercida desde os romanos, ao utilizar telhas, tijolos e louças cerâmicas moídas como pozolana (SANTOS, 1975). Vale ressaltar que a ausência de matéria prima bem

como, as dificuldades no descarte dos entulhos, influenciaram de maneira direta no reuso dos RCDs. (VON STEIN, 2000).

A reciclagem ocorre partindo de três principais vertentes, das quais são: aspecto econômico, legislação, benefício do meio ambiente (LUND, 1993). A partir do aspecto de benefício ao meio ambiente, tem-se a possibilidade de conservar recursos naturais, consequentemente diminuindo a exploração de recursos, quando é observado a perspectiva econômica, entende-se que retornar os materiais a cadeia produtiva, devolve valor agregado ao invés de serem descartados, leva a substituição da utilização de matéria-prima, assim como, a diminuição sensível nos custos de produção. Por fim, a legislação, onde se percebe que aumento do consumo da população, por consequência o aumento dos resíduos gerados por este consumo, impõem ao governo a elaboração de medidas, para diminuir os impactos ambientais, e criação de leis que obriguem a destinação correta.

Neste contexto de regulamentação, a ABNT lançou algumas especificações que tratam dos processos que envolvem a reciclagem dos resíduos, até a sua aplicação na pavimentação, ou até mesmo em concreto sem função estrutural. Seguem as normas abaixo:

- NBR 15113:2004 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114:2004 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15115:2004 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15116:2021 – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento portland – Requisitos e métodos de ensaios.

Na cidade de Nova Iorque, segundo o departamento de saneamento da cidade, a porcentagem de reciclagem de resíduos oriundos de alvenarias e concreto, alcança a marca de 60% e 40% (NYCG,2013a). São índices bastantes consideráveis, uma vez que, atingem a marca de mais da metade dos resíduos produzidos.

O Departamento de Proteção Ambiental do Governo de Hong Kong, relata que entre o período de 1996 e 2000 a média anual de resíduos em aterros foi de 6 milhões de toneladas por ano e 43% eram de RCD, no período de 2001- 2005 foram em média 6,5 milhões de toneladas por ano com 39% de RCD (EPDHK, 2012), ou seja, mesmo com o aumento dos resíduos, a presença de RCD não acompanhou a crescente, pelo contrário foi minimizada. O governo

conseguiu diminuir o número de resíduos em aterros devido a implantação de centros de triagem de RCD.

2.3.2 Processo de reciclagem

As etapas para a reciclagem dos RCDs recolhidos no município, até seu destino final, como por exemplo a utilização como agregado, são configuradas pelos processos de: concentração; cominuição; peneiramento; auxiliares. s (LUZ et al., 2004; CHAVES, 2002)

Figura 2 – Etapas de reciclagem



Fonte: Adaptado do LUZ et al., 2004; CHAVES, 2002

a) Concentração

A primeira e principal etapa da reciclagem é dada, pela separação ou catação dos materiais indesejáveis, ou seja, nessa etapa, é realizado uma “limpeza”, para que seja possível ter um material que não apresente tanta presença de matérias como, madeira, metais, gesso entre outros, assim é possível ter um material mais coerente para determinada função.

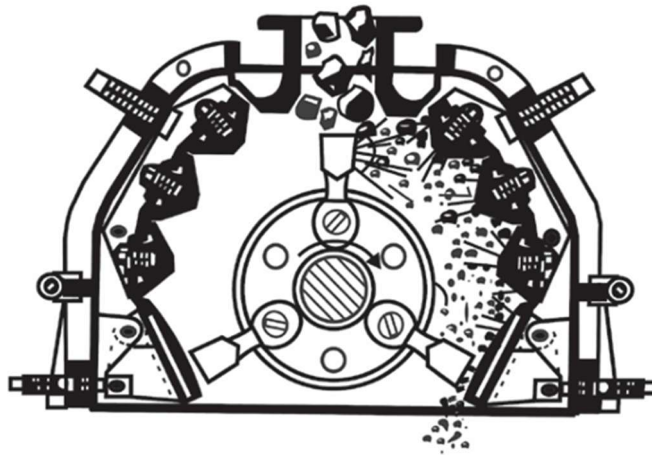
b) Cominuição ou britagem

Este processo comumente conhecido como britagem, é resumido em diminuir as dimensões do material, para que seja possível ter amostras mais uniformes. Por consequência desse processo, os grãos se tornam mais resistentes a esforços de compressão, quando comparamos com os resíduos retirados diretamente do local, isso ocorre devido, a maneira como os grãos se fragmentam, pois o rompimento acontece no plano de menor resistência. Assim como, ao final do cominuição, são geradas frações mais finas, que facilitam agrupamento ou imbricamento das partículas de menor dimensão. A maneira como se executa a britagem influencia diretamente nas características de resistência e graduação do agregado reciclado (LIMA,1999).

- Tipos de britadores

Britador de impacto: Um dos tipos mais usados nas indústrias de reciclagem, uma vez que, pode ser aplicado para britagem primária e secundária. Um aspecto interessante, é que este equipamento é o mais vantajoso para a produção de agregados reciclados no uso de pavimentação, haja vista sua granulometria final (LIMA, 1999).

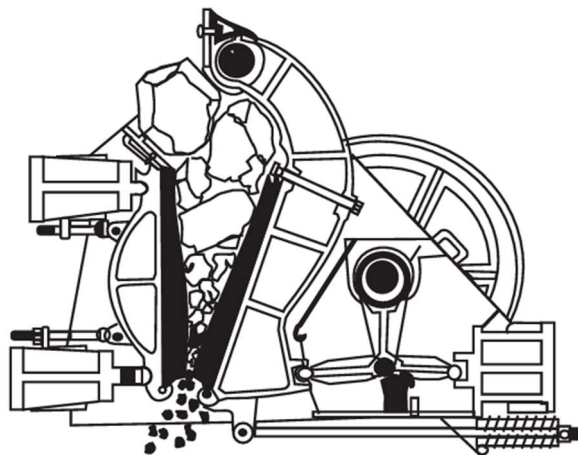
Figura 3 – Britador de impacto



Fonte: Roberts et al (1996, apud Bernucci et al, 2006)

Britador tipo mandíbula: Este tipo de britador, geralmente é utilizado para a cominuição primária, pois, seu processo se dá por compressão, em razão deste fato, resulta em grãos mais graúdos, o que causa a necessidade de uma britagem secundária (CHAVES e PERES, 2003; LIMA 1999).

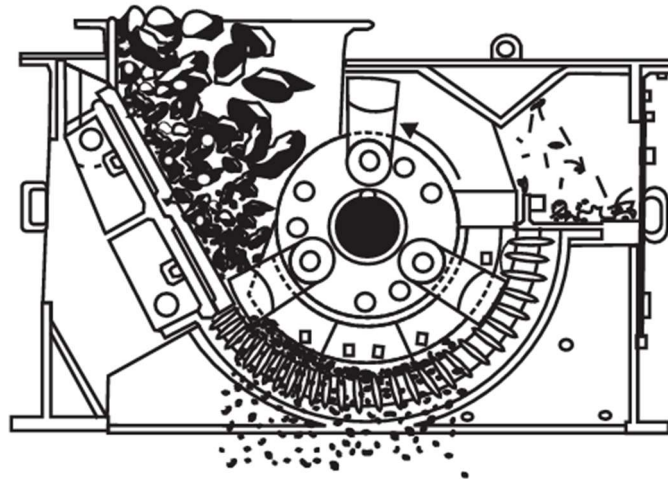
Figura 4 – Britador de mandíbula



Fonte: Roberts et al (1996, apud Bernucci et al, 2006)

Moinho de martelo: É um equipamento, que por sua vez a quebra dos grãos é dada por atrito e impacto. Na maioria dos casos, é constituído grãos de geometrias cúbicas e matérias com grandes quantidades de finos.

Figura 5 – Britador de martelo



Fonte: Roberts et al (1996, apud Bernucci et al, 2006)

c) Operação de peneiramento

Basicamente esse processo compreende a separação granulométrica de grãos, nos quais são submetidos, a passar por peneiras. Esta etapa se assemelha a análise granulométrica, realizada para classificação de solos.

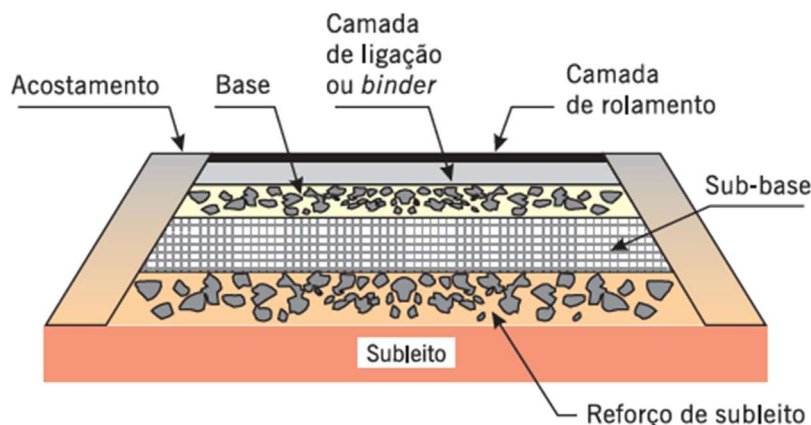
d) Operação auxiliares

Essas operações envolvem procedimentos, que buscam auxiliar nos processos de reciclagem, nos quais são, sistemas nebulizadores, esteiras transportadoras, caminhões entre outros.

2.4 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM PAVIMENTAÇÃO

Na engenharia, a Pavimentação consiste na infraestrutura de multicamadas que tem a função de transmitir a carga do tráfego para o solo (subleito). As camadas geralmente são divididas em revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Estrutura de camadas de pavimentos



Fonte: Bernucci et al (2006)

Motta (2005) cita diversos tipos de uso para o agregado reciclado como: camadas drenantes, envelopamento de galerias, lastro para assentamento de tubos ou de guias, produção de concreto e argamassa para diversos fins como componentes para infraestrutura e alvenaria, regularização e cascalhamento de ruas de terra e estabilização de solos expansíveis.

Além disso, podem ser usados como camadas de base, sub-base e reforço de subleito de pavimentos. Para esse fim, o agregado também pode ser misturado com solo para a obtenção de um CBR maior atendendo a norma (NBR 15.115/2004) que o define como o principal requisito mecânico a ser cumprido.

Existe um estímulo, nas últimas três décadas, para o desenvolvimento de mais técnicas de reciclagem de RCD devido à alta demanda de materiais naturais, seus altos preços e a possibilidade de no futuro a demanda não ser atendida. O RCD tem se mostrado viável quando usado como material em camadas de base, sub-base e reforço de subleito para vias com baixo volume de tráfego. (Orioli, 2018)

Segundo dados do DNPM (2005), a exploração de jazidas minerais para obtenção de agregados naturais tem uma produção altíssima e é responsável por um grande impacto ambiental. No Brasil em 2004, foram produzidos 172,4 milhões de toneladas de areia e rocha britada, sendo que a pavimentação respondeu por cerca de 20% deste total (DNPM, 2005).

O uso do agregado reciclado em pavimentação é uma alternativa muito interessante para substituir materiais naturais, não-renováveis, principalmente para os milhares de quilômetros de vias brasileiras ainda não pavimentadas (COPPEAD, 2007).

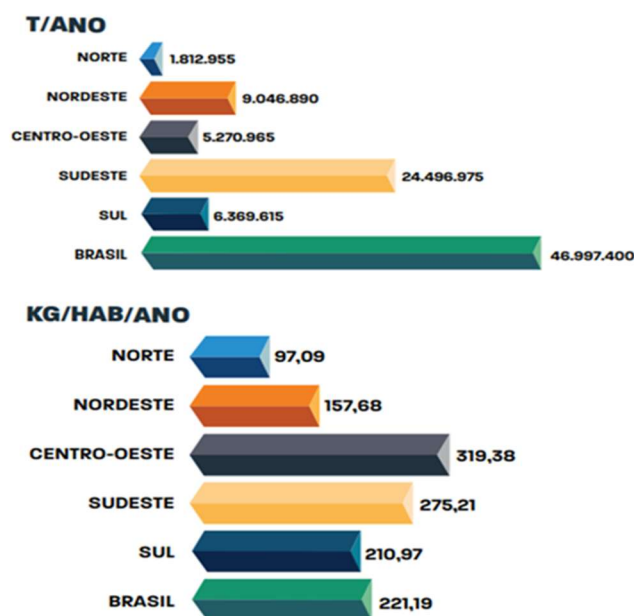
Dessa forma, ao utilizar-se o material produzido pelas usinas recicladoras em pavimentação, vários aspectos complementares de projeto e construção devem ser analisados. Como o material não é fornecido com uma característica constante, durante a execução do

pavimento podem ser necessárias modificações no projeto. Por isso é tão importante o emprego de um controle tecnológico sério quando se emprega um material reciclado (BENNERT et al., 2000). Muitas pesquisas indicaram que muitos métodos de controle de qualidade padrão não se aplicam aos agregados reciclados de resíduo sólido da construção civil (BLANKENAGEL e GUTHRIE, 2006).

