



Serviço Público Federal

Ministério da Educação

**Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul**

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia - FAENG



**GUSTAVO RIOS MILHORIM**

**USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO  
EM PAVIMENTOS DE FLUXO SUAVE PARA VEÍCULOS  
ELÉTRICOS SUPERLEVES**

**Campo Grande – MS**

**2023**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO  
E GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS



## **USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM PAVIMENTOS DE FLUXO SUAVE PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS SUPERLEVES**

**GUSTAVO RIOS MILHORIM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul como requisito parcial à obtenção de título de mestre em Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Meira de Vasconcelos

**Campo Grande – MS**

**2023**

GUSTAVO RIOS MILHORIM

USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM PAVIMENTOS  
DE FLUXO SUAVE PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS SUPERLEVES

Prof. Dr. Jamil Alexandre Ayach Anache

Coordenador de Curso

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Alexandre Meira de Vasconcelos

Orientador

Prof. Dr. Daniel Anijar de Matos

Coorientador

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eliane Guaraldo

PGRN

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Paula da Silva Milani

UFMS

## DEDICATÓRIA

*A Deus, pelo dom da vida.  
À minha esposa Mariana e meu filho Davi  
pelo amor, compreensão e apoio  
incondicionais.  
Aos meus pais e familiares que sempre  
apoiaram a busca incessante pelo  
conhecimento.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Dr. Alexandre Meira de Vasconcelos pelos ensinamentos, incentivos e apoio durante todo o período do mestrado.

Ao PGRN, Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo (FAENG) da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Ao Professor Dr. Daniel Anijar de Matos pela disposição e contribuição técnica no desenvolvimento da metodologia e execução dos ensaios, bem como a toda a equipe do LATRAN – Laboratório de Transportes da UFMS.

À colega Natalia Rissay por todo apoio na realização da pesquisa e dos ensaios laboratoriais.

Ao CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil, pelo acesso ao Portal de Periódicos, fundamental para a pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS/MEC – Brasil.

## RESUMO

O desenvolvimento de novos objetivos para as cidades e sistemas de transportes sustentáveis passam por um longo caminho de múltiplas variáveis, como a mudança da tendência da matriz energética dos meios de transportes, a preocupação com os congestionamentos nos grandes centros urbanos, a disponibilidade de materiais e energia para a implementação da infraestrutura. A micromobilidade urbana é um meio bastante promissor com alto potencial transformador, através da redução de congestionamentos e baixa emissão de carbono. Por se tratar de veículos leves e superleves, vislumbra-se a necessidade de adequação da infraestrutura de vias, uma vez que as cargas capazes de deformar os pavimentos tendem a ser menores. O estudo buscou verificar a possibilidade de utilização de resíduos da construção e demolição gerados no município de Campo Grande MS, em pavimentos a serem utilizados por veículos leves, tendo como premissa técnica o alcance de parâmetros mínimos determinados nas normativas do DNIT e da ABNT. De forma geral, a utilização de agregados reciclados de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) na pavimentação demonstrou ser viável do ponto de vista técnico, contribuindo para a promoção da sustentabilidade global, apesar das limitações que esses materiais possam apresentar, mas que são perfeitamente superáveis por meio de implementação de processos de controle de qualidade em seu beneficiamento.

Palavras-chave: Micromobilidade, pavimentos, resíduos de construção e demolição, veículos superleves.

## **ABSTRACT**

The development of new goals for cities and sustainable transportation systems involves a long journey of multiple variables, such as the shift in the energy matrix trend of transportation means, concern about congestion in large urban centers, and the availability of materials and energy for infrastructure implementation. Urban micromobility is a very promising means with high transformative potential, through congestion reduction and low carbon emissions. Given that these are lightweight and super lightweight vehicles, there is a need to adapt road infrastructure, as the loads capable of deforming pavements tend to be smaller. The study aimed to verify the possibility of using construction and demolition waste generated in the municipality of Campo Grande MS in pavements to be used by lightweight vehicles, with the technical premise of achieving minimum parameters determined by DNIT and ABNT regulations. In general, the use of recycled aggregates from Construction and Demolition Waste (CDW) in pavement has proven to be technically feasible, contributing to the promotion of global sustainability, despite any limitations these materials may have, which can be easily overcome through the implementation of quality control processes in their processing.

**Keywords:** Micromobility, pavements, construction and demolition waste, super lightweight vehicles.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	16
OBJETIVO GERAL .....	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
1. REFERENCIAL TEÓRICO .....	19
1.1 SELEÇÃO DE PORTFÓLIO E ESTUDO CIENCIOMÉTRICO.....	19
1.2 ANÁLISE DE CONTEÚDO DO REFERENCIAL TEÓRICO.....	25
1.2.1 CLASSIFICAÇÃO HIERÁRQUICA DESCENDENTE .....	28
1.2.1.1 PAVIMENTO.....	30
1.2.1.3 MOBILIDADE/ INFRAESTRUTURA .....	30
1.2.1.3 MOBILIDADE/ SERVIÇO.....	31
1.2.1.4 MOBILIDADE/ OPERAÇÃO .....	32
1.2.1.5 MOBILIDADE/ SUSTENTABILIDADE .....	32
1.2.2 ANÁLISE FATORIAL DE CORRESPONDÊNCIA.....	33
1.2.3 ANÁLISE DE SIMILITUDE.....	34
1.3 VEÍCULOS LEVES ELETRIFICADOS.....	35
1.4 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO .....	36
1.5 LEGISLAÇÃO E NORMAS .....	38
1.6 RECICLAGEM DE RCD .....	41
1.7 APLICAÇÃO DE RCD RECICLADO NA PAVIMENTAÇÃO .....	41
2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	44
2.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	44
2.1.1 MATERIAIS .....	45
2.1.1.1 AGREGADO NATURAL (AN).....	45
2.1.1.2 AGREGADO RECICLADO MISTO (ARM).....	46
2.1.1.3 SOLO.....	47
2.1.1.4 COLETA, PREPARAÇÃO E REDUÇÃO DAS AMOSTRAS .....	48
2.2 CAMADA DE BASE .....	49
2.2.1 CRONOGRAMA EXPERIMENTAL.....	50
2.2.2 ENSAIOS.....	52
2.2.2.1 NATUREZA DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DOS ARM.....	52
2.2.2.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO MECÂNICO .....	52

2.2.2.3 COMPOSIÇÃO DAS DOSAGENS DE SOLO-AGREGADO.....	53
2.2.2.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS MISTURAS .....	55
2.2.2.4.1 LIMITES DE ATTERBERG .....	55
2.2.2.4.2 EQUIVALENTE DE AREIA (EA).....	58
2.2.2.4.3 ABRASÃO LOS ANGELES .....	59
2.2.2.5 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS .....	60
2.2.2.5.1 COMPACTAÇÃO, ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC) E EXPANSÃO .....	60
2.3 CAMADA DE ROLAMENTO.....	62
2.3.1 CRONOGRAMA EXPERIMENTAL.....	63
2.3.2 ENSAIOS.....	66
2.3.2.1 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS .....	66
2.3.2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS MISTURAS .....	67
2.3.2.2.1 EQUIVALENTE DE AREIA.....	67
2.3.2.2.2 ABRASÃO LOS ANGELES .....	68
2.3.2.2.3 ÍNDICE DE FORMA (IF) .....	68
2.3.2.2.4 DURABILIDADE .....	70
2.3.2.2.5 ADESIVIDADE.....	70
2.3.2.3 PROPRIEDADES DO LIGANTE ASFÁLTICO – CAP 50/70.....	71
2.3.2.3.1 VISCOSIDADE ROTACIONAL .....	72
2.3.2.4 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	73
2.3.2.4.1 DOSAGEM MARSHALL .....	74
2.3.2.4.1.1 PREPARAÇÃO E COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	75
2.3.2.4.1.2 MÉTODO RICE – DENSIDADE RELATIVA MÁXIMA ( $G_{mm}$ ) .....	76
2.3.2.4.1.3 AFERIÇÃO DAS MASSAS E DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA .....	77
2.3.2.4.1.4 DENSIDADE RELATIVA APARENTE DO CORPO DE PROVA ( $G_{mb}$ ) .....	77
2.3.2.4.1.5 DENSIDADE RELATIVA APARENTE MÉDIA (G).....	78
2.3.2.4.1.6 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS.....	79
2.3.2.4.1.7 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA .....	82
2.3.2.4.1.8. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PROJETO .....	83

2.3.2.4.1.9 VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA TEOR DE PROJETO .....	84
3. RESULTADOS .....	85
3.1 CAMADA DE BASE .....	85
3.2 CAMADA DE ROLAMENTO .....	102
CONCLUSÕES .....	127
REFERÊNCIAS .....	130

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma para seleção de Portfólio Bibliográfico da pesquisa.....	20
Figura 2 - Produção de Artigos por ano .....	20
Figura 3 - Visualização da rede de palavras-chave.....	23
Figura 4 - Nuvem de palavras .....	26
Figura 5 -Classificação Hierárquica Descendente.....	29
Figura 6 - Análise Fatorial de Correspondência (AFC).....	34
Figura 7 - Análise de Similitude.....	35
Figura 8 - Ecopontos da Capital de locais de entrega voluntária .....	39
Figura 9 - Camadas de Pavimento Tipo.....	42
Figura 10 - Disposição dos agregados naturais (NA).....	46
Figura 11 – Disposição dos agregados reciclados mistos (ARM) .....	47
Figura 12 – Coleta do aterro natural (ATN) .....	48
Figura 13 - Fluxograma experimental da camada de base .....	50
Figura 14 - Fluxograma experimental da camada de rolamento .....	64
Figura 15 - Determinação do teor de projeto em função do volume de vazios (VV) e da relação betume/vazios (RBV).....	84
Figura 16 - Composição das amostras ARM.....	86
Figura 17 - Materiais indesejados encontrados na composição dos ARM.....	87
Figura 18 - Curva granulométrica.....	89
Figura 19 - Curva granulométrica.....	89
Figura 20 - Curva granulométrica.....	89
Figura 21 - Curva granulométrica.....	89
Figura 22 - Curva granulométrica.....	89
Figura 23 - Dosagem 1.....	91
Figura 24 - Dosagem 2.....	91
Figura 26 – Dosagem 4.....	91
Figura 25 – Dosagem 3.....	91
Figura 27 - Dosagem 5.....	92
Figura 28 - Valores de abrasão Los Angeles associado a porcentagem de material natural e reciclado por dosagem .....	96
Figura 29 - Curvas de compactação das dosagens solo-agregado .....	97

Figura 30 - Resultado do ensaio de compactação associado a percentagem de material natural e reciclado por dosagem – Umidade ótima .....	98
Figura 31 - Resultado do ensaio de compactação associado a percentagem de material natural e reciclado por dosagem – Massa específica aparente máxima .....	98
Figura 33 - Mistura 2 .....	102
Figura 32 – Mistura 1 .....	102
Figura 35 - Mistura 4 .....	103
Figura 34 - Mistura 3 .....	103
Figura 36 - Mistura 5 .....	103
Figura 37 - Resultado dos ensaios de equivalente de areia (EA) e abrasão Los Angeles associado a percentagem de material natural e reciclado, por mistura .....	106
Figura 38 - Resultados do ensaio de índice de forma (IF) .....	107
Figura 39 - Resultados dos ensaios de durabilidade.....	108
Figura 40 - Curva da variação da viscosidade em função da temperatura ....	111
Figura 41 - Representação gráfica dos valores médios das densidades relativas dos corpos de prova (Gmb) em função das percentagens de ligante asfáltico adotadas .....	116
Figura 42 - Representação gráfica do volume de vazios (VV) em função das percentagens de ligante asfáltico adotadas .....	117
Figura 43 - Representação gráfica da relação betume/vazios (RBV) em função das percentagens de ligante asfáltico adotadas.....	119
Figura 44 - Representação gráfica da estabilidade em função das percentagens de ligante asfáltico adotadas.....	120
Figura 46 - Teor ótimo Mistura .....	122
Figura 45 - Teor ótimo Mistura 1 .....	122
Figura 47 - Teor ótimo Mistura 3 .....	122
Figura 48 - Teor ótimo Mistura 4 .....	122
Figura 49 - Teor ótimo Mistura 5 .....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Pesquisas por países .....	21
Tabela 2 - Afiliação.....	22
Tabela 3 - Áreas de Interesse .....	22
Tabela 4 - Palavras-chave.....	23
Tabela 5 - Artigos mais citados .....	24
Tabela 6 - Coleta de RCD .....	37
Tabela 7 - Classificação dos Resíduos .....	38
Tabela 8 - Normas ABNT referentes aos RCDs.....	40
Tabela 9 - Etapas experimentais da camada de base .....	51
Tabela 10 - Conjunto de peneiras para análise granulométrica dos agregados .....	53
Tabela 11 - Composição granulométrica da faixa D.....	54
Tabela 12 - Proporção de material por dosagem .....	55
Tabela 13 - Graduação para o ensaio de abrasão Los Angeles .....	60
Tabela 14 - Etapas experimentais da camada de rolamento .....	65
Tabela 15 - Composição granulométrica da faixa C.....	66
Tabela 16 – Proporção de agregado por mistura .....	67
Tabela 17 - Especificações do ensaio de índice de forma (IF) com crivos.....	69
Tabela 18 - Certificado de Qualidade do CAP 50/70.....	72
Tabela 19 - Teores de ligante betuminoso por mistura .....	75
Tabela 20 - Critérios de aceitabilidade para misturas asfálticas usinadas a quente .....	85
Tabela 21 - Especificações para os vazios do agregado mineral.....	85
Tabela 22 - Porcentagens em massa de cada grupo.....	86
Tabela 23 - Percentual de material passante e tolerâncias por peneira das dosagens solo-agregado.....	93
Tabela 24 - Limites de Atterberg e índice de plasticidade de cada dosagem ..	94
Tabela 25 - Resultados do ensaio de ISC e expansão das dosagens solo-agregado.....	100
Tabela 26 - Análise de conformidade dos resultados das dosagens solo-agregado para aplicação em camadas de base.....	101

Tabela 27 - Percentual de material passante e tolerâncias por peneira das misturas.....	104
Tabela 28 - Resultados dos ensaios de adesividade .....	110
Tabela 29 - Resultados do ensaio de viscosidade .....	111
Tabela 30 - Temperaturas de mistura, compactação e do agregado .....	112
Tabela 31 - Resultados dos ensaios de densidade relativa máxima (Gmm) para cada teor de ligante adotado.....	113
Tabela 32 - Resultado dos ensaios de densidade relativa aparente do agregado, miúdo e graúdo, e determinação da densidade relativa aparente média (G). 113	
Tabela 33 - Resultados das dosagens Marshall.....	115
Tabela 34 - Teores centrais e teor de projeto.....	123
Tabela 35 - Verificação dos parâmetros para o teor de projeto.....	125
Tabela 36 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) .....	126
Tabela 37 - Análise de conformidade dos resultados das dosagens Marshall para aplicação em camadas de rolamento.....	126

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AFC	Análise Fatorial de Correspondência
AR	Agregado Reciclado
ARCI	Agregado Reciclado de Alvenaria e Cimentícios
ARCO	Agregado Reciclado de Concreto
ARM	Agregado Reciclado Misto
ATN	Aterro Natural
ATR	Aterro Reciclado
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CHD	Classificação Hierárquica Descendente
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EA	Equivalente de Areia
ES	Especificação de Serviço
G	Densidade relativa aparente média
Gmb	Densidade relativa
Gmm	Densidade relativa máxima
Gsb	Densidade aparente do Agregado
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IF	Índice de Forma
IoT	Internet das coisas
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LATRAN	Laboratório de Transportes
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
ME	Método de Ensaio
NA	Agregado Natural

NBR	Norma Brasileira
NP	Não Plástico
PIB	Produto Interno Bruto
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
RBV	Relação Betume Vazios
RCD	Resíduos da construção e demolição
RT	Resistência à Tração
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UFMS	Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
VAM	Vazios do agregado mineral
VV	Volume de Vazios

## INTRODUÇÃO

O progresso e o contínuo crescimento das cidades vêm causando um considerável aumento de congestionamentos, boa parte devido à cultura de transporte individual, cujo conceito traz a sensação de liberdade e flexibilidade ao indivíduo (SOPJANI; STIER; HESSELGREN; RITZÉN, 2020). Isso implica uma necessidade real de meios de transporte sustentáveis para tornar as cidades lugares melhores para se viver. Na verdade, os veículos pessoais elétricos já estão substituindo carros e motos em cenários urbanos, o que tem um impacto positivo na pegada de carbono da mobilidade urbana e, conseqüentemente, na saúde dos habitantes das cidades (SANCHEZ-IBORRA; BERNAL-ESCOBEDO; SANTA, 2020). Muitos esforços têm sido investidos na melhoria da qualidade de vida nas cidades, cuja principal motivação surge de um número crescente de população que hoje as habita. As Nações Unidas relatam que 54% da população mundial vive em áreas urbanas, uma proporção que deverá aumentar para 66% até 2050 (ŠEMANJSKI; MANDŽUKA; GAUTAMA, 2018).

Estudos recentes analisaram os diversos fatores que influenciam as externalidades e métodos para quantificar economicamente seus impactos. Reduzir os fatores geradores de externalidades é fundamental, pois isso garantiria uma melhor qualidade de vida humana e uma gestão sustentável dos recursos (RANIERI; DIGIESI; SILVESTRI; ROCCOTELLI, 2018).

Os sistemas de transporte são a espinha dorsal das cidades. Eles permitem que os cidadãos e as empresas funcionem onde as atividades são inevitavelmente separadas espacialmente. Como resultado, o transporte é tradicionalmente um grande usuário de energia (MENICHETTI; VAN VUREN, 2011). Nesse contexto, deve-se procurar medidas que busquem adaptar a malha viária urbana às novas tendências de transportes e uma vez que o setor de construção de rodovias e vias requer um volume significativo de consumo de energia devido ao volume total de materiais usados na pavimentação todo ano (ABDULJABBAR; LIYANAGE; DIA, 2021). Além disso, a forte e crescente evidência dos efeitos ambientais dessas atividades, juntamente com rigorosas regulamentações reforçou o compromisso dos Departamentos de Transportes em buscar a implementação de infraestrutura mais ambientalmente preferível e que reduzam os custos de construção e manutenção de pavimentos por meio de soluções de engenharia sustentáveis (SANTOS; FLINTSCH; FERREIRA,

2017). Assim, observa-se a oportunidade de desenvolvimento de métodos de pavimentação que atendam às novas características de tráfego e que também tenham um desempenho ambiental satisfatório.

O novo paradigma de desenvolvimento sustentável e economia circular nos setores de construção e mineração passa pela redução do consumo de matérias-primas da crosta terrestre, não esgotando sua disponibilidade para as gerações futuras, minimizando o impacto ambiental derivado da geração de resíduos, e favorecendo sua incorporação em um processo produtivo (SUESCUM-MORALES; ROMERO-ESQUINAS; FERNÁNDEZ-LEDESMA; FERNÁNDEZ *et al.*, 2019). Compreender os mecanismos pelos quais os pavimentos afetam o meio ambiente é um passo fundamental para melhorar seu desempenho ambiental.

O setor da construção civil tem papel fundamental no desenvolvimento do país, entretanto, apesar do setor ser de suma importância é, também, uma das atividades humanas que mais consome recursos naturais. Calcula-se, internacionalmente, que entre 40% e 75% dos recursos naturais existentes são consumidos por esse setor, causando, assim, uma enorme geração de resíduos (CAMILO; CARDOSO; BATISTA; MARQUES *et al.*, 2022). Em 2015 a geração de resíduos sólidos urbanos chegou na casa dos 79,9 milhões de toneladas – dos quais cerca de 65% são Resíduos de Construção e Demolição (RCD), sendo a cobertura de coleta de aproximadamente 91% do total gerado, 7,3 milhões de toneladas de resíduos ainda ficaram sem destinação adequada (MATUELLA, 2017).

O RCD serve de matéria-prima para agregados de ótima qualidade, podendo ser utilizados num leque de variedades de processos construtivos: confecção de tijolos, blocos pré-moldados, meio-fio, calçadas, argamassa de revestimento, camadas de base e sub-base, pavimentos, entre outros (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Assim, pretende-se verificar através de análises físicas e mecânicas, a viabilidade do uso de materiais alternativos na produção de pavimentos a serem utilizados em vias calmas (slow traffic) por veículos leves, que sejam ambientalmente favoráveis e que possam proporcionar uma melhor qualidade de transporte e diminuir a pegada ambiental. Tendo em vista uma crescente tendência global que visa redução de poluentes ambientais, praticidade e agilidade do deslocamento individual.

## **OBJETIVO GERAL**

O propósito deste estudo é avaliar física e mecanicamente diferentes soluções de misturas betuminosas e materiais para base e sub-base de pavimentos, por meio de variação de percentual de resíduos da construção e demolição - RCD em suas composições, em substituição aos agregados naturais convencionais, a serem utilizados em vias calmas para fluxo de veículos elétricos superleves em Campo Grande/MS.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Identificar os principais beneficiadores de resíduos de construção e demolição em Campo Grande - Mato Grosso do Sul, com potencial de utilização em misturas para camadas granulares e asfáltica em pavimentos de fluxo leve;
- b) Realizar testes laboratoriais de misturas utilizando resíduos de construção e demolição como insumos;
- c) Verificar a viabilidade de uso dos resíduos da construção e demolição em pavimentos para veículos elétricos superleves.

## 1. REFERENCIAL TEÓRICO

O processo de pesquisa se constitui em uma atividade científica básica que, através da indagação e (re)construção da realidade, alimenta a atividade de ensino e a atualiza frente à realidade. Assim como vincula pensamento e ação já que "nada pode ser intelectualmente um problema se não tiver sido, em primeiro lugar, um problema da vida prática" (MINAYO, 2001).

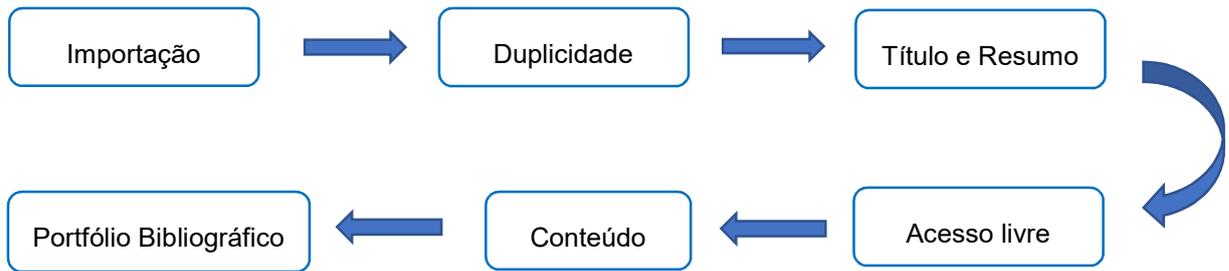
O estudo cienciométrico resultou de uma pesquisa bibliográfica baseada em referenciais teóricos publicados e objetiva avaliar o estado da produção científica multidisciplinar referente a micromobilidade urbana e pavimentos sustentáveis.

### 1.1 SELEÇÃO DE PORTFÓLIO E ESTUDO CIENCIOMÉTRICO

Para a seleção de portfólio, realizou-se triagem de artigos obtidos de uma base de dados indexados (Scopus) utilizando-se palavras-chave relevantes ao tema. Inicialmente utilizou-se busca através dos termos (micromobil\* or micro-mobil\* or "last mile" or "traffic" or "calm way" or "calm road" or usabil\* or transport\*) AND ("Smart cit\*" or "Sustain\* cit\*" or "sustain\* develop" or "circular econ\*" or "internet of things") AND (Vehicle OR Car) AND (asphalt or pavem\* or material or recyc\* or reuse or project or "life cycle") e através de processo de depuração e filtragem de títulos, leitura dos resumos, idioma e verificação de disponibilidade dos arquivos completos em formato pdf para leitura e formação do acervo bibliográfico obteve-se um total de 61 artigos dentro do período de 2001 a 2021, anualizados conforme figura 1, onde observa-se um maior período produtivo nos anos de 2018 e 2020.

Assim, através da Base Scopus gerou-se um arquivo em formato *RIS* que foi exportado para o *software* Endnote, utilizado para gerenciamento bibliográfico. De onde foi possível, através de metadados gerar um cadastro dos itens relevantes como título, autores, ano, resumo, palavras-chave, periódicos, instituição dos pesquisadores, país de origem, de cada artigo, e com a utilização do programa Power BI gerou-se relatórios sobre esses dados que possam permitir uma maior compreensão sobre os estudos e a pesquisa quantitativa e qualitativa sobre o assunto exposto.

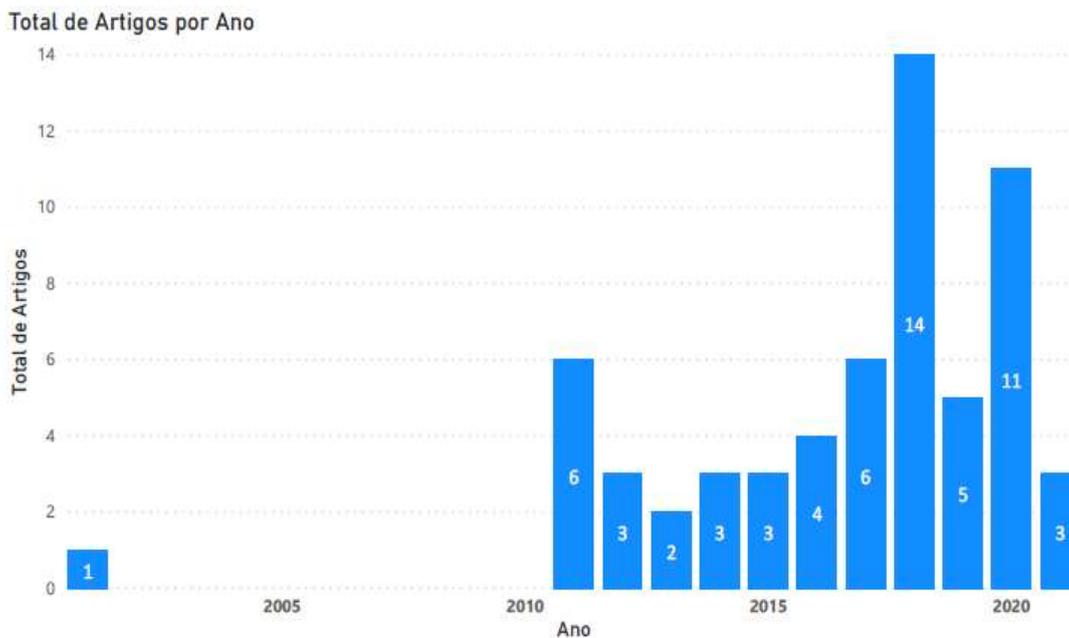
Figura 1 - Fluxograma para seleção de Portfólio Bibliográfico da pesquisa



Fonte: Autor

Efetuuou-se a identificação automática dos trabalhos em duplicidade e procedeu-se a leitura de todos os títulos, eliminando os que não se tratava de estudos que trouxessem contribuições ao assunto pesquisado. Para a próxima etapa, buscou-se os documentos completos em formato pdf na base indexada e também na internet, excluindo aqueles que não estavam disponíveis ou que estavam escritos em idiomas que não fossem: português, inglês e espanhol. Com a leitura dos resumos, excluiu-se os artigos que não trouxeram subsídios para o aprofundamento na compreensão da pesquisa e assim concluiu-se a formação do portfólio bibliográfico conforme Figura 1.

Figura 2 - Produção de Artigos por ano



Fonte: Autor (base Scopus)

Com a análise de produção por países, usada para identificar as principais nações onde a pesquisa sobre micromobilidade e pavimentos vem obtendo um maior

interesse e como ela se dispõe pelo mundo (Tabela 1), foram identificados um total de 22 países pesquisadores e nota-se que os Estados Unidos (9 documentos) apresentam um predomínio no interesse sobre o assunto, seguidos por Itália (8 documentos), Espanha e Reino Unido (ambas com 6 documentos). Sendo as que as demais nações apresentaram quantidade de produção próximas, entretanto através de análise continental, constata-se que o assunto é tratado com maior interesse na Europa.

Seguindo o mapeamento da produção científica no mundo identificou-se um total de 92 principais instituições pesquisadoras em virtude do trabalho conjunto dos pesquisadores, onde se destaca a Universidade de Leeds, no Reino Unido (Tabela 2).

Tabela 1- Pesquisas por países

<b>País</b>	<b>Total de Artigos</b>
Estados Unidos	9
Itália	8
Espanha	6
Reino Unido	6
Suécia	4
China	4
Portugal	3
Rússia	3
Austrália	2
Áustria	2
Bélgica	2
Canadá	2
Índia	2
Alemanha	1
Grécia	1
Indonésia	1
Malásia	1
México	1
Polónia	1
Sérvia	1
Taiwan	1
<b>Total</b>	<b>61</b>

Fonte: Autor (base Scopus)

Outro tópico analisado através da Base de dados Indexados Scopus foi a área de interesse de cada artigo do portfólio escolhido, demonstrando a predominância das áreas de engenharia, ciências sociais e meio ambiente conforme Tabela 3, o que

permite presumir o viés e inter-relacionamento do assunto pesquisado, tornando ainda mais evidente ao analisar as palavras-chave através do software Power BI, onde foi possível identificar e quantificá-las de acordo com a Tabela 4, onde apresentam-se aquelas que são citadas seis vezes ou mais e também obter uma rede de relacionamento (Figura 3), com a utilização do VOSviewer, onde os nós são as palavras-chave e as linhas formam a rede, sendo que a variação de cores mostra a tendência de evolução da abordagem do tema ao longo dos anos.