2.5 GERAÇÃO DE RCDS NO BRASIL

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública de Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021), no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, cita que em 2021 foram coletados 221,2 kg de RCD por habitante/ano. A Figura 7 apresenta os dados mencionados.

Figura 7 – Coleta de RCD pelos municípios nas regiões brasileiras



Fonte: ABRELPE, 2021.

Segundo Pesquisa Setorial publicada em 2022 pela ABRECON, o Nordeste é a segunda região que mais gera RCD (29 Mt/ano), perdendo apenas para o Sudeste (44,5 Mt/ano). Além disso, o relatório considera a existência de cerca de 380 usinas de reciclagem de RCD no Brasil em 2021, porém a quantidade de agregado reciclado é inferior à capacidade das usinas.

2.5.1 Pavimentação com agregado reciclado no Brasil

A primeira via com agregado da construção civil na cidade de São Paulo foi asfaltada no ano de 1984. A Rua Gervásio da Costa, localizada na zona oeste da cidade, recebeu o agregado da construção civil em sua camada de reforço do subleito. A construção teve

supervisão executiva e de desempenho pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo). Naquela época, a via apresentou um desempenho extremamente satisfatório (BODI et al., 1995).

No início dos anos 90, na cidade de São Paulo, foi implementado um programa de reutilização de resíduos da construção civil para fins de pavimentação. Foram conduzidos estudos em laboratório e foi concluído que a utilização de resíduos de construção e demolição se mostrava uma alternativa promissora e interessante para a pavimentação urbana (BODI et al., 1995).

A Prefeitura Municipal de Belo Horizonte executa, desde 1996, pavimentos com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em suas camadas de base e sub-base (FERNANDES, 2004). O dimensionamento da estrutura é baseado no índice de suporte Califórnia dos materiais e na experiência prática dos engenheiros do município. Belo Horizonte possui uma política de gestão de resíduos diferenciada. O agregado reciclado é produzido internamente pela prefeitura, por meio de três estações de reciclagem de resíduos da construção civil. São produzidos dois tipos de materiais:

- Tipo A: compostos basicamente de concreto e argamassas;
- Tipo B: composto por materiais mistos, como cerâmica, concreto, argamassa e outros.

Muitas vias urbanas em Belo Horizonte foram construídas utilizando os agregados reciclados produzidos internamente pela prefeitura e apresentam condições de tráfego comparáveis aos trechos pavimentados com agregados convencionais. No entanto, não é possível afirmar se houve um dimensionamento excessivo das camadas do pavimento, uma vez que, confiou-se apenas na experiência prática e técnica dos engenheiros da Prefeitura de Belo Horizonte (FERNANDES, 2004).

No final dos anos 90, Trichês e Kryckyj (1999) conduziram um estudo sobre o reaproveitamento de resíduos da construção civil em pavimentação em Florianópolis. Foram analisados dois tipos de materiais provenientes dos resíduos, bem como dois tipos de solos:

- Entulho branco: principalmente compostos por materiais cimentícios, como argamassas, concreto e pequena quantidade de gesso;
- Entulho vermelho: composto por tijolos, telhas e cerâmicas;
- Solo areno-siltoso;
- Solo argiloso.

Foram realizados testes para avaliar as propriedades físicas e a capacidade de suporte do resíduo, solo e das misturas solo-resíduo, variando a composição percentual. Os resultados indicaram que os resíduos provenientes da construção e demolição não apresentavam expansão e contribuíam para a redução da expansão nas misturas com o solo. No entanto, observaram-se valores menores do índice de suporte Califórnia para os resíduos em comparação com as misturas solo-resíduo. Os autores, Trichês e Kryckyj (1999), acreditam que a incorporação da fração fina do solo ao resíduo de construção proporcionou uma melhor compactação, resultando em um aumento da capacidade de suporte (TRICHÊS e KRYCKYJ, 1999).

Na Bahia, Carneiro et al. (2001) investigaram a viabilidade do uso de agregados reciclados de Salvador na pavimentação. Foram estudados agregados reciclados nas frações grossa e fina, além de misturas de solo com agregados reciclados em diferentes proporções. Foram realizados testes de caracterização física e mecânica, incluindo análise granulométrica, ensaio de abrasão Los Angeles, compactação e índice de suporte Califórnia. Os resultados da pesquisa indicaram que o agregado reciclado de Salvador é adequado para aplicação em bases e sub-bases de pavimentos.

A partir do ano 2000, a Secretaria de Serviços Urbanos de Uberlândia e a Universidade Federal de Uberlândia conduziram um estudo para definir parâmetros que permitissem o uso de resíduos da construção civil em camadas de pavimentos urbanos. Em 2003, foi construída uma pista experimental utilizando agregado reciclado na camada de base. A pista possui um tráfego intenso, pois serve como acesso a um aterro sanitário da cidade. Após três anos de funcionamento, não foram observados defeitos no pavimento por meio de avaliações visuais (MOREIRA et al., 2006).

Agregados reciclados brancos e vermelhos foram estudados em laboratório por Ribeiro et al. (2002) para aplicação na pavimentação na cidade de Goiânia. Os agregados foram britados em laboratório, ajustando-se aos intervalos especificados pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Também foi analisado o comportamento dos agregados reciclados misturados com solo. Foram realizados ensaios de compactação e índice de suporte Califórnia. De acordo com o autor Ribeiro et al. (2002), os resultados obtidos demonstraram que a utilização de agregados reciclados na pavimentação é tecnicamente viável.

Em Goiânia, entre 2003 e 2004, foi construído um trecho experimental de 50 metros utilizando uma mistura de solo argiloso com agregado reciclado nas camadas de base (75% de agregado reciclado) e sub-base (83% de agregado reciclado). A pista apresenta um tráfego considerável de caminhões, pois é um acesso a um centro de abastecimento da cidade. O

controle tecnológico do trecho incluiu a realização de ensaios de frasco de areia, densímetro nuclear e pressiômetro Pencil. O controle de compactação indicou que o densímetro nuclear apresentou valores de umidade e densidade de campo maiores do que os obtidos em estufa e com o frasco de areia. O pressiômetro Pencil foi utilizado para medir as propriedades de deformação dos materiais. Os resultados mostraram que o módulo de recarregamento e a pressão limite são considerados bons parâmetros para avaliar o comportamento das camadas do pavimento. A construção deste trecho experimental confirmou a viabilidade técnica do uso de agregado reciclado em pavimentos flexíveis (MENDES et al., 2004).

Em relação às propriedades mecânicas, Fernandes (2004) realizou estudos em laboratório com agregados reciclados de concreto e mistos provenientes do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte. Os materiais foram analisados quanto à sua aplicabilidade em bases, sub-bases e reforços de subleito de pavimentos, comparando-os com materiais convencionalmente utilizados. Também foram realizados testes para verificar possíveis impactos ambientais, como lixiviação e solubilização.

Os testes de lixiviação conduzidos por Fernandes (2004) atenderam aos limites estabelecidos pelas normas. No entanto, os testes de solubilização indicaram que os agregados reciclados eram classificados como materiais da Classe IIA, ou seja, não inertes. Foram observadas as presenças de:

- a) Alumínio: 0,290mg/l e 0,400mg/l para agregados do Rio de Janeiro e Belo Horizonte, respectivamente. O limite máximo permitido é de 0,200mg/l, para ser considerado um material inerte (Classe IIB);
- b) Fenóis: 0,004mg/l para agregados do Rio de Janeiro. O limite máximo é 0,001mg/l, para ser considerado um material inerte (Classe IIB);
- c) Selênio: 0,020mg/l para agregados de Belo Horizonte. O limite máximo é 0,010mg/l, para ser considerado um material inerte (Classe IIB).

Materiais não inertes não devem ser utilizados em camadas de pavimento devido ao risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas. No entanto, Fernandes (2004) conclui que os valores observados não impedem o uso desses agregados reciclados, especialmente considerando que, em grande parte do território brasileiro, o lençol freático se encontra a profundidades seguras e os pavimentos contam com sistemas de drenagem projetados para evitar a percolação de água.

2.5.2 Normalização internacional e nacional

A norma empregada neste trabalho é a NBR 15115 (ABNT, 2004), que especifica como devem ser executados pavimentos que empregam o agregado reciclado. O ensaio de índice de suporte Califórnia é o principal critério de avaliação para emprego dos agregados reciclados em camadas de base, sub-base e reforço do subleito.

Antes da norma da ABNT, foi publicada no ano de 2003 a especificação técnica de serviço da Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP), PMSP/SP ETS-001 (PMSP, 2003), que também define critérios para orientar a execução de camadas de pavimento com o agregado reciclado. A PMSP/SP ETS-001 (PMSP, 2003) considera o valor do índice de suporte Califórnia como principal parâmetro para a utilização de agregados reciclados em pavimentos e é um pouco mais rígida em relação às propriedades físicas dos agregados reciclados, comparada à NBR 15115 (ABNT, 2004).

Para empregar o agregado reciclado em camadas de pavimentos, é importante conhecer as especificações existentes e respeitá-las. Atualmente nos Estados Unidos 28 estados permitem o uso do agregado reciclado de concreto como material para base e sub-base e somente 15 destes estados possuem especificações para o uso destes agregados reciclados (KUO et al., 2002).

Em termos de normalização internacional sobre o uso de agregado reciclado em pavimentação, não foram encontradas muitas referências na bibliografia consultada. As normas ou especificações observadas são (LEVY, 2001; NATAATMADJA e TAN, 2001; KUO, 2002; MOTTA, 2005):

- i. Norma Britânica - BS 6543 (1985): Guide to use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering;
- ii. Especificação técnica holandesa - Standaard RAW bepalingen (1995): Stichting Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek;
- iii. Especificação técnica alemã - TL RC-TOB (1995): Technischen Lieferbedingungen für Recyclingbaustoffe in Tragschichten ohne Bindemittel;
- iv. Especificação técnica do estado de Victoria (Road Authority of Victoria), Austrália - Section 820 (2006): Recycled crushed concrete for pavement subbase and light duty base;
- v. Especificações técnicas dos Departamentos de Transportes dos estados da Florida e Minnesota (FDOT e Mn/DOT).

A elaboração de normas e de especificações técnicas colabora para que seja difundido e consolidado o uso do agregado reciclado em camadas de pavimentos. Pela literatura revisada, observou-se que muitos estudos vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo, procurando estabelecer diretrizes para a reciclagem dos resíduos da construção. Os resultados apontam de uma forma geral que o agregado reciclado possui um grande potencial para emprego em pavimentação, proporcionando uma série de benefícios ambientais, econômicos e sociais.

2.5.3 Pavimentação com agregado reciclado: experiências internacionais

No início da década de 90, foram realizadas pesquisas no Reino Unido verificando a viabilidade do emprego de materiais reciclados de resíduos da construção civil em pavimentação. Segundo O'Mahony e Milligan (1991), apesar do Reino Unido ser relativamente rico em reservas naturais, o consumo de materiais de construção estava crescendo muito. Acreditava-se que no futuro a produção de agregados naturais não conseguiria suprir a procura por estes materiais.

A pesquisa inglesa verificou em laboratório as propriedades de resíduos britados de concreto e de alvenaria para emprego em camadas de sub-base. Uma amostra de brita calcária, que seria o material convencionalmente empregado no Reino Unido, foi também analisada para servir de referência comparativa. Por meio de ensaios de índice de suporte Califórnia verificou-se que os resíduos britados de concreto apresentaram comportamento semelhante ao da brita calcária. Já os resíduos britados de alvenaria apresentaram uma capacidade de suporte menor, em função da grande variabilidade da natureza de seus materiais constituintes. Contudo, todas as amostras analisadas apresentaram um índice de suporte Califórnia maior que 30%, limite estipulado no Reino Unido para emprego em camada de sub-base (O'MAHONY e MILLIGAN, 1991).