Tabela 2 - Afiliação

<b>Afiliação</b>	<b>Quantidade</b>
Universidade de Leeds	3
Swinburne University of Technology	2
Technische Universitat Wien	2
Univesidade Politécnica da Cartagena	2
Universidade Politécnica de Madri	2
Adam Smith Business School	1
Agência de Obra Pública Andalusia	1
America University of the Midle East	1
Aristerra company	1
Aristotel University of Thessaloniki	1
AXA	1
Beijing Jiaotong University	1
Carleton University	1

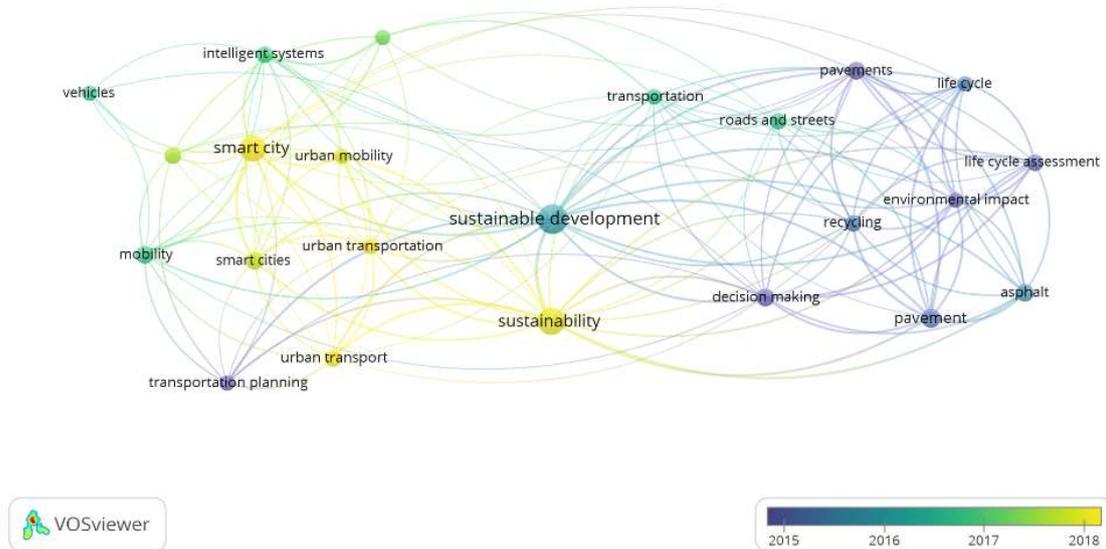
Fonte – Próprio Autor (base Scopus)

Tabela 3 - Áreas de Interesse

<b>Área de Interesse</b>	<b>%</b>
Engenharias	22,83
Ciências Sociais	22,05
Meio Ambiente	14,96
Energia	11,81
Economia, Econometria e Finanças	5,51
Ciências dos Materiais	4,72
Negócios e Gestão	4,72
Ciências da Computação	3,94
Matemática	3,16
Ciências das Decisões	2,36
Física e Astronomia	1,57
Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	0,79
Engenharia Química	0,79
Terra e Ciências do Planeta	0,79
<b>Total</b>	<b>100,00</b>

Fonte – Próprio Autor (base Scopus)

Figura 3 - Visualização da rede de palavras-chave



Fonte: Próprio autor (VOSviewer)

Tabela 4 - Palavras-chave

Palavra chave	Nº de ocorrências
Ciclo de vida	22
Cidade Inteligente	21
Desenvolvimento Sustentável	19
Rodovia	18
Sustentabilidade	18
Tráfego	18
Pavimento	17
Transporte	17
Transporte urbano	13
Sistemas de Transporte inteligente	11
Pavimento asfáltico reciclado	11
Veículos elétricos	8
Asfalto	7
Concreto	7
Tomada de decisão	7
Mobilidade	7
Transporte público	7
Mobilidade sustentável	7
Sistemas inteligentes	6
Reciclagem	6
Área Urbana	6
<b>Total</b>	<b>253</b>

Fonte - Próprio Autor (base Scopus)

Tabela 5 - Artigos mais citados

<b>Artigos</b>	<b>Total de Citações</b>
Avaliação do ciclo de vida de pavimentos. Parte I: Revisão Crítica	209
Abordagem híbrida integrando diagrama de afinidade, AHP e TOPSIS fuzzy para planejamento logístico sustentável da cidade	127
A governança da mobilidade inteligente	122
Pavimento asfáltico reciclado e misturas de agregados de concreto reciclado em sub-bases de pavimentos: avaliação laboratorial e de campo	81
Uso de agregado reciclado de resíduos de construção e demolição para pavimentação de estradas	72
Aprofundando conhecimentos sobre a mobilidade urbana - Alinhando os paradigmas de mobilidade inteligente e sustentável	70
uma revisão das inovações logísticas em "última milha" sobre a visão de redução de custos de externalidades	68
Avaliação ambiental e econômica da construção de pavimentos e práticas de gestão para melhorar a sustentabilidade do pavimento	67
Avaliação comparativa do ciclo de vida de pavimentos rodoviários de concreto usando subprodutos industriais como materiais alternativos	61
Cagliari e a mobilidade urbana inteligente: análise e comparação	59
Uma revisão sobre o uso de borracha triturada no reforço de pavimento asfáltico	49
Análises ambientais e econômicas de misturas de concreto asfáltico reciclado com base na produção de material e desempenho potencial	46
Coevolução entre sustentabilidade urbana e inovação do ecossistema de negócios: evidências do setor de mobilidade compartilhada em Shangai	45
Reciclagem de asfalto 100% a quente: desafios e benefícios	41
Um avançado sistema de gestão inteligente para recarga de veículos elétricos	40
Avaliação ambiental da infraestrutura de pavimentos: Uma revisão sistemática	38
Planejamento e projeto para mobilidade urbana sustentável: relatório global sobre assentamentos humanos 2013	35
A Tirania das Pequenas Decisões: Cidades insustentáveis e o planejamento diário dos transportes locais	35
Estilos de vida contemporâneos e as implicações para a política de desenvolvimento sustentável: lições da cidade mais dependente de automóveis do Reino Unido, Belfast	30
Materiais renováveis em aglomerantes e misturas betuminosas: pretexto especulativo ou oportunidade confiável	23
<b>Total</b>	<b>1318</b>

Fonte - Autor (base Scopus)

Por meio da quantificação das citações pode-se criar uma lista de artigos que têm sido considerados mais relevantes por pesquisadores e cujas linhas de pesquisa se relacionam com o tema em tela, podendo assim permitir o aprofundamento das análises tendo-os como referência.

## 1.2 ANÁLISE DE CONTEÚDO DO REFERENCIAL TEÓRICO

Com o portfólio bibliográfico, partiu-se para a análise de conteúdo textual, que é um método empírico, realizado com apoio do software Iramuteq (CAMARGO, JUSTO, 2013), que resulta em análises gráficas e estatísticas, com base lexicométrica. A lexicometria consiste em uma análise estatística de um corpus textual que identifica todas as formas textuais utilizadas e as sistematiza e as reorganiza de forma objetiva por meio das frequências das palavras, (inter)dependência entre as formas textuais, identificação de desvios ou falta de padrão e compreensão da estrutura discursiva (CONDE, 2015; DAMASCENO, 2007; IRIARTE; GAMALLO; SIMÕES, 2018).

A utilização de softwares para análise estatística de dados provenientes de diversas fontes tradicionalmente utilizadas, como material textual, tem se tornado cada vez mais frequente (NASCIMENTO; MENANDRO). O processamento de dados permitido pelo software viabiliza o aprimoramento das análises, inclusive em grandes volumes de texto. Pode-se utilizar das análises lexicais, sem que se perca o contexto em que a palavra aparece, tornando possível integrar níveis quantitativos e qualitativos na análise, trazendo maior objetividade e avanços às interpretações dos dados de texto (CAMARGO; JUSTO, 2013).

Obteve-se a análise do corpus textual dos 61 textos, que foram divididos em 383 segmentos de texto com 3 a 4 linhas, 13767 ocorrências de formas textuais com um total de 2847 formas lexicais diferentes e 1556 hápax, que são palavras que aparecem em uma única forma (frequência = 1).

Calculou-se também a frequência das palavras mais relevantes, ou de primeira ordem (QUONIAM et al., 1998; CASSETTARI et al., 2015), que são aquelas que possuem frequência maior ou igual ao número total de formas textuais ativas que, neste caso, é igual a 42 e que estão nas 12 primeiras posições (Figura 4). A nuvem é uma análise lexical mais simples, porém graficamente interessante, pois possibilita rápida

identificação das palavras-chave de um corpus (JUSTO; CAMARGO, 2014). Observa-se que as formas com maior frequência são bem próximas daquelas usadas na seleção dos artigos, o que é de certa forma esperado, porém ao analisar o contexto e a maneira que cada uma dessas palavras foi utilizada no corpus permite que sejam avaliadas a abordagem do assunto, os termos utilizados no meio científico e o viés comumente adotado pelos pesquisadores.

Figura 4 - Nuvem de palavras



Fonte: Autor (2022)

Para realizar uma análise mais aprofundada sobre os contextos em que as palavras são apresentadas, procurou-se primeiramente identificar e quantificar o número de ocorrências de cada uma, onde obteve-se a palavra Transporte como o tema principal dos textos. Dessa forma, procedeu-se estudo individual dos textos onde foram identificados os principais assuntos abordados e com a listagem pode-se realizar análise de dados por meio do software Iramuteq, permitindo-se realizar correlações entre os principais assuntos abordados, e as tendências de pesquisa em cada continente e o número de pesquisas que vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos. Observou-se que o continente com maior interesse em pesquisas relacionadas ao transporte é o Europeu, com 40 textos, seguido por Ásia (16), América (8) e Oceania (4). De forma geral, as pesquisas têm como principal viés o estudo dos sistemas de

transporte em todos os continentes, entretanto observa-se uma maior preocupação com a sustentabilidade do transporte no continente Europeu. Na maioria das vezes, o assunto transporte é abordado como o sistema de mobilidade, voltado para a eficiência do tráfego nos centros urbanos, visando a diminuição do tempo de deslocamento e seus custos decorrentes. A mobilidade sustentável permite viajar de um local para outro usando uma abordagem multimodal com os mais altos padrões de segurança e proteção, oferece escolha de modo de transporte, oferece acesso acessível a serviços de carga e passageiros, limita as emissões e minimiza o uso da terra (ZYRYANOV, 2019).

Busca-se também o desenvolvimento de sistemas inteligentes com o uso de tecnologia e inovações, inclusive veículos autônomos, e integração de plataformas e modais, que possam alcançar a maior parte da sociedade, proporcionando meios de transportes mais eficientes, ágeis e democráticos, uma vez que o uso individual de veículos, um dos principais responsáveis por congestionamentos, é em sua grande maioria efetuado por pessoas com maior renda. As mudanças necessárias não estão apenas associadas intrinsecamente aos modos de mobilidade, como veículos e tecnologias novos e mais limpos, mas essa transição está ligada a infraestruturas, regras, normas sociais e, provavelmente, o mais importante, está entrelaçada com a vida cotidiana estabelecida das pessoas (SOPJANI; STIER; HESSELGREN; RITZÉN, 2020). Em menor incidência, outras pesquisas apontam para a maior preocupação com os impactos ambientais que o transporte causa, como poluição do ar, sonora e o alto consumo de energia e matérias primas, buscando a compatibilização entre segurança do transporte, eficiência e sustentabilidade.

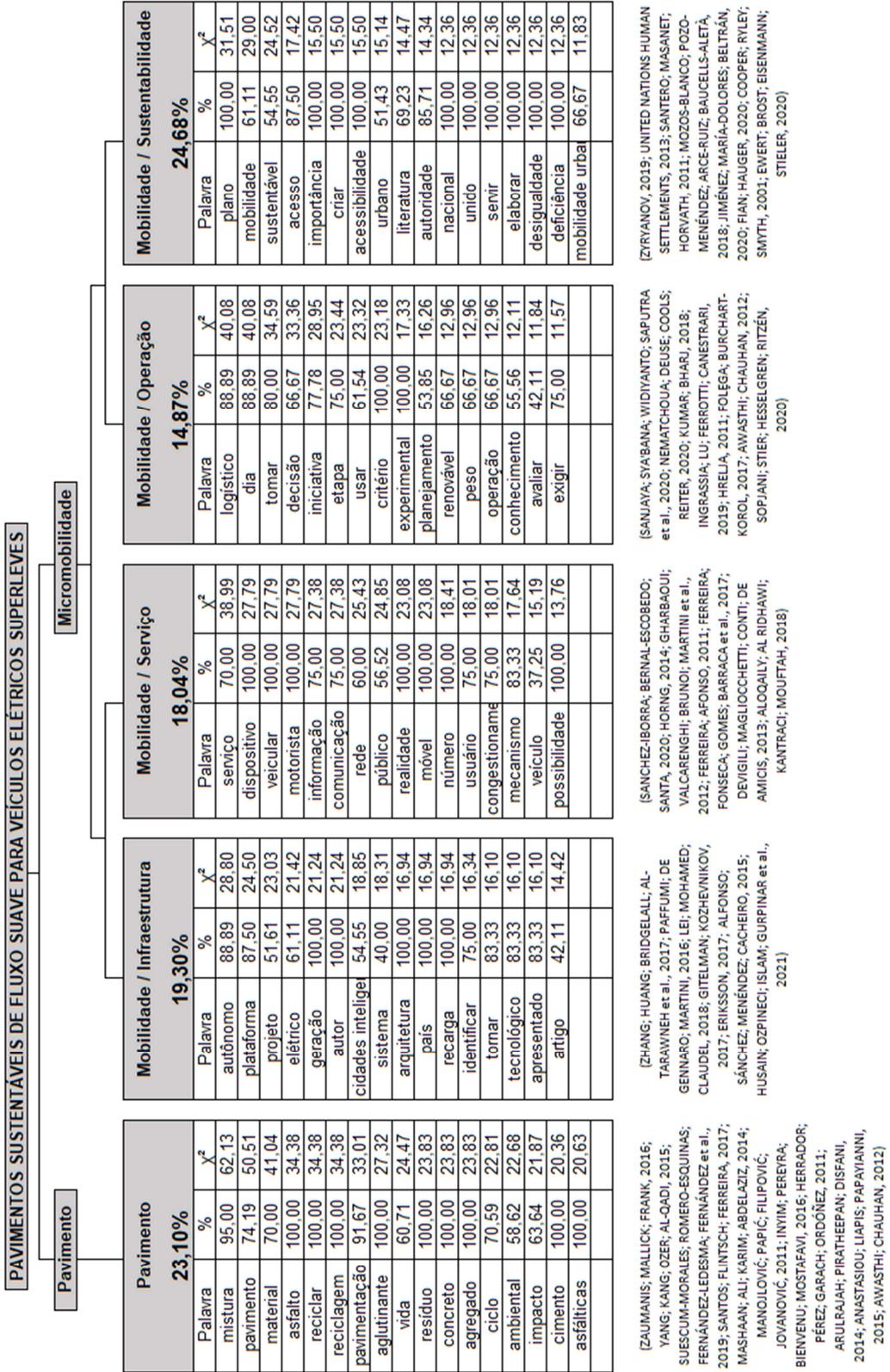
Dentre as principais palavras apontadas nos textos, destaca-se os veículos. Os contextos identificados referem-se a tecnologias instaladas que permitem monitoramento ponto a ponto e a conectividade em sistemas que promovam um melhor gerenciamento de tráfego, além da possibilidade de extrair conhecimentos baseados em big data. Outra vertente identificada é a matriz energética utilizada pelos veículos, com expressivo aumento de veículos elétricos o que traz um alerta sobre a urgente necessidade de desenvolvimento e implementação de infraestrutura de recarga capaz de absorver essa necessidade (PAFFUMI; DE GENNARO; MARTINI, 2016).

### 1.2.1 CLASSIFICAÇÃO HIERÁRQUICA DESCENDENTE

Ampliando a análise do corpus textual, optou-se por realizar o agrupamento das palavras em clusters por meio da classificação hierárquica descendente (CHD) pelo método de Reinert (CAMARGO; JUSTO, 2013). As palavras foram agrupadas em 5 classes por meio e o resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) indica a força de relacionamento entre as palavras na forma de um dendrograma (Figura 5) com duas grandes dimensões (Micromobilidade e Pavimento). A dimensão da Micromobilidade apresenta-se com duas divisões e cada uma delas subdividida em duas, que foram nomeadas em função do assunto mais expressivo. As classes ou clusters foram nomeados de acordo com as palavras mais representativas: Pavimento (23,10%), Mobilidade/ Infraestrutura (19,30%), Mobilidade/ Serviço (18,04%), Mobilidade/ Operação (14,87%) e Mobilidade/ Sustentabilidade (24,68%), Essas classes são expressões ou palavras estatisticamente significativas em função das quais o conteúdo é organizado (CAVALCANTE; CALIXTO; PINHEIRO, 2014).

Assim, ao se recuperar os segmentos de texto associados às formas, compreende-se claramente o contexto em que cada trabalho aborda os assuntos de acordo com a classe em que as palavras se enquadram, pois o dendrograma além de apresentar as classes, demonstra a ligação entre elas (SOUZA; WALL; THULER; LOWEN et al., 2018). De forma a facilitar o entendimento e compreensão, o assunto e contexto de cada classe serão detalhados com base no portfólio bibliográfico utilizado.

Figura 5 -Classificação Hierárquica Descendente



Fonte: Autor (2021)

### 1.2.1.1 PAVIMENTO

O objetivo máximo da política de transportes é auxiliar na implementação de um sistema que promova o desenvolvimento econômico, melhorando a competitividade e oferecendo maior nível de serviço em relação à mobilidade com utilização racional e eficiente de recursos (MANOJLOVIĆ; PAPIĆ; FILIPOVIĆ; JOVANOVIĆ, 2011). Assim, as pesquisas relacionadas na classe Pavimento abordam assuntos, que de forma geral, busquem processos e estudos relativos ao reaproveitamento e reciclagem de materiais no intuito de redução de consumo de matéria virgem e consequente redução de impactos ambientais, bem como a utilização de novos componentes aglutinantes que possam reduzir o consumo de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), como também melhorar sua composição por meio do incremento de novos elementos, uma vez que a combinação de uma demanda relativamente alta por produtos betuminosos juntamente com a alta pegada ambiental de tais materiais abriu caminho para o surgimento de estratégias e práticas sustentáveis para atender às demandas de infraestrutura viária, reduzindo o custo ambiental (YANG; KANG; OZER; AL-QADI, 2015).

O objetivo de muitos estudos é fomentar a reutilização e reciclagem de resíduos e outras formas de valorização com vista a contribuir para o desenvolvimento sustentável das atividades no setor da construção e pavimentação (HERRADOR; PÉREZ; GARACH; ORDÓÑEZ, 2011), embora o produto final – um concreto ou um pavimento de concreto asfáltico – possa ser bastante semelhante em termos de utilidade, diferenças nos materiais utilizados, bem como nos processos de produção, podem levar a impactos ambientais consideravelmente diferentes (ANASTASIOU; LIAPIS; PAPAYIANNI, 2015).

### 1.2.1.3 MOBILIDADE/ INFRAESTRUTURA

A importância do plano de mobilidade visando um sistema de transporte sustentável na prática é impossível sem o uso de tecnologias. De acordo com o Eurostat, nos 27 países da União Europeia (UE) quase um terço de todo o uso de energia foi em 2008 associado a transportes (MENICHETTI; VAN VUREN, 2011). Temas relacionados a

infraestrutura tecnológica do sistema de mobilidade urbana, integram internet, internet das coisas (IoT), sistemas de posicionamento, estruturação para recarga de veículos e toda a automatização do transporte. Edifícios inteligentes, energia inteligente e mobilidade inteligente são apresentados como pilares básicos das iniciativas de cidades inteligentes viabilizadas pela aplicação de tecnologias de informação e comunicação (ŠEMANJSKI; MANDŽUKA; GAUTAMA, 2018).

A integração total de veículos elétricos em áreas urbanas e dentro da rede elétrica, tanto como consumidores de energia quanto como potenciais instalações de armazenamento é uma das chaves para a quebra da dependência do petróleo e descarbonizar a mobilidade. O Plano de Ação sugere a necessidade de um conjunto de iniciativas políticas, incluindo o desenvolvimento de uma estratégia sustentável de combustíveis alternativos, uma infraestrutura apropriada e o desenvolvimento de uma retaguarda de tecnologia de informação e comunicação para atender com eficiência a demanda e a oferta de eletricidade, juntamente com uma mudança de mentalidade em direção a um novo, modelo de mobilidade sustentável e de baixo carbono. Neste contexto, os dados produzidos pelos cidadãos podem ser usados para impulsionar a mudança e definir soluções eficazes para a mobilidade inteligente nas cidades (PAFFUMI; DE GENNARO; MARTINI, 2016).

### 1.2.1.3 MOBILIDADE/ SERVIÇO

O serviço de mobilidade em seu aspecto de qualidade de trânsito, buscam melhorias nos sistemas de transportes, evitando-se congestionamentos e maior agilidade. O setor de transportes é responsável por cerca de 24% das emissões de CO<sub>2</sub>, sendo estes valores extremamente altos sob um aquecimento global longe de ser resolvido. Os veículos elétricos surgem como um potencial solução para atenuar gradualmente este problema. Suas vendas aumentaram exponencialmente nos últimos anos, envolvendo não apenas automóveis, mas também veículos de duas rodas. Abrindo um novo nicho de pesquisa para aplicar novas tecnologias de informação e comunicação para melhorar a eficiência do tráfego e garantir a segurança, no momento em que as emissões são reduzidas principalmente nas áreas urbanas (SANCHEZ-IBORRA; BERNAL-ESCOBEDO; SANTA, 2020). A medida que o sistema de mobilidade inteligente evolui, as novas oportunidades de mobilidade que ele

apresenta levarão a uma reconfiguração dos elementos sistêmicos que produzem diferentes resultados de mobilidade em primeiro lugar, como padrões de uso do solo, locais de emprego e moradia etc (DOCHERTY; MARSDEN; ANABLE, 2018).

#### 1.2.1.4 MOBILIDADE/ OPERAÇÃO

Para a classe Mobilidade/ Operação, embora trate-se de assuntos próximos a classe Mobilidade/ Serviço, observou-se que a tendência das pesquisas traz abordagens referentes a logística e planejamento dos sistemas sob a ótica da sustentabilidade. Sanjaya et al. (2020) descreve a micromobilidade tem sido descrita de acordo com a velocidade e o peso do veículo, onde geralmente tem velocidade máxima de 25 km/h e peso bruto do veículo inferior a 500 kg, excluídos os veículos com motor de combustão interna, independentemente de sua velocidade e peso. Os dispositivos de micromobilidade são principalmente movidos a energia humana ou elétrica, tendo com exemplos, entre outros, bicicletas, skates e pequenas scooters elétricas.

Esta classe apresenta pesquisas que buscam soluções para manter o crescimento econômico das cidades e atender às demandas da comunidade. As organizações estão continuamente envolvidas na produção e distribuição de mercadorias; no entanto, isso gerou um custo inesperado de degradação da qualidade de vida nas cidades modernas, o que fez com que as prefeituras investissem em estudos sobre planejamento e avaliação da logística urbana (AWASTHI; CHAUHAN, 2012). Entretanto, cabe ressaltar que uma solução considerada ambientalmente vantajosa pode não ser preferida a outra tecnicamente equivalente se não for economicamente competitiva.

#### 1.2.1.5 MOBILIDADE/ SUSTENTABILIDADE

A mobilidade urbana sustentável é resumida como a facilidade, conveniência e acessibilidade de viajar para um destino com impacto mínimo sobre o meio ambiente e outros (LYONS, 2018). A avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta bem conhecida, coberta por padrões internacionais (ISO, 2006 a,b), que pode ser usada para comparar alternativas para melhorar o impacto ambiental da construção de

pavimentos (Comissão Europeia, 2010). Com base nos resultados dessa avaliação, o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa podem ser identificados e reduzidos em todas as etapas do ciclo de vida do pavimento: construção, uso e manutenção e fim de vida (ANASTASIOU; LIAPIS; PAPAYIANNI, 2015). Fornecer perspectivas de ciclo de vida das implicações ambientais e econômicas da implementação de novas soluções de engenharia de pavimentação e práticas de gerenciamento é, sem dúvida, um primeiro passo essencial para aumentar a sustentabilidade da infraestrutura de pavimentação (SANTOS; FLINTSCH; FERREIRA, 2017).

Outro fator importante a ser considerado é a evolução dos veículos, mais eficientes em termos de combustíveis e mais limpos, com normas mais rígidas em vigor, sendo que o impulso para melhoria da qualidade do ar em grandes centros também levou a um foco em veículos elétricos a bateria, particularmente no contexto de transporte comercial e público (RAMJI; VENUGOPAL, 2019). Um Plano de Mobilidade Urbana Sustentável é um plano estratégico desenhado para satisfazer as necessidades de mobilidade das pessoas e empresas nas cidades e seus arredores para uma melhor qualidade de vida, baseando-se em práticas de planejamento existentes e leva em consideração os princípios de integração, participação e avaliação (JIMÉNEZ; MARÍA-DOLORES; BELTRÁN, 2020). Isto demonstra a real necessidade de planejamento amplo sobre todo o sistema de transporte, reduzindo o consumo de energia e materiais, bem como redução de emissão de gases e poluentes e buscando uma maior qualidade de vida.

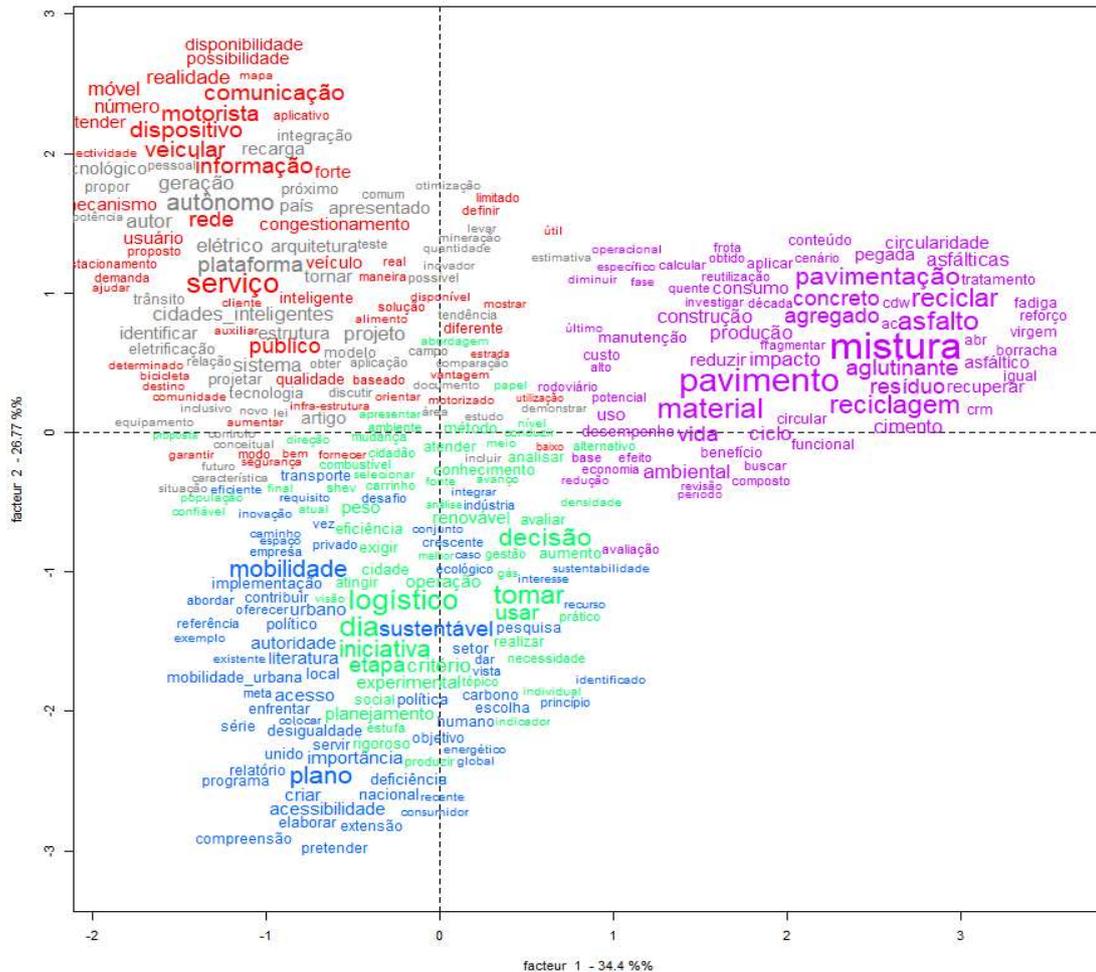
### 1.2.2 ANÁLISE FATORIAL DE CORRESPONDÊNCIA

Com a leitura mais aprofundada do referencial bibliográfico, nota-se que a palavra “transporte” é abordada nos artigos em contextos variados, promovendo a conectividade entre os assuntos, mas principalmente associada ao conceito de sistemas públicos de transportes, buscando alternativas inteligentes e sustentáveis.

A Análise Fatorial de Correspondência (AFC) consiste em cruzar as ocorrências de cada forma léxica do vocabulário do corpus com as classes resultantes da CHD, de forma a apresentar as relações existentes entre estas classes num plano cartesiano

fatorial, divididos em quatro quadrantes de coordenadas X e Y (NETA; CARDOSO, 2021), conforme apresentado na figura 5. Nota-se claramente a forma como as palavras ocupam os quadrantes em consonância com as classes apresentadas no dendrograma (CHD).

Figura 6 - Análise Fatorial de Correspondência (AFC)



Fonte: Autor

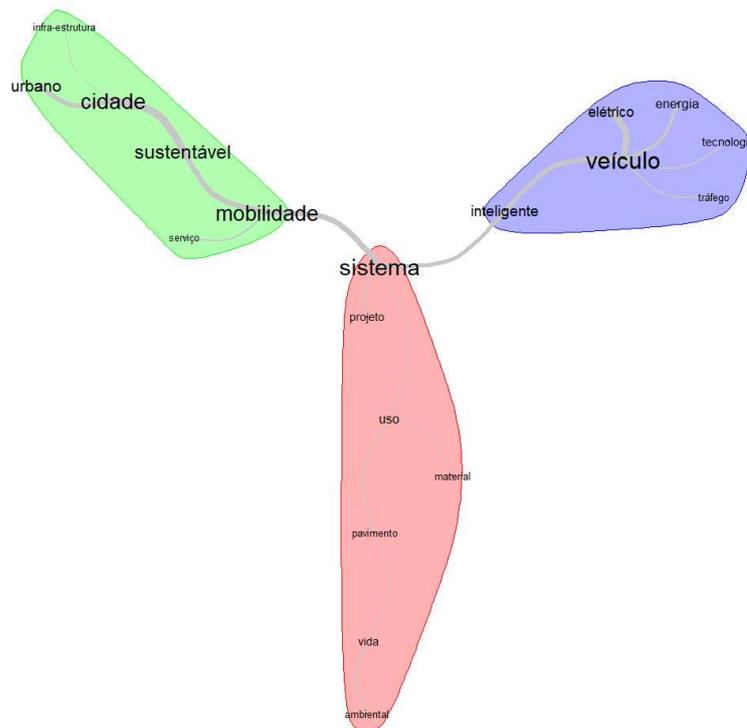
### 1.2.3 ANÁLISE DE SIMILITUDE

A Análise de Similitude é um método complementar às análises fatoriais clássicas, que possibilita identificar coocorrências entre os elementos e seu resultado traz indicações da conexidade entre as palavras, auxiliando na estrutura de um corpus textual, permitindo também identificar as partes comuns e as especificidades do

vocabulário em função das variáveis descritivas identificadas na análise (MARCHAND; RATINAUD, 2012).

Visando um melhor entendimento, optou-se por executar a ferramenta utilizando as 20 palavras com maior ocorrência e em uma segunda execução retirou-se a palavra “Transporte” por se tratar do tema central. Isso possibilitou a verificação de três núcleos prioritários do assunto, que seriam a **mobilidade**, que trata da forma como se dá o deslocamento de pessoas e bens; o **sistema** que se refere a infraestrutura e pela qual são feitos esses deslocamentos e os **veículos** que são os meios de realização de transporte.

Figura 7 - Análise de Similitude



Fonte: Autor

### 1.3 VEÍCULOS LEVES ELETRIFICADOS

O setor de transportes é responsável por 28% das emissões de gases poluentes e de CO<sub>2</sub>, sendo que 74% advém do transporte rodoviário (NEMATCHOUA; DEUSE; COOLS; REITER, 2020) causando grandes impactos na qualidade do ar.