De acordo com o Federal Highway Administration, desde 1997, pelo menos 20 estados americanos empregam agregados reciclados de concreto na construção de pavimentos: Arizona, California, Colorado, Florida, Indiana, Iowa, Louisiana, Maryland, Massachussetts, Minnesota, Missouri, Nebraska, New Jersey, New York, North Dakota, Ohio, Pennsylvania, Rhode Island, South Carolina e Texas. Segundo FHWA (1997), o agregado reciclado de concreto tem se mostrado um excelente material granular para emprego em bases e sub-bases, apresentando boa capacidade de suporte, durabilidade e drenabilidade.

Desde o final da década de 90, em New Jersey nos Estados Unidos, foi verificada a viabilidade de utilização de agregado reciclado de concreto em base e sub-bases de pavimentos (BENNERT et al., 2000). Foi conduzido um extenso programa laboratorial, utilizando-se várias porcentagens de agregado reciclado misturado com brita graduada simples. Conduziram-se ensaios triaxiais de carga repetida, determinando o módulo de resiliência e a deformação permanente do agregado reciclado de concreto. Os resultados indicaram que o agregado reciclado de concreto e as misturas de agregado reciclado de concreto com a brita graduada simples apresentaram módulos de resiliência superiores ao da brita graduada simples.

Contudo, o agregado reciclado de concreto apresentou deformação permanente maior que a brita graduada simples sob as mesmas condições de ensaio (BENNERT et al., 2000). Entre 1996 e 1997, o Departamento de Transportes da Florida (Florida Department of Transportation - FDOT), nos Estados Unidos, desenvolveu metodologias e especificações para o uso de agregados reciclados de concreto em pavimentos flexíveis e rígidos (KUO et al., 2001). A intenção era maximizar o uso destes agregados reciclados, provenientes dos antigos pavimentos de concreto. As pesquisas compreenderam o uso tanto em bases e sub-bases, como na composição de concretos para pavimentos rígidos. O FDOT propõe reciclar o concreto retirado do pavimento a ser restaurado e aplicá-lo na reconstrução do mesmo, ou seja, no mesmo local. Assim, o processo de reciclagem é otimizado e os gastos com transporte e deposição de materiais são reduzidos (CHINI et al., 2001).

Na Austrália, desde a década de 90 o agregado reciclado de concreto é empregado em projetos de construção de rodovias, nas camadas de sub-base. Nataatmadja e Tan (2001) desenvolveram estudos para verificar a comportamento resiliente de agregados reciclados de concreto. Foram analisadas quatro amostras de agregados reciclados, provenientes de concretos com diferentes resistências à compressão: 15,0; 18,5; 49,0 e 75,0MPa. Os resultados obtidos indicaram que a resistência à compressão do concreto de origem influencia no módulo de resiliência e na deformação permanente do agregado reciclado de concreto. Contudo, o fator mais importante é a granulometria, pois materiais bem graduados apresentam módulos de resiliência mais elevados (NATAATMADJA e TAN, 2001).

Na Holanda, desde a década de 70, o reuso de resíduos de demolição de alvenaria e concreto como material para bases e sub-bases granulares de pavimentos é uma prática comum. Em 2002, Molenaar e van Niekerk estudaram em laboratório os efeitos da graduação, composição e grau de compactação do agregado reciclado nas suas propriedades mecânicas. Concluíram que a composição e a granulometria influem no desempenho do agregado reciclado

para utilização em camadas de bases e sub-bases de pavimentos, mas o grau de compactação é claramente o fator mais importante. Este resultado se mostrou muito interessante, pois ainda que a graduação e a composição muitas vezes sejam parâmetros de difícil controle, a compactação eficiente é possível de ser realizada e fiscalizada a um custo baixo (MOLENAAR e VAN NIEKERK, 2002).

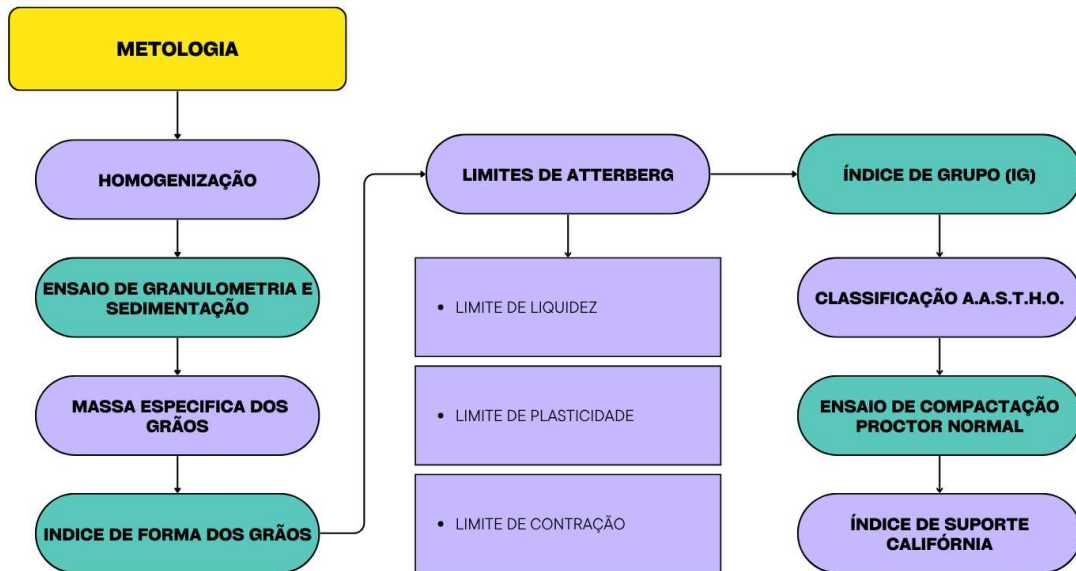
3. MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 Descrição do estudo

A utilização de agregados reciclados em pavimentação tem mostrado uma alternativa sustentável na construção civil, principalmente em um cenário de crescente preocupação com a preservação dos recursos naturais e a gestão de resíduos. Nesse contexto, a caracterização física deste material torna-se essencial para avaliar sua previsão em estruturas de pavimentos. As propriedades físicas estão diretamente relacionadas à capacidade do agregado reciclado de suportar as cargas e os esforços gerados pelo tráfego de veículos. Dessa forma, conhecer essas características permite melhorar o desempenho do pavimento, garantindo durabilidade e segurança nas vias.

A campanha de caracterização física/mecânica da amostra de Agregado Reciclado (AR), foram iniciadas no Laboratório de Geotecnia do Centro de Tecnologia (CTEC) na Universidade Federal de Alagoas (UFAL). No primeiro momento, a amostra AR foi homogeneizada para pesagem da massa total e em seguida quarteada para início do Ensaio de Granulometria e Sedimentação, em conformidade com a ABNT/ NBR 7181/2016. Em seguida, serão executados os ensaios de Limites de Atterberg (Limites de Consistência), em termos de normas técnicas referente a estes ensaios serão empregadas a NBR 6459/84 para a determinação do Limite de Liquidez (LL), a NBR 7180/84 para a determinação do Limite de Plasticidade (LP) e quanto ao Limite de Contração (LC) a NBR 7183/82. Na sequência foram realizados os ensaios de Massa Específica dos Grãos em conformidade com a NBR 6458 (ABNT, 2016), norma utilizada para solos. Posteriormente, os ensaios de compactação no Proctor Normal e CBR também no Proctor Normal serão conduzidos em conformidade respectivamente com a NBR 7182/2016 (Solo – Ensaio de Compactação) e a NBR 9895/87 (Índice de Suporte Califórnia - ISC).

Figura 8 – Metodologia da pesquisa



Fonte: Autora, 2025.

3.2 Análise granulométrica

O estudo da granulometria de um solo permite saber as porcentagens das partículas existentes em função de suas dimensões, tornando-o de grande importância para prever o comportamento desses materiais ao serem utilizados em obras de engenharia. A granulometria pode ser realizada somente por peneiramento ou por peneiramento e sedimentação, caso que foi utilizado nesse trabalho.

O ensaio é preconizado pela NBR 7181/2016 (Solo – Análise Granulométrica). Para a realização do ensaio é necessário a preparação prévia das amostras de solo conforme a Norma NBR 6457/2016 (Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização).

Quando finalizada a preparação prévia da amostra de AR, foi realizado a pesagem a cerca de 10 Kg da mesma, para peneiramento na peneira #10 (2,00mm). O material retido na peneira #10 (2,00mm) foi utilizado no peneiramento grosso do solo. Do material que passa na #10, foi retirado 120g para a realização do ensaio de sedimentação, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Ensaio de granulometria do AR



Fonte: Autora, 2025.

3.3 Peneiramento e sedimentação

O peneiramento grosso foi realizado utilizando-se a quantidade de RCD que fica retida na #10 (2,00mm), no momento da preparação da amostra. O material foi lavado na peneira #10 e colocado em seguida na estufa, como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Lavagem do peneiramento grosso do AR



Fonte: Autora, 2025.

Com o auxílio do agitador mecânico, o material foi passado nas peneiras com abertura de 50, 38, 25, 19, 9.5 e 4.8 mm. Após o peneiramento, foi pesada a fração de RCD retida em cada peneira, até chegar à peneira #10 (2,00mm), conforme a Figura 11.

Figura 11– Amostras do AR após peneiramentos grosso



Fonte: Autora, 2025.

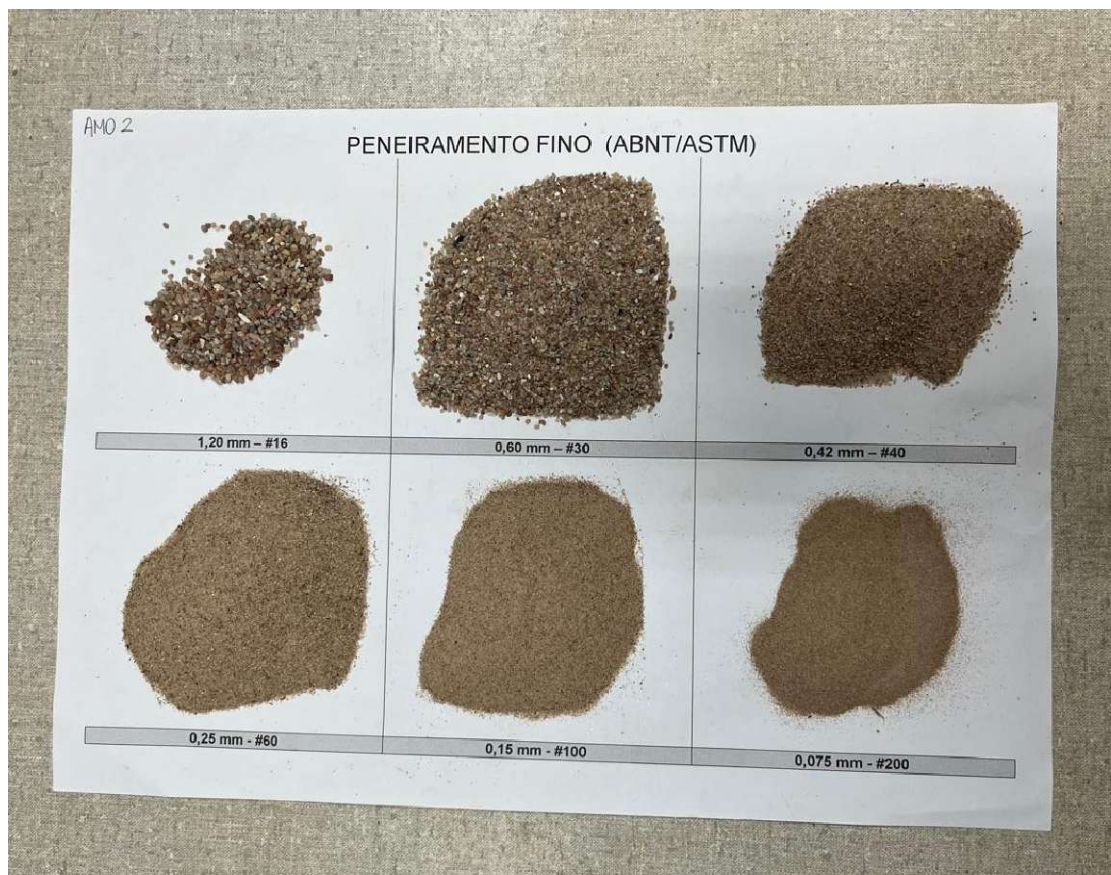
O peneiramento fino foi realizado com cerca 120 g da amostra de RCD passante na peneira #10 (2,00mm). O material foi lavado na peneira #200 (0,075mm) e em seguida colocado na estufa. Fazendo uso do agitador mecânico, o material foi passado nas peneiras de 1.2, 0.6, 0.42, 0.25, 0.15, e 0.075 mm. Após esse processo, foram pesadas as frações de RCD retidas em cada peneira, como mostra a Figura 12 e Figura 13.