Os motores elétricos são mais eficientes que os tradicionais, uma vez que estes possuem eficiência de 20 a 30% enquanto que os motores elétricos conseguem

transformar cerca de 90% da energia elétrica em energia mecânica, apresentando um rendimento energético pelo menos três vezes superior ao veículo com motor a combustão, minimizando emissões atmosféricas e ruídos (PESSANHA; PERES; CALDAS; PARTICELLI, 2011).

Os veículos leves eletrificados são uma alternativa de transporte de baixo impacto ambiental, que favorecem a mobilidade urbana. Para este estudo serão considerados veículos leves, aqueles que possuam peso bruto menor que 3.500 kg conforme estabelecido pelas normativas do DNIT.

#### 1.4 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Nas últimas décadas o Brasil vem passando por um crescente aumento da população urbana, causando alterações que impactam o ambiente urbano. Essas atividades demandam grandes quantidades de recursos naturais e conseqüentemente geram muitos resíduos.

A indústria da construção civil é um dos principais setores industriais do país, responsável por 6,2% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil e com crescimento de 9,7% no ano de 2021 segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ajuda a desenvolver o bem-estar da sociedade, preservando o meio ambiente, por meio de obras de engenharia civil nos segmentos de infraestrutura e edificações. Um papel tão significativo na economia nacional implica, conseqüentemente, em responsabilidades quanto ao grande impacto ambiental produzido devido ao consumo de matérias-primas e energia e a geração de agentes poluidores em quase todos os seus processos (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, em 2017 foram coletados 45 milhões de toneladas de RCD no Brasil, sendo que aproximadamente 75% dos resíduos provêm de pequenos geradores, principalmente de obras informais.

O resíduo gerado pela construção e demolição (RCD) é também conhecido como entulho. Possuem forma sólida, com características físicas variáveis, que dependem do seu processo gerador, variando desde grãos até dimensões irregulares. Englobando materiais resultantes de construções, manutenções e demolições, sendo originado desde etapas da atividade industrial como mineração, refino de materiais e

transformação; como também originadas do consumo, pela obsolescência, através do descarte de embalagens e por meio de degradação e desgaste. Possui composição variada, podendo ser constituído de materiais como cerâmica, concreto, argamassas, rochas naturais, madeira, aço e outros metais, plástico, gesso, cimento, vidros, asfalto, entre outros (LARUCCIA, 2014).

Os resíduos são gerados em todas as etapas do ciclo produtivo do setor da construção civil, partindo a produção de materiais e componentes que consomem os recursos naturais e também produzem grandes quantidades de resíduos, sendo necessário observar que o volume de resíduo gerado está diretamente ligado à intensidade da atividade de construção em cada país, tecnologia utilizada e taxas de desperdício e manutenção (JOHN, 2000).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) em 2020 foram coletados aproximadamente 47 milhões de toneladas de RCD, com um crescimento de 5,5% em relação ao ano anterior.

Tabela 6 - Coleta de RCD

<b>Ano</b>	<b>Quantidade de RCD (t)</b>
2020	46.997.400
2019	44.534.380
2018	44.534.380
2017	45.048.665

Fonte: ABRELPE

A grande quantidade de resíduos de construção e demolição, muitas vezes não tratada, é motivo de preocupação em diversos lugares do mundo, o que traz prejuízos irreversíveis ao meio ambiente, sendo imprescindível ações de reciclagem e reutilização, a fim de promover retorno sustentável e garantia do ciclo de vida dos materiais (TAVARES; MARQUES; SANTOS; NASCIMENTO et al., 2013).

A deposição irregular dos RCD continua existindo em praticamente todas as cidades do país, principalmente aqueles atrelados às obras de médio e pequeno porte.(DOS SANTOS; PINTO; CATUNDA, 2015), aumentando consideravelmente as áreas de aterro. Neste sentido, a legislação vem se tornando cada vez mais rigorosa, trazendo a responsabilidade de destinação dos resíduos aos seus geradores, bem como a adoção de novas técnicas de redução de desperdícios e políticas de reciclagem (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

## 1.5 LEGISLAÇÃO E NORMAS

A Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981 é considerada o marco legislativo do Direito Ambiental Brasileiro, pois instaurou a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), com o objetivo de preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental favorável à vida e que pudesse garantir que o país possuísse condições de desenvolvimento socioeconômico, regulamentando qualquer situação que utilize o meio ambiente como objeto, garantindo a sua proteção, prevenção de danos, preservação, melhorias ecológicas e recuperação da qualidade ambiental.

Tabela 7 - Classificação dos Resíduos

<b>Classe</b>	<b>Destinação</b>	<b>Tipos de Materiais</b>
<b>Classe A</b>	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregado ou dispostos em aterros.	Resíduos de construção, demolição, reformas e reparos em pavimentação, inclusive solos provenientes de terraplenagem; componentes cerâmicos (blocos, tijolos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios, etc.)
<b>Classe B</b>	Resíduos recicláveis ou reutilizáveis ou dispostos em áreas temporariamente.	Plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso.
<b>Classe C</b>	De acordo com normas técnicas específicas.	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.
<b>Classe D</b>	De acordo com normas técnicas específicas.	são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde, oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Fonte: Autor

A Resolução CONAMA n.º 307 de 2002, que embora priorize a não geração de resíduos, mas em caso da inexistência dessa possibilidade estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção, classificando-os em quatro classes conforme Tabela 7.

Atentos aos problemas que poderiam surgir devido à inadequada disposição dos Resíduos da Construção e Demolição em 12 de agosto de 2010 foi promulgada a Lei n.º 12.305 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, popularmente conhecida como a “Lei do Lixo”, e estabeleceu boas práticas a serem seguidas de forma a reduzir a quantidade de resíduos destinados a aterros, onde através da

reciclagem esses materiais possam ter finalidade de substituir parcial ou totalmente o material natural.

No Município de Campo Grande a Lei nº 4.864 de 7 de julho de 2010 dispôs sobre a gestão dos resíduos da construção civil e instituiu o plano integrado de gerenciamento de resíduos da construção civil de acordo com o previsto na Resolução CONAMA nº 307/2002, no Município de Campo Grande, sendo posteriormente regulamentada pelo Decreto nº 13.192 de 21 de junho de 2017, onde em seu Capítulo III determinou a criação dos Ecopontos (Figura 6), que são áreas a serem implantadas pela administração municipal, destinadas ao recebimento de pequenos volumes de resíduos da construção, sendo que atualmente existem cinco Ecopontos em funcionamento, localizados em regiões estratégicas da capital, nos bairros Nova Lima, Panamá, Noroeste, União e Moreninha.

Figura 8 - Ecopontos da Capital de locais de entrega voluntária



Fonte: Google Earth (2023)

O mesmo decreto regulamentou a operação das áreas destinadas para recepção de grandes volumes, inclusive as implantadas por particulares visando o beneficiamento dos resíduos para que possam ser reutilizados e ou reciclados.

Em 2004, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em virtude da necessidade de gestão e manejo corretos dos resíduos da construção civil, publicou diversas normas abrangendo toda a cadeia de reutilização e reciclagem de resíduos da construção civil. A Tabela 8 traz um resumo dessas normativas e seus objetivos.

Tabela 8 - Normas ABNT referentes aos RCDs

<b>Norma</b>	<b>Título</b>	<b>Objetivo</b>
<b>ABNT NBR 10004</b>	Resíduos sólidos – Classificação	Classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente
<b>ABNT NBR 10007</b>	Amostragem de resíduos sólidos	Fixa os requisitos exigíveis para amostragem de resíduos sólidos visando determinar suas características quanto à classificação, métodos de tratamento etc.
<b>ABNT NBR 15112</b>	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação	Fixa os requisitos exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e resíduos volumosos.
<b>ABNT NBR 15113</b>	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação	fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A e de resíduos inertes.
<b>ABNT NBR 15114</b>	Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.	Fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil classe A.
<b>ABNT NBR 15115</b>	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.	Estabelece os critérios para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camada de revestimento primário, com agregado construção civil, denominado “agregado reciclado”, em obras de pavimentação. reciclado de resíduo sólido da construção civil, denominado “agregado reciclado”, em obras de pavimentação.
<b>ABNT NBR 15116</b>	Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios.	Especifica os requisitos para produção e recepção dos agregados reciclados (miúdos e graúdos), obtidos a partir do beneficiamento de resíduos da construção civil classe A, incluindo misturas de agregados naturais e reciclados, para argamassas e concretos de cimento Portland

Fonte: Autor

## 1.6 RECICLAGEM DE RCD

Ao analisar as contribuições ambientais da reciclagem, a mais evidente é a preservação dos recursos naturais, uma vez que os materiais serão substituídos pelos resíduos, prolongando a vida útil das reservas naturais e reduzindo a destruição da paisagem, flora e fauna (JOHN, 2000), além de ser uma alternativa à falta de espaços para aterros e gerar vantagens econômicas, podendo gerar novos empreendimentos, gerando empregos e renda.

No Brasil, o maior interesse sobre a reciclagem de resíduos da construção e demolição advém da década de 80, quando obteve maior atenção dos gestores municipais pelas possibilidades de destinação dos resíduos gerados. A partir de 1991, equipamentos de maiores portes foram instalados em vários municípios com a implantação de planos de gestão dos RCD (PINTO, 1999), pois através da reciclagem pode-se obter materiais possíveis de serem utilizados em diversos serviços e obras, alcançando também economia de recursos financeiros devido aos custos mais baixos, em geral, da reciclagem em comparação ao gerenciamento de aterramento e remoção de áreas irregulares, bem como o custo do agregado reciclado que poderia ser mais atrativo do que os agregados convencionais (LIMA, 1999).

Articulações entre a gestão pública de resíduos e a iniciativa privada devem ser fortemente incentivadas para que o máximo volume possível de RCD seja reciclado, interrompendo o desperdício de recursos minerais nobres e o esgotamento continuado de áreas indisponíveis (PINTO, 1999), uma vez que as experiências de maior sucesso no país se devem a benefícios econômicos evidentes, aliado a alguma influência de pressões dos serviços de coleta de lixo urbano (JOHN, 2000). Como exemplo, verificou-se em Belo Horizonte uma economia de 22% na execução da pavimentação asfáltica e cerca de 50% na produção de blocos de vedação (CARNEIRO; BURGOS; ALBERTI, 2001).

## 1.7 APLICAÇÃO DE RCD RECICLADO NA PAVIMENTAÇÃO

Deslumbrando soluções para a reutilização desses materiais, diversas pesquisas mostram a possibilidade de utilização de agregados reciclados na construção civil,

tendo como principais focos a pavimentação, concretos e argamassas, lastro para assentamento de tubos e camadas drenantes (com ausência de partículas finas) (BAPTISTA JUNIOR; ROMANEL, 2013; MOTTA, 2005).

Zordan (2003), afirma que a área de pavimentação é a que oferece a melhor opção para destinação de RCD devido ao consumo de grandes quantidades de material em comparação a outras atividades.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), um pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas, compostas por diferentes materiais, construído sobre o solo preparado com a finalidade de resistir as cargas sobre ele aplicada, advindos da projeção de tráfego de veículos para um determinado espaço de tempo. Essas camadas trabalham conjuntamente de forma que nelas se dissipem as pressões aplicadas no topo do pavimento, proporcionando aos usuários, condições de trafegar com conforto e segurança.

Figura 9 - Camadas de Pavimento Tipo



Fonte: DNIT 2006

Nos pavimentos de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) mais de 90% do peso total da mistura refere-se aos agregados, fator que tem impulsionado pesquisas com a finalidade de aplicar agregados reciclados nas misturas e consequentemente seu retorno à cadeia da construção civil (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Outro fator preponderante que favorece a utilização do RCD em camadas de reforço do subleito, camadas de sub-base, de base e incluindo o revestimento asfáltico é que as especificações técnicas que norteiam a utilização desse material em pavimentação

são menos restritivas quando comparadas à sua utilização em concreto estrutural (MATUELLA, 2017).

Os primeiros relatos acerca de utilização de RCD reciclado em pavimentação datam de 1984 na cidade de São Paulo, com utilização como revestimento primário de vias urbanas para amenizar impactos causados pelas intempéries, sendo evidenciado que as vias demandaram menores reparos, visto que, a compactação gerada pelo tráfego local estabilizou a camada de subleito (BODI; BRITO; ALMEIDA, 1995). Ainda em São Paulo/ SP, no ano de 1989, pesquisas basearam-se em metodologias adequadas nas características dos solos tropicais e os resultados indicaram que ao se utilizar o agregado reciclado em substituição ao convencional, foi possível reduzir a quantidade de material necessário para atingir a mesma capacidade de suporte (PINTO, 1999).

A Prefeitura de Goiânia, em 2003, firmou parcerias com Universidade de Brasília, Universidade de Goiás empresas locais ligadas à construção, coleta e reciclagem para a elaboração do Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos da Construção Civil do município. No intuito de verificar a viabilidade técnica da utilização dos agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil foram realizados estudos de laboratório e de campo, resultando na construção de uma pista experimental com uso de agregados reciclados nas camadas de base e sub-base, sob um revestimento de concreto asfáltico, onde foi observado que após quase três anos, a via não apresentou comprometimento estrutural e de funcionalidade, bem como deformações (OLIVEIRA, 2007).

Verificou-se que além dos bons resultados do CBR (capacidade de suporte), os resíduos de construção reciclados, sendo material não expansivo, ao ser adicionado ao solo, contribui para a redução da taxa de expansão da mistura. A massa específica do material praticamente não se altera com a mistura, diminuindo, assim, a possibilidade de segregação dos materiais (CARNEIRO; BURGOS; ALBERTI, 2001). Assim, apesar de experiências anteriores indicarem resultados satisfatórios, é importante estudar o processo de reciclagem, a variabilidade e o desempenho dos agregados recicláveis particulares de uma localidade (IYOMASA, 2013), pois o fato de um determinado material não ter o mesmo comportamento que os convencionais ou não atender especificações de normas não indica que ele não possa ser utilizado em condições especiais, atendendo às necessidades dos usuários (ZORDAN, 2003).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Visando buscar alternativas ambientalmente sustentáveis, que possam reduzir a disposição irregular de resíduos da construção, evitando desperdícios de materiais nobres bem como altos custos de recuperação de áreas degradadas e ainda diminuir a necessidade de extração de materiais virgens, este trabalho busca elementos que possam permitir uma avaliação mais objetiva quanto à viabilidade do uso de Resíduos da Construção Civil na pavimentação de vias de fluxo calmo para veículos superleves, por meio de análise experimental de características físicas e propriedades mecânicas dos agregados reciclados fazendo um comparativo com os materiais convencionais, uma vez que na maioria dos países utiliza-se o revestimento asfáltico como camada de pavimento das vias rodoviárias e urbanas.

Para os estudos laboratoriais primeiramente identificou-se os principais beneficiadores de RCDs no município de Campo Grande – MS, sendo elas: Progemix Resilix, Ambiental Solutions e a Econstrur. Através de visita aos locais e inspeção visual dos produtos oriundos da reciclagem optou-se por utilizar os materiais da empresa Econstrur, pois possuem características mais uniformes, menos contaminados devido ao processo de triagem e separação de material contaminante, incluindo fragmentos metálicos e também com maior predominância de materiais derivados de concreto, o que induz a uma maior resistência quando comparado aos que contenham maior quantidade de produtos cerâmicos (tijolos, telhas, etc.). Em virtude da grande rotatividade e das inúmeras fontes, evidencia-se a impossibilidade de obtenção de materiais uniformes, de modo que esta pesquisa busca avaliar inicialmente a razoabilidade do uso de reciclados. De todo modo, quesitos básicos (Classe A) devem ser atendidos, como a ausência de madeiras, vidros, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas, papéis e quaisquer materiais orgânicos ou não inertes.

### 2.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para que venha se estabelecer como uma possibilidade ambientalmente segura, o produto resultante dos processos de beneficiamento e/ou reciclagem de RCD deve

abranjer conhecimentos multidisciplinares durante o processo de pesquisa e desenvolvimento. Deste modo, pensando na inclusão destes materiais reciclados na cadeia produtiva da Engenharia Civil, é necessário adotar uma metodologia que reúna e vincule os conceitos e métodos substanciais para o desenvolvimento das diferentes atividades, buscando por aplicações em que suas particularidades não causem prejuízo ao empreendimento (ZORDAN, 2002; ÂNGULO, ZORDAN e JOHN, 2022). O programa experimental desta pesquisa estabeleceu diretrizes baseadas em normativas vigentes em conformidade com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para a mistura de solo-agregado para estabilização granulométrica de solos e misturas asfálticas usinadas a quente com o objetivo de aplicação, respectivamente, em camadas de base e rolamento de pavimentos. Ainda, buscou-se determinar as características físicas e propriedades mecânicas de dosagens constituídas de agregados naturais (AN) e agregados reciclados mistos (ARM) em diferentes proporções por meio de ensaios laboratoriais comumente aplicados em pesquisas associadas a aplicação de materiais convencionais de pavimentação.

Salienta-se que o agregado reciclado (AR) é o produto resultante de materiais que já cumpriram seu uso primário na cadeia produtiva, portanto, frequentemente estes apresentarão limitações quanto a sua qualidade e aplicabilidade. Deste modo, os procedimentos e ensaios previstos para o desenvolvimento de pavimentos com AN, em alguns casos, não serão convenientes ou propícios, devendo buscar o aprimoramento para melhor representatividade do comportamento do AR (SHERWOORD, 1997; ZORDAN, 2002; MOTTA, 2005).

## 2.1.1 MATERIAIS

### 2.1.1.1 AGREGADO NATURAL (AN)

Foram coletadas amostras significativas de agregado natural (NA), aproximadamente 1,5 tonelada, distribuídos nas frações 5/8", 3/8", 3/16" e areia. Os agregados são de origem basáltica e provenientes da pedreira Mineração Campo Grande (MCG), localizada na cidade de Campo Grande/MS. Ainda, salienta-se que estes estavam

dispostos em baias e separados por tipo de material, conforme a Figura 10, preservando a granulometria e reduzindo a possibilidade de contaminação em decorrência de intempéries.

Figura 10 - Disposição dos agregados naturais (NA)



Fonte: MCG

#### 2.1.1.2 AGREGADO RECICLADO MISTO (ARM)

Os materiais reciclados foram coletados da usina recicladora Econstru, localizada na cidade de Campo Grande/MS. As amostras, distribuídas nas frações 5/8", 3/8" e 3/16", totalizaram aproximadamente 1,8 tonelada. Ainda, verificou-se que sua composição era constituída, principalmente, por materiais cerâmicos e cimentícios, deste modo, foram enquadradas na classe ARM, conforme as especificações da NBR 15116 (ABNT, 2021).

O sistema de britagem adotado pela empresa é por britador de mandíbula, com produção de 40 m<sup>3</sup> por hora. Ademais, é oportuno destacar que a triagem dos materiais era realizada em duas etapas, antes e após o beneficiamento, com o objetivo de eliminar a presença de materiais indesejados, como plástico, metais, madeira, vidro etc. Acerca da disposição, diferentemente dos AN, os AR estavam dispostos ao ar

livre, sem a presença de estruturas de ou mecanismos de proteção, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 11 – Disposição dos agregados reciclados mistos (ARM)



Fonte: Autor

### 2.1.1.3 SOLO

Para a elaboração das dosagens de solo-agregado foram utilizados dois tipos de solo, que foram denominados, de modo a simplificar a identificação dos materiais, de aterro natural (ATN) e aterro reciclado (ATR).

A coleta de ATN se deu em um único dia, retirando-se amostras significativas em três pontos distintos da pilha, conforme apresentado na Figura 10. Ainda, cabe ressaltar que o solo foi retirado de um loteamento localizado na cidade de Campo Grande/MS.

Figura 12 – Coleta do aterro natural (ATN)



Fonte: Autor

Em contrapartida, necessitou-se realizar a coleta de aterro reciclado em dois dias diferentes, devido a pequena quantidade de material presente no primeiro dia. Ainda, o material foi cedido pela mesma recicladora dos ARM, isto é, o solo coletado é obtido, também, através do beneficiamento dos entulhos da construção civil.

#### 2.1.1.4 COLETA, PREPARAÇÃO E REDUÇÃO DAS AMOSTRAS

A coleta dos agregados e solos seguiu as diretrizes da Norma DNER-PRO 120/97, a qual determina o processo de coleta de agregados graúdos e miúdos com o propósito de apresentar um resultado que mais se adeque com as reais características do material em análise. Deste modo, os materiais foram acondicionados em sacos de nylon com capacidade para 50kg e transportados para o Laboratório de Transportes – LATRAN, localizado na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Ainda, cabe ressaltar que o planejamento de coleta foi idealizado para que esta pudesse ser realizada em um único dia para evitar a possibilidade de variabilidade da composição e mudanças na distribuição granulométrica (MOTTA, 2005), entretanto, este não se fez possível devido aos imprevistos laboratoriais, que demandaram maiores quantidades de material, e baixa disponibilidade de reciclados no local.

Posteriormente ao processo de coleta, as amostras foram submetidas a secagem prévia em estufa a 60°C, conforme especificado pela Norma DNER-ME 041/94, para retirada do excesso de umidade. Para isto, os materiais foram bandejados e colocados em estufas com controle de temperatura, permanecendo sob esta condição até a constância de massa. Em seguida, em consonância com a Norma DNER-PRO 199/96 – Método A, realizou-se a redução do material com auxílio do separador mecânico. O material foi distribuído integralmente ao longo do separador, permitindo a passagem pelas calhas e, então, separado em duas partes nos respectivos recipientes.

## 2.2 CAMADA DE BASE

Os solos são materiais resultantes de ações intempéricas de rochas por decomposição química ou desintegração física. Contextualizando dentro dos aspectos da pavimentação, estes podem ser usados para a composição de camadas granulares, tais como: subleito, sub-base, base e revestimento primário (DNIT, 2010). Em alguns casos, os solos *in natura* não apresentarão propriedades adequadas ou mínimas para o cumprimento das especificações de projeto. Deste modo, a estabilização granulométrica de solos apresenta-se como uma solução para a problemática apresentada, sendo a técnica de estabilização física a mais utilizada para a construção de pavimentos. Em termos rápidos, este método é estabelecido a partir de duas proposições: o rearranjo das partículas mediante a aplicação de energia de compactação adequada e a adição e/ou retirada de partículas para ajuste da curva granulométrica (ORIOLI, 2018).

Na estabilização granulométrica as misturas podem ser constituídas por solos naturais, mistura de solos ou mistura de solos com britados, que são popularmente denominadas de misturas solo-agregado. Ainda, cabe ressaltar que o principal objetivo deste tipo de manobra é a obtenção de um material bem graduado e com controle adequado das porcentagens de finos, aumentando a longevidade e qualidade dos pavimentos (ORIOLI, 2018).

Atualmente, o emprego de materiais alternativos como mecanismo de estabilização de solos tem se tornado uma prática comum, apresentando resultados satisfatórios quanto a durabilidade, resistindo as cargas de tráfego e intempéries, e estabilidade de

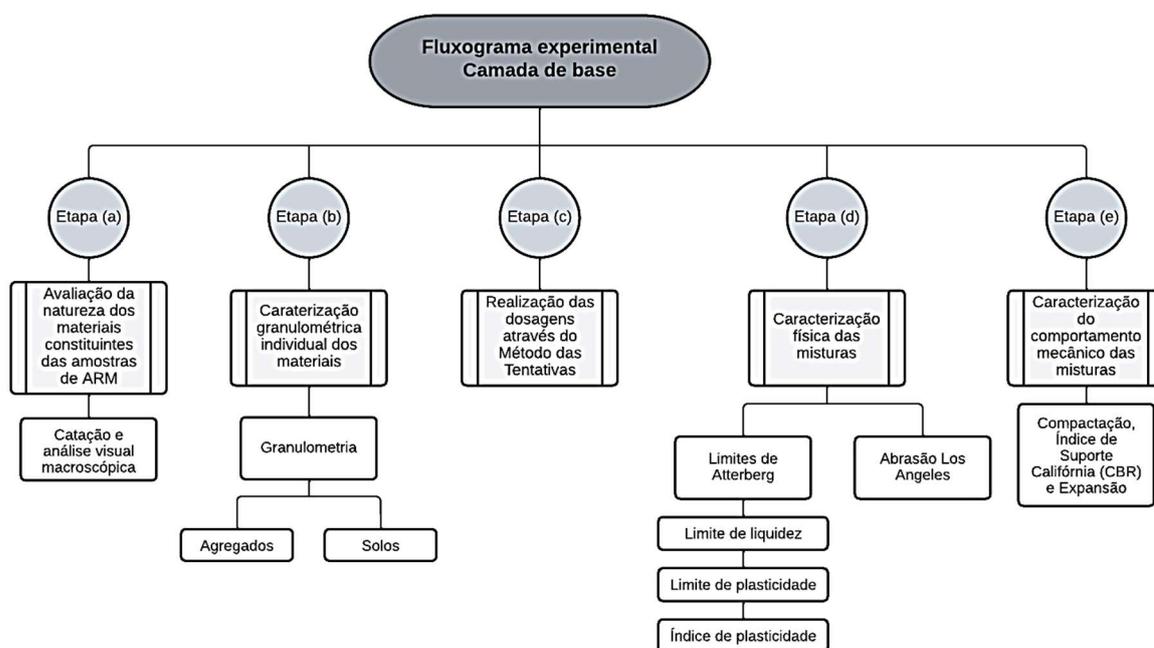
pavimentos (BODI, BRITO e ALMEIDA, 1995; PINTO, 1999; HERRADOR et al., 2012; ORIOLI, 2018).

Deste modo, os ensaios adotados para a avaliação do emprego de misturas de solo-agregado em camadas de base com substituição parcial e/ou total de AN por ARM foram regulamentados pela Norma DNIT 141/2010 – ES, que estabelece diretrizes e critérios de aceitabilidade a serem adotadas na execução deste pavimento.

### 2.2.1 CRONOGRAMA EXPERIMENTAL

O cronograma experimental dos ensaios para camada de base desta pesquisa, em resumo, pode ser descrito pelas etapas: (a) avaliação da natureza dos materiais constituintes das amostras de ARM; (b) caracterização granulométrica individual dos materiais; (c) realização das dosagens através do Método das Tentativas; (d) caracterização física das misturas e; (e) caracterização do comportamento mecânico das misturas. A Figura 11 apresenta um fluxograma ilustrativo do panorama geral dos ensaios. E, de modo a complementar, a Tabela 9 identifica os quantitativos e normas utilizadas para o desenvolvimento da metodologia apresentada.

Figura 13 - Fluxograma experimental da camada de base



Fonte: Autor

Tabela 9 - Etapas experimentais da camada de base

Etapas	Ensaio	Quantitativos			Normas
		Individual	Descrição	Total	
(a)	Natureza dos materiais constituintes das amostras de ARM	3	Graduação: 5/8" (ARM) Graduação: 3/8" (ARM)	6	-
(b)	Análise granulométrica por peneiramento mecânico	3	Graduação: 5/8" (AN) Graduação: 3/8" (AN) Graduação: 3/16" (AN) Graduação: 5/8" (ARM) Graduação: 3/8" (ARM) Graduação: 3/16" (ARM) Aterro natural (ATN) Aterro reciclado (ATR) Material: areia	27	DNIT 412/2019-ME (Agregados)  DNER-ME 080/94 (Solos)
(c)	Método das Tentativas	1	Dosagens	5	-
(d)	Limite de liquidez	1	Dosagem 01 Dosagem 02 Dosagem 03 Dosagem 04 Dosagem 05	5	ABNT NBR 6459:2016
	Limite de plasticidade	1	Dosagem 01 Dosagem 02 Dosagem 03 Dosagem 04 Dosagem 05	5	ABNT NBR 7180:2016
	Índice de plasticidade	1	Dosagem 01 Dosagem 02 Dosagem 03 Dosagem 04 Dosagem 05	5	ABNT NBR 7180:2016
	Abrasão Los Angeles	1	Dosagem 01 Dosagem 02 Dosagem 03 Dosagem 04 Dosagem 05	5	DNER-ME 035/98
(e)	Compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão	1	Dosagem 01 Dosagem 02 Dosagem 03 Dosagem 04 Dosagem 05	5	DNIT 164/2013-ES (Compactação)  DNIT 172/2016-ME (CBR e expansão)

Fonte: Autor

## 2.2.2 ENSAIOS

### 2.2.2.1 NATUREZA DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DOS ARM

Devido a composição heterogênea dos agregados reciclados mistos (ARM), torna-se necessária a realização de um estudo mais detalhado acerca da composição deste material, a fim de determinar o comportamento físico e mecânico quando aplicados em empreendimentos comuns (MOTTA, 2005; ÂNGULO, ZORDAN e JOHN, 2022). Deste modo, esta pesquisa buscou avaliar a natureza dos materiais constituintes das amostras de ARM por meio de catação e análise visual macroscópica.

Inicialmente, foram estabelecidos os grupos para separação dos grãos, sendo eles: (a) cimentícios; (b) cerâmicas; (c) piso/azulejo; (d) materiais indesejados e; (e) material fino. Em seguida, foram separadas três amostras contendo aproximadamente 2kg da fração 5/8" e, similarmente, mais três amostras da fração 3/8" com 1kg, que passaram por análise visual e, através da catação manual, realizou-se a separação do material conforme as classes supracitadas. Posteriormente, efetuou-se a pesagem das frações obtidas, de modo a obter suas porcentagens individuais correspondentes.

### 2.2.2.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO MECÂNICO

O conhecimento da graduação do agregado, retratado pela curva de distribuição granulométrica, é a primeira etapa para obtenção da proporcionalidade da dosagem. Além disto, este parâmetro, quando bem definido e caracterizado, garante a estabilidade de pavimentos em decorrência do maior entrosamento entre as partículas graúda e miúda (MOTTA, 2005; DNIT, 2019).

Bazuco (1999) indica que a determinação do comportamento granulométrico do AR e AN deve seguir as mesmas diretrizes, apontando a obtenção de módulo de finura um pouco maior para o primeiro. Deste modo, os agregados utilizados nesta pesquisa foram submetidos a análise individual por peneiramento mecânico seguindo as normativas do DNIT 412/2019-ME. Em síntese, foram separadas três amostras para cada agregado, de modo a atingir a massa mínima previamente determinada a partir do tamanho máximo de cada material. Em seguida, estas foram transferidas,

individualmente, para a série de peneiras padronizadas de malha quadrada, conforme a Tabela 10, e iniciou-se o peneiramento com agitador mecânico. Ao término do período, determinou-se os percentuais de massa retido, acumulado e passante de cada peneira, determinando, por fim, a curva granulométrica de cada agregado.

Tabela 10 - Conjunto de peneiras para análise granulométrica dos agregados

Série N°	Diâmetro Ø
2"	50,0 mm
1 1/2"	37,5 mm
1"	25,0 mm
3/4"	19,0 mm
1/2"	12,5 mm
3/8"	9,5 mm
1/4"	6,3 mm
N° 4	4,75 mm
N° 8	2,36 mm
N° 10	2,00 mm
N° 16	1,18 mm
N° 30	0,60 mm
N° 40	0,425 mm
N° 50	0,30 mm
N° 100	0,15 mm
N° 200	0,075 mm

Fonte: DNIT (2019)

Ainda, para a análise da composição granulométrica dos solos utilizou-se os métodos preconizados pelo DNER-ME 080/94. Deste modo, foram separadas três amostras de cada aterro, com massa aproximada de 2000g, considerando que, por análise tátil, estes foram classificados com aspecto arenoso. Foram retiradas três porções de cada amostra para determinação da umidade higroscópica e, individualmente, estas foram transferidas para o conjunto de peneiras padronizadas de malha quadrada. Similarmente ao processo de granulometria dos agregados, após o término do peneiramento mecânico determinou-se os percentuais de massa retido, acumulado e passante de cada peneira, possibilitando a construção gráfica da curva granulométrica. Salienta-se que, em conformidade com as diretrizes da Norma (DNER, 1994), a umidade não foi considerada nas frações de solo acima de 2,0 mm.

### 2.2.2.3 COMPOSIÇÃO DAS DOSAGENS DE SOLO-AGREGADO

Para a composição das dosagens, realizou-se a ponderação do quantitativo de cada material através do Método das Tentativas. Deste modo, por meio de interações de

tentativa e erro, de modo empírico, foi possível determinar o traçado das curvas limites, tanto inferior quanto superior, sobre a curva granulométrica, atendendo os parâmetros indicados pela faixa adotada. Ademais, Leite et al. (2020) indicam que os percentuais de massa passante (a, b e c), consonante com as quantidades dos materiais (X, Y e Z), podem ser calculados a partir da Equação 1.

$$\%P_i = a_iX + b_iY + c_iZ \quad (1)$$

Onde:

$\%P_i$  = Porcentagem total de massa passante na peneira  $P_i$ ;

$a_i, b_i$  e  $c_i$  = Porcentagens de massa passante na peneira  $P_i$ ;

$X, Y$  e  $Z$  = Porcentagens dos materiais.

Para Leite et al. (2020), o Método das Tentativas, em uma parcela significativa dos casos, não apresentará a melhor composição possível, deste modo, atribui-se a responsabilidade ao profissional experiente, que deve procurar obter a melhor combinação possível dos materiais envolvidos. Entre outros aspectos negativos, os autores indicam que a falta de controle sistemático durante o processo de peneiramento das frações comercializadas resulta em granulometrias não confiáveis, assim dizendo, uma partícula com mesmo diâmetro pode ser encontrada em diferentes graduações. Entretanto, deve-se destacar que, mesmo com o processo não apresentando confiabilidade em seus resultados, ainda é uma metodologia amplamente utilizada em âmbito nacional.

A partir da análise prévia do comportamento granulométrico dos materiais, adotou-se as especificações previstas pela faixa D da Norma DNIT 141/2010-ES. A Tabela 11 abaixo apresenta as porcentagens de massa passante aceitáveis para a composição granulométrica da faixa, bem como suas respectivas tolerâncias.

Tabela 11 - Composição granulométrica da faixa D

Peneiras	Faixa D	
	% Massa passante	Tolerância
1"	100	± 7
3/8"	60 – 100	± 7
Nº 4	50 – 85	± 5
Nº 10	40 – 70	± 5
Nº 40	25 – 45	± 2
Nº 200	10 – 25	± 2

Fonte: DNIT (2010)

Neste estudo foram realizadas cinco dosagens, iniciando-se pela mistura, exclusiva, de materiais naturais. O incremento de ARM e ATR foi realizado de forma gradual até integrarem 100% da composição. Ainda, ressalta-se que devido a impossibilidade de obter outro insumo com propriedades idênticas à da areia natural com potencial de reutilização, utilizou-se este agregado semelhantemente nas dosagens recicláveis, sendo considerado como elemento neutro. Buscando a conformidade com os limites da faixa adotada, as proporções de cada material, por dosagem, estão apresentados na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 - Proporção de material por dosagem

Materiais	Dosagem					
	01	02	03	04	05	
<b>Natural</b>	Aterro	37,0%	13,0%	13,0%	5,0%	-
	5/8"	9,0%	9,0%	8,0%	2,0%	-
	3/8"	40,0%	14,0%	9,0%	4,0%	-
	3/16"	10,0%	27,0%	17,0%	19,0%	-
<b>Neutro</b>	Areia	4,0%	7,0%	6,0%	7,0%	7,0%
<b>Reciclado</b>	Aterro	-	13,0%	13,0%	22,0%	30,0%
	5/8"	-	6,0%	8,0%	13,0%	12,0%
	3/8"	-	4,0%	9,0%	10,0%	23,0%
	3/16"	-	7,0%	17,0%	18,0%	28,0%
<b>TOTAL</b>		100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Autor

Deste modo, após a determinação das dosagens, bem como o percentual de material passante por peneira e suas respectivas tolerâncias, os agregados retidos na peneira N° 10 foram submetidos a análise visual com a finalidade de determinar os aspectos de suas partículas, que devem ser “duras e resistentes, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, e isentos de matéria vegetal ou outra substância prejudicial” (DNIT, 2010). Ainda, verificou-se o percentual de material que passa da peneira N° 200, que não deve apresentar valor superior a 2/3 do montante passante na peneira N° 40.

## 2.2.2.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS MISTURAS

### 2.2.2.4.1 LIMITES DE ATTERBERG

De acordo Souza, Rafull e Vieira (2000), o estudo e caracterização da consistência do solo proporciona segurança para as obras de Engenharia, uma vez que, deste modo, é possível prever o comportamento destes perante a aplicação de determinadas tensões e deformações. Ademais, os autores ressaltam a importância dos estudos geotécnicos para fins relacionados a fundações, estruturas para armazenamento e retenção de água e construção de estradas.

Em síntese, o comportamento do solo, conforme a variação do teor de umidade, pode ser classificado em quatro estados, sendo eles: sólido, semissólido, plástico e líquido. Deste modo, o geólogo Albert Mauritz Atterberg dedicou-se ao estudo comportamental de solos e, em meados da década de 1910, propôs indicadores que relacionassem as propriedades e forças físicas envolvidas em problemas relacionados ao preparo do solo, denominando-os de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). Ainda, depois de determinados estes parâmetros, conhecidos popularmente por Limites de Atterberg, é possível determinar o índice de plasticidade do solo (IP), sendo obtido através da diferença entre LL e LP (DAS e SOBHAN, 2015).

a) Limite de liquidez (LL)

Em linhas gerais, o LL pode ser utilizado como indicador de permeabilidade do solo, sendo definido como o menor teor de umidade com que a amostra é capaz de fluir (SOUZA, RAFULL e VIEIRA, 2000; ALMEIDA, 2005). Deste modo, para a determinação deste parâmetro foram seguidas as diretrizes da NBR 6459 (ABNT, 2016), cujo método é preconizado a partir do uso da concha de Casagrande.

Conforme as especificações da Norma (ABNT, 2016), é tomada aproximadamente 100g de material passante da peneira N° 40, que é submetido a pequenas adições de água destilada para a formação de uma massa plástica. Logo após, essa mistura é transferida para a concha de Casagrande, devendo apresentar uma ranhura em sua parte central. Deste modo, inicia-se a sequência de golpes contra a base, devendo ser suspensas logo após as bordas inferiores da ranhura se unirem ao longo de 13 mm de comprimento, aproximadamente. Em sequência, é retirada uma pequena quantidade de material para determinação da umidade higroscópica. Após a validação dos pontos obtidos durante o ensaio, estes serão utilizados para a construção do gráfico semilogarítmico, no qual as ordenadas, em escala logarítmica, corresponderão

aos números de golpes e as abscissas, em escala aritmética, os teores de umidade. O resultado final será a umidade correspondente ao número de golpes igual a 25. Ainda, salienta-se que na impossibilidade de atingir a abertura da ranhura ou o fechamento com mais de 25 golpes, deve-se considerar a amostra como não líquida (NL).

Nesta pesquisa determinou-se o valor do LL para as cinco dosagens realizadas, realizando a verificação conforme a normativa vigente para a camada de base, que estabelece valor igual ou inferior a 25% (DNIT, 2010).

#### b) Limite de plasticidade (LP)

O limite de plasticidade (LP) refere-se ao teor de umidade transitório em que ocorre a mudança de consistência do solo, passando do estado plástico para o semissólido. Em termos laboratoriais, o teor de umidade é caracterizado pelo início da impossibilidade de moldagem cilíndrica da amostra de solo, apresentando fraturas ao longo do processo (ALMEIDA, 2005; OLIVEIRA, 2016).

Preconizado pela NBR 7180 (ABNT, 2016), o ensaio é realizado com aproximadamente 100g de materiais passantes da peneira N° 40, que são submetidos a pequenos incrementos de água destilada, de forma a obter uma pasta homogênea com consistência plástica. Em seguida, forma-se uma pequena bola com aproximadamente 10g e, exercendo pressão suficiente com a palma da mão, rola-se essa amostra sobre a placa de vidro com o objetivo de obter uma forma cilíndrica. Deste modo, deve ser possível obter um cilindro com diâmetro de 3 mm e, em casos em que houver fragmentação extemporânea, retorna-se a amostra a cápsula de porcelana e procede-se como descrito anteriormente. Para obtenção dos teores individuais, retiram-se pequenas porções de amostra que atingiram o diâmetro especificado e alcançaram comprimento de 100 mm. O resultado final é dado pela média aritmética de três valores de umidade considerados satisfatórios. Ainda, na impossibilidade de obtenção do cilindro conforme as especificações, deve-se considerar a amostra como não plástica (NP).

Para cada dosagem adotada, determinou-se o LP em conformidade com a metodologia de ensaio supracitada, entretanto, salienta-se que a Norma DNIT 141/2010-ES não estabelece critérios de aceitabilidade para este parâmetro.

c) Índice de plasticidade (IP)

O índice de plasticidade (IP) pode ser definido como a quantidade de água necessária para o solo transitar do estado plástico ao líquido, isto é, ele define a zona em que a amostra se encontra no estado plástico (CAPUTO, 1987). Ainda, determina-se este parâmetro a partir da diferença entre os limites de liquidez e plasticidade, conforme a Equação 2.

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

Onde:

IP = Índice de plasticidade;

LL = Limite de liquidez;

LP = Limite de plasticidade.

Atterberg comprovou que solos de caráter argilosos possuem comportamento mais plástico, obtendo valores de IP mais altos. Ademais, observou-se que o vínculo superficial das partículas de argila em relação ao seu volume e o número de moléculas de água absorvidas são condições diretamente proporcionais, que resultam, também, na elevação dos limites de Atterberg (SOUZA, RAFULL e VIEIRA, 2000). Ainda, Caputo (1987) indica que porcentagens mínimas de matéria orgânica podem elevar o valor do LP sem causar alteração no LL, deste modo, resultando em baixos valores de IP.

Para a determinação do IP das dosagens, adotou-se as especificações da NBR 7180 (ABNT, 2016), considerando que na impossibilidade de determinação do LL ou LP, anotou-se o IP como não plástico (NP), isto é, IP nulo. Ademais, o critério de aceitabilidade para este parâmetro, em conformidade com o DNIT 141/2010-ES, prevê valores iguais ou inferiores a 6%.

#### 2.2.2.4.2 EQUIVALENTE DE AREIA (EA)

Para fins de pavimentação, os agregados utilizados devem ser livres de impurezas e materiais indesejados, que podem causar a retração e inchamento do pavimento (OLIVEIRA, 2016). Uma forma de avaliar esta condicionante é a realização do ensaio de equivalente de areia (EA), que verifica, entre outros aspectos, a presença de material plástico na amostra miúda.

Consonante as diretrizes da Norma DNER-ME 054/97, o EA é obtido através de ensaio laboratorial com amostras de solos ou de agregados miúdos passantes da peneira 4,8 mm, que são submetidas a uma solução concentrada e mantidas em repouso por 10 minutos. Posteriormente, o conjunto é agitado por, aproximadamente, 90 ciclos/30 segundos e, imediatamente após, a proveta deve ser completada com solução até o nível de referência, permanecendo em repouso por 20 minutos. Deste modo, a expressão do resultado individual é dada pela razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa da amostragem. Ainda, a Norma especifica que o resultado, em porcentagem, deve ser obtido através da média aritmética de três determinações.

Para as dosagens adotadas, não se fez necessária a realização deste ensaio, visto que o LL e o IP não ultrapassaram, respectivamente, os valores de 25% e 6%, conforme especificado por Norma (DNIT, 2010).

#### 2.2.2.4.3 ABRASÃO LOS ANGELES

As propriedades relacionadas a resistência à degradação dos agregados, que também se associam as características de abrasão e quebra, podem ser estimadas quando estes são submetidos aos processos construtivos do pavimento, antes do início da vida útil da estrutura (BESSA, BRANCO e SOARES, 2011). Ainda, o tráfego intenso das vias e os movimentos mútuos das diversas partículas do esqueleto mineral são aspectos que influem diretamente na determinação deste parâmetro, uma vez que o desgaste sofrido pelo agregado passa a ser maior (DIAS, 2004; MOTTA, 2005).

Atualmente, o ensaio de abrasão Los Angeles, normatizado pelo DNER-ME 035/98, é o método mais conhecido e utilizado dentre os laboratórios para a avaliação da resistência do agregado à abrasão e à dureza (KANDHAL e PARKER, 1998; BESSA, BRANCO e SOARES, 2011). Inicialmente, a partir do conhecimento prévio da granulometria do material a ser ensaiado, define-se a graduação conforme as especificações apresentadas na Tabela 13. Deste modo, transfere-se a amostra de agregado para a máquina “Los Angeles”, e adiciona-se a carga abrasiva (esferas de aço) correspondente. O tambor é submetido a um determinado número de rotações,

mantendo a velocidade de 30 a 33 rpm. O resultado é convencionalmente expresso pela porcentagem, em peso, do material passante, após o ensaio, da peneira de malha quadrada N° 12.

Tabela 13 - Graduação para o ensaio de abrasão Los Angeles

Peneiras		Amostra – massa parcial em gramas						
Abertura em mm		Graduação						
Passante	Retido	A	B	C	D	E	F	G
76	63	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500 ± 50	5000 ± 50	-
50	38	-	-	-	-	5000 ± 50	5000 ± 25	5000 ± 25
38	25	1250 ± 25	-	-	-	-	-	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	-	-	-	-	-	-
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000 ± 10	-	-	-
Massas totais (g)			5000 ± 10			10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Número de rotações			500			1000		
Número de esferas			12	11	8	6	12	
Massa de carga (g)			5000 ± 25	4584 ± 25	3330 ± 20	2500 ± 15	5000 ± 25	

Fonte: DNER (1998)

Nesta pesquisa, este experimento foi realizado para cada dosagem realizada e seguiu as especificações da graduação B da Norma (DNER, 1998). Ademais, salienta-se que o desgaste obtido não deve ser superior a 55%, admitindo valor superior quando este apresentar, em utilização anterior, desempenho satisfatório (DNIT, 2010).

## 2.2.2.5 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS

### 2.2.2.5.1 COMPACTAÇÃO, ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC) E EXPANSÃO

Precedentemente à etapa de caracterização do comportamento mecânico, foram determinadas para cada dosagem a umidade ótima e a massa específica aparente máxima através do ensaio de compactação. Caputo (1987) explica que o processo de compactar, por processo manual ou mecânico, está relacionado a redução do volume de seus vazios, aumentando a resistência, permeabilidade, compressibilidade e estabilidade dos pavimentos.

Deste modo, seguindo as especificações do Método C da Norma DNIT 164/2013-ES, preparou-se cinco amostras com massa aproximada de 7kg, que foram submetidas a adições crescentes de água e envoltos com o objetivo de obter um material homogêneo. Após a compactação dos corpos de prova, são determinados seus respectivos valores de umidade e massa específica aparente seca, permitindo, portanto, a construção gráfica da curva de compactação de cada amostra, cuja umidade ótima e a massa específica aparente máxima são os valores máximos encontrados, respectivamente, no eixo da abscissa e ordenada.

O ensaio California Bearing Ratio (CBR), por tradução Índice de Suporte Califórnia (ISC), foi desenvolvido em 1929 pelo engenheiro O. J. Porter, diretor da Divisão de Materiais do Califórnia Highway Department, e tinha como objetivo inicial estimar a capacidade de suporte de solos para a utilização em camadas granulares de pavimento (CAPUTO, 1987; SILVA et al., 2017). Atualmente, o ensaio de CBR determina não somente a resistência dos materiais granulares, como também a expansão das amostras na presença de água, podendo ser realizado duas formas: utilizando os corpos de prova já moldados no ensaio de compactação, que apresentam teores crescentes de umidade, ou moldando-se um novo corpo de prova com o teor ótimo, obtido previamente no ensaio de compactação (FONTES, NEPOMUCENO e BATISTA, 2017).

Deste modo, seguindo as diretrizes da Norma DNIT 172/2016-ME, os moldes dos corpos de prova, previamente moldados em conformidade com os processos supracitados, foram submetidos a adaptações para colocação do extensômetro e, posteriormente, imersos em água durante o prazo de 96h para determinação da expansão. Após o período, estes foram retirados e submetidos ao ensaio de penetração na prensa, obtendo as leituras em função da penetração do pistão no solo e do tempo. Os dados foram lançados no mesmo gráfico da curva de compactação, registrando-se, em escala adequada, sobre o eixo das ordenadas, os valores de ISC e expansão, tendo seu resultado final obtido através do correspondente à umidade ótima.

Em concordância com o DNIT 141/2010-ES, o valor de ISC do solo deve ser igual ou superior a 60% e 80% para, respectivamente,  $N \leq 5 \times 10^6$  e  $N > 5 \times 10^6$ . Ainda, a

expansão deve representar máxima de 0,5% para atendimento dos critérios de aceitabilidade.

### 2.3 CAMADA DE ROLAMENTO

Bernucci et al. (2008) indicam que, no Brasil, os projetos de revestimento com especificações de espessura superior a 80mm são comumente subdivididos em duas camadas, para fins de execução. A camada de rolamento, ou apenas “capa”, é o revestimento superior da estrutura, responsável por absorver os impactos da ação do tráfego, visto que esta permanece em contato direto com os pneus dos veículos; e, logo abaixo, encontra-se o *binder*, também denominada de camada de ligação, objetivado em promover a boa aderência entre a camada de rolamento e a base. Os autores ressaltaram que existem diferenças significativas nos parâmetros e critérios de projeto para as duas camadas, uma vez que as misturas asfálticas da capa de rolamento requerem uma restrição mais rigorosa em relação ao volume de vazios para garantir a impermeabilidade do pavimento, enquanto na camada de ligação as normativas vigentes permitem um intervalo um pouco maior para reduzir o teor de ligante, promovendo uma considerável economia na produção da mistura asfáltica.

As misturas asfálticas são produzidas em usinas estacionárias, combinando frações variadas de agregados com o ligante asfáltico, em proporções adequadas, obtendo a homogeneização do conjunto a partir do processo de envolvimento dos materiais sob temperaturas adequadas. Estas, por sua vez, podem ser usinadas a quente, dando origem ao tradicional concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), considerado a categoria de mistura asfáltica mais utilizada em escala nacional (BERNUCCI et al., 2008). Embora o pavimento confeccionado a partir deste método apresente menor vida útil e a necessidade de intervenções sucessivas, este pode ser considerado como o mais nobre da categoria devido a rigorosidade do controle de especificações das normativas vigentes (SENÇO, 2007; AZEVEDO, 2018; RAMOS e SAVI; 2022).

Pesquisas relacionadas à utilização de RCD reciclados na pavimentação apontam resultados promissores, uma vez que os pavimentos confeccionados com estes insumos apresentaram capacidade de suporte equivalente aos tradicionais, sobretudo utilizando menor quantidade de agregados. Além disso, quando testados de acordo

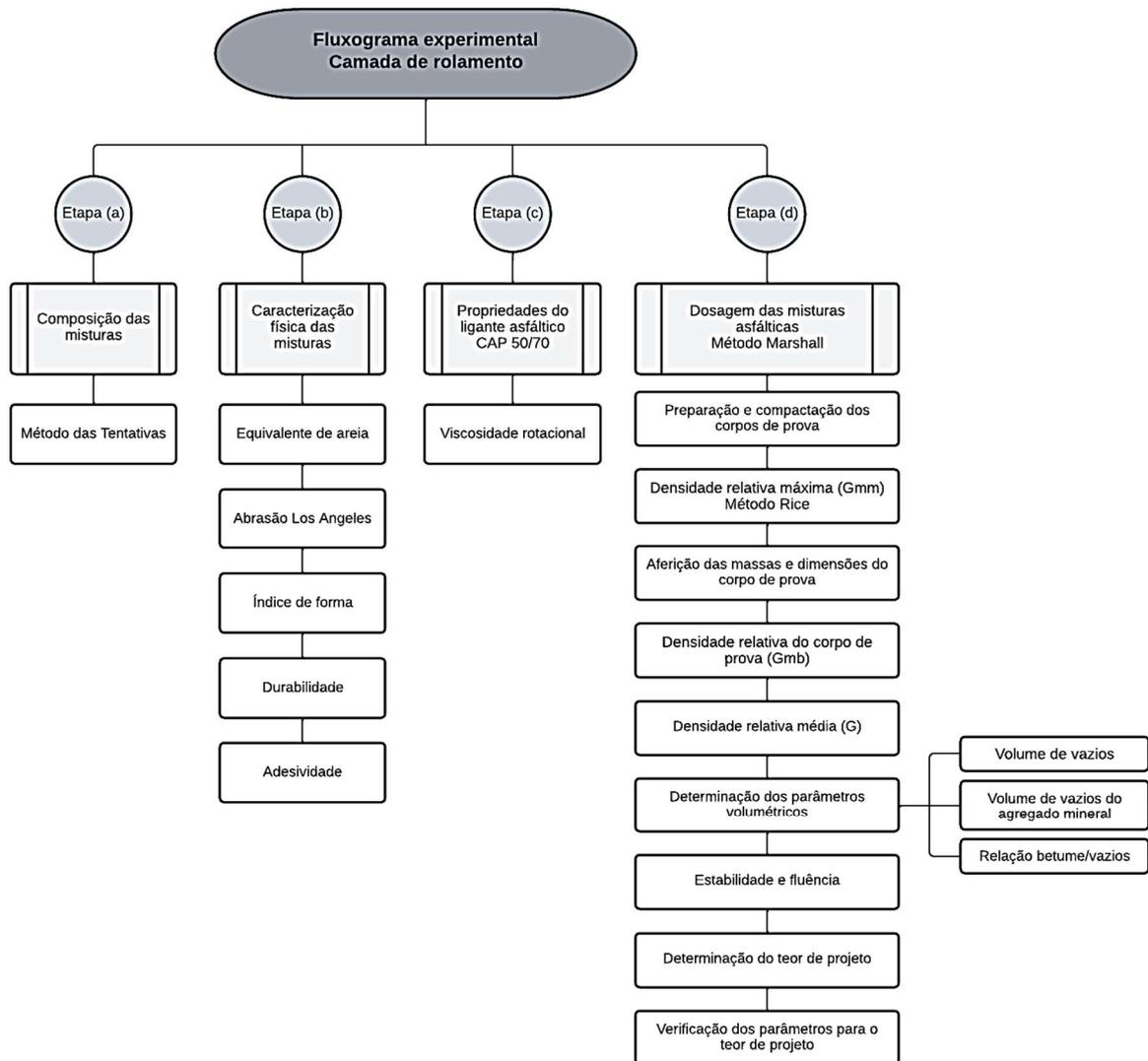
com as especificações das Normas regulamentadoras, estes pavimentos atenderam aos critérios de aceitabilidade, tornando-os adequados para uso na manutenção de estradas com condições mínimas de tráfego (BODI, BRITO e ALMEIDA, 1995; PINTO, 1999; HERRADOR et al., 2012).

Deste modo, os ensaios adotados para a avaliação do desempenho da camada de rolamento obtida através da substituição parcial e/ou total de AN por ARM foram preconizados pela Norma DNIT 031/2010 – ES, que estabelece diretrizes a serem adotadas na execução de camada de pavimentos flexíveis pela confecção de mistura asfáltica a quente, composta por ligante asfáltico, agregados e, se necessário, material de enchimento (filer).

### 2.3.1 CRONOGRAMA EXPERIMENTAL

Em linhas gerais, o cronograma experimental dos ensaios para camada de rolamento pode ser descrito pelas seguintes etapas: (a) composição das misturas; (b) caracterização física das misturas; (c) propriedades do ligante asfáltico e; (d) dosagem das misturas asfálticas – Método Marshall. Ademais, a Figura 14 apresenta um fluxograma ilustrativo do panorama geral dos ensaios, sendo complementado pela Tabela 14, que identifica, quantifica e informa as Normas utilizadas para o desenvolvimento da metodologia apresentada.

Figura 14 - Fluxograma experimental da camada de rolamento



Fonte: Autor

Tabela 14 - Etapas experimentais da camada de rolamento

Etapas	Ensaio	Quantitativos			Normas
		Individual	Descrição	Total	
(a)	Método das Tentativas	1	Misturas	5	-
	Equivalente de areia (EA)	1	Mistura 01	5	DNER-ME 054/97
			Mistura 02		
			Mistura 03		
			Mistura 04		
			Mistura 05		
	Abrasão Los Angeles	1	Mistura 01	5	DNER-ME 035/98
			Mistura 02		
			Mistura 03		
			Mistura 04		
			Mistura 05		
(b)	Índice de forma (IF)	1	Mistura 01	5	DNIT 424/2020 – ME
			Mistura 02		
			Mistura 03		
			Mistura 04		
			Mistura 05		
	Durabilidade	1	Mistura 01	5	DNER-ME 089/94
			Mistura 02		
			Mistura 03		
			Mistura 04		
			Mistura 05		
	Adesividade	1	Mistura 01	5	DNER-ME 078/94
			Mistura 02		
			Mistura 03		
			Mistura 04		
			Mistura 05		
(c)	Viscosidade rotacional	3	Por temperatura	9	ABNT NBR 15184:2021
	Obs.: Foram ensaiadas réplicas (03) para uma mesma temperatura. Como a Normativa prevê o ensaio em três temperaturas diferentes, totalizaram-se 9 resultados individuais.				
	Preparação dos corpos de prova	18	Mistura 01	90	DNIT 178/2018 – ME
			Mistura 02		
			Mistura 03		
			Mistura 04		
			Mistura 05		
	Obs.: Foram preparados 3 corpos de prova para cada dosagem de ligante inicial. Posteriormente, para verificação dos parâmetros no teor de projeto, são moldados mais 6 corpos de prova. Deste modo, para cada mistura foram realizados 18 corpos de prova.				
	Densidade relativa máxima ( $G_{mm}$ )	5	Teor de ligante inicial	25	DNIT 427/2020- ME
			+		
	Teor de projeto				
(d)	Obs.: A $G_{mm}$ é calculada para cada teor de ligante inicial estipulado e, posteriormente, para o teor de projeto encontrado. Como são 05 misturas, totalizaram-se 25 ensaios.				
	Densidade relativa do corpo de prova ( $G_{mb}$ )	1	Por corpo de prova	75	DNIT 428/2020 – ME
	Obs.: Não se realiza o cálculo da $G_{mb}$ para o grupo de corpos de prova destinado ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT).				
	Densidade relativa média (G)	2	Mistura 01	10	DNIT 411/2021 – ME
			Mistura 02		
			Mistura 03		
			Mistura 04		
			Mistura 05		
	Obs.: Como todas as misturas são compostas por parcelas miúda e graúda, deve-se realizar os procedimentos das duas Normas especificadas, totalizando 10 ensaios.				

Etapas	Ensaio	Quantitativos			Normas
		Individual	Descrição	Total	
	Parâmetros volumétricos	1	Por corpo de prova	75	
	Obs.: Não se realiza o cálculo dos parâmetros volumétricos para o grupo de corpos de prova destinado ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT)				
	Estabilidade e fluência	1	Por corpo de prova	75	DNER-ME 043/95
	Obs.: Não se realiza o ensaio de estabilidade e fluência para o grupo de corpos de prova destinado ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT).				
(d)	Determinação do teor de projeto	1	Mistura 01	5	
			Mistura 02		
Mistura 03					
Mistura 04					
Mistura 05					
	Resistência à tração por compressão diametral (RT)	3	Mistura 01	15	DNIT 136/2018 – ME
			Mistura 02		
			Mistura 03		
			Mistura 04		
			Mistura 05		

Fonte: Autor

## 2.3.2 ENSAIOS

### 2.3.2.1 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

Com base na análise prévia do comportamento granulométrico dos agregados, obtido conforme os processos descritos na seção 2.2.2.2 deste estudo, foram adotadas as especificações correspondentes à faixa C da Norma DNIT 031/2006 – ES. A Tabela 15 apresenta as porcentagens de material passante aceitáveis para a composição granulométrica da referida faixa, juntamente com suas respectivas tolerâncias.

Tabela 15 - Composição granulométrica da faixa C

Peneiras	Faixa C	
	% Massa passante	Tolerância
3/4"	100	± 7
1/2"	80 – 100	± 7
3/8"	70 – 90	± 7
Nº 4	44 – 72	± 5
Nº 10	22 – 50	± 5
Nº 40	8 – 26	± 5
Nº 80	4 – 16	± 3
Nº 200	2 – 10	± 2

Fonte: DNIT (2006)

Identicamente aos processos descritos para a camada de base, realizou-se a ponderação do quantitativo de cada agregado através do Método das Tentativas, obtendo cinco misturas, cuja primeira é composta exclusivamente por naturais. O incremento ARM foi realizado de forma gradativa até que integrassem 100% do arranjo. Buscando atender aos requisitos da faixa estabelecida, as proporções de cada agregado, por mistura, estão apresentadas na Tabela 16 abaixo. Ademais, ressalta-se que a areia natural se manteve classificada como elemento neutro, sendo utilizada semelhantemente nas misturas recicláveis.

Tabela 16 – Proporção de agregado por mistura

Materiais	Mistura					
	01	02	03	04	05	
Natural	5/8"	15,0%	18,0%	13,0%	5,0%	-
	3/8"	41,0%	28,0%	17,5%	14,5%	-
	3/16"	37,0%	20,0%	14,0%	13,5%	-
Neutro	Areia	7,0%	8,0%	11,0%	11,0%	11,0%
	5/8"	-	4,0%	13,0%	17,0%	23,0%
Reciclado	3/8"	-	12,0%	17,5%	25,0%	33,0%
	3/16"	-	10,0%	14,0%	14,0%	33,0%
<b>TOTAL</b>		100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Autor

Por fim, os agregados miúdos passaram por análise tátil-visual para identificação do aspecto individual de suas partículas, considerando satisfatórias aquelas que se apresentarem resistentes e livres de torrões de argila e de substâncias nocivas (DNIT, 2006).

### 2.3.2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS MISTURAS

#### 2.3.2.2.1 EQUIVALENTE DE AREIA

Similarmente aos procedimentos descritos no item 2.2.2.4.2, o ensaio de equivalente de areia (EA) foi realizado em conformidade com as especificações da Norma DNER-ME 054/97. Acerca do critério de aceitabilidade, os agregados miúdos, passantes da peneira N° 4, devem apresentar-se resistentes, livres de torrões de argila e de substâncias nocivas, com EA mínimo aceitável de 55% (DNIT, 2006).