Figura 12 – Lavagem do peneiramento fino do AR



Fonte: Autora, 2025.

Figura 13 – Amostras do AR após peneiramentos fino



Fonte: Autora, 2025.

O ensaio de sedimentação, representado na Figura 14, foi realizado com a finalidade de analisar a distribuição das partículas finas, aquelas com diâmetro inferior a 0,075 mm. Para isso, utilizou-se uma amostra de 120 g, previamente separada, que permaneceu submersa por 24 horas em uma solução defloculante à base de hexametáfosfato de sódio. Após esse período de imersão, a amostra foi submetida à dispersão mecânica por 15 minutos e, posteriormente, transferida para uma proveta graduada de 1.000 mL contendo água destilada.

Figura 14 – Ensaio de sedimentação



Fonte: Autora, 2025.

As medições foram feitas utilizando um densímetro, em intervalos de tempo previamente definidos: 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas e 24 horas. Esses registros possibilitaram acompanhar a sedimentação e a distribuição das partículas ao longo do tempo.

3.4 Massa Específica dos Grãos

A determinação da massa específica foi realizada conforme os procedimentos da NBR 6458:2017 (ABNT, 2017), que estabelece os métodos para avaliar a massa específica de partículas retidas e passantes na peneira com abertura de 4,8 mm.

Para isso, foram coletados 10 kg de amostra de agregado reciclado (AR), preparada conforme as orientações da NBR 6457:2024 (ABNT, 2024). Em seguida, o material foi peneirado para separação das partículas com dimensão inferior a 4,8 mm. As frações retidas passaram por lavagem, a fim de remover impurezas aderidas, e foram posteriormente submersas

em água destilada à temperatura ambiente por um período de 24 horas, garantindo assim a completa saturação das partículas.

Após o período de imersão, o material foi retirado da água e cuidadosamente seco com o auxílio de um pano absorvente levemente umedecido, com o objetivo de remover apenas a umidade superficial. Esse procedimento assegura que os grãos sejam pesados em condição de saturação com superfície seca, conforme exigido para a obtenção precisa da massa específica.

3.4.1 Grãos Retidos na Peneira 4,8 mm

A massa específica dos grãos retidos (ρ_{sr}), expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm³), foi calculada utilizando a Equação 1.

$$\rho_{sr} = \frac{M_s}{M_s - M_i} * \rho_w \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

M_s é a massa da amostra seca, expressa em gramas (g);

M_i é a massa da amostra totalmente imersa em água destilada, expressa em gramas (g);

ρ_w é a massa específica da água à temperatura do ensaio, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³).

3.4.2 Partículas Passantes na Peneira 4,8 mm

Para as partículas que passaram na peneira com abertura de 4,8 mm, a determinação da massa específica foi realizada por meio do método do picnômetro, conforme descrito no Anexo B da NBR 6458:2017 (ABNT, 2017). A amostragem para o ensaio consistiu em aproximadamente 250 g de material, previamente preparado de acordo com os procedimentos da NBR 6457:2024 (ABNT, 2024). O método envolve a dispersão da amostra em água destilada e a aplicação de vácuo para remoção do ar aderido às partículas, assegurando maior precisão na medição do volume deslocado e, conseqüentemente, na determinação da massa específica.

A massa específica dos grãos de solo passantes (ρ_{sp}), expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³), foi calculada utilizando a Equação 2.

$$\rho_{sp} = \frac{M_1 * \left[\frac{100}{100+w} \right]}{\left[\frac{M_1 * 100}{100+w} \right] + M_3 - M_2} * \rho_{w(T)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

M_1 é a massa do solo úmido, expressa em gramas (g);

M_2 é a massa do picnômetro + solo + água, à temperatura do ensaio, expressa em gramas (g);

M_3 é a massa do picnômetro cheio de água, à temperatura do ensaio, expressa em gramas (g);

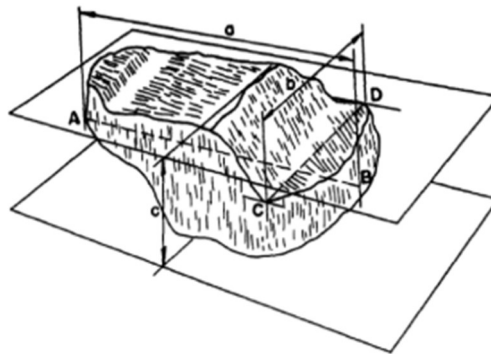
w é a umidade inicial da amostra, expressa em gramas por gramas (g/g);

$\rho_{w(T)}$ é a massa específica da água à temperatura do ensaio, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³).

3.5 Índice de Forma dos Grãos

O índice de forma é um parâmetro importante para avaliar a geometria dos grãos do agregado graúdo, sendo obtido por meio da média ponderada das relações entre o comprimento (a) e a espessura (b) de cada partícula analisada, como mostra a Figura 15. Esse método, descrito na NBR 7809 (ABNT, 2019), utiliza um paquímetro para as medições, garantindo maior precisão na caracterização da forma dos grãos.

Figura 15 – Dimensões dos grãos a serem medidas



Fonte: ABNT,1989

Para a realização do ensaio, foi utilizada uma amostra de 20 kg, quantidade estabelecida em função da distribuição granulométrica do material. Inicialmente, a amostra foi submetida à análise granulométrica, sendo desconsideradas as frações passantes na peneira de 9,5 mm e aquelas que apresentaram porcentagem em massa igual ou inferior a 5%. Em seguida, as frações selecionadas foram submetidas ao quarteamento até se obter o número de grãos necessário, conforme definido pela Equação 3.

$$N_i = \frac{200}{F_1 + F_2 + \dots + F_n} \times F_i \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

N_i : número de grãos para medição da fração i ;

F_i : porcentagem em massa retida individual correspondente a fração i ;

F_n : soma das porcentagens em peso retidas individuais das frações obtidas

A avaliação do formato dos grãos do agregado reciclado foi conduzida seguindo as diretrizes da NBR 6954, que estabelece os procedimentos para classificação das partículas com base em suas características geométricas. Os critérios adotados para essa classificação estão

detalhados na Tabela 2, permitindo a categorização dos grãos de acordo com seus índices de forma.

Tabela 2 – Classificação do formato dos grãos

	Média das relações	Classificação da forma
1	b/a maior que 0,5 e c/b maior que 0,5	Cúbica
2	b/a menor que 0,5 e c/b maior que 0,5	Alongada
3	b/a maior que 0,5 e c/b menor que 0,5	Lamelar
4	b/a menor que 0,5 e c/b menor que 0,5	Alongada-lamelar

Fonte: ABNT (1989)

3.6 Limite de Liquidez (LL)

Com o auxílio do aparelho de Casagrande, como mostra a Figura 16, para determinar o teor de umidade do solo com 25 golpes, onde tem que ser feito uma ranhura que une os bordos inferiores de uma canelura (um centímetro).

Figura 16 – Aparelho de Casagrande



Fonte: Autora, 2025

Esse procedimento de ensaio é padronizado pela NBR 6459 (ABNT, 2016). Parte da amostra é colocada em um recipiente de porcelana, e a água é adicionada aos poucos até que a massa fique homogênea. Em seguida, uma porção desse material é colocada em uma concha do aparelho de Casagrande e nivelada com uma espátula, de modo que a espessura no centro seja de 1 cm. Com um cinzel, faz-se uma ranhura no meio da massa, no sentido do maior comprimento do aparelho. Após isso, começa-se a aplicar os golpes, girando a manivela a uma velocidade de duas voltas por segundo, contando o número de golpes até que a ranhura se feche. Uma pequena quantidade de material é retirada do ponto onde as bordas da ranhura que se

encontram para medir a umidade. O restante do material da concha é transferido de volta para um recipiente de porcelana, onde mais água é adicionada. O processo é repetido cinco vezes, aumentando gradativamente a quantidade de solo, para que o número de golpes necessários para fechar a canelura seja aproximadamente 10, 20, 30, 40 e 50 golpes. A partir de pares de valores (número de golpes e teor de umidade), é construído um gráfico com o teor de umidade em escala aritmética (nas ordenadas) e o número de golpes em escala logarítmica (nas abscissas).

3.7 Limite de Plasticidade (LP)

O Limite de Plasticidade é o valor de umidade na qual o solo passa do estado plástico para o estado semi-sólido. Atterberg definiu que a condição para que um solo esteja no estado plástico é sua capacidade de ser moldado em um cilindro de 10 cm de comprimento por 3 mm de diâmetro, por meio de rolagem sobre uma placa de vidro até que o solo comece a se quebrar em pequenos pedaços. O procedimento deste ensaio é padronizado pela NBR 7180 (ABNT, 2016).

Para realizar o ensaio, uma amostra de solo foi colocada em uma bacia de porcelana, à qual adicionou-se pequenos detalhes de água destilada. A mistura foi feita por 15 a 30 minutos, até que se obtenha uma pasta aquosa, com consistência plástica. Em seguida, cerca de 10 g dessa amostra foram moldados com os dedos em uma pequena bola, que é rolada sobre uma placa de vidro, aplicando-se pressão com a palma da mão para formar um cilindro com dimensões próximas ao gabarito de comparação. O processo continua até que o cilindro se fragmente. As peças fragmentadas foram colocadas rapidamente para um recipiente adequado para a determinação da umidade, utilizando o método da estufa, conforme a NBR 6457 (ABNT, 2024). Esse procedimento deve ser repetido três vezes para obter três valores de umidade, a fim de calcular a média desses resultados.

3.8 Índice de Plasticidade (IP)

O Índice de Plasticidade (IP) é obtido através da diferença numérica entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP):

$$IP = LL - LP \quad \text{Equação 4}$$

Perante a determinação do Índice de Plasticidade, tem-se a classificação de plasticidade:

Fracamente plásticas: $1 < IP < 7$

Medianamente plásticas: $7 < IP < 15$

Altamente plásticas: $IP > 15$

O Índice de Plasticidade é essencial para a classificação de solos finos e para o gráfico de plasticidade de Casagrande, que também é utilizado como base para o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), conforme a NBR 7180(ABNT, 1984).

3.9 Índice de Grupo (IG)

O índice de grupo (IG), consiste em um número inteiro variando de 0 a 20. Por meio do IG é estimada a capacidade de suporte da camada de subleito de um pavimento. Quanto mais próximo de 0 (zero), a compreensão é de o solo tem boa capacidade suporte, já quanto mais próximo de 20, tem-se a expectativa de que o material tenha um mau desempenho como camada de subleito (ABNT, 1984).

A determinação do índice de grupo baseia-se nos limites de Atterberg (LL e IP) do solo e na porcentagem de material fino que passa na peneira número 200 (0,075mm). Seu valor é obtido utilizando a seguinte expressão:

$$IG = 0,2 \cdot a + 0,005 \cdot a \cdot c + 0,01 \cdot b \cdot d \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

a = porcentagem do solo que passa na peneira nº 200 menos 35%. Se o valor de “a” for negativo adota-se zero, e se for superior a 40, adota-se este valor como limite máximo.

$$a = P_{p,200} - 35\% \quad (0 - 40).$$

b = porcentagem do solo que passa na peneira nº 200 menos 15%. Se o valor de “b” for negativo adota-se zero, e se for superior a 40, adota-se este valor como limite máximo.

$$b = P_{p,200} - 15\% \quad (0 - 40)$$

c = valor do limite de liquidez menos 40%. Se o valor de “c” for negativo adota-se zero, e se for superior a 20, adota-se este valor como limite máximo.

$$c = LL - 40\% \quad (0 - 20)$$

d = valor do índice de plasticidade menos 10%. Se o valor de “d” for negativo adota-se zero, e se for superior a 20, adota-se este valor como limite máximo.

$$d = IP - 10\% \quad (0 - 20).$$

3.10 Classificação A.A.S.T.H.O (American Association State Highway Officials)

A Classificação AASHTO, conforme a NBR 7182 é baseada em diversos aspectos do solo, como granulometria, limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de grupo. O resultado é indicativo da capacidade de suporte do material. A Figura 17 é apresentada abaixo com a Classificação AASHTO (ABNT, 2020):

Figura 17 – Classificação do solo: A.A.S.H.T.O.