#### 2.3.2.2.2 ABRASÃO LOS ANGELES

Assim como referido na seção 2.2.2.4.3 deste estudo, o ensaio de abrasão Los Angeles foi executado seguindo as especificações da graduação B, estabelecidas pela Norma DNER-ME 035/98. Em relação ao critério de aceitação, é necessário que os agregados tenham um desgaste máximo de 50%. No entanto, em casos excepcionais, podem ser aceitos valores maiores se o material apresentar um desempenho satisfatório em aplicações anteriores, conforme DNIT (2006).

#### 2.3.2.2.3 ÍNDICE DE FORMA (IF)

Os agregados devem atender a diversos critérios de controle, destacando-se sua classificação quanto à forma. De acordo com o DNIT (2020), este parâmetro remete-se a sua feição exterior, relacionando-se suas dimensões na hora de categorizá-los, podendo ser: alongados, esféricos, cúbicos ou lamelares.

No contexto da pavimentação, misturas asfálticas confeccionadas com partículas lamelares apresentam maior estabilidade em virtude do intertravamento e atrito interno dos agregados, entretanto, tendem a fracionar mais facilmente quanto submetidos a cargas. Deste modo, deve-se optar por formas mais cúbicas, uma vez que estes apresentam melhor trabalhabilidade, isto é, resultam em uma maior compacidade da mistura asfáltica (MOTTA, 2005; RIBEIRO, CORREIA e SEILD, 2007).

Nesta pesquisa determinou-se o índice de forma (IF) das partículas graúdas consoante às especificações da Norma DNIT 424/2020 – ME, adotando o método dos crivos. Acerca dos procedimentos, a partir do conhecimento prévio da composição granulométrica de cada mistura, realiza-se o enquadramento conforme as especificações apresentadas na Tabela 17. Uma vez separadas as frações da amostra e os crivos redutores correspondentes, testa-se as partículas para o primeiro crivo redutor (crivo I), tomando nota do peso da porção retida. Imediatamente após, os passantes são testados para o segundo crivo redutor (crivo II), pesando-se novamente a massa de material retido.

Tabela 17 - Especificações do ensaio de índice de forma (IF) com crivos

Graduação	Crivos de abertura circular (mm)		Peso das frações da amostra (g)	Crivos redutores correspondentes (mm)	
	Passando	Retido		Crivo I	Crivo II
A	76,0	63,5	3000	38,0	25,0
	63,5	50,0	3000	32,0	21,0
	50,0	38,0	3000	25,0	17,0
	38,0	32,0	3000	19,0	12,7
B	32,0	25,0	3000	16,0	10,5
	25,0	19,0	3000	12,7	8,5
	19,0	16,0	3000	9,5	6,3
C	19,0	16,0	2000	9,5	6,3
	16,0	12,7	2000	8,0	5,3
	12,7	9,5	2000	6,3	4,2
D	12,7	9,5	1000	6,3	4,2
	9,5	6,3	1000	4,8	3,2

Fonte: DNIT (2020)

Deste modo, uma vez determinadas as massas retidas no crivo I e II, o IF da amostra pode ser calculado conforme a Equação 3.

$$IF = \frac{P_1 + 0,5P_2}{100n} \quad (3)$$

Onde:

$IF$  = Índice de forma;

$P_1$  = Soma das porcentagens retidas nos crivos I das frações que compõem a graduação;

$P_2$  = Soma das porcentagens retidas nos crivos 2 das frações que compõem a graduação;

$n$  = Número de frações (ou de tamanhos diretrizes) que compõem a graduação escolhida.

O IF é um parâmetro adimensional, cujo intervalo admissível compreende valores de 0 a 1. Valores próximos de 0 indicam formas mais lamelares e, quando próximos de 1, podem ser considerados de ótima cubicidade (BERNUCCI et al., 2008).

Nesta pesquisa, este experimento foi realizado para cada mistura e seguiu as especificações da graduação D da Norma (DNIT, 2020). Ainda, em conformidade com a Norma DNIT 031/2006 – ES, o IF obtido deve ser superior a 0,5.

#### 2.3.2.2.4 DURABILIDADE

Gouveia (2006) indica que os agregados selecionados com o propósito de pavimentação devem ser resistentes de modo a suportar os processos construtivos, bem como ser capaz de transmitir as cargas para as camadas subjacentes do pavimento, após a abertura das vias para o tráfego.

O ensaio de durabilidade, também conhecido por ensaio de sanidade, estima a resistência do agregado ao intemperismo, isto é, mensura à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo. Em linhas gerais, o método busca avaliar a capacidade do agregado de resistir aos efeitos nocivos das intempéries, que envolvem ciclos alternados de molhagem e secagem e, para regiões com invernos rigorosos, períodos de congelamento e descongelamento, sem que ocorra quebra, deterioração ou danos significativos que comprometam a estrutura do pavimento (GOUVEIA, 2006; CARDOSO et al., 2015).

Preconizado pela Norma DNER-ME 089/94, o ensaio de durabilidade prevê a submissão das frações da amostra, previamente separadas a partir da análise granulométrica, a imersão em soluções saturadas de sulfato de sódio ou de magnésio e, em seguida, promove sua secagem em estufa. Este processo é repetido em ciclos, e cada imersão/secagem é chamada de ciclo de sanidade. O desenvolvimento cíclico do ensaio é fundamental para promover que a solução salina penetre nos interstícios das partículas durante o processo de imersão e os sais se cristalizem no interior das partículas durante a secagem (GOUVEIA, 2006). O resultado é expresso como a porcentagem de perda de material após a aplicação de um determinado número de ciclos de sanidade.

Neste estudo, as amostras foram submetidas ao ataque de uma solução padronizada de sulfato de magnésio durante 5 ciclos, com tempo de imersão de 16 horas. Ademais, em conformidade com a Norma DNIT 031/2006 – ES, o valor máximo de perda admitido é de 12%.

#### 2.3.2.2.5 ADESIVIDADE

As misturas de revestimentos asfálticos devem ser constituídas por agregados que apresentem boas condições de adesividade, de modo a garantir que não haja deslocamento da película betuminosa quando em contato com água, uma vez que

estes, em condições insatisfatórias, podem atuar como potenciais catalisadores para o surgimento de patologias no pavimento, diminuindo significativamente sua vida útil (CHO e KIM, 2010; PINTO e PINTO, 2015; LUCAS JÚNIOR, 2018).

A ligação da película betuminosa com a superfície do agregado, bem como sua resistência às ligações intermoleculares, é obtida através de duas interações físico-químicas: adesão e coesão. Entre outros fatores, a adesividade da mistura asfáltica pode ser influenciada pela viscosidade e composição química do ligante, bem como pelas características dos agregados, tais como a composição química, porosidade, textura e presença de contaminantes (STRUILLOU, 1969; PERTERSEN et al. 1982; DIBALSKI, 1982; KENNEDY e ANAGNOS, 1984; LUCAS JÚNIOR, 2018).

Gouveia (2016) indica que a análise de adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico pode ser realizada através da avaliação visual ou pelo comportamento mecânico das misturas asfálticas. Entretanto, Lucas Júnior (2018) aponta que os resultados devem ser considerados apenas como um indicativo da força adesiva, sem considerar o desempenho do material na conduta mecânica do pavimento.

Este estudo buscou avaliar o deslocamento da película betuminosa de agregados graúdos conforme as especificações da Norma DNER-ME 078/94, desconsiderando a parcela miúda das misturas. Em linhas gerais, as amostras contendo aproximadamente 500g, fracionadas previamente por peneiramento, foram envoltas com ligante asfáltico, permanecendo sobre superfície lisa e limpa até atingirem temperatura ambiente. Posteriormente, foram imersas em água destilada, permanecendo preservadas durante 72h. Deste modo, o resultado do ensaio é obtido visualmente, considerando satisfatório quando não houver deslocamento da película betuminosa, ou não satisfatório, quando ocorrer o deslocamento parcial ou total da película.

### 2.3.2.3 PROPRIEDADES DO LIGANTE ASFÁLTICO – CAP 50/70

De acordo com a Resolução nº 2 de 2015 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o asfalto é definido como um “material de cor escura e consistência sólida ou semissólida, composto de misturas de hidrocarbonetos pesados, onde os constituintes predominantes são os betumes, incluindo os materiais betuminosos”. Ainda, segundo o DNIT 095/2006 – ME, o cimento asfáltico de petróleo

(CAP) é um tipo de asfalto desenvolvido especificamente para apresentar as características e consistência ideais para ser utilizado diretamente na construção de pavimentos.

García-Morales et al. (2004) indicam que os ligantes asfálticos são comumente utilizados na construção de pavimentos flexíveis devido as suas propriedades viscoelásticas, bem como sua alta capacidade de adesão aos agregados. Ademais, acerca da composição, os autores indicam que o CAP é o produto resultante da mistura complexa de compostos inorgânicos e orgânicos, podendo ser separados em duas frações: maltenos e asfaltenos.

Nesta pesquisa, em virtude da disponibilidade de material, utilizou-se o CAP 50/70, processado na refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) da Petrobras. A Tabela 18 apresenta, entre outras, as características indicadas pelo Certificado de Qualidade, oferecido pela empresa.

Tabela 18 - Certificado de Qualidade do CAP 50/70

Característica	CAP 50/70		
	Método	Limites DNIT 095/2006 - EM	Resultado
Ponto de amolecimento	D 36	46°C (mín.)	51°C
Ponto de fulgor	D 92	235°C (mín.)	264°C
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,5% (mín.)	100,0% em massa
Índice de suscetibilidade térmica	X 018	-1,5 a 0,7	-0,7
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP 21, 20 rpm	D 4402	274 cP (mín.)	316 cP
Viscosidade Brookfield a 150°C, SP 21	D 4402	112 cP (mín.)	160 cP
Viscosidade Brookfield a 177°C, SP 21	D 4402	57 – 285 cP	60 cP

Fonte: PETROBRAS (2022)

### 2.3.2.3.1 VISCOSIDADE ROTACIONAL

A viscosidade é a característica representada pela capacidade de resistência do CAP à deformação ao cisalhamento quando submetido a uma força externa (CHEN et al., 2014). De acordo com Maharaj, Harry e Mohamed (2015), a redução da viscosidade do ligante impacta proporcionalmente na tensão superficial entre o agregado e o revestimento do ligante, uma vez que contribui para expulsão do ar aprisionado, aumentando significativamente a coesão interfacial dos materiais envolvidos.

Com o objetivo de comprovar os resultados oferecidos pelo Certificado de Qualidade, submeteu-se amostras do CAP 50/70 ao ensaio da NBR 15184 (ABNT, 2021), de modo a determinar a viscosidade aparente do material quando submetido a altas temperaturas, através do uso do viscosímetro rotacional Brookfield. Para maior controle da variabilidade dos resultados, foram ensaiadas réplicas, sendo a viscosidade final obtida através da média aritmética das leituras individuais. Ademais, cabe ressaltar que a escolha das temperaturas e velocidades foi preconizada por Norma (ABNT, 2021), sendo elas: 135°C/20rpm, 150°C/50rpm e 177°/100rpm. As temperaturas de mistura e compactação foram obtidas graficamente, referindo-se respectivamente a viscosidade de  $170 \pm 20$  cP e  $280 \pm 30$  cP, conforme solicitado pela Norma DNIT 178/2018-PRO. Ainda, consoante a Bernucci et al. (2008), a temperatura do agregado foi estabelecida de 10 a 15°C acima da temperatura da mistura.

#### 2.3.2.4 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Na prática, a elaboração do projeto de mistura asfáltica é um processo complexo, que demanda um estudo minucioso de todos os fatores envolvidos a fim de assegurar que a mistura atenda plenamente aos requisitos específicos. Leandro (2016) aponta que as propriedades de projeto estão intrinsecamente relacionadas a camada estrutural do pavimento e a finalidade a qual se destina.

O projeto de mistura asfáltica pode ser elaborado a partir de três etapas básicas: (i) seleção do agregado mineral; (ii) seleção do tipo de ligante asfáltico e; (iii) determinação do teor de projeto (MONISMITH, FINN e VALERGA, 1989).

De acordo com Sousa et al. (1991), os métodos de dosagem têm como principal objetivo a obtenção do teor de projeto, também conhecido como teor "ótimo", para uma determinada granulometria compactada. As técnicas envolvidas neste processo permitem a confecção de corpos de prova com propriedades semelhantes às de pista, tornando admissível considerar que ambos apresentam propriedades mecânicas semelhantes. Desta forma, é possível garantir que as propriedades dos materiais utilizados no projeto sejam condizentes com as condições reais de uso.

#### 2.3.2.4.1 DOSAGEM MARSHALL

O Método Marshall de dosagem a quente foi desenvolvido pelo engenheiro norte-americano Bruce G. Marshall no final da década de 1930, como uma solução para a crescente demanda por pavimentos projetados para suportar o aumento do tráfego rodoviário. Na época, a técnica predominante de construção de pavimentos asfálticos era o modelo proposto por Hubbard-Field, que se mostrava inadequada para atender as novas exigências de desempenho e durabilidade. Deste modo, Bruce Marshall propôs um novo método de dosagem baseado na compactação por impacto e uma série de fatores relacionados às propriedades do ligante asfáltico e agregados, objetivado em determinar o teor de projeto das misturas asfálticas, considerando as limitações dos equipamentos disponíveis na época (LEANDRO, 2016). Atualmente, o Método Marshall, assim conhecido, tornou-se o mais utilizado em escala mundial (BERNUCCI et al., 2008).

O desenvolvimento do Método Marshall foi pautado nos estudos de mecânica dos solos, considerando exclusivamente a deformação dos pavimentos provocada devido aos esforços de cisalhamento. Ainda, Leandro (2016) destaca que o modelo proposto pelo engenheiro norte-americano detém caráter empírico e apresenta limitações quanto à abordagem de aspectos climáticos e de trafegabilidade.

Eventualmente a resistência de um material é vista como uma propriedade intrínseca, entretanto, para o estudo de mecânica dos solos é necessário considerar a capacidade dos materiais de desenvolver resistência sob atuação de cargas externas, que pode ser facilmente mensurado através do ensaio de cisalhamento direto. Em linhas gerais, a relação entre as tensões normais e de cisalhamento estabelecem dois parâmetros incisivos, sendo eles: o intercepto de coesão aparente e o ângulo de atrito interno. O primeiro refere-se à resistência intrínseca do material, ou seja, a parcela da resistência que existe independentemente de qualquer tensão aplicada; já o ângulo de atrito interno, representa a capacidade do material de desenvolver resistência sob influência do carregamento externo aplicado. Deste modo, deve-se enfatizar que a água, neste contexto, não funcionará como mecanismo de transmissão dos esforços de cisalhamento, uma vez que as tensões de cisalhamento em qualquer plano são independentes da pressão neutra (FOSTER, 1982; PINTO 2006; LEANDRO, 2016). Em relação aos revestimentos asfálticos, pode-se fazer uma análise análoga considerando o ligante como a água presente num solo. Devido às propriedades

reológicas do ligante, o comportamento do concreto asfáltico varia em função da temperatura e da alta frequência, desenvolvendo resistência a partir das forças produzidas pelo ligante, mantendo as partículas unidas. Em temperaturas elevadas e taxa de carregamento baixa, as forças provenientes do ligante são menores, mas ocorre a produção de maior resistência devido ao carregamento externo (LEANDRO, 2016).

No Brasil, as técnicas criadas por Marshall foram adaptadas e padronizadas ao longo dos anos, levando em consideração a inclusão de novas tecnologias e equipamentos. Para pavimentos constituídos de misturas asfálticas a quente, a Norma DNER-ME 043/95 estabelece critérios e diretrizes para a execução dos ensaios baseados neste método e, ainda, a Norma DNIT 031/2006 – ES institui requisitos concernentes para o controle de qualidade destes.

#### 2.3.2.4.1.1 PREPARAÇÃO E COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Dando início ao processo de dosagem, estabeleceu-se o teor de ligante asfáltico inicial (T, em %) para o primeiro grupo de corpos de prova conforme a experiência do laboratorista, considerando a faixa granulométrica selecionada. Os grupos seguintes foram determinados consoante as especificações de Bernucci et al. (2008), que estabelece que os novos teores deverão ser dosados a partir do valor T adotado, variando de 0,5% a 1,0% para cada intervalo, conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Teores de ligante betuminoso por mistura

<b>Mistura</b>	<b>Teores de ligante asfáltico</b>			
<b>01</b>	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%
<b>02</b>	5,0%	5,5%	6,0%	7,0%
<b>03</b>	6,5%	7,0%	7,5%	8,0%
<b>04</b>	6,0%	6,5%	7,0%	8,0%
<b>05</b>	7,5%	8,0%	8,5%	9,0%

Fonte: Autor

Em seguida, conhecidas as porcentagens dos materiais (agregados e ligante betuminoso) que iriam compor as misturas asfálticas, procedeu-se com os cálculos dos quantitativos, em massa, de cada elemento, dando início ao processo de confecção através do misturador automático. Analogamente aos métodos descritos por Bernucci et al. (2008), preparou-se três corpos de prova para cada dosagem de ligante asfáltico.

Em conformidade aos procedimentos descritos pela Norma DNIT 178/2018 – ME, que estabelece as condições de preparação e compactação de misturas asfálticas, os agregados, já separados em frações adequadas, foram previamente mantidos em estufa até a constância de massa. Simultaneamente a este processo, o ligante asfáltico também foi mantido em estufa até que atingisse a temperatura ideal para utilização, determinada conforme as especificações descritas na seção 3.3.2.3.1. Posteriormente, os materiais foram levados até o misturador automático, permanecendo até o envolvimento total dos agregados pelo ligante asfáltico. O processo de compactação foi realizado utilizando o equipamento Marshall automático, prevendo a aplicação de 75 golpes em cada lado do corpo de prova. Ademais, a extração do molde ocorreu após o resfriamento do conjunto, permanecendo em superfície plana para evitar possíveis danos. Ao final desta etapa foram obtidos 12 corpos de prova para cada mistura realizada.

#### 2.3.2.4.1.2 MÉTODO RICE – DENSIDADE RELATIVA MÁXIMA ( $G_{mm}$ )

Vasconcelos, Soares e Leite (2003) indicam que a determinação da densidade máxima, utilizada para o cálculo de algumas características volumétricas da mistura asfáltica, pode ser obtida a partir de métodos integralmente distintos. Entretanto, os autores ressaltam a discrepância de resultados obtidos a partir dos diferentes procedimentos, apontando mudanças significativas nos cálculos que sucedem a definição deste parâmetro.

A densidade máxima teórica (DMT) é obtida através da ponderação das densidades reais dos agregados constituintes da mistura asfáltica. Entretanto, em algumas bibliográficas, este método pode não ser considerado fidedigno, uma vez que a porosidade dos agregados não é bem representada. Ademais, a DMT é diretamente influenciada pela norma utilizada para a determinação das densidades reais dos materiais granulares (VASCONCELOS, SOARES e LEITE, 2003; BERNUCCI et al., 2008; LEANDRO, 2016).

Atualmente, o Método Rice, desenvolvido pelo engenheiro norte-americano James Rice, surge como uma proposta eficaz para a substituição da tradicional DMT, uma vez que este passa a considerar a parcela de ligante asfáltico absorvido pelos agregados, refletindo um resultado mais condizente com a realidade. Deste modo,

densidade relativa máxima ( $G_{mm}$ ), também denominada de densidade máxima medida (DMM) ou densidade específica Rice, é obtida numericamente pela razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com ligante e total de ligante (ROBERTS et al., 1996; BERNUCCI et al., 2008).

Neste estudo, o ensaio para determinação da  $G_{mm}$  foi preconizado pela Norma DNIT 427/2020-ME, sendo realizado para cada teor de ligante asfáltico estipulado, incluindo o teor de projeto. Acerca dos procedimentos, foram separadas frações da mistura asfáltica não compactada, a mesma utilizada para a confecção dos corpos de prova, contendo aproximadamente 1500g, que foram imergidas em água destilada a temperatura de 25°C. Posteriormente ao processo de envelhecimento em estufa, o conjunto foi acoplado a bomba de vácuo, permanecendo ativa durante o período de 15 minutos para expulsão completa das bolhas de ar. Por fim, executa-se as aferições de massa e temperatura necessárias para obtenção do resultado final.

#### 2.3.2.4.1.3 AFERIÇÃO DAS MASSAS E DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA

Transcorridos os processos de resfriamento e desmoldagem dos corpos de prova, aferiu-se suas dimensões, altura e diâmetro, sendo o resultado final a média aritmética de quatro medidas realizadas em posições diametralmente opostas, conforme solicitado pela Norma DNER-ME 043/95. Em relação aos critérios de aceitabilidade, classificou-se como satisfatório o corpo de prova que apresentou altura de 63,5 mm  $\pm$  1,3 mm e diâmetro de 100  $\pm$  2,0 mm (DNER, 1995; DNIT, 2018).

Na sequência, os corpos de prova foram pesados, consoante as especificações da Norma DNIT 428/2020 – ME, de modo a obter sua massa nas condições: (i) seco ao ar ( $M_s$ ); (ii) submerso em água ( $M_{ssub}$ ) e; (iii) saturado ( $M_{sat}$ ). Os resultados das pesagens, para estas três modalidades, foram utilizados para obtenção das propriedades volumétricas e mecânicas da mistura asfáltica, conforme apresentado na seção 2.3.2.4.1.6.

#### 2.3.2.4.1.4 DENSIDADE RELATIVA APARENTE DO CORPO DE PROVA ( $G_{mb}$ )

De acordo com DNIT (2020), a densidade relativa aparente do corpo de prova ( $G_{mb}$ ), também denominada de densidade relativa aparente da mistura asfáltica compactada

(BERNUCCI et al., 2008), é numericamente igual à razão entre a massa seca ( $M_s$ ) de um corpo de prova e a massa de igual volume de água por ele ocupado, ambas à temperatura de ensaio ( $25 \pm 1$  °C). Deste modo, a partir das aferições de massa realizadas após o resfriamento e desmolde, determinou-se este parâmetro para corpo de prova confeccionado, conforme as preconizações da Norma DNIT 428/2020 – ME.

#### 2.3.2.4.1.5 DENSIDADE RELATIVA APARENTE MÉDIA (G)

Segundo Bernucci et al. (2008), para o cálculo da densidade relativa aparente do agregado ( $G_{sb}$ ), miúdo ou graúdo, considera-se o material na sua forma aparente, isto é, como um todo, sem descontar os vazios. Em termos matemáticos, esta pode ser obtida pela razão da massa seca pelo volume aparente do agregado, incluindo o volume de agregado sólido mais o volume dos poros superficiais contendo água. Ademais, os autores salientam que o agregado deve estar em sua condição saturada, tendo sua superfície cuidadosamente secada com o uso de tecido absorvente.

No Brasil, os procedimentos para determinação da  $G_{sb}$  estão relacionados a classificação dos agregados, seguindo as Normas DNIT 411/2021 – ME e DNIT 413/2021 – ME para miúdos e graúdos, respectivamente. Para tanto, realizou-se a preparação das misturas, conforme as porcentagens apresentadas na seção 2.3.2.1, de modo a obter a massa mínima necessária para realização dos ensaios. A porção miúda e graúda da mistura foram obtidas através do peneiramento mecânico, referindo-se a massa retida e passante da peneira N° 4, nesta ordem. Posteriormente, prosseguiu-se com as especificações das Normas supracitadas, obtendo os resultados de  $G_{sb}$  para cada porção ensaiada.

Segundo o Asphalt Institute (2014), em casos de misturas constituídas de fração miúda e graúda, deve-se computar um valor médio de densidade relativa aparente, considerando a composição como um todo. Deste modo, a densidade relativa aparente média (G), assim intitulada por Bernucci et al. (2008), foi determinada através da média harmônica ponderada, conforme apresentado na Equação 4, considerando a porcentagem respectiva a parcela miúda e graúda da mistura, bem como seus valores individuais de  $G_{sb}$ .

$$G = \frac{100}{\frac{P_{graúda}}{G_{sb\,graúda}} + \frac{P_{miúda}}{G_{sb\,miúda}}} \quad (4)$$

Onde:

$G$  = Densidade relativa aparente média;

$P_{graúdo}$  = Porcentagem de material retido na peneira N° 4, referindo-se a parcela graúda;

$P_{miúdo}$  = Porcentagem de material passante da peneira N° 4, referindo-se a parcela miúda;

$G_{sbgraúda}$  = Densidade relativa aparente da fração graúda;

$G_{sbmiúda}$  = Densidade relativa aparente da fração miúda.

#### 2.3.2.4.1.6 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS

Peterson et al. (2003) indicam que os procedimentos laboratoriais de compactação têm como finalidade simular a compactação final obtida em um pavimento asfáltico após o adensamento devido ao tráfego, que normalmente ocorre durante os dois anos iniciais de exposição. Nesta perspectiva, os parâmetros volumétricos de uma mistura compactada em laboratório são um indicador do provável desempenho da mistura em campo (ASPHALT INSTITUTE, 2001).

Os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas compactadas são o volume de vazios (VV), o volume de vazios do agregado mineral (VAM) e a relação betume/vazios (RBV). Na literatura americana, estes termos podem sofrer uma pequena distinção quanto a nomenclatura, podendo ser encontrados por: air voids ( $V_a$ ), voids in mineral aggregate (VMA) e voids filled with asphalt (VFA), respectivamente (ASPHALT INSTITUTE, 2014).

##### a) Volume de vazios (VV)

O Asphalt Institute (2014) define o volume de vazios (VV) como a porcentagem de vazios de ar existentes numa mistura compactada, em relação ao volume total. Em âmbito nacional, o cálculo deste parâmetro é comumente realizado utilizando a densidade máxima teórica (DMT), divergindo das Normas internacionais. Nesta pesquisa determinou-se a porcentagem de vazios conforme as especificações do Asphalt Institute (2014), que estabelece a razão entre a  $G_{sb}$  e a  $G_{mm}$ , conforme a Equação 5.

$$VV = 100 - \frac{100 \times G_{mb}}{G_{mm}} \quad (5)$$

Onde:

$VV$  = Volume de vazios, em porcentagem;

$G_{mb}$  = Densidade relativa aparente do corpo de prova;

$G_{mm}$  = Densidade relativa máxima da mistura asfáltica.

Marinho (2011) indica que manter o volume de vazios adequado, conforme as especificações das Normas vigentes, é garantir que o ligante da mistura seja expelido para a superfície, devido à expansão térmica. Ademais, de acordo com a autora, o excesso de vazios pode ocasionar rápido endurecimento e oxidação do ligante asfáltico, resultando na desintegração do revestimento.

Para Ferreira (2015), o volume de vazios influencia diretamente a durabilidade do pavimento, uma vez que está intimamente ligado à permeabilidade de misturas asfálticas. Ainda, para Roberts et al. (1996), a existência de um baixo teor de vazios na mistura asfáltica tende a contribuir para a minimização dos impactos do envelhecimento e do deslocamento da película betuminosa na interface agregado-ligante.

De modo geral, ressalta-se a importância de atender os intervalos estipulados por Norma para este parâmetro, visto que pavimentos confeccionados com percentuais de volume de vazios abaixo do recomendado tendem a sofrer mais deformações plásticas, devido à falta de espaço para atenuação das tensões; e, antagonicamente, estes tornam-se mais susceptíveis a percolação de água (BERNUCCI et al., 2008; QUEIROZ NETO, 2019).

#### b) Volume de vazios do agregado mineral (VAM)

O volume de vazios do agregado mineral (VAM) pode ser definido como os vazios intergranulares da mistura compactada, incluindo o volume de ar e o teor de ligante asfáltico efetivo, em relação ao volume total (ASPHALT INSTITUTE, 2014). Soares et al. (2000) indicam que este parâmetro pode ser determinado em função do volume de vazios e da DMT, entretanto, trata-se de um modelo atípico, com pouca exatidão do resultado. Deste modo, nesta pesquisa foram aplicados os cálculos especificados pelo Asphalt Institute (2014), conforme a Equação 6 abaixo.

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_{agregado}}{G} \quad (6)$$

Onde:

$VAM$  = Volume de vazios do agregado mineral, em porcentagem;

$G_{mb}$  = Densidade relativa aparente do corpo de prova;

$P_{agregado}$  = Porcentagem de agregados da mistura;

$G$  = Densidade relativa aparente média.

O volume de vazios do agregado mineral (VAM) é um tema controverso dentro da literatura estudada, dificultando estabelecer uma perspectiva conclusiva. Kandhal e Koehler (1985) sugerem que este parâmetro permite a incorporação de proporções suficientes de ligante asfáltico nas misturas, obtendo máxima durabilidade sem desencadear instabilidade nos pavimentos. Ainda, Ceratti e Reis (2011) afirmam que porcentagens altas de VAM podem proporcionar melhor cobertura dos agregados pelo ligante asfáltico, aumentando a durabilidade das misturas asfálticas. Por outro lado, a partir da coleta de dados em campo, Foster (1982) verificou que o VAM não apresentou influência sob o desempenho da pista analisada.

Acerca dos critérios de aceitabilidade, a Norma DNIT 031/2006 – ES estabelece que na impossibilidade de atendimento das especificações da relação betume/vazios (RBV), deve-se buscar atingir a porcentagem mínima para o VAM, conforme o tamanho máximo nominal da mistura asfáltica (TMN).

#### c) Relação betume/vazios (RBV)

Define-se a relação betume/vazios (RBV) como a porcentagem de vazios intergranulares do agregado mineral preenchidos com ligante asfáltico, sem considerar a parcela absorvida (ASPHALT INSTITUTE, 2014). De acordo com Leandro (2016), o uso do termo RBV é inadequado do ponto de vista literal, uma vez que o betume é apenas um dos materiais constituintes do ligante asfáltico. Ademais, não foram encontradas divergências nas Normas nacionais e internacionais para o cálculo do parâmetro em questão, portanto, utilizou-se a Equação 7, estabelecida pelo Asphalt Institute (2014), para a determinação do resultado da RBV.

$$RBV = 100 \times \frac{VAM - VV}{VAM} \quad (7)$$

Onde:

$RBV$  = Relação betume/vazios;

$VAM$  = Vazios do agregado mineral, em porcentagem;

$VV$  = Volume de vazios, em porcentagem.

A relação betume/vazios (RBV) tem como objetivo assegurar que os espaços vazios do agregado mineral sejam preenchidos por uma quantidade adequada de ligante asfáltico. Ainda, deve-se prezar por manter as especificações da Norma acerca deste parâmetro, uma vez que valores de RBV muito baixos podem causar desagregação da mistura e infiltrações do pavimento, levando a perda de durabilidade; em contrapartida, valores muito altos podem afetar significativamente a estabilidade da estrutura pavimentada (MARINHO, 2011; QUEIROZ NETO, 2019).

#### 2.3.2.4.1.7 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA

Segundo o DNER (1995), a estabilidade e fluência são definidas como a resistência máxima à compressão radial, expressa em N (kgf), e a deformação total, em milímetros (mm), apresentada pelo corpo de prova desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, respectivamente.