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

Fonte: BRASIL, 2006

As características dos solos de cada um dos grupos e subgrupos da classificação AASHTO, estão, abaixo, relacionadas a sua utilização em pavimentação.

Grupo A-1 - O material típico deste grupo é constituído de mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulhos, areia grossa, areia fina e um aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico. Contudo, este grupo inclui também fragmentos de pedra, pedregulho, areia grossa, cinzas vulcânicas etc., que não contenham aglutinantes de solo.

Subgrupo A-1-a - Inclui os materiais contendo, principalmente, fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante.

Subgrupo A-1-b - Inclui os materiais constituídos, principalmente, de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado.

Grupo A-2 - Este grupo inclui grande variedade de materiais que se situam entre os grupos A-1 e A-3 e entre os materiais constituídos de mistura silte-argila dos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7. Inclui todos os solos com 35% ou menos passando na peneira nº 200, mas que não podem ser classificados como A-1 ou A-3, devido ao teor de finos que contêm, ou a plasticidade, ou ambos excedendo os limites estabelecidos para os citados grupos.

Subgrupos A-2-4 e A-2-5 - Incluem solo contendo 35% ou menos, passando na peneira nº 200, com uma porção menor retida na peneira nº 40, possuindo as características dos grupos A-4 ou A-5. Estes grupos abrangem os materiais tais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos para o Grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico excedendo os limites do Grupo A-3.

Subgrupos A-2-6 e A-2-7 - Incluem solos semelhantes aos descritos nos subgrupos A-2-4 e A-2-5-, exceção feita da porção de finos que contêm argila plástica com características dos grupos A-6 ou A-7. Os efeitos combinados dos índices de plasticidade maiores que 10 e percentagem passando na peneira nº 200, maiores que 15, estão refletidos nos valores dos índices do grupo de 0 a 4.

Grupo A-3 - O material típico deste grupo é areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou possuindo pequena quantidade de silte não plástico. O grupo inclui também misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho depositados pelas correntes.

Grupo A-4 - O solo típico deste grupo é siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, possuindo, geralmente, 5% ou mais passando na peneira nº 200. Inclui também misturas de solo fino siltoso com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 8, as percentagens crescentes de material grosso, dando origem a valores decrescentes para os índices de grupo.

Grupo A-5 - O solo típico deste grupo é semelhante ao que foi descrito no A-4, exceto que ele é, geralmente, de caráter diatomáceo ou micáceo, altamente elástico, conforme indica seu elevado limite de liquidez. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 12; esses valores crescentes revelam o efeito combinado do aumento dos limites de liquidez das percentagens decrescentes de material grosso.

Grupo A-6 - O solo típico deste grupo é argiloso, plástico, tendo, geralmente, 75% ou mais de material passando na peneira nº 200. O grupo inclui também misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200. Os solos deste grupo comumente sofrem elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido. Os

valores dos índices do grupo vão de 1 a 16, esses valores crescentes mostram o efeito combinado do aumento dos índices de plasticidade e diminuição dos materiais grossos.

Grupo A-7 - O solo típico deste grupo é semelhante ao descrito no grupo A-6, com a diferença que possui as características de alto limite de liquidez do grupo A-5, podendo ainda ser elástico e estar sujeito a elevada mudança de volume. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 20; este aumento indica o efeito combinado de crescimento dos limites de liquidez e dos índices de plasticidade, bem como a diminuição dos materiais grossos.

Subgrupo A-7-5 - Encerra materiais com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume.

Subgrupo A-7-6 - Inclui materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume.

3.11 Ensaio de Compactação Proctor Normal

O ensaio de Proctor, conforme padronizado pela NBR 7182 (ABNT, 2020), estabelece que cinco medições da relação densidade seca-umidade são suficientes para representar graficamente a curva de compactação do solo. A preparação das amostras de solo para este ensaio seguiu os procedimentos definidos pela Norma NBR 6457 (ABNT, 2024).

A energia de compactação aplicada em cada camada dependerá da função do aterro e do tipo de construção a ser realizada. Em situações em que o tráfego de veículos será baixo, por exemplo, o processo pode ser realizado com a energia de compactação normal. Quando o tráfego de veículos é denso são necessárias densidades mais altas, o que demanda o uso de energias de compactação intermediária ou modificada. Para este trabalho, vale destacar que foi adotada a energia de compactação normal.

Figura 18 – Energias de compactação

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação.	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Números de camadas	5	5	5
	Números de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: NBR 7182/2020

A amostra foi seca ao ar, destorroada, homogeneizada e quarteada, de acordo com a norma do NBR 7182 (ABNT, 2020).

Após a preparação, o solo foi peneirado em malha de 19 mm e compactado com Energia Normal, onde foi empregado o cilindro grande, com aplicação de 12 golpes em cima de cada camada totalizando 5 camadas iguais, com altura de cerca de 12,5 cm, após compactação. A Figura 19 ilustra o corpo de prova sendo compactado.

Figura 19 – Execução do ensaio de compactação



Fonte: Autora, 2025

Após a compactação da amostra, o cilindro complementar foi removido para a determinação do peso do material compactado ainda úmido. Em seguida, a amostra foi retirada do molde cilíndrico, e dela foram separadas duas porções para medir a umidade do material. A relação entre o peso da amostra úmida e o peso da amostra seca permitiu calcular o teor de umidade da amostra compactada, o que ajudou a determinar a umidade ideal do material. Esse procedimento foi repetido cinco vezes, com teores de umidade crescentes, para caracterizar a curva de compactação.

3.12 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC), também conhecido como *California Bearing Ratio* (CBR), foi criado em 1930 no laboratório do Departamento de Pesquisa de Materiais da Divisão de Rodovias da Califórnia, nos Estados Unidos (HEAD, 1994).

O ensaio de ISC mede a relação entre a pressão aplicada para causar a penetração de um pistão em um corpo de prova de solo e a pressão necessária para obter a mesma penetração em uma brita padronizada. O resultado dessa relação, expresso em porcentagem, possibilita, por meio de equações empíricas, calcular a espessura adequada de pavimento flexível, conforme o volume de tráfego (BRASIL, 2006).

Os parâmetros de ISC e expansibilidade estabelecidos pela NBR 15115 para o uso de agregados reciclados em camadas de pavimentação para tráfego leves estão apresentados na Tabela 3:

Tabela 3: Requisitos específicos para agregados reciclados destinado à pavimentação

Aplicação	ISC %	Expansibilidade %	Energia de Compactação
Reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Base de pavimento¹	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada

¹ permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições de eixo padrão de 8,2 tf no período de projeto.

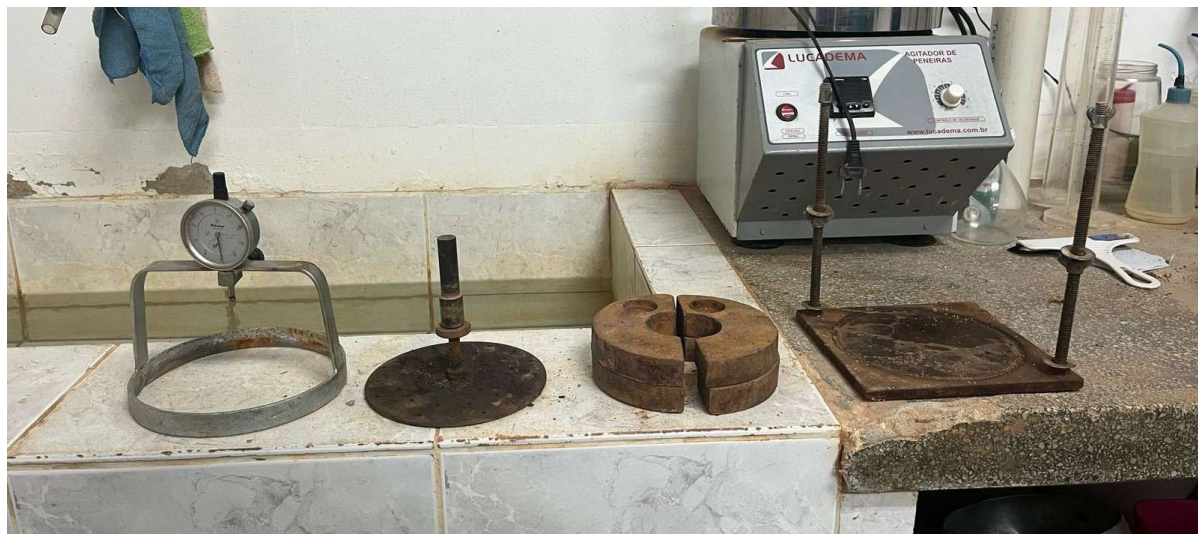
Fonte: ABNT 15115, 2004

O procedimento do ensaio de ISC segue a norma NBR 9895 (ABNT, 2016). Para a execução do ensaio, foram utilizados: um molde cilíndrico grande com base e colarinho, prato-base perfurado, disco espaçador, prato perfurado com haste central ajustável, soquete de 4,5 kg, extensômetro, papel-filtro, prensa com anel dinamométrico, tanque de imersão, cápsulas para medição de umidade, estufa, balança e peneira de 19 mm.

A amostra foi previamente seca ao ar, destorroada e passada na peneira de 19 mm. Em seguida, foi determinada a umidade higroscópica para, posteriormente, foi adicionada água até atingir um valor próximo à umidade ótima.

Para a preparação dos 5 corpos de prova, foi colocado um disco espaçador no cilindro, coberto com papel filtro, e os corpos de prova foram compactados na umidade ótima utilizando a energia de compactação Proctor Normal (05 camadas com 12 golpes de soquete a uma altura de 30,5 cm). Em seguida, o cilindro foi invertido, substituindo o disco espaçador por um prato perfurado com haste de expansão e pesos, como mostra a figura 20. Os corpos de prova ficarão submersos em água por 96 horas, como mostra a figura 21, com leituras de deformação realizadas a cada 24 horas. Após a saturação, foram deixados para escorrer por 15 minutos e pesados.

Figura 20 – Equipamentos utilizados no ensaio



Fonte: Autora, 2025

Figura 21 – Corpo de prova imerso

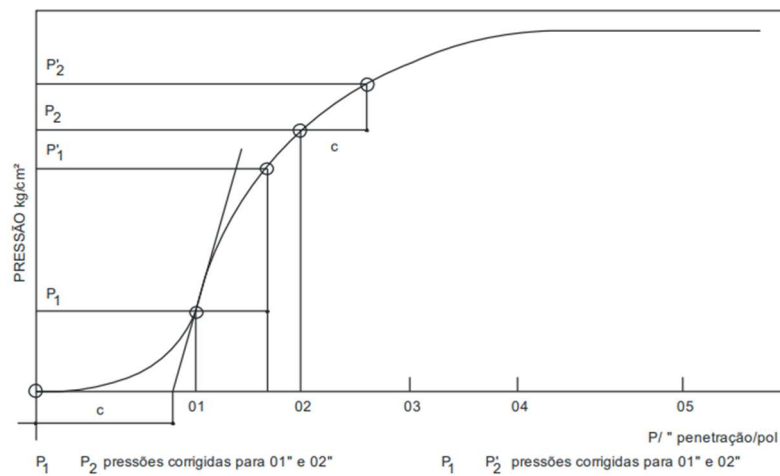


Fonte: Autora, 2025

Para a medição da resistência à compressão, o conjunto formado pelo molde cilíndrico com o corpo de prova e a sobrecarga foi instalado na prensa. Em seguida, o pistão da prensa foi posicionado na superfície do topo do corpo de prova e o extensômetro zerado. O carregamento foi então aplicado a uma velocidade de 1,27 mm/min, registrando-se a carga e a penetração a cada 30 segundos por um período de 6 minutos. As leituras de deformação do anel fornecerão as cargas correspondentes às penetrações de 0,63; 1,25; 2,5; 5,0; 7,5; 10,0 e 12,5 mm.

Com os valores de carga e penetração, é possível traçar uma curva, onde os valores de carga (kgf) são plotados no eixo das ordenadas e os valores de penetração (mm) no eixo das abscissas. Se a curva apresentar um ponto de inflexão, traça-se uma reta a partir desse ponto, seguindo o comportamento da curva até que ela intercepte o eixo das abscissas. O ponto de interseção será a nova origem, provocando uma translação no sistema de eixos. A partir do gráfico, obtêm-se por interpolação as cargas correspondentes às penetrações de 2,5 mm e 5,0 mm. Como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Curva pressão – penetração



Fonte: BRASIL, 2006

O Índice de Suporte Califórnia (ISC), em percentagem, para cada corpo-de-prova é obtido pela Equação 6:

$$ISC = \frac{\text{Pressão Calculada}}{\text{Pressão Padrão}} \cdot 100 \quad \text{Equação 6}$$

Para o ISC adota-se o maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas.

4. RESULTADOS

O Agregado Reciclado (AR) utilizado neste estudo foi fornecido pela empresa Braskem, já beneficiado por meio de um processo de britagem primária realizado em britador de mandíbulas. O material é proveniente de resíduos da construção civil e foi entregue pronto para uso, sem necessidade de processamento adicional por parte da equipe de pesquisa, na Figura 23 mostra o AR.

Figura 23 – Agregado reciclado utilizado no estudo



Fonte: Autora, 2025

Optou-se por utilizar o AR exatamente como foi recebido, com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica do material fornecido para aplicação em camadas de pavimento, conforme os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 15115:2004. Essa abordagem permite verificar se os agregados reciclados disponibilizados comercialmente atendem às exigências normativas, sem depender de ajustes ou retrabalhos em laboratório.

4.1 Composição do Agregado Reciclado

Conforme estabelecido pela Resolução CONAMA N° 307/2002 (BRASIL, 2002), após a realização do processo de segregação e classificação visual dos resíduos da construção civil, foram identificadas diferentes categorias de materiais recicláveis. Entre os materiais

predominantes, destacam-se os componentes cimentícios (concreto e argamassa), agregados pétreos (brita), materiais cerâmicos (telhas e tijolos), além de revestimentos como pisos e azulejos.

Em contrapartida, também foram constatados resíduos considerados contaminantes, tais como madeira, vidro, plástico, gesso, forros, tubulações, fiações elétricas e papéis, os quais demandam destinação específica em conformidade com as normas ambientais vigentes, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Materiais indesejáveis presente na amostra



Fonte: Autora, 2025

Os resultados das análises indicaram um índice de contaminantes de apenas 1%, significativamente abaixo do limite máximo de 3% prescrito pela norma NBR 15115 (ABNT, 2005). Essa conformidade normativa contribui para a viabilidade técnica da aplicação do agregado reciclado em camadas estruturais de pavimentação.

4.2 Análise Granulométrica

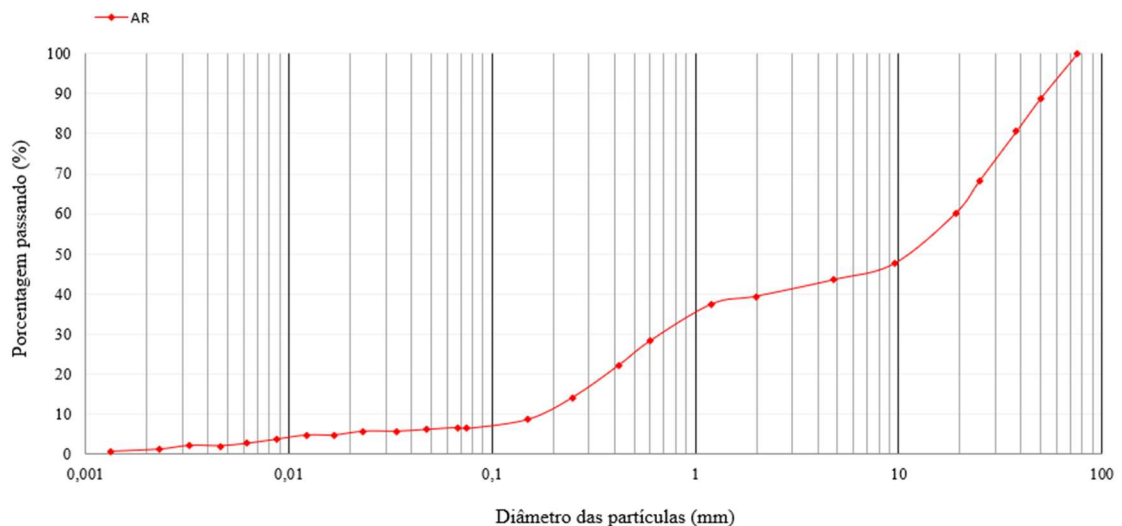
A caracterização granulométrica do material, obtida por meio de ensaios laboratoriais, é tradicionalmente representada graficamente pela curva granulométrica. Nesta representação gráfica, o eixo horizontal (abscissas) apresenta a distribuição das partículas em escala

logarítmica, correspondente às aberturas das peneiras utilizadas, enquanto o eixo vertical (ordenadas) indica as porcentagens acumuladas de material passante em cada fração peneirada.

A interpretação da curva granulométrica permite classificar o material em três categorias principais: uniforme, bem graduado ou mal graduado, conforme estabelecido pelo Manual de Pavimentação (DNIT, 2006). Essa classificação baseia-se na distribuição relativa das frações granulométricas (finas e grossas), avaliada por meio de parâmetros matemáticos que quantificam a dispersão e a inclinação da curva.

A curva granulométrica apresentada na Figura 25 representa a distribuição de partículas da amostra do agregado reciclado, demonstrando a composição dimensional do material analisado.

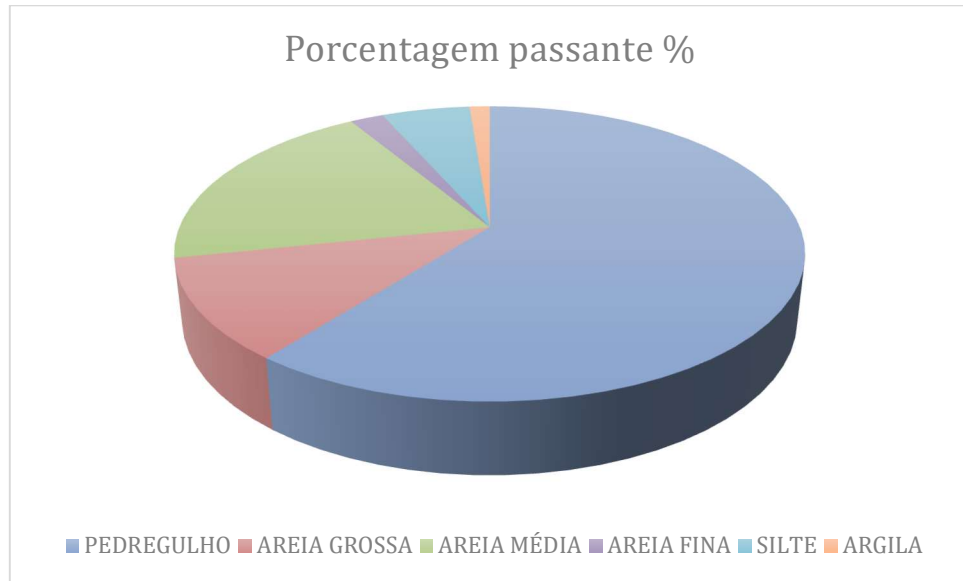
Figura 25 – Curva granulométrica do AR



Fonte: Autora, 2025

A distribuição granulométrica dos AR (Figura 26) revelou uma clara predominância de frações grossas (pedregulhos e areias) sobre as frações finas (siltes e argilas), indicando uma composição predominantemente formada por partículas de maiores dimensões.

Figura 26 – Classificação granulométrica do AR de Maceió



Fonte: Autora, 2025

Os resultados granulométricos obtidos para a amostra AR estão sistematizados na Tabela 4 e Tabela 5, que detalha a distribuição percentual do peneiramento grosso e fino.

Tabela 4 – Resultado Granulometria - Peneiramento Grosso: Amostra AR

Peneira(mm)	Retido Parcial (g)	Mi -Retido acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
50	1116,03	1116,03	88,78
38	815,07	1931,1	80,59
25	1227,7	3158,8	68,25
19	814,2	3973	60,06
9,5	1246,83	5219,83	47,53
4,8	398,07	5617,9	43,53
2	410,01	6027,91	39,41

Fonte: Autora, 2025

Tabela 5 – Resultado Granulometria - Peneiramento Fino: Amostra AR

Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi -Retido acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
1,2	9,84	9,84	37,44
0,6	45,72	55,56	28,32
0,42	30,51	86,07	22,22
0,25	40,12	126,19	14,22
0,15	27,89	154,08	8,65
0,075	11,50	165,58	6,35

Fonte: Autora, 2025

Para a completa caracterização granulométrica do material investigado, foram empregados dois métodos distintos. A distribuição das frações mais finas foi determinada através da análise por sedimentação, cujos resultados são apresentados na Tabela 6. Esta tabela detalha as porcentagens de partículas em diferentes faixas de tamanho, essenciais para compreender o comportamento do material. Complementarmente, a análise granulométrica por peneiramento, cujas porcentagens passantes e retidas em cada peneira são sumarizadas na Tabela 7, oferece uma visão abrangente da distribuição granulométrica do material.

Tabela 6 – Resultado Granulometria por Sedimentação: Amostra AR

Tempo decorrido (min)	Leitura Densimétrica . L	Temperatura (°C)	Correção Temp. Ld	Viscosidade e (10-6gs/cm2)	Diâmetro (mm)	Altura de Queda (cm)	% da Amostra total
0,25							
0,5	1,0070	28,0	1,00355	8,52	0,070	15,7	4,24
1	1,0060	28,0	1,00355	8,52	0,050	16,0	3,01
2	1,0055	28,0	1,00355	8,52	0,034	15,1	2,40
4	1,0055	28,0	1,00355	8,52	0,024	15,1	2,40
8	1,0050	28,0	1,00355	8,52	0,017	15,2	1,78
15	1,0050	28,0	1,00355	8,52	0,013	15,2	1,78
30	1,0045	28,0	1,00355	8,52	0,009	15,3	1,17
60	1,0045	28,0	1,00355	8,52	0,006	15,3	1,17
120	1,0045	28,0	1,00355	8,52	0,004	15,3	1,17
240	1,0045	28,0	1,00355	8,52	0,003	15,3	1,17
480	1,0040	28,0	1,00355	8,52	0,002	15,5	0,55
1440	1,0040	28,0	1,00355	8,52	0,001	15,5	0,55

Fonte: Autora, 2025

Tabela 7 – Resultado Granulometria – Porcentagem Passantes e Retidas: Amostra AR

Diâmetro	ACUMULADO		ABNT		
	% Passando	% Retido			
76	100,00	0,00	PEDREGULHO	60,59%	
50	88,78	11,22			
38	80,59	19,41			
25	68,25	31,75			
19	60,06	39,94			
9,5	47,53	52,47			
4,8	43,53	56,47			
2	39,41	60,59	AREIA GROSSA	32,80%	11,09%
1,2	37,44	62,56			AREIA MÉDIA
0,6	28,32	71,68			
0,42	22,22	77,78			

0,25	14,22	85,78	AREIA FINA		2,04%
0,15	8,65	91,35			
0,075	6,35	93,65			
0,070	6,60	93,40			
0,050	6,15	93,85	SILTE	5,37%	
0,034	5,69	94,31			
0,024	5,69	94,31			
0,017	4,75	95,25			
0,013	4,73	95,27			
0,009	3,72	96,28			
0,006	2,69	97,31			
0,004	2,08	97,92			
0,003	2,14	97,86			
0,002	1,23	98,77			
0,00130	0,64	99,36	ARGILA	1,23%	
0,00100	0,00	100,00			

Fonte: Autora, 2025

4.2.1 Resultados da Análise Granulométrica

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos na análise granulométrica da amostra AR, com base na porcentagem de material passante e retido em cada peneira, bem como a classificação das frações segundo os critérios estabelecidos pela ABNT.