Brasileiro (1983) aponta que a resistência interna dos concretos betuminosos pode variar conforme as características dos agregados utilizados. Deste modo, a utilização de agregados com formas cúbicas bem definidas e texturas rugosas contribuem para o aumento da estabilidade dos pavimentos, melhorando sua homogeneidade. Em contrapartida, Martin e Wallace (1958) indicam que a aplicação de agregados com faces polidas e formas arredondadas pode gerar instabilidade nas misturas asfálticas devido ao deslizamento das partículas entre si, ocasionada pela falta de resistência ao movimento apresentada.

Gouveia, Fernandes Júnior e Soares (2007) estudaram a influência da energia de compactação sob os resultados de caracterização volumétrica e mecânica de misturas asfálticas, onde puderam concluir que níveis mais altos de energia de compactação levaram a valores maiores de estabilidade, apresentando reduções significativas na deformação total (fluência).

Nesta pesquisa, a estabilidade e fluência das misturas asfálticas foram determinadas conforme as especificações do DNER-ME 043/95. Deste modo, após a verificação das massas e dimensões, os corpos de prova foram levados a prensa Marshall, onde foram submetidos a um carregamento crescente de carga até o seu rompimento, tendo seus resultados gerados automaticamente pelo equipamento e encaminhados

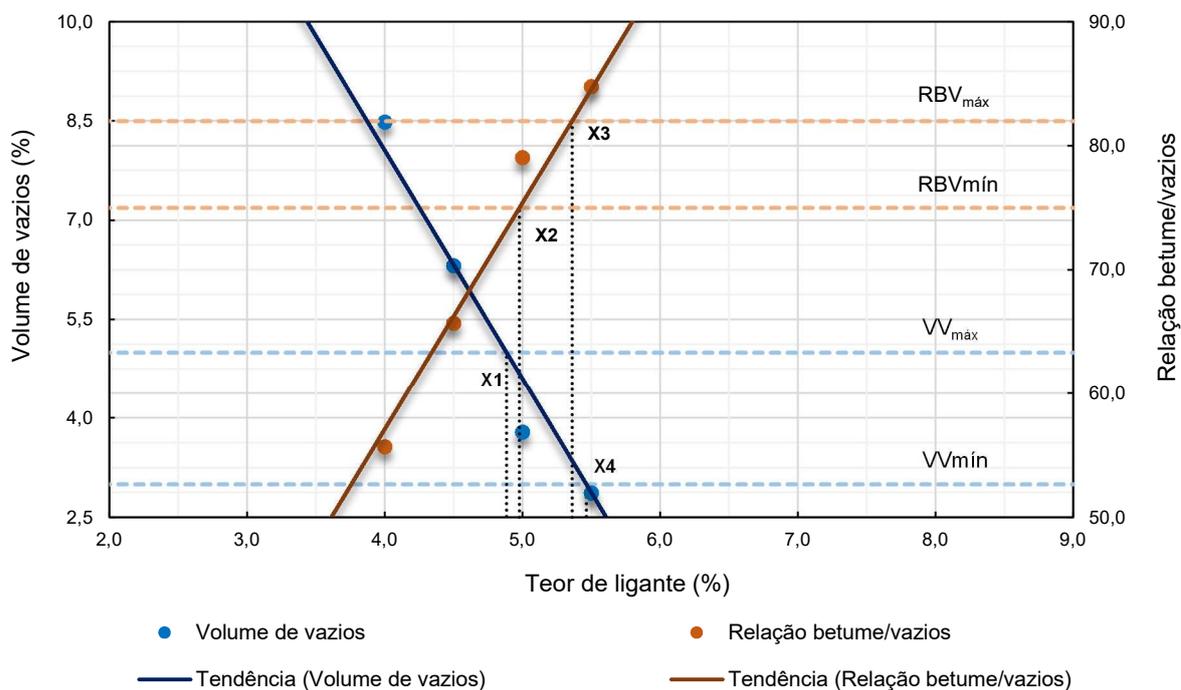
para o computador. A estabilidade é dada pela carga média, em N (kgf), de três corpos de prova. Para a fluência, segue-se o mesmo padrão, adotando a precisão de 0,25 mm, conforme solicitado por Norma (DNER, 1995).

#### 2.3.2.4.1.8. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PROJETO

Estabelecer o teor de projeto, ou teor “ótimo”, pode se tornar uma atividade árdua, considerando a existência de diferentes métodos, que surgiram a partir de diversas literaturas, apresentando, portanto, significativas particularidades entre si (LEANDRO, 2016). Para Vilela (2018), a definição deste parâmetro pode variar conforme o método de dosagem escolhido e a função de determinadas características, como a composição granulométrica, forma dos agregados, tipo de mistura, energia de compactação, temperatura do pavimento a qual será submetido, fluxo de tráfego, entre outros.

Neste estudo, para a seleção do teor de projeto das misturas asfálticas, utilizou-se o método do 3º Distrito Rodoviário Federal do DNER, apresentado por Soares et al. (2000) e Bernucci et al. (2008), que é baseado em dois parâmetros volumétricos: o volume de vazios (VV) e relação betume/vazios (RBV). Deste modo, realiza-se a montagem do gráfico contendo dois eixos de ordenadas ( $Y_1$  e  $Y_2$ ), sendo um para cada parâmetro volumétrico, em função dos teores de ligante (eixo das abscissas). Em seguida, adicionam-se linhas horizontais tracejadas, referindo-se ao limite mínimo e máximo das variáveis volumétricas, conforme estabelecido pelo DNIT 031/2006 – ES. O teor de projeto será calculado a partir da média aritmética dos dois teores centrais, obtidos através da intersecção das linhas de tendência dos valores médios com as linhas limite, conforme o exemplo apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Determinação do teor de projeto em função do volume de vazios (VV) e da relação betume/vazios (RBV)



Fonte: Autor

#### 2.3.2.4.1.9 VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA TEOR DE PROJETO

Bernucci et al. (2008) destacam que os parâmetros volumétricos convencionais não garantem que o teor de projeto escolhido será o melhor para todas as propriedades da mistura asfáltica, isto é, a consideração exclusiva destas características (VV e RBV) pode não ser suficiente para obter uma mistura com desempenho adequado em todas as condições de uso.

De modo a comprovar a viabilidade técnica da mistura asfáltica, realizou-se a moldagem de mais 6 corpos de prova utilizando o teor de projeto obtido empiricamente, conforme especificado na seção 2.3.2.4.1.8, que foram divididos em dois grupos. O primeiro grupo, com 3 corpos de prova, foram submetidos aos procedimentos descritos nos itens 2.3.2.4.1.2 a 2.3.2.4.1.7, com exceção do cálculo da densidade relativa aparente média (G), que se mantém a mesma durante todo o processo de dosagem, para cada mistura. Por fim, as amostras do segundo grupo foram ensaiadas para avaliação da resistência à tração por compressão diametral (RT), consoante as recomendações da Norma DNIT 136/2018 – ME. Em termos gerais, o ensaio prevê a resistência à tração indireta, medida através da compressão

diametral dos corpos de prova, estabelecendo a aplicação de um carregamento estático crescente até a ruptura.

Os resultados finais são obtidos através da média aritmética dos valores individuais dos corpos de prova ensaiados, que devem ser verificados conforme os critérios de aceitabilidade da Norma DNIT 031/2006 – ES, apresentados na Tabela 20 a seguir.

Tabela 20 - Critérios de aceitabilidade para misturas asfálticas usinadas a quente

<b>Características</b>	<b>Camada de rolamento</b>
Volume de vazios, (%)	3 a 5
Relação betume/vazios	75 – 82
Estabilidade, mínima, (kgf)	500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25 °C, mínima, MPa	0,65

Fonte: DNIT (2006)

Ainda, cabe ressaltar que na impossibilidade de atendimento dos limites da relação betume/vazios (RBV), a Norma prevê critérios mínimos para os vazios do agregado mineral (VAM), apresentados na Tabela 21 abaixo, conforme o tamanho nominal máximo (TMN) da mistura asfáltica.

Tabela 21 - Especificações para os vazios do agregado mineral

<b>Tamanho máximo nominal (TMN)</b>	<b>Vazios do agregado mineral (VAM) mínimo, %</b>
38,1 mm	13
25,4 mm	14
19,1 mm	15
12,7 mm	16
9,5 mm	18

Fonte: DNIT (2006)

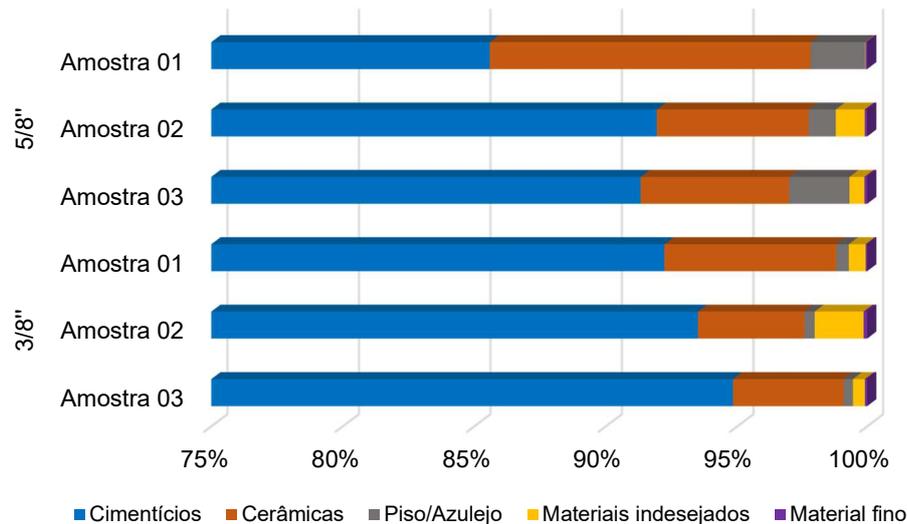
### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 CAMADA DE BASE**

As características dos RCD reciclados são determinadas, entre outros aspectos, a partir de condicionantes regionais e temporais. Ainda, devido a diversidade da fonte geradora, matérias-primas, técnicas e tecnologias construtivas empregadas durante a execução da obra, sua composição torna-se de difícil controle sistemático (JOHN, 2000; CARNEIRO, BURGOS e ALBERTI, 2001; MARQUES, 2007). Deste modo, após analisar a natureza dos materiais constituintes dos ARM das frações 5/8" e 3/8"

coletadas, foi possível estabelecer uma perspectiva inicial do comportamento destes materiais. A Figura 16 apresenta a composição das amostras ensaiadas e, para melhor percepção dos dados, a Tabela 22 indica as porcentagens em massa de cada grupo formado.

Figura 16 - Composição das amostras ARM



Fonte: Autor

Tabela 22 - Porcentagens em massa de cada grupo

Amostra	5/8''			3/8''		
	01	02	03	01	02	03
Cimentícios	85,59%	91,94%	91,33%	92,23%	93,51%	94,84%
Cerâmicas	12,22%	5,80%	5,66%	6,57%	4,06%	4,25%
Piso/Azulejo	2,11%	1,05%	2,33%	0,49%	0,40%	0,36%
Materiais indesejados	0,02%	1,12%	0,58%	0,65%	1,89%	0,46%
Material fino	0,06%	0,09%	0,10%	0,06%	0,14%	0,09%
<b>Total</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: Autor

A partir dos dados obtidos, notou-se que os materiais cimentícios, originados de concretos e argamassas, são predominantes nas composições de ARM ensaiadas, uma vez que correspondem aproximadamente 90% do total. Já a parcela de cerâmicas, manifesta-se com fração moderada, com média participativa de 6,4%. Em suas análises qualitativas, Zordan (1997) também observou a predominância de materiais cimentícios nas composições de RCD, constatando que 37,4% do resíduo da cidade de Ribeirão Preto, interior de São Paulo, era constituído de argamassa, seguido de 21,1% de concretos.

Ainda, observou-se uma discrepância de valores da amostra 01 da fração 5/8” em relação as demais, apontando elevado percentual de cerâmica e ligeiro declive dos cimentícios. Este aspecto pode ser justificado pela heterogeneidade do material, cuja característica torna-se um impasse para a definição do comportamento padrão característico do agregado.

Os materiais indesejados, em conformidade com as especificações da NBR 15116 (ABNT, 2021), são definidos como fragmentos de natureza orgânica e inorgânica não pertencentes a classe A da Resolução CONAMA nº 307 de 2002. A retirada completa destas impurezas do montante de reciclados produzidos por uma usina pode ser uma tarefa árdua, uma vez que partículas pequenas de contaminantes podem passar despercebidas, contaminando a amostra em sua totalidade (MOTTA, 2005). Para Lima (1999), a retirada manual dos contaminantes antes e após o processo de britagem e, na presença de materiais ferrosos, o uso de eletroímã, são formas mais acessíveis para resolução deste problema.

Durante a análise visual macroscópica das amostras, observou-se a presença, em ordem quantitativa decrescente, de fragmentos de gesso, madeira, plástico, vidro e materiais ferrosos, conforme exemplificado na Figura 17, que totalizaram percentuais inferiores a 1,5%. Ainda, ressalta-se que os cerâmicos vidrados, classificados nesta pesquisa pelo grupo (c) piso/azulejo, também são considerados indesejáveis, entretanto, por apresentarem quantidades significativas, principalmente na fração 5/8”, foram identificados separadamente.

Figura 17 - Materiais indesejados encontrados na composição dos ARM



Fonte: Autor

De acordo com John e Cincotto (2003), quantidades excessivas de gesso na composição de aterros ou base de pavimentos, ressalta-se que este foi o contaminante mais presente nas amostras analisadas, podem ocasionar problemas a longo prazo em decorrência da formação de vazios pela lixiviação do material.

No caso das madeiras, além de apresentarem-se compressíveis com o tempo, isto é, podem diminuir de volume sob compressão, podem deteriorar-se a curto prazo, gerando a formação de vazios indesejáveis, que podem provocar recalques diferenciais do pavimento (MOTTA, 2005).

Para Costa e Ursella (2003), o principal problema acerca da presença de grandes quantidades de plásticos, vidros e metais em camadas granulares de pavimento está relacionado a diminuição do embricamento dos grãos, resultando em adversidades durante o processo de compactação. Embora não apresentem características deteriorativas, estes materiais apresentam similaridade com as madeiras ao que se refere a formação de vazios indesejáveis no pavimento, podendo ocasionar em recalques diferenciais (MOTTA, 2005).

Zordan (1997) aponta a presença de materiais cerâmicos polidos como o principal fator para a redução da resistência dos concretos confeccionados com RCD reciclado. Ademais, o autor alega a falta de aderência entre as faces polidas com a matriz de concreto, propiciando o surgimento de superfícies de ruptura no local. Em relação aos pavimentos, não foram encontradas conexões acerca do assunto dentro da bibliografia estudada.

Embora a Norma DNIT 141/2010-ES não estabeleça critérios de aceitabilidade quanto as impurezas, a NBR 15115 (ABNT, 2004) indica que, para materiais indesejados de grupos distintos e de mesmo grupo é tolerável percentuais inferiores ou iguais a 3% e 2%, em massa, respectivamente. Deste modo, realizou-se a somatória dos valores individuais obtidos nos grupos (c) e (d), apontando regularidade com a Norma (ABNT, 2004).

Dando prosseguimento ao fluxograma experimental, realizou-se a análise granulométrica por peneiramento mecânico de cada material. Dantas (1996) indica que o aspecto apresentado pela curva de distribuição granulométrica do material pode ser um fator determinante para a estabilidade dos pavimentos, uma vez que o correto dimensionamento pode garantir maior entrosamento das partículas graúda e miúda,

isto é, melhor intertravamento dos agregados. As Figuras de 18 a 22 apresentam os resultados obtidos nesta etapa e, de modo comparativo, as curvas granulométricas respectivas a mesma fração do material natural e reciclado foram dispostas no mesmo gráfico.

Figura 18 - Curva granulométrica

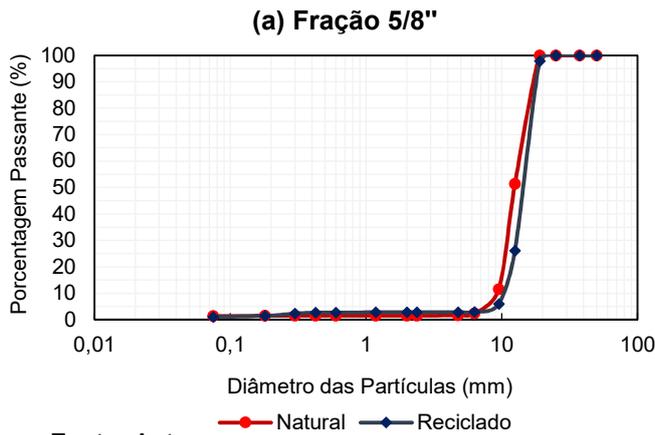


Figura 19 - Curva granulométrica

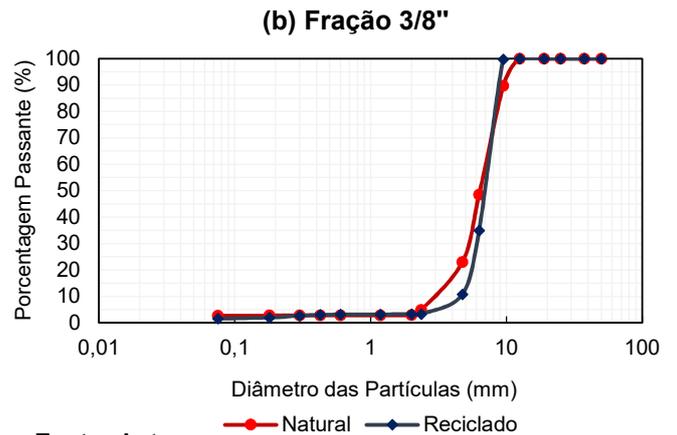


Figura 21 - Curva granulométrica

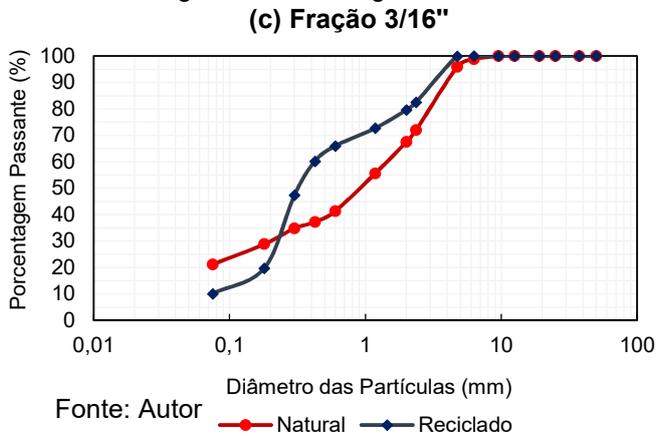


Figura 20 - Curva granulométrica

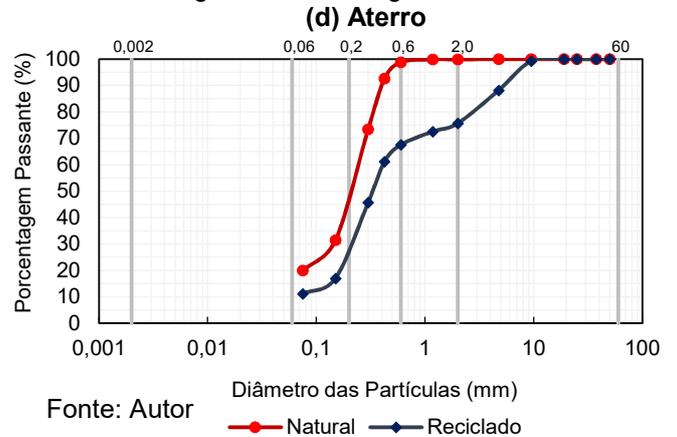
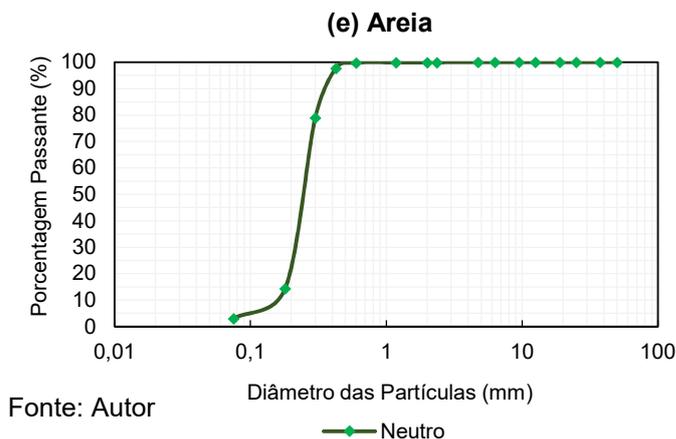


Figura 22 - Curva granulométrica



De modo geral, observou-se que as curvas das frações 5/8" e 3/8" apresentam comportamento similar, observando uma graduação ligeiramente mais aberta para os AR. Este comportamento pode ser justificado pelo tipo de britador utilizado, uma vez que equipamentos do tipo mandíbula tendem a obter, durante a britagem primária, maiores quantidades de grãos graúdos (LIMA, 1999; CHAVES e PERES, 2003). Deste modo, recomenda-se que realize novamente o processo de britagem para uniformidade e redução das partículas da fração (LIMA, 1999). Ademais, ambas frações apresentaram quantidades mínimas de finos, contribuindo para sua aplicação em obras de infraestrutura, uma vez que a capacidade de suporte do pavimento está diretamente ligada a parcela graúda das misturas (NETO, 2019).

Para Motta (2005) e Neto (2019), a curva granulométrica do material deve apresentar aspecto contínuo, garantindo melhor empacotamento dos grãos. Deste modo, ressalta-se que esta condição não foi observada nos resultados da fração 3/16", que apresentaram comportamento descontínuo e bem-graduado (CAPUTO, 1987). Ademais, observou-se uma quantidade considerável de material fino passante da peneira N° 200 dos AN, chegando a corresponder 21% da composição total; enquanto para os ARM, esta porcentagem foi de aproximadamente 10%. Bernucci et al. (2008) apontam que o excesso deste material fino pode alterar a capacidade e trabalhabilidade das misturas, bem como influenciar na estabilidade do esqueleto mineral dos pavimentos, uma vez que este pode diminuir o contato entre os agregados graúdo e miúdo.

Em relação aos aterros, observou-se que a granulometria do reciclado apresentou-se demasiadamente mais graúda, isto é, constatou-se a presença significativa de material nas peneiras 3/8", N° 4, N° 10 e N° 16, condição não observada no ATN.

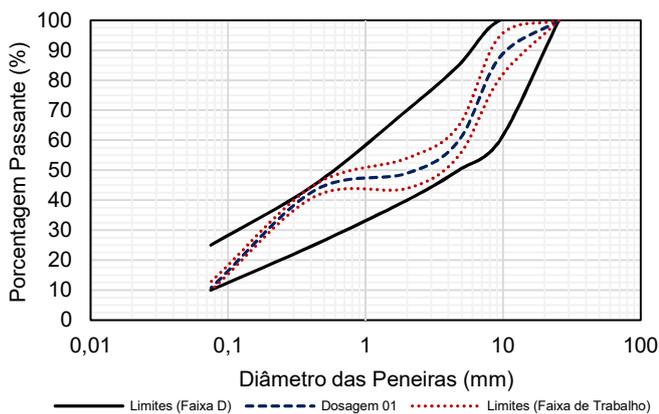
A classificação da areia seguiu as diretrizes de classificação da NBR 6502 (ABNT, 1997), que estabelece grãos finos aqueles com diâmetro entre 0,06 mm a 0,20 mm, médios de 0,20 mm a 0,60 mm e grossos de 0,60 a 2,0 mm. As amostras ensaiadas apresentaram percentuais próximos a 18,7%, 64,7% e 11,3% para as peneiras, respectivamente, de abertura 0,30 mm, 0,18 mm e 0,075 mm. Deste modo, devido a existência de material com granulometria superior a 0,20 mm, classificou-se como areia média.

Ademais, durante o processo de peneiramento dos agregados reciclados mistos (ARM) verificou-se que a própria agitação mecânica resultou no fracionamento das

partículas da amostra, podendo ser justificado pela maior fragilidade destes agregados (BAZUCO, 1999). Motta (2005) também observou a condição supracitada em seus estudos, indicando as dificuldades de enquadramento do material na faixa granulométrica normatizada, uma vez que esta situação pode vir a alterar a curva de distribuição dos grãos.

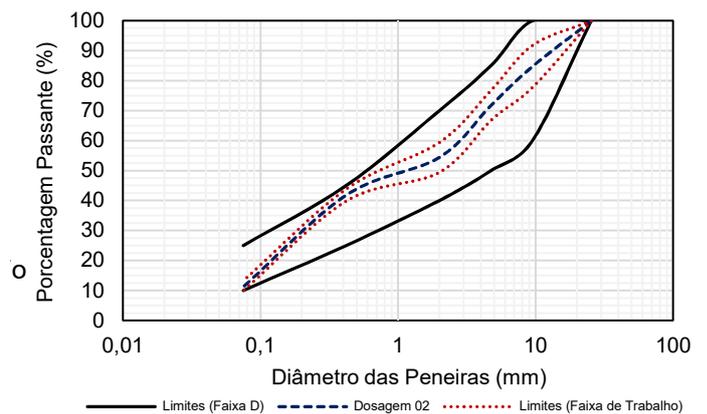
Após a determinação do comportamento granulométrico dos materiais, iniciou-se o processo de dosagem das misturas solo-agregado. Desta forma, os enquadramentos das curvas granulométricas obtidas pelo Método das Tentativas, de cada dosagem, estão apresentados nas Figuras 23 a 27. O gráfico tem como objetivo relacionar os percentuais de material passante, bem como os limites máximos e mínimos da referida faixa de estudo. Ademais, a Tabela 23 apresenta o percentual de material passante por peneira de cada mistura, como também suas tolerâncias.

Figura 23 - Dosagem 1



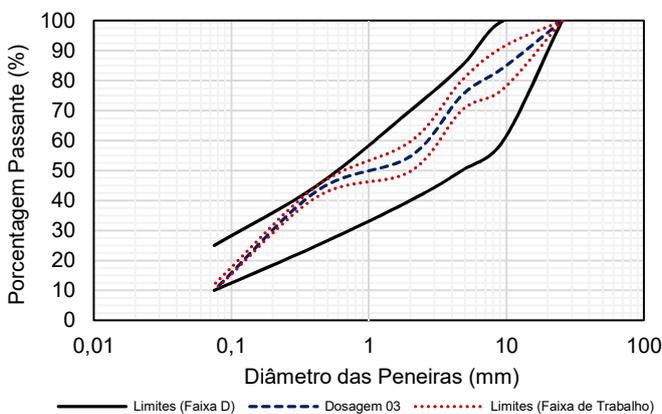
Fonte: Autor

Figura 24 - Dosagem 2



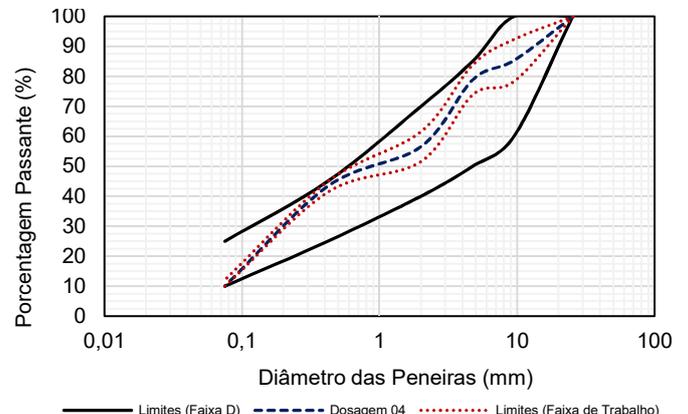
Fonte: Autor

Figura 26 – Dosagem 3



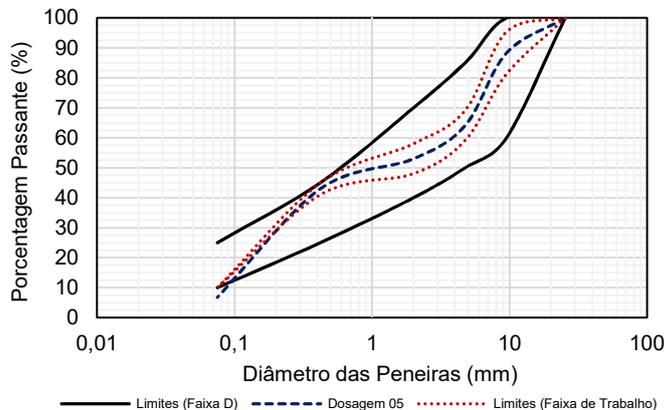
Fonte: Autor

Figura 25 – Dosagem 4



Fonte: Autor

Figura 27 - Dosagem 5



Fonte: Autor

Com base nos dados apresentados, observou-se o enquadramento da curva granulométrica das Dosagens de 01 a 04 nas especificações da faixa D, entretanto, ressalta-se que o material passante da N° 200, em todos os casos, ficou próximo do limite inferior de 10% preconizado por Norma (DNIT, 2010).

Em relação a Dosagem 05, respectiva a mistura exclusiva de reciclados, verificou-se a impossibilidade de enquadramento em decorrência da carência de partículas finas, uma vez que esta apresentou apenas 6,9% de material passante da peneira N° 200. Santos, Araújo e Ayres (2019) observaram aspecto similar ao supracitado em seus estudos na cidade de Fortaleza/CE. Os autores analisaram dez amostras coletadas de camadas de base e sub-base executadas com o uso de RCD reciclados e, após a análise granulométrica, constataram que nenhuma apresentou conformidade com as especificações da faixa D da Norma DNIT 141/2010-ES, sendo quatro destas por não possuírem o mínimo exigido para a peneira de N° 200.

Bazuco (1999) justifica a granulometria moderadamente mais grossa dos materiais reciclados quando comparados aos naturais em decorrência das características dos materiais envolvidos no processo de reciclagem e, também, o sistema de britagem utilizado pela usina recicladora. Deste modo, Chan (1998) indica a inclusão de pequenas quantidades de areia natural à dosagem para a solução da problemática dos finos, entretanto, mesmo com a inclusão de 7% deste material na Dosagem 05, não foi possível satisfazer as especificações da faixa.