Observa-se que a maior parte da amostra está concentrada nas frações de areia, com destaque para a areia média, que representa 19,67% do total, seguida da areia fina com 2,04% e da areia grosseira com 11,09%. As frações de silte e argila correspondem a 5,37% e 1,23%, respectivamente, indicando uma baixa presença de partículas finas na composição do material. O pedregulho aparece com 60,59%, configurando-se como a maior fração presente.

Com base nos dados obtidos da análise granulométrica, foram determinados os coeficientes de uniformidade (Cu) e de curvatura (Cc) da amostra AR. Os valores estimados foram $Cu = 26,67$ e $Cc = 0,167$, calculados a partir dos diâmetros correspondentes a 10% ($D_{10} \approx 0,18$ mm), 30% ($D_{30} \approx 0,38$ mm) e 60% ($D_{60} \approx 4,8$ mm) de material passante.

De acordo com os critérios da classificação unificada dos solos (USCS), um material granular é considerado bem graduado quando apresenta $Cu > 4$ (para areias) e Cc entre 1 e 3. Embora o valor de Cu obtido esteja bastante elevado, indicando uma ampla faixa de tamanhos de partículas, o valor de Cc ficou significativamente abaixo do intervalo recomendado. Isso evidencia uma distribuição desequilibrada entre as frações, caracterizando o material como mal graduado.

Essa má graduação pode comprometer a compactação e o desempenho mecânico do agregado reciclado, especialmente se utilizado em camadas de pavimento que exigem bom encaixe entre as partículas. Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com os achados de Teixeira (2025).

4.3 Massa Específica dos Grãos

O material foi então seco em estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante, determinando-se a massa seca (M_s) que permitiu o cálculo da massa específica real e da absorção de água. A capacidade de absorção do pedregulho, parâmetro crítico para aplicação em pavimentação, foi obtida pela relação percentual entre a massa de água absorvida e a massa seca do agregado. A Tabela 8, mostra os resultados obtidos na pesagem.

Tabela 8 – Massa específica retida na #4,8 mm das amostras de AR.

Parâmetro	Massa (g)
Saturada (M_{sat})	7201,3
Submersa (M_i)	3938,4
Seca (M_s)	5565

Fonte: Autora, 2025

Os valores médios obtidos em três determinações indicaram uma massa específica aparente seca de $1,70 \text{ g/cm}^3$, massa específica real de $3,41 \text{ g/cm}^3$ e absorção de água de 29,40%. De acordo com a ABNT NBR 15115:2004, tais parâmetros devem ser analisados à luz da elevada porosidade e heterogeneidade inerente aos agregados reciclados. A massa específica aparente seca, embora inferior aos valores típicos dos agregados naturais (geralmente entre 2,0 e $2,3 \text{ g/cm}^3$ para aparente seca), é condizente com a natureza leve e porosa do material.

A massa específica real mostrou-se elevada, indicando presença de frações densas como cimento hidratado e minerais cerâmicos. A alta absorção de água (29,40%), ainda que superior aos limites usuais para agregados convencionais, pode ser considerada aceitável para camadas de reforço de subleito, desde que associada a controle rigoroso da umidade na compactação. Ressalta-se que, conforme a NBR 15115:2004, agregados com elevada absorção devem ser usados preferencialmente em camadas não estruturais ou com dosagem técnica compensatória.

Adicionalmente, foi realizada a determinação da massa específica da fração fina do agregado reciclado, ou seja, da porção passante na peneira de 4,8 mm, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 6458:2016. O ensaio foi conduzido por meio de

picnômetro, sob temperatura controlada de 28,7 °C, resultando em uma massa específica média de 2,659 g/cm³.

A Tabela 9 apresenta os dados obtidos no ensaio de determinação da massa específica da fração fina, incluindo os valores utilizados para o cálculo conforme previsto na norma técnica.

Tabela 9 – Massa específica dos passantes na #4,8 mm das amostras de AR

Parâmetro	Valor (g ou °C)
Pa (picnômetro + água)	630,05
Pas (picnômetro + solo + água)	660,84
Pb (cápsula + solo seco)	550,50
Pc (cápsula)	501,21
Ps (massa do solo)	49,29

Fonte: Autora, 2025

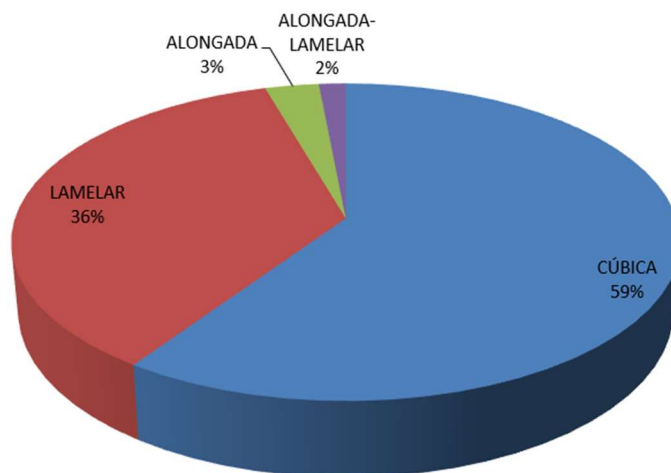
Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com os achados de Teixeira (2025).

4.4 Forma das Partículas e Índice de Forma

Os resultados obtidos no ensaio de determinação do índice de forma, realizado conforme a NBR 7809 (ABNT, 2019), revelam características importantes da amostra do AR quanto à sua forma e dimensionalidade. O índice de forma, calculado pela relação entre o comprimento médio e a espessura média das partículas, apresentou um valor de **2,76**, indicando que o material está dentro do limite estabelecido pela norma para agregados destinados a pavimentação. Conforme essa norma, um índice de forma inferior a 3 é considerado aceitável, enquanto valores superiores podem comprometer a trabalhabilidade e a resistência mecânica do concreto ou do subleito pavimentado.

Contudo, uma análise mais detalhada da distribuição das formas individuais das partículas, também realizada conforme a NBR 7809 (ABNT, 2019) nas frações retidas nas peneiras de 37,5 mm, 25 mm, 19 mm e 12,5 mm, fornece informações complementares essenciais. As partículas foram classificadas como cúbicas, alongadas ou laminares, e os resultados percentuais dessa classificação são apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Forma das partículas do AR



Fonte: Autora, 2025

A análise da Figura 27 evidencia que, embora a maior parte das partículas possua formato cúbico (59,5%), considerado ideal para um bom intertravamento, existe uma proporção significativa de partículas lamelares 36,0%, onde ultrapassa o limite máximo de 30% estabelecido pela NBR 15115:2004. A presença elevada de partículas laminares é um fator desfavorável em pavimentação, pois estes grãos são mais suscetíveis à quebra durante os processos de espalhamento, compactação e sob a ação do tráfego. Além disso, partículas laminares tendem a se orientar horizontalmente, o que pode dificultar a obtenção de uma estrutura granular densa e estável, potencialmente reduzindo a capacidade de suporte da camada exigindo maior controle sobre a composição do AR ou ajustes granulométricos para melhorar o desempenho mecânico da mistura.

Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com os achados de Teixeira (2025).

4.5 Limite de Atterberg

Com o objetivo de caracterizar o comportamento físico do Agregado Reciclado (AR) em sua forma pura (100% AR), foram conduzidos ensaios para a determinação dos Limites de Atterberg, seguindo os procedimentos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 6459:2016 (Solo - Determinação do limite de liquidez) e ABNT NBR 7180:2016 (Solo - Determinação do limite de plasticidade).

Conforme o esperado para um material de natureza predominantemente granular e com reduzida ou inexistente fração de finos argilosos coesivos, o AR analisado apresentou comportamento Não Plástico (NP). A determinação do Limite de Plasticidade (LP) não foi

viabilizada, uma vez que não foi possível moldar os cilindros com 3 mm de diâmetro, conforme especificado pela NBR 7180:2016, sem que ocorresse ruptura prematura, evidenciando a ausência de plasticidade no material, como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Resultado do ensaio de Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez



Fonte: Autora, 2025

No ensaio para determinação do Limite de Liquidez (LL), empregando-se o aparelho de Casagrande em conformidade com a NBR 6459:2016, foi observado um comportamento atípico, condizente com a natureza não plástica do AR. Mesmo sob teores de umidade relativamente baixos, a ranhura padronizada na amostra apresentou fechamento com um número significativamente reduzido de golpes – especificamente, 3 (três) golpes –, valor consideravelmente inferior à faixa convencional de 15 a 35 golpes utilizada para a interpolação do LL em solos coesivos. Esse fenômeno demonstra a ausência de coesão necessária para que o material exiba um comportamento de fluxo controlado sob os impactos do ensaio, ratificando a classificação do AR puro como Não Plástico (NP).

A não plasticidade do AR constitui uma característica relevante para sua aplicação em camadas de pavimentação, em especial no reforço do subleito. Materiais não plásticos apresentam menor suscetibilidade a variações de umidade, conferindo maior estabilidade volumétrica e resistência mecânica – propriedades essenciais para o desempenho adequado de camadas estruturais de pavimentos.

4.6 Índice de Grupo (IG) e Classificação AASHTO

Com base nos ensaios de caracterização realizados, foi possível determinar o Índice de Grupo (IG) do agregado reciclado (AR) e, com isso, realizar sua classificação segundo o sistema HRB-AASHTO.

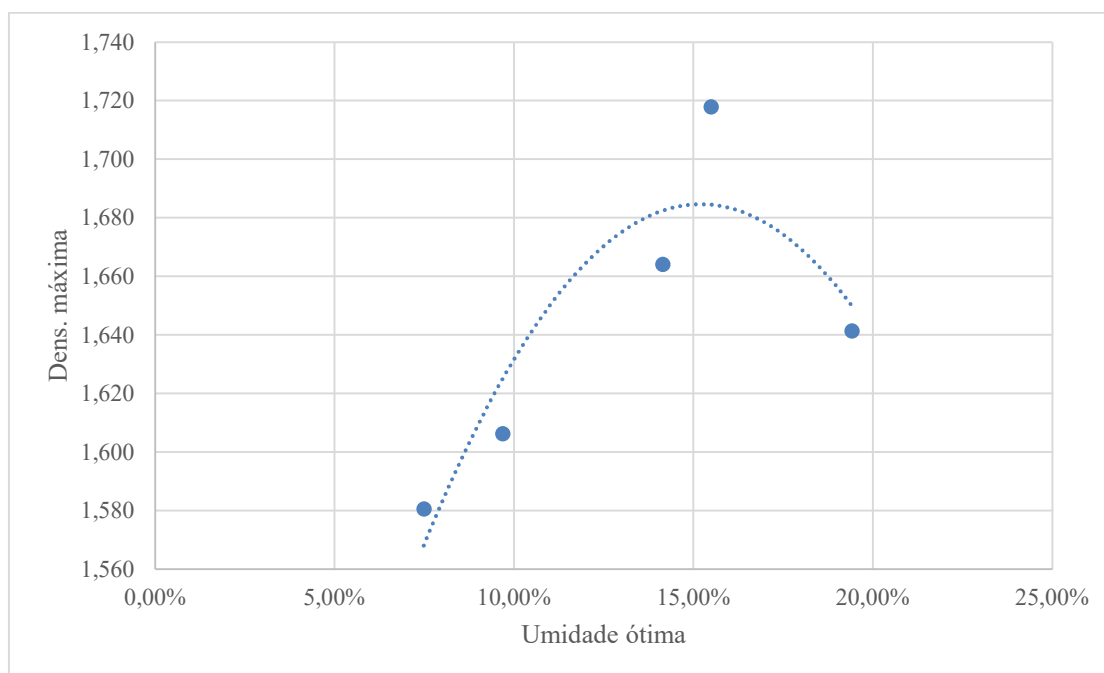
A amostra do AR enquadrrou-se no grupo A-2-4, o que indica um solo de natureza granular, com presença moderada de finos, especialmente silte e argila. O valor do IG obtido foi igual a zero, evidenciando um material com excelente aptidão para uso em camadas de pavimentos, principalmente base e sub-base. Essa classificação está em consonância com os dados da análise granulométrica, que apontaram predominância de partículas de granulometria mais grossa, como areias e fragmentos graúdos.

Tais características são compatíveis com materiais que apresentam bom desempenho mecânico, favorecendo a resistência e a capacidade de drenagem — fatores fundamentais para a durabilidade das estruturas de pavimentação.

4.7 Ensaio de Compactação Proctor Normal

A Figura 29 apresenta a curva gerada a partir dos resultados obtidos no ensaio de compactação, evidenciando a relação entre o teor de umidade e a densidade máxima.

Figura 29 – Curva de compactação Agregado Reciclado



Fonte: Autora, 2025

Com base nos resultados obtidos no ensaio de compactação com energia normal, verificou-se que o agregado reciclado apresentou densidade máxima de 1,685 g/cm³, com uma umidade ótima em torno de 15,2%. O comportamento da curva de compactação é condizente com materiais reciclados, sendo considerado normal, uma vez que o agregado já havia passado

por um processo de britagem realizado pela Braskem. Esses valores indicam um bom potencial de compactação do material, favorecendo sua aplicação em camadas de reforço de subleito. Embora neste estudo tenha sido adotado o procedimento padrão com cinco pontos no ensaio de compactação, os resultados obtidos estão alinhados com os de Teixeira (2025), que realizou o ensaio de abrasão Los Angeles (NBR NM 51:2001) e empregou seis pontos no ensaio de compactação, observando comportamento semelhante em agregados reciclados britados.

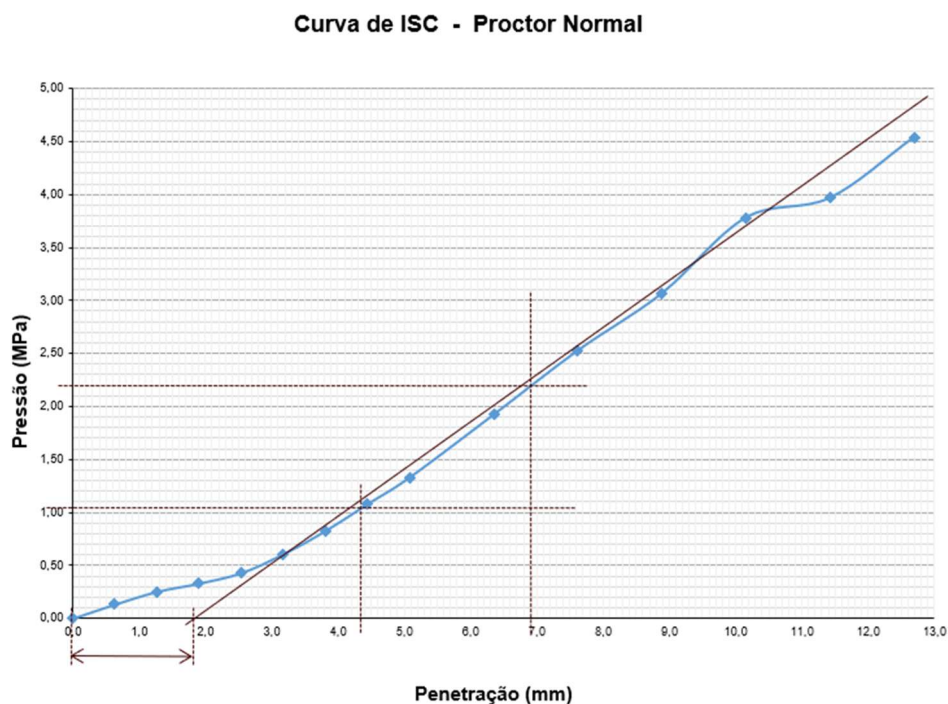
4.8 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O valor do Índice de Suporte Califórnia (ISC) obtido para o agregado reciclado foi de 16,04%, atendendo ao critério mínimo estabelecido pela NBR 15115 (2004), que exige $ISC \geq 12\%$ para aplicação em camadas de reforço de subleito destinadas a vias com tráfego leve. Este resultado indica que o material possui resistência mecânica compatível com o uso proposto.

Quanto ao ensaio de expansão, o agregado reciclado não apresentou variação de volume significativa após quatro dias de imersão em água, demonstrando boa estabilidade volumétrica frente à ação da umidade.

A Figura 30 apresenta o gráfico ajustado a partir dos dados obtidos no ensaio, evidenciando o ponto de inflexão que resultou no valor final do ISC utilizado para análise.

Figura 30 – Curva de ISC do agregado reciclado



Fonte: Autora, 2025

A Tabela 10 apresenta os dados obtidos no ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), realizado com a amostra de agregado reciclado (AR) compactada sob energia Proctor Normal. Durante o ensaio, foram registradas as leituras de penetração, carga e pressão, possibilitando a construção da curva pressão versus penetração.

Tabela 10 – Resultado da Determinação do ISC do AR

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA										
Constante do anel	2,1588	kgf/mm ^{x10-3}	constante de pressão CBR	0,110	Ø do pistão (cm)	5,00	Área pistão (cm²)	19,63	Ajuste	ISC
Tempo (min)	Penetração (mm)		Leitura (div. Do extensômetro)	Carga (kgf)		Pressão (Mpa)		ISC-CBR	1,8	
0,0	0,00		0,00	0,00		0,00				
0,5	0,63		12,00	25,91		0,13				
1,0	1,27		23,00	49,65		0,25				
1,5	1,90		30,00	64,76		0,33				
2,0	2,54		39,00	84,19		0,43		15,22%	4,34	8,99%
2,5	3,17		55,00	118,73		0,60				
3,0	3,81		75,00	161,91		0,82				
3,5	4,44		98,00	211,56		1,08				
4,0	5,08		121,00	261,21		1,33		21,26%	6,88	16,04%
5,0	6,35		175,00	377,79		1,92				
6,0	7,62		230,00	496,52		2,53				
7,0	8,89		279,00	602,31		3,07				
8,0	10,16		344,00	742,63		3,78				
9,0	11,43		361,00	779,33		3,97				
10,0	12,70		413,00	891,58		4,54				

Fonte: Autora, 2025

Durante a análise gráfica da Figura 30, observou-se um deslocamento do eixo de penetração, indicando que o ponto de origem (zero) não coincidia com o início efetivo da curva. Esse desvio pode ocorrer devido a pequenas folgas no equipamento ou movimentação inicial do pistão sem resistência significativa do solo. Para corrigir esse efeito, foi traçado o prolongamento do trecho retilíneo da curva inicial, estabelecendo-se um novo ponto de origem no valor de 1,8 mm de penetração, que passou a ser adotado como o "novo zero".

Com a aplicação desse ajuste gráfico, o valor do ISC foi recalculado, resultando em uma correção do índice para 16,04%. Esse valor representa a resistência do material frente à penetração padronizada e confirma sua viabilidade técnica para aplicação em camadas de reforço de subleito, especialmente em vias com baixo a médio volume de tráfego.

4.9 Cálculo do volume de AR por Quilômetro de Rua Urbana

Com o objetivo de estimar o volume de agregado reciclado (AR) necessário para a execução da camada de reforço de subleito em vias urbanas, foi considerada uma rua padrão composta por duas faixas de tráfego, cada uma com 3,50 metros de largura, totalizando 7 metros de largura. A espessura da camada adotada foi de 15 cm (0,15 m) e o comprimento de referência, 1 metro. O cálculo do volume foi realizado utilizando a fórmula:

$$V = largura * espessura * comprimento \quad \text{Equação 7}$$

Com base nesses parâmetros, obteve-se um volume de 1,05 m³ por metro linear de via. Assim, para cada quilômetro (1.000 metros) de rua urbana, seriam necessários 1.050 m³ de agregado reciclado, substituindo integralmente o uso de materiais naturais nesta camada. Essa substituição representa uma solução tecnicamente viável e ambientalmente favorável para o reaproveitamento de resíduos da construção civil em obras de infraestrutura urbana.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Diante da crescente demanda por práticas sustentáveis na construção civil, o presente trabalho avaliou a viabilidade técnica do uso exclusivo de Agregado Reciclado (AR) na composição de camadas de reforço de subleito em pavimentação urbana. Os resultados laboratoriais indicaram um Índice de Suporte Califórnia (ISC) de 16%, superior ao mínimo exigido pela NBR 15115 para subleitos em vias de tráfego leve, além de boa estabilidade volumétrica e ausência de plasticidade, favorecendo o desempenho do material. Apesar da classificação como material mal graduado e da presença de partículas lamelares — fatores que podem limitar a eficiência da compactação —, o comportamento geral do AR foi satisfatório.

Conclui-se que, do ponto de vista técnico, os agregados reciclados demonstram potencial para uso em reforço de subleito. No entanto, observa-se que no contexto específico de Maceió, onde o subleito natural geralmente apresenta boas condições de suporte, essa aplicação não se mostra necessária. Além disso, as regiões que poderiam se beneficiar de reforço de subleito estão situadas a grandes distâncias das fontes de RCD avaliadas, o que eleva significativamente os custos logísticos e pode inviabilizar economicamente a utilização do material.

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a realização de ensaios em escala real, com trechos experimentais em campo, para avaliar o desempenho do AR sob diferentes condições de tráfego e clima. Sugere-se ainda a investigação do uso do AR em outras camadas do pavimento, como a base, onde as exigências mecânicas são maiores, bem como a combinação com solos regionais visando melhorias de graduação e desempenho. Por fim, estudos ambientais de longa duração são importantes para monitorar a possível liberação de substâncias como o alumínio, garantindo que o uso do material não ofereça riscos ambientais.

Essas recomendações visam não apenas validar os resultados obtidos em laboratório, mas também fortalecer o uso do AR como uma solução eficaz, sustentável e segura na infraestrutura urbana.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Solos - Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2024.

_____. **NBR 6458**: Solo - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6954**: Lastro-padrão - Determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016

_____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 7182**: Solo- Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC). Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos- Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos de construção civil- Execução de camadas de pavimentação- Procedimentos- Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15116**: Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil- Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos - Rio de Janeiro, 2004.

BAGATINI, Felipe. Resíduos de construção civil: aproveitamento como base e sub-base na pavimentação de vias urbanas. 2011.

BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. PETROBRAS, ABEDA. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n. 307 de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002.

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

BRASILEIRO, Luzana Leite; MATOS, José Milton Elias de. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178-189, 2015.

BURGOS, Luciano Reis. A IMPORTÂNCIA DO TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL. Revista O Universo Observável-v, v. 1, n. 4, p. 2, 2024.

COUTO, Whendel Cezar Silva de. Integração de técnicas de geoprocessamento aplicadas à definição de áreas potenciais para expansão urbana em Maceió – AL. 2024. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

FERNANDES, C. da G. Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em pavimentação dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

HEAD, K. H. Manual of soil laboratory testing: permeability, shear strength and compressibility tests. 2. ed. New York: Wiley, 1994. 440 p. ISBN: 9780470233627.

HORTEGAL, M. V.; FERREIRA, T. C.; SANT'ANA, W. C.. Utilização de agregados resíduos sólidos da construção civil para pavimentação em São Luís – MA. Pesquisa em Foco, v.17, n.2, p.60-74, 2009.

MARTINS, Leonardo Alves et al. Estimativa da geração de resíduos da construção civil no município de Poço das Trincheiras–AL. 2023.

MOTTA, Rosângela dos Santos. Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PEREIRA, Ana Beatriz Mascarenhas et al. A RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL. 2024.

Pesquisa CNT de rodovias 2023. – Brasília : CNT : SEST SENAT : ITL, 2023.

RIBEIRO, Angélica Kelly dos Santos Pimentel et al. Quantificação e Classificação dos Resíduos procedentes da construção civil no município de Maceió–AL. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 10, n. 1, p. 363-384, 2021.

Teixeira, Francisco Aureliano Rocha de Vasconcelos. Caracterização dos resíduos de demolições em bairros de Maceió/AL para reaproveitamento como agregado em camadas do pavimento urbano / Francisco Aureliano Rocha de Vasconcelos Teixeira. – 2025.

WITIUK, Rafael Lopes; GUIMARÃES, Antônio Carlos Rodrigues. ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS DE GRANULOMETRIA TRANSICIONAL. GEOTECNIA, p. 204.