Tabela 23 - Percentual de material passante e tolerâncias por peneira das dosagens solo-agregado

<b>Dosagem 01</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Mistura</b>	<b>Limite superior</b>
1"	100,0%	100,0%	100,0%
3/8"	80,9%	87,9%	94,9%
N° 4	54,9%	59,9%	64,9%
N° 10	44,0%	49,0%	54,0%
N° 40	41,1%	43,1%	45,0%
N° 200	10,0%	10,8%	12,8%

<b>Dosagem 02</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Mistura</b>	<b>Limite superior</b>
1"	100,0%	100,0%	100,0%
3/8"	77,8%	84,8%	91,8%
N° 4	66,9%	71,9%	76,9%
N° 10	49,5%	54,5%	59,5%
N° 40	39,9%	41,9%	43,9%
N° 200	10,0%	11,3%	13,3%

<b>Dosagem 03</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Mistura</b>	<b>Limite superior</b>
1"	100,0%	100,0%	100,0%
3/8"	77,3%	84,3%	91,3%
N° 4	70,2%	75,2%	80,2%
N° 10	49,7%	54,7%	59,7%
N° 40	41,4%	43,4%	45,0%
N° 200	10,0%	10,1%	12,1%

<b>Dosagem 04</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Mistura</b>	<b>Limite superior</b>
1"	100,0%	100,0%	100,0%
3/8"	78,4%	85,4%	92,4%
N° 4	73,9%	78,9%	83,9%
N° 10	51,6%	56,6%	61,6%
N° 40	41,6%	43,6%	45,0%
N° 200	10,0%	10,1%	12,1%

<b>Dosagem 05</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Mistura</b>	<b>Limite superior</b>
1"	100,0%	100,0%	100,0%
3/8"	81,4%	88,4%	95,4%
N° 4	59,3%	64,3%	69,3%
N° 10	48,1%	53,1%	58,1%
N° 40	41,1%	43,1%	45,0%
N° 200	10,0%	6,9%	10,0%

Fonte: Autor

Outro aspecto analisado nesta etapa foi a porcentagem de material passante da peneira N° 200 que, segundo o DNIT 141/2010 – ES, não deve ultrapassar 2/3 do montante passante na peneira N° 40. Motta (2005) aponta que esta verificação deve garantir quantidades mínimas de material fino nas misturas de solo-agregado, promovendo o maior embricamento da fração graúda. Com base nos dados apresentados na Tabela 23, constatou-se que todas as dosagens estavam de acordo com a Norma (DNIT, 2010).

Ainda, realizou-se a investigação dos materiais retidos na peneira N° 10 através da análise macroscópica, constatando a existência de matéria orgânica e impurezas nas amostras de ARM. Ressalta-se que o foco deste estudo não foi verificar as interferências deste tipo de material nas composições de solos estabilizados granulometricamente, deste modo, uma análise mais apurada deve ser realizada para constatar com precisão a influência destes em camadas de pavimento.

Uma vez determinada a composição de cada dosagem, iniciou-se os estudos de caracterização física das misturas de solo-agregado. Para determinar os limites de consistência das amostras, realizou-se a separação individual de cada material conforme as porcentagens apresentadas na seção 2.2.2.3., que foram dispostos em sacos plásticos e envoltos até obter uma mistura homogeneizada. Posteriormente, realizou-se o peneiramento manual, reservando a massa de material passante da peneira N° 40 para a realização dos ensaios previstos. Na Tabela 24 estão apresentados os resultados obtidos neste processo, isto é, os limites de Atterberg, bem como respectivos índices de plasticidade.

Tabela 24 - Limites de Atterberg e índice de plasticidade de cada dosagem

Parâmetros	Dosagem				
	01	02	03	04	05
Limite de liquidez (LL)	15%	15%	14%	14%	16%
Limite de plasticidade (LP)	NP	NP	NP	NP	NP
Índice de plasticidade (IP)	NP	NP	NP	NP	NP

Fonte: Autor

Durante a realização do ensaio de LP, verificou-se a impossibilidade de formação do cilindro conforme as especificações da Norma (ABNT, 2016). Destaca-se que este aspecto foi observado em todas as amostras, que foram classificadas como não plásticas (NP), isto é, NP = 0. Ademais, os valores de LL e IP apresentaram valores

inferiores ao máximo preconizado pelo DNIT (2010), portanto, não se fez necessária a realização do ensaio de EA.

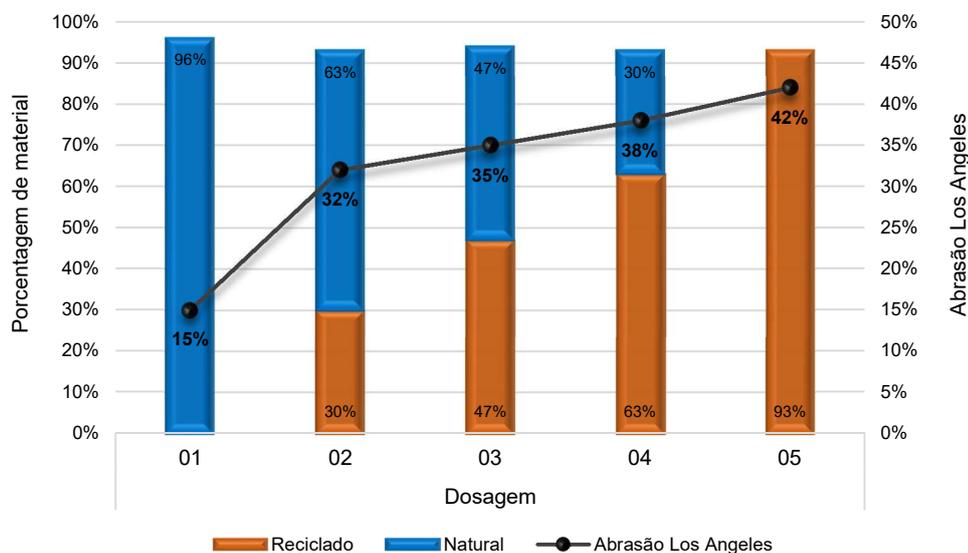
Carneiro, Burgos e Albert (2001) apontam que os AR, graúdo e miúdo, tendem a apresentar maiores quantidades de areia em sua composição, conseqüentemente, baixos percentuais de argila e silte, que favorecem, deste modo, sua aplicação em camadas granulares de pavimentos. Ainda, os autores evidenciam que devido à ausência de plasticidade destes materiais, torna-se viável sua participação em processos de estabilização de solos plásticos.

Ainda sobre a caracterização física das misturas, Bazuco (1999) aponta que os AR são mais suscetíveis a apresentarem maiores valores de abrasão Los Angeles em comparação aos AN. Esta característica pode estar associada ao fato de que os AR possuem maior quantidade de microfissuras e trincas internas decorrentes do processo de britagem e seleção, tornando-os mais frágeis e vulneráveis à deterioração sob esforços repetidos. Ademais, a presença de materiais cerâmicos contribui para a baixa resistência do AR, em virtude da baixa densidade e o alto índice de degradação. Embora as adversidades, os ARM apresentam vantagens no âmbito ambiental e econômico, uma vez que estes mostram-se como uma alternativa mais sustentável e financeiramente viável (BARBUDO et al., 2012, ARULRAJAH et al., 2012; ORIOLI, 2018).

O gráfico da Figura 28 associa os resultados de abrasão Los Angeles obtidos laboratorialmente com a porcentagem de material natural e reciclado por dosagem, sem considerar a areia.

A partir dos dados apresentados na Figura 28, notou-se que a resistência a abrasão diminuía conforme o acréscimo de ARM nas dosagens, apresentando-se, deste modo, inversamente proporcionais. Este aspecto é consistente com as descobertas dos autores Kumar e Reddy (2008), que obtiveram um desgaste de 39% para a mesma proporção da Dosagem 04. Ademais, os resultados obtidos apresentaram conformidade com a Norma DNIT 141/2010 – ES, que preconiza como válido valor inferior ou igual a 55% para este parâmetro.

Figura 28 - Valores de abrasão Los Angeles associado a porcentagem de material natural e reciclado por dosagem



Fonte: Autor

Orioli et al. (2018) estudaram a viabilidade de utilização de ARM, provenientes da cidade de São Carlos/SP, em misturas solo-agregado em camadas de base e sub-base de pavimentos. Os autores encontraram valores de abrasão Los Angeles de 19% e 51%, respectivamente, para AN e ARM, diferindo significativamente dos valores encontrados neste estudo.

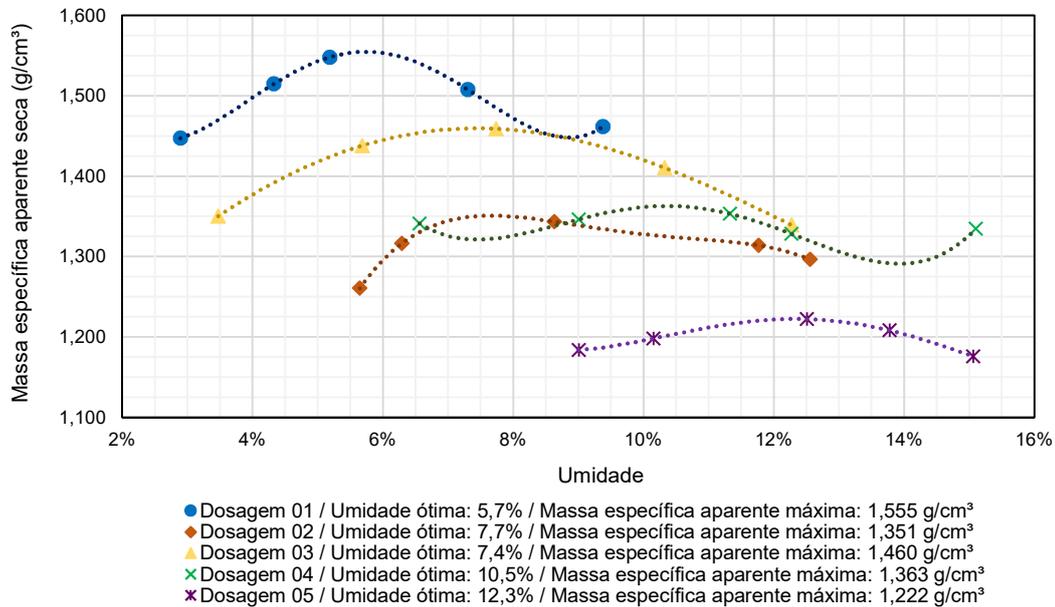
Dentro da bibliografia estudada, constatou-se uma variabilidade expressiva dos resultados do ensaio de abrasão Los Angeles entre os agregados reciclados, possivelmente sendo justificado pelas suas composições e origens. Deste modo, torna-se uma tarefa difícil estipular limites de aceitabilidade para estes materiais.

Ainda, cabe ressaltar que a norma DNER-ME 035/98, elaborada com base em AN, poderia ser aplicável também aos AR, uma vez que enfatiza que a interpretação dos resultados do ensaio de abrasão Los Angeles deve considerar a composição mineralógica, estrutura e uso do material (MOTTA, 2005).

Dando início a etapa de caracterização do comportamento mecânico das misturas, realizou-se o ensaio de compactação com energia modificada, conforme solicitado pela Norma (DNIT, 2010), para determinação da umidade ótima e a massa específica aparente máxima. A necessidade de controle desta característica reside na tentativa de aprimoramento das propriedades do solo, visando aumentar a resistência, reduzir a permeabilidade e minimizar a deformação, por meio da diminuição do volume de

vazios (MORAIS, 2015). Deste modo, as curvas de compactação estão apresentadas na Figura 29.

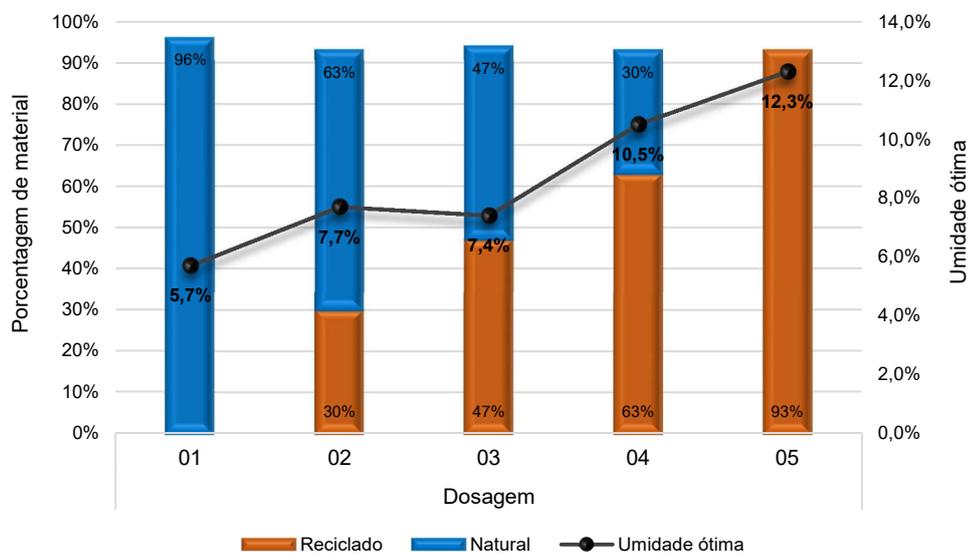
Figura 29 - Curvas de compactação das dosagens solo-agregado



Fonte: Autor

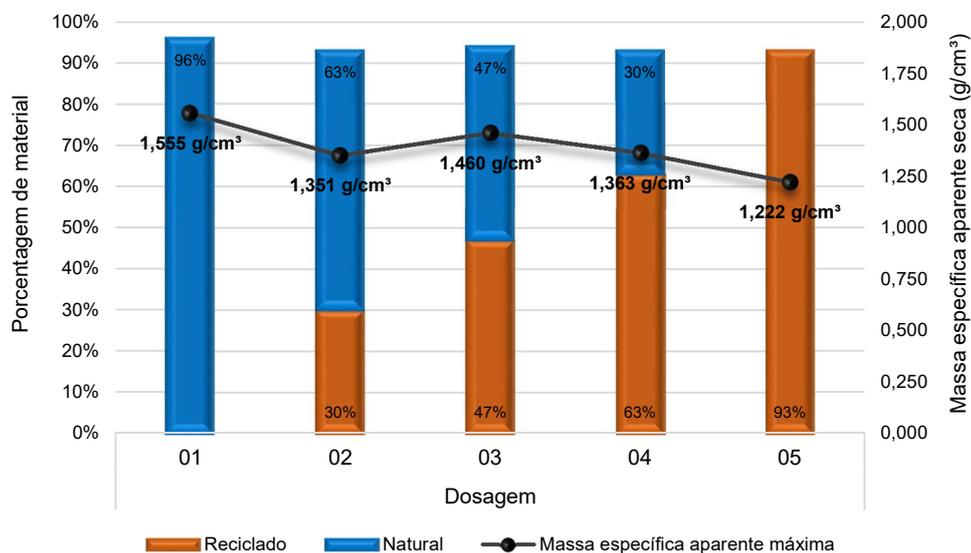
Em relação aos parâmetros obtidos nos ensaios de compactação, observou-se condições de proporcionalidade entre o acréscimo de ARM nas misturas com a redução e elevação, nesta ordem, da massa específica aparente máxima e umidade ótima. Ainda, embora tenha sido observada uma excepcionalidade nos resultados das dosagens 02 e 03, esta pode ser explicada pela composição da respectiva parcela de reciclados utilizados naquela mistura, considerando que são materiais heterogêneos e de difícil controle sistemático. Para melhor visualização, os gráficos da Figura 30 associam os dados encontrados, para cada parâmetro, com a composição de cada dosagem, sem considerar a porcentagem de areia.

Figura 30 - Resultado do ensaio de compactação associado a porcentagem de material natural e reciclado por dosagem – Umidade ótima



Fonte: Autor

Figura 31 - Resultado do ensaio de compactação associado a porcentagem de material natural e reciclado por dosagem – Massa específica aparente máxima



Fonte: Autor

De acordo com Orioli et al. (2018), devido à alta porosidade dos agregados reciclados, a taxa de absorção de água é maior em comparação aos agregados naturais. Os autores destacam que essa característica é uma consequência das propriedades dos materiais constituintes, como é o caso das cerâmicas, que são altamente porosas.

Deste modo, espera-se que a umidade ótima aumente à medida que mais AR é adicionado à mistura, o que está alinhado com os resultados encontrados neste estudo.

Ademais, devido à maior ocorrência de poros nos ARM, estes tornam-se mais suscetíveis à absorção de água e, portanto, tendem a apresentar menor densidade (ORIOLI et al., 2018). Ainda, os autores indicam que outros fatores podem ser afetados pela diminuição da densidade, como a resistência do material e a massa específica aparente máxima.

Molenaar e Niekerk (2002) constataram que algumas características dos AR podem modificar o próprio comportamento mecânico destes materiais, como por exemplo a graduação, composição e, considerado o fator de maior influência, o grau de compactação. Embora os resultados por vezes tenham se mostrado inconsistente, concluiu-se que os corpos de prova, cujo grau de compactação variou de 97% a 105%, apresentaram desempenho mais satisfatórios quando ensaiados para determinação do módulo de resiliência.

Dentro desta perspectiva, surgiram novos estudos acerca da influência da energia de compactação. Leite et al. (2011) indica que a principal característica está relacionada a deformabilidade, uma vez que devido à quebra dos grãos durante o processo de compactação, há uma nova redistribuição de tamanho das partículas. De acordo com o autor, esta condição foi observada com maior nitidez nos corpos de prova compactados com energia modificada e, acerca dos AR, também se observou mudanças quanto à forma, adquirindo caráter mais cúbico.

O presente estudo não se objetivou em verificar a deformabilidade dos agregados após a realização do ensaio de compactação, entretanto, ressalta-se a importância de uma investigação detalhada para conhecimento dos novos aspectos adquiridos. Orioli (2018) indica que caso o agregado não tenha sofrido degradação durante o processo de compactação, este poderá ocorrer devido à ação do tráfego das vias, contribuindo para a ocorrência de deformações permanentes e reduzindo, deste modo, a vida útil do pavimento.

Após determinadas a umidade ótima e a massa específica aparente máxima, iniciou-se os processos para determinação do ISC e expansão das amostras. Conforme mencionado na seção 2.2.2.5.1 deste trabalho, este parâmetro é responsável por estabelecer o valor da capacidade de suporte de solos de materiais granulares

utilizados em camadas de pavimentos, sendo determinado a partir da relação entre a pressão necessária para provocar a penetração do pistão no corpo de prova com a pressão necessária para provocar a mesma condição em um material padrão de referência (MOTTA, 2005). Ainda, são aferidas as variações de altura do corpo de prova, sendo a medida inicial anotada anteriormente ao processo de imersão e, a final, imediatamente após, determinando, assim, a expansão da amostra. Os resultados destes parâmetros, para cada dosagem, estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados do ensaio de ISC e expansão das dosagens solo-agregado

Parâmetros	Dosagem				
	01	02	03	04	05
Índice de Suporte Califórnia (ISC)	360,9%	250,8%	215,4%	109,4%	62,4%
Expansão	0,3%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%

Fonte: Autor

Com base nos dados apresentados na Tabela 25, nota-se uma redução significativa dos valores de ISC conforme o aumento do percentual de material reciclados das dosagens. Orioli (2018) indica que, em termos gerais, agregados naturais tendem a apresentar valores de ISC mais elevados quando comparados aos agregados reciclados de concreto (ARCO), que por sua vez apresentam resultados superiores aos ARM. Ainda, o autor relaciona tal comportamento devido a origem dos materiais, sendo aqueles oriundos de concretos e argamassas mais resistentes em relação aos cerâmico, devido aos processos de cura do cimento.

Em Hong Kong, Poon e Chan (2007) constataram valores de ISC menores para misturas de ARCO com adição de tijolos quando comparados aos resultados respectivos de misturas exclusivas de ARCO e AN para corpos de prova compactados com energia normal, cujos resultados ficaram próximos a 43%, 66% e 85%, respectivamente.

Jiménez et al. (2011) estudaram o comportamento mecânico de diferentes tipos de agregados da região de Córdoba, na Espanha, quando compactados com energia modificada. Os autores encontraram valores de ISC iguais a 152% para AN e, para ARM, resultados compreendidos entre 62% a 68%.

Pereira e Vieira (2022) indicam que os intervalos de ISC para ARM, dentro das literaturas avaliadas, estão compreendidos entre 26% a 150%, corroborando com os valores obtidos nas Dosagens 04 e 05, onde estes agregados estão em sua maioria. De modo geral, os resultados de ISC deste estudo associado aos obtidos através da bibliográfica estudada, apresentaram-se bastante diversos, dificultando o processo de

padronização. Entretanto, esta condição pode ser justificada pela variabilidade intrínseca dos materiais utilizados, principalmente, dos ARM. Deste modo, Oliveira (2015) indica que para a classificação dos RCD reciclados devem ser considerados o desenvolvimento da construção civil da região, as técnicas construtivas e o tipo de empreendimento, as atividades econômicas e as características regionais, tais como a densidade demográfica, cultura e localização geográfica.

Para o DNIT (2010), os critérios de aceitabilidade do ensaio de ISC estão relacionados ao número N, utilizado para determinação do tráfego previsto nas vias. Constatou-se que todas as dosagens apresentaram desempenho satisfatório para  $N \leq 5 \times 10^6$ , entretanto, a Dosagem 05 não deve ser usada para  $N > 5 \times 10^6$ , ou seja, para tráfego leve.

No que se refere à expansão das amostras solo-agregado, em geral, observou-se o declínio deste parâmetro nas dosagens com ARM, manifestando-se nula em alguns casos. De acordo com Orioli (2018), o comportamento de baixa expansibilidade já é esperado para este tipo de material, apresentando, normalmente, valores inferiores a 0,5%, corroborando para a sua aplicação nas camadas de pavimento. Ademais, ressalta-se que todas as dosagens apresentaram conformidade com as especificações da Norma (DNIT, 2010).

Por fim, a Tabela 26 relaciona os parâmetros exigidos pelo DNIT (2010) com os resultados obtidos laboratorialmente, expressando se estão, ou não, em conformidade com a Norma.

Tabela 26 - Análise de conformidade dos resultados das dosagens solo-agregado para aplicação em camadas de base

DNIT 141/2010 – ES					
Parâmetros	Dosagem				
	01	02	03	04	05
Enquadramento na faixa D	●	●	●	●	■
Porcentagem passante da N° 200	●	●	●	●	●
Material retido na N° 10	●	■	■	■	■
Limite de liquidez	●	●	●	●	●
Índice de plasticidade	●	●	●	●	●
Índice de Suporte Califórnia (ISC)	$N \leq 5 \times 10^6$	●	●	●	●
	$N > 5 \times 10^6$	●	●	●	●
Expansão	●	●	●	●	●
Abrasão Los Angeles	●	●	●	●	●

●: Em conformidade      ■: Não conformidade

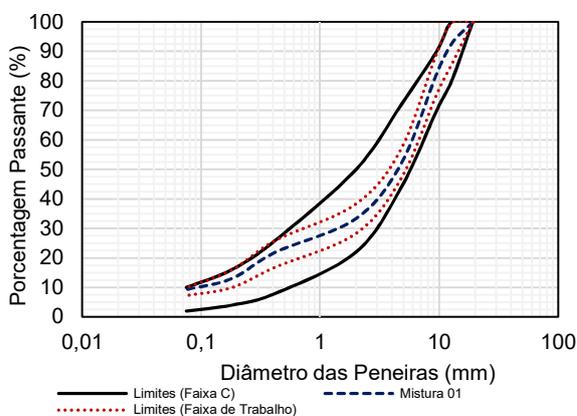
Fonte: Autor

Em linhas gerais, considerou-se a substituição dos AN por ARM satisfatória, embora exija cuidados quanto a presença de materiais indesejados na composição dos reciclados. Ademais, acerca das características dos ARM, entre outros aspectos, destacam-se a graduação ligeiramente mais aberta, alta porosidade, baixa densidade e menores valores de capacidade de suporte para misturas solo-ARM. Apesar da adversidades discutidas, a utilização de RCD reciclados ainda é uma alternativa tecnicamente e ambientalmente vantajosa, uma vez que promove a sustentabilidade e colabora para a criação de um novo empreendimento, as usinas recicladoras (JOHN, 2000; PINTO, 1999; ORIOLI, 2018).

### 3.2 CAMADA DE ROLAMENTO

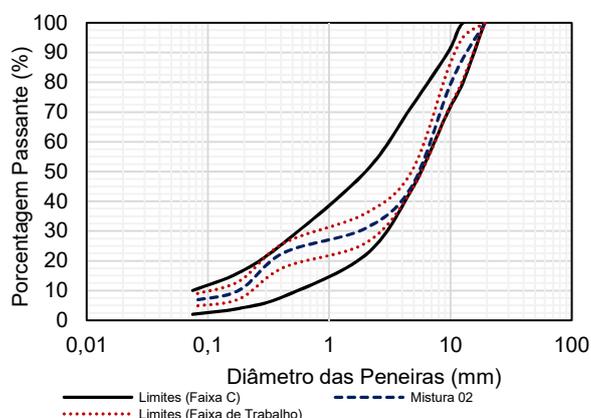
Uma vez determinado o comportamento granulométrico dos agregados, conforme apresentado na seção 3.1 deste estudo, foi possível estabelecer os quantitativos individuais de cada material para composição das misturas. Deste modo, a partir do Método das Tentativas, realizou-se o enquadramento das curvas granulométricas de cada mistura, conforme apresentado nas Figuras 33 a 36. Ainda, cabe ressaltar que a resolução gráfica tem como objetivo relacionar os percentuais de material passante, bem como os limites máximos e mínimos da referida faixa de estudo. Suplementarmente, a Tabela 27 identifica os percentuais de material passante por peneira, juntamente com suas respectivas tolerâncias.

Figura 33 – Mistura 1



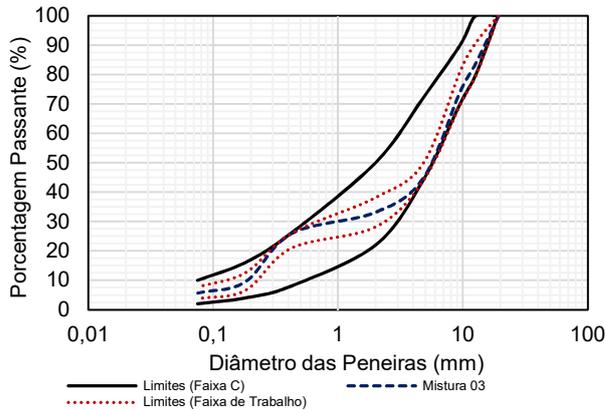
Fonte: Autor

Figura 32 - Mistura 2



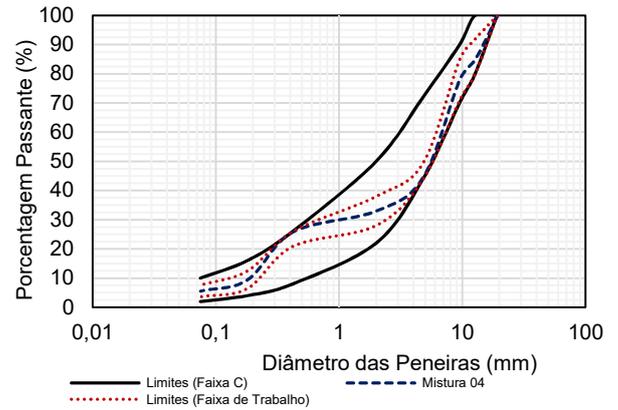
Fonte Autor

Figura 35 - Mistura 3



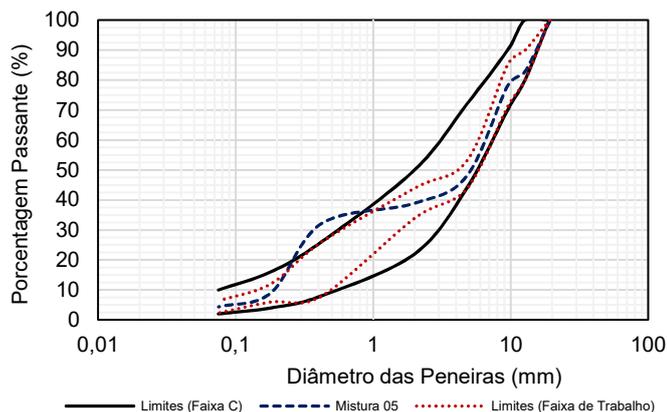
Fonte: Autor

Figura 34 - Mistura 4



Fonte: Autor

Figura 36 - Mistura 5



Fonte: Autor

A partir dos dados apresentados, constatou-se a impossibilidade de enquadramento da Mistura 05, composta exclusivamente por ARM. Ainda, foram verificadas algumas dificuldades durante o processo de dosagem dos agregados reciclados, como é o caso das Misturas 03 e 04, cujo limite máximo passante foi alcançado para a peneira N° 40, enquanto o mínimo quase não foi atingido para a peneira N° 4.

Consoante com as informações apresentadas na Tabela 27, observou-se que a quantidade de material fino, passante da peneira N° 200, foi diminuindo, ao mesmo tempo que os quantitativos de ARM iam aumentando. Este resultado corrobora para a afirmativa que os materiais reciclados possuem graduações ligeiramente mais grossas, o que demanda um controle granulométrico mais rigoroso, como por exemplo o processo duplo de britagem (LIMA, 1999; BAZUCO, 1999).

Tabela 27 - Percentual de material passante e tolerâncias por peneira das misturas

<b>Mistura 01</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Mistura</b>	<b>Limite superior</b>
3/4"	100,0%	100,0%	100,0%
1/2"	85,7%	92,7%	99,7%
3/8"	75,5%	82,5%	89,5%
N° 4	47,2%	52,2%	57,2%
N° 10	28,4%	33,4%	38,4%
N° 40	17,0%	22,0%	26,0%
N° 80	10,0%	13,0%	16,0%
N° 200	7,3%	9,3%	10,0%
<b>Mistura 02</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Mistura</b>	<b>Limite superior</b>
3/4"	100,0%	99,9%	100,0%
1/2"	81,3%	88,3%	95,3%
3/8"	70,4%	77,4%	84,4%
N° 4	44,0%	45,3%	50,3%
N° 10	26,1%	31,1%	36,1%
N° 40	17,8%	22,8%	26,0%
N° 80	7,2%	10,2%	13,2%
N° 200	4,7%	6,7%	8,7%
<b>Mistura 03</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Mistura</b>	<b>Limite superior</b>
3/4"	100,0%	99,7%	100,0%
1/2"	80,0%	84,1%	91,1%
3/8"	70,0%	74,4%	81,4%
N° 4	44,0%	44,9%	49,9%
N° 10	28,2%	33,2%	38,2%
N° 40	21,0%	26,0%	26,0%
N° 80	6,6%	9,6%	12,6%
N° 200	3,8%	5,8%	7,8%
<b>Mistura 04</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Mistura</b>	<b>Limite superior</b>
3/4"	100,0%	99,6%	100,0%
1/2"	80,0%	85,0%	92,0%
3/8"	71,0%	78,0%	85,0%
N° 4	44,0%	44,5%	49,5%
N° 10	28,1%	33,1%	38,1%
N° 40	20,9%	25,9%	26,0%
N° 80	6,5%	9,5%	12,5%
N° 200	3,6%	5,6%	7,6%
<b>Mistura 05</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Mistura</b>	<b>Limite superior</b>
3/4"	100,0%	99,5%	100,0%
1/2"	80,0%	83,0%	90,0%
3/8"	71,3%	78,3%	85,3%
N° 4	44,0%	48,2%	53,2%
N° 10	34,0%	39,0%	44,0%
N° 40	8,0%	32,2%	26,0%
N° 80	6,1%	9,1%	12,1%
N° 200	2,4%	4,4%	6,4%

Fonte: Autor

Lima et al. (2021) indicam que a parcela graúda da mistura é responsável pelo comportamento flexível do concreto asfáltico, deste modo, quanto maior for sua

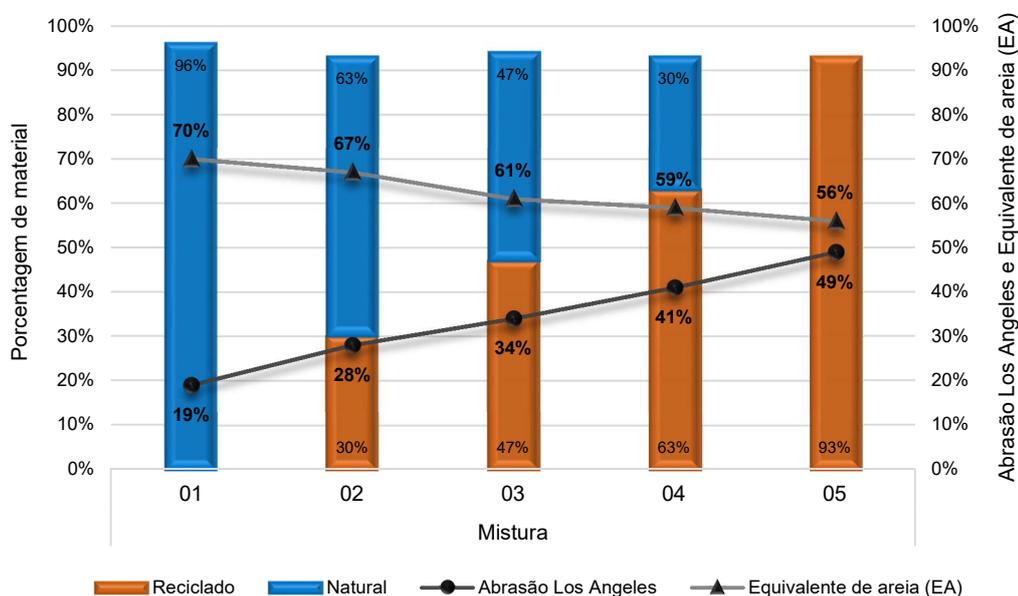
parcela dentro do traço de projeto, melhor será o comportamento flexível do material. Ainda, os autores ressaltam que dosagens altas de finos podem levar a um comportamento rígido do pavimento, deixando-o mais propenso ao surgimento de trincas e fissuras, reduzindo significativamente a vida útil da capa de rolamento. Contudo, vale ressaltar que a Norma DNIT 031/2006 – ES não prevê exceções no que diz respeito à granulometria, deste modo, considerou-se o resultado do enquadramento como insatisfatório para misturas com porcentagens de passante fora dos limites mínimo e máximo.

Ainda, salienta-se que a análise tátil-visual realizada nos agregados miúdos, passantes da peneira N° 4, não revelou quaisquer inconformidades com a Norma (DNIT, 2006). Todavia, conforme discutido na seção 4.1, constatou-se a presença de materiais indesejáveis, tais como gesso, madeira, plástico, vidro, cerâmicos vidrados e ferrosos, exclusivamente nas amostras de ARM. Portanto, destaca-se a necessidade de identificar e eliminar estes materiais durante o processo de beneficiamento destes agregados, a fim de evitar danos à qualidade e ao desempenho da mistura asfáltica (ZORDAN, 1997; MOTTA, 2005).

Seguindo o cronograma experimental, procedeu-se à caracterização física das misturas, que compreende a análise de equivalente de areia (EA), abrasão Los Angeles, índice de forma (IF), durabilidade e adesividade dos agregados graúdos. Deste modo, o gráfico apresentado na Figura 37 tem como objetivo relacionar o percentual de material, natural e reciclado, constituinte de cada mistura com os resultados dos dois primeiros ensaios mencionados.

A partir da análise gráfica da Figura 37, identificou-se que os resultados de abrasão Los Angeles apresentaram aspecto similar aos obtidos para a camada de base. Em outras palavras, à medida que a quantidade de materiais reciclados incorporados às composições aumentou, os percentuais de desgaste também aumentaram, resultando na diminuição da resistência à abrasão da mistura. Ademais, cabe ressaltar a divergência de valores obtidos para a Dosagem 05 e Mistura 05, respectivamente a camada de base e rolamento, que apresentaram resultados de abrasão Los Angeles de 42% e 49% para misturas compostas exclusivamente de ARM. Entretanto, este resultado pode ser devidamente justificado pelas diferenças existentes na composição e origem dos agregados reciclados utilizados em cada arranjo (MOTTA, 2005).

Figura 37 - Resultado dos ensaios de equivalente de areia (EA) e abrasão Los Angeles associado a porcentagem de material natural e reciclado, por mistura



Fonte: Autor

Acerca dos critérios de aceitabilidade, verificou-se que as misturas, em sua totalidade, apresentaram desgaste a abrasão inferior a 50%, atendendo as especificações da norma DNIT 031/2006-ES. Queiroz Neto (2019) indica que este ensaio está intimamente relacionado à durabilidade do agregado e, por consequência, do pavimento asfáltico. Portanto, resultados dentro dos limites normativos são indicativos de uma vida útil mais prolongada para a estrutura, conferindo estabilidade e segurança em condições severas de tráfego.

Com relação ao controle de finos, os resultados do equivalente de areia (EA) indicam que à medida que se aumentava a incorporação de ARM nas misturas, os percentuais de argila também aumentavam, o que ocasionou um aumento na proporção de areia, que de 7% passou a compor 11%, para as Misturas de 03 a 05. Ainda, embora o percentual de EA da Mistura 05 tenha ficado muito próximo do limite mínimo estabelecido por Norma, todos os resultados foram considerados satisfatórios (DNIT, 2006).

Durante a prática experimental, constatou-se que os movimentos circulares da haste utilizada no ensaio provocaram o fracionamento dos grãos dos ARM, corroborando com a afirmação de que estes possuem baixa resistência ao desgaste, como descrito por Motta (2005). Ademais, o decréscimo do percentual de areia nas misturas pode

ser justificado pela composição dos ARM, considerando que estes são constituídos, também, de materiais cerâmicos, que são fabricados a partir da argila. Assim, o atrito entre os grãos do agregado reciclado provoca o fracionamento das partículas e o depósito de frações menores de argila na solução aquosa do ensaio, resultando na redução do EA das misturas.

Ainda sobre a caracterização física das misturas, Bernucci et al. (2008) apontam que a forma das partículas, isto é, a feição exterior relacionada às suas dimensões, pode interferir na resistência ao cisalhamento de pavimentos e, adicionalmente, na energia de compactação das misturas asfálticas. Deste modo, os resultados do ensaio de índice de forma (IF), pelo método dos crivos, estão apresentados na Tabela 38.

Figura 38 - Resultados do ensaio de índice de forma (IF)

Parâmetro	Mistura				
	01	02	03	04	05
Índice de forma (IF)	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8

Fonte: Autor

A partir dos dados obtidos, observou-se que as frações granulométricas da Mistura 04 e 05 indicaram comportamento mais cúbico quando comparadas, por exemplo, com a Mistura 01, composta integralmente por AN. Ademais, em conformidade com as especificações da Norma (DNIT, 2006), os resultados obtidos foram efetivos, apresentando IF superior a 0,5.

Gouveia (2006) indica que, para fins de pavimentação, a forma ideal dos agregados é a arredondada, entretanto, considerando que as partículas também são angulosas, pode-se adotar como forma ideal a cúbica. Ainda, a autora salienta que os conceitos de forma e angularidade não devem ser confundidos, uma vez que, independentemente da forma, as partículas podem apresentar variações em suas angularidades, como cantos e arestas agudos ou desgastados.

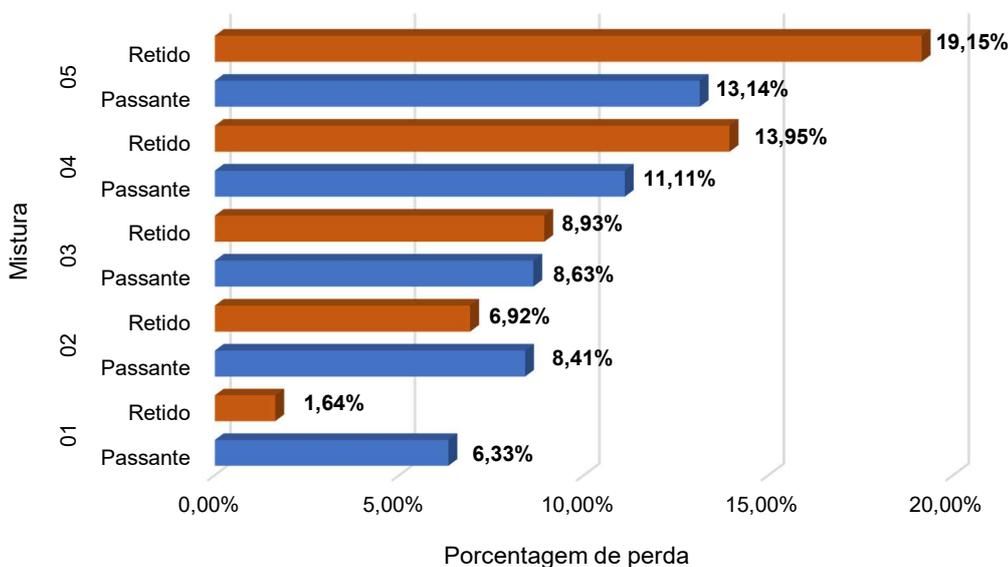
Resultados análogos ao deste trabalho foram encontrados por Queiroz Neto (2019) e Lima et al. (2021), cujo IF encontrado foi igual a 0,9. Ainda, Motta (2005) constatou, através da classificação pelo método do paquímetro, que as frações granulométricas analisadas apresentaram forma cúbica, corroborando para sua aplicação em pavimentos asfálticos.

Bazucco (1999) indica que os equipamentos de britagem podem influenciar na forma dos agregados, destacando-se o uso de britadores giratórios, que fornecem partículas

mais arredondadas, enquanto os britadores de mandíbula tendem a acentuar a forma angular dos agregados. Ademais, Fernandes (2004) aponta que a cubicidade dos agregados reciclados, especialmente os de tipo misto, decorre em parte da sua vulnerabilidade ao desgaste superficial das partículas.

Em relação a caracterização física quanto a durabilidade das partículas, Cardoso et al. (2015) indicam que esta propriedade pode ser definida como a capacidade de um agregado de resistir à degradação devido aos efeitos ambientais ou químicos, isto é, as intempéries. Consoante as especificações do DNER-ME 089/94, os agregados são analisados separadamente, conforme as subfrações apresentadas no escopo normativo, obtendo dois resultados para este parâmetro, sendo um referente as partículas retidas na peneira N° 4 e outro para os passantes, respectivamente a porção graúda e miúda. Deste modo, os resultados obtidos nesta fase experimental estão apresentados na Figura 39.

Figura 39 - Resultados dos ensaios de durabilidade



Fonte: Autor

Notou-se que as maiores perdas estavam relacionadas a fração graúda das Misturas 04 e 05, compostas maioritariamente por AR, cujos resultados indicaram uma perda de 13,95% e 19,15%, respectivamente. Ainda, cabe ressaltar que o percentual de perda tolerado é de até 12%, portanto, as misturas supracitadas não apresentaram conformidade com a Norma (DNIT, 2006).

Bazaz, Khayati e Akrami (2006) compararam a durabilidade de agregados reciclados de alvenaria e cimentícios (ARCI) após a imersão em solução de sulfato de sódio. Os resultados mostraram que o primeiro grupo apresentou uma perda de massa de 10,9% e 4,1% para a parcela graúda e miúda, respectivamente. Por outro lado, a amostra de cimentícios apresentou percentuais próximos a 65,9% e 38,5%, para a mesma ordem. Deste modo, os autores concluíram que o desempenho dos ARCI é insatisfatório, cujos resultados podem ser justificados pelo efeito destrutivo do sulfato nos materiais cimentícios, como argamassa e concreto.

Paiva (2017) indica que a aplicação do ensaio de durabilidade em território nacional tem sido alvo de críticas, uma vez que o clima do país não apresenta grandes variações de temperatura que possam causar congelamento do pavimento, deste modo, o desgaste devido à redução da expansão é menor. Contudo, até o presente momento, não houve a implementação de um método alternativo para avaliar a durabilidade dos agregados pelos órgãos fiscalizadores.

Para concluir a caracterização física das misturas, realizou-se o ensaio de adesividade dos agregados graúdos das Misturas 01 e 05, compostas exclusivamente por AN e ARM, respectivamente. A análise foi conduzida de maneira individual, uma vez que o propósito do experimento é avaliar o deslocamento da película betuminosa do agregado, portanto, caso houvesse uma combinação de diferentes agregados, seria impossível identificar qual deles sofreu o deslocamento. Deste modo, os resultados estão apresentados na Tabela 28.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 28, verificou-se a ocorrência de deslocamento da película betuminosa que envolvia os agregados da Mistura 05, evidenciando a má adesividade dos ARM. Além disso, é importante destacar que durante o processo inicial de envolvimento dos ARM pelo ligante asfáltico, notou-se uma dificuldade em alcançar uma cobertura total, ocasionando no recobrimento parcial de muitas partículas da amostra.

Tabela 28 - Resultados dos ensaios de adesividade

	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa
	Envolvimento do agregado	Imersão em água destilada	Transcorrido o período de 72 horas
Mistura 01			
Mistura 05			

Fonte: Autor

De acordo com a literatura estudada, a superfície rugosa, áspera e porosa dos ARM pode contribuir para a diminuição da adesão e coesão da estrutura agregado ligante (KENEDY et al., 1983; HAMASSAKI et al., 1996; ORIOLI et al.; 2018). Ainda, outras variáveis relacionadas ao ligante asfáltico podem exercer interferência no resultado da adesividade, como a viscosidade e composição química (DIBALSKI, 1982; PETERSEN et al., 1982; ROBERTS et al., 1996).

Bernucci et al. (2008) indicam o uso de melhoradores de adesividade, também conhecidos como dope, em casos em que o ligante asfáltico não apresentou boa adesividade ao agregado selecionado para a obra. Ainda, os autores apontam que a adesão entre os materiais é influenciada por fatores físicos e químicos e, no caso das misturas asfálticas, a carga elétrica do ligante asfáltico (ácido) e a mineralogia do agregado são os fatores mais influentes.

Na etapa subsequente do cronograma experimental, que aborda as propriedades do ligante asfáltico – CAP 50/70, foi conduzido o ensaio de viscosidade rotacional. O resultado foi determinado a partir da média aritmética de três leituras individuais para

cada condição aplicada, que incluiu: 135°C/20 rpm, 150°C/50 rpm e 177°C/100 rpm. Assim, com base nos dados obtidos para cada cenário supracitado, foi possível estabelecer a Tabela 29 a seguir.

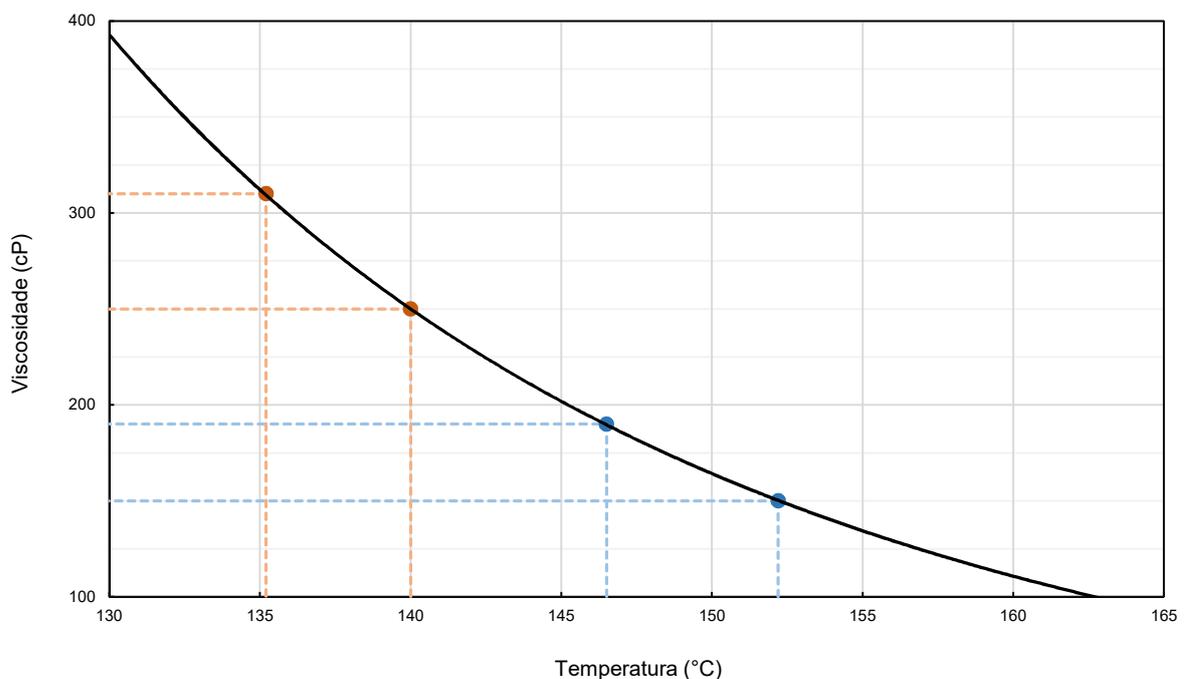
Tabela 29 - Resultados do ensaio de viscosidade

	<b>Parâmetros</b>	<b>Medição 01</b>	<b>Medição 02</b>	<b>Medição 03</b>	<b>Média</b>
20	Temperatura	135,3°C	135,3°C	135,3°C	135,3°C
	Torque	12,6%	12,4%	12,4%	12,5%
	Viscosidade	315,0 cP	310,0 cP	310,0 cP	311,7 cP
50	Temperatura	150,2°C	150,4°C	150,3°C	150,3°C
	Torque	15,9%	15,9%	15,9%	15,9%
	Viscosidade	159,0 cP	159,0 cP	159,0 cP	159,0 cP
100	Temperatura	176,9°C	176,8°C	177,0°C	176,9°C
	Torque	12,1%	12,1%	12,1%	12,1%
	Viscosidade	60,5 cP	60,5 cP	60,5 cP	60,5 cP

Fonte: Autor

Em um primeiro momento, constatou-se que, para todas as condições de ensaio, o valor médio da viscosidade atendeu às especificações estabelecidas pela Norma DNIT 095/2006 – EM. Deste modo, procedeu-se com a elaboração da curva de variação da viscosidade em função da temperatura, apresentada graficamente na Figura 40. Por fim, as temperaturas de mistura, compactação e do agregado foram definidas, conforme identificado na Tabela 30.

Figura 40 - Curva da variação da viscosidade em função da temperatura



Fonte: Autor

Tabela 30 - Temperaturas de mistura, compactação e do agregado

Parâmetros	Temperatura	
	Mínima	Máxima
Mistura	147°C	152°C
Compactação	135°C	140°C
Agregado	157°C	162°C

Fonte: Autor

As temperaturas de mistura e compactação foram estabelecidas com base no intervalo da faixa de viscosidade do ligante asfáltico, consoante a Norma DNIT 178/2018-PRO. Ainda, a temperatura do agregado, conforme Bernucci et al. (2008), foi definida como sendo 10 °C acima da temperatura de mistura, também conhecida como temperatura de usinagem.

Azari, McCuen e Stuart (2003) enfatizam a relevância de determinar o intervalo de temperaturas de compactação apropriado, uma vez que esta medida permite um melhor condicionamento da moldagem dos corpos de prova em laboratório e, ainda, contribui substancialmente para a elaboração de misturas asfálticas para lançamento em campo. Ainda, por meio de análises estatísticas dos dados, os autores identificaram que a variação desse parâmetro impactou significativamente tanto o teor total de vazios de ar quanto a distribuição desses vazios dentro da amostra. No geral, observou-se que estas temperaturas podem influenciar o teor de projeto, o grau de envelhecimento e a absorção do ligante asfáltico, levando ao desarranjo estrutural dos agregados e impactando a densidade da mistura compactada.

Segundo o Asphalt Institute (1980), as partículas de agregado tendem a se movimentar com maior facilidade em níveis de viscosidade mais baixas, porém, este processo não confere coesão suficiente para mantê-las estruturadas. Portanto, durante o processo de rolagem, a dinâmica deve ser contida por viscosidades mais altas, de modo a conferir estabilidade ao pavimento.

Dando início a última etapa do cronograma experimental, referente a Dosagem Marshall, procedeu-se a moldagem dos corpos de prova e aferições de massas e dimensões, conforme especificado nos itens 2.3.2.4.1.1 e 2.3.2.4.1.3 deste estudo. Paralelamente a estes processos, realizou-se o ensaio previsto pela Norma DNIT 427/2020-ME, para determinação da densidade relativa máxima ( $G_{mm}$ ) de amostras não compactadas. Deste modo, a Tabela 31 apresenta os resultados obtidos nesta fase para cada teor de ligante adotado.

Tabela 31 - Resultados dos ensaios de densidade relativa máxima ( $G_{mm}$ ) para cada teor de ligante adotado

Mistura	Parâmetros	Resultados			
01	% Ligante asfáltico	4,5	5,0	5,5	6,0
	$G_{mm}$	2,664	2,630	2,580	2,549
02	% Ligante asfáltico	5,0	5,5	6,0	7,0
	$G_{mm}$	2,553	2,526	2,503	2,494
03	% Ligante asfáltico	6,5	7,0	7,5	8,0
	$G_{mm}$	2,397	2,374	2,369	2,358
04	% Ligante asfáltico	6,0	6,5	7,0	8,0
	$G_{mm}$	2,389	2,385	2,374	2,327
05	% Ligante asfáltico	7,5	8,0	8,5	9,0
	$G_{mm}$	2,275	2,247	2,193	2,150

Fonte: Autor

Baseado nos dados apresentados na Tabela 31, verificou-se que as misturas compostas principalmente por AN, como as Misturas 01 e 02, apresentaram valores mais elevados de  $G_{mm}$ . Lima et al. (2021) indicam que a redução da densidade dos AR está diretamente relacionada a presença de frações de material cerâmico, gesso e pasta de cimento em sua composição. Ainda, os autores salientam que esta condição pode influenciar a dosagem de ligante asfáltico das misturas, exigindo maiores percentuais para atendimento das normativas.

Os resultados evidenciam uma relação inversamente proporcional entre os parâmetros, indicando que o aumento do percentual de ligante asfáltico resultará na diminuição da  $G_{mm}$ , aspecto também observado por Queiroz Neto (2019). De maneira geral, a densidade apresenta uma tendência de redução à medida que o percentual de ligante asfáltico aumenta, devido ao aumento do volume ser mais significativo em relação ao aumento da massa.

Prosseguindo com o processo de dosagem, procedeu-se com a determinação da densidade relativa aparente do agregado ( $G_{sb}$ ), miúdo e graúdo, para o cálculo da densidade relativa aparente média ( $G$ ), conforme apresentado na seção 2.3.2.4.1.5 deste estudo. Os resultados deste processo estão apresentados na Tabela 32, que indica os valores finais de  $G$  após a média harmônica ponderada.

Tabela 32 - Resultado dos ensaios de densidade relativa aparente do agregado, miúdo e graúdo, e determinação da densidade relativa aparente média ( $G$ )

Mistura	Densidade relativa aparente		
	Miúdo	Graúdo	Média ( $G$ )
01	2,715	2,818	2,771
02	2,512	2,663	2,603
03	2,570	2,510	2,533
04	2,483	2,322	2,382
05	2,317	2,151	2,221

Fonte: Autor

Conforme discutido na seção 3.1 desta pesquisa, a elevada porosidade do AR resulta em altas taxas de absorção de água, deste modo, misturas dosadas com este tipo de material tendem a apresentar menores valores de densidade (ZORDAN, 2003; MOTTA, 2005), aspecto verificado a partir dos resultados indicados na Tabela 32.

Bazuco (1999) indica que é comum observar uma redução de 5% a 10% na densidade dos ARM, variando em pequenos intervalos conforme a origem e a granulometria do agregado. Ainda, Cardoso et al. (2015) apontam que materiais com densidades reduzidas tendem a manifestar desempenho inferior em aplicações que exijam alta resistência, rigidez e baixa taxa de absorção de água.

Posteriormente aos processos descritos, realizou-se os cálculos para obtenção da densidade relativa do corpo de prova ( $G_{mb}$ ) e dos parâmetros volumétricos. Ainda, preconizado pela Norma DNER-ME 043/95, foram obtidos os valores de estabilidade e fluência. Os resultados finais das dosagens Marshall, baseados na média aritmética de três corpos de prova moldados sob as mesmas condições, estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Resultados das dosagens Marshall

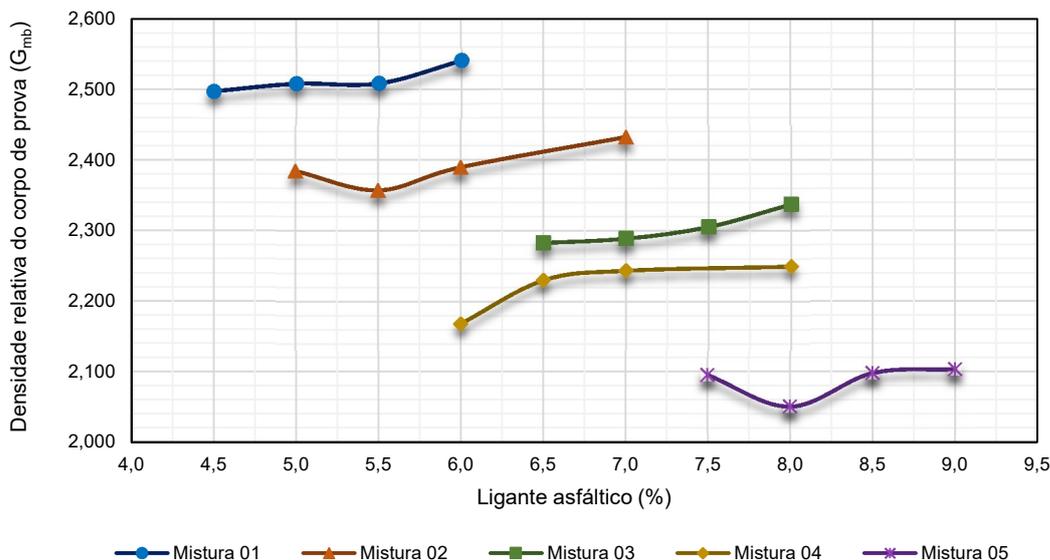
Mistura	Ligante asfáltico	Massa do corpo de prova (g)			Absorção de água	Densidade relativa		Parâmetros volumétricos				Estabilidade			Fluência
		Seco ao ar	Imerso em água	Saturado		Aparente (G <sub>mb</sub> )	Máxima (G <sub>mm</sub> )	VV	VAM	RBV	Altura	Fator de correção	Leitura (kgf)	Corrigida (kgf)	
01	4,5%	1209,30	729,00	1213,20	0,8%	2,498	2,644	5,5%	13,9%	60,3	61,9 mm	1,05	1506,0	1578,5	2,39 mm
	5,0%	1226,17	738,70	1227,57	0,3%	2,508	2,630	4,6%	14,0%	67,1	64,6 mm	0,99	1213,7	1210,1	2,30 mm
	5,5%	1216,90	734,03	1219,13	0,5%	2,509	2,580	2,8%	14,5%	80,9	67,0 mm	0,93	1060,7	995,1	2,60 mm
	6,0%	1261,27	765,47	1261,90	0,1%	2,541	2,549	0,3%	13,8%	97,5	62,5 mm	1,04	1205,7	1252,0	3,91 mm
02	5,0%	1231,63	718,07	1234,57	0,6%	2,384	2,553	6,6%	13,0%	49,3	65,4 mm	0,97	1260,0	1205,5	2,49 mm
	5,5%	1166,57	677,70	1172,63	1,2%	2,357	2,526	6,7%	14,4%	53,6	62,5 mm	1,04	1184,0	1231,9	2,31 mm
	6,0%	1160,17	676,70	1162,20	0,4%	2,390	2,503	4,5%	13,7%	67,0	61,5 mm	1,07	1053,0	1125,7	2,30 mm
	7,0%	1191,83	703,17	1193,17	0,3%	2,432	2,494	2,5%	13,1%	81,3	75,3 mm	0,86	998,5	858,7	2,17 mm
03	6,5%	1151,70	651,3	1155,73	0,8%	2,283	2,397	4,8%	15,7%	69,8	63,5 mm	1,01	1113,3	1125,8	2,80 mm
	7,0%	1151,60	651,77	1154,83	0,6%	2,289	2,374	3,6%	15,9%	77,6	63,2 mm	1,02	971,3	993,0	2,31 mm
	7,5%	1152,57	655,57	1155,53	0,6%	2,306	2,369	2,7%	15,8%	83,3	62,5 mm	1,04	831,3	866,5	3,59 mm
	8,0%	1150,93	660,70	1153,07	0,4%	2,338	2,358	0,9%	15,1%	94,2	61,8 mm	1,06	1195,7	1266,1	4,31 mm
04	6,0%	1134,87	643,77	1167,00	6,1%	2,169	2,389	9,2%	14,4%	36,1	62,8 mm	1,03	818,0	843,5	2,26 mm
	6,5%	1170,83	653,50	1178,47	1,5%	2,230	2,385	6,5%	12,4%	47,8	66,1 mm	0,95	1265,0	1200,0	2,21 mm
	7,0%	1140,77	636,47	1144,90	0,8%	2,244	2,374	5,5%	12,4%	55,9	64,4 mm	0,99	1415,7	1409,0	2,99 mm
	8,0%	1165,30	649,53	1167,53	0,4%	2,250	2,327	3,3%	13,1%	74,9	64,5 mm	0,99	539,3	525,8	2,57 mm
05	7,5%	1053,33	552,57	1055,37	0,4%	2,095	2,275	7,9%	12,8%	38,0	62,8 mm	1,03	1463,0	1509,4	1,77 mm
	8,0%	1053,60	546,83	1060,70	1,4%	2,050	2,247	8,7%	15,1%	42,1	64,5 mm	0,99	1159,7	1144,7	3,16 mm
	8,5%	1051,57	554,50	1055,80	0,8%	2,098	2,193	4,3%	13,6%	68,2	62,7 mm	1,03	1002,3	1037,2	2,99 mm
	9,0%	1053,03	554,63	1055,33	0,5%	2,103	2,150	2,2%	13,8%	84,3	62,3 mm	1,05	909,0	950,9	2,49 mm

Fonte: Autor

No que se refere à densidade relativa do corpo de prova ( $G_{mb}$ ), constatou-se, inicialmente, sua relação direta com o volume de vazios (VV), visto que ambos são inversamente proporcionais. Achados similares foram reportados por Costa Filho (2012) e Queiroz Neto (2019), que identificaram que o acréscimo do teor de ligante asfáltico se traduziu em um aumento da  $G_{mb}$ , uma vez que ocorrerá o maior preenchimento dos vazios entre os agregados.

A Figura 41 apresenta as curvas relativas entre os valores médios das  $G_{mb}$ , obtidas através da média aritmética de três corpos de prova, em função das porcentagens de ligante asfáltico adotadas para cada mistura.

Figura 41 - Representação gráfica dos valores médios das densidades relativas dos corpos de prova ( $G_{mb}$ ) em função das porcentagens de ligante asfáltico adotadas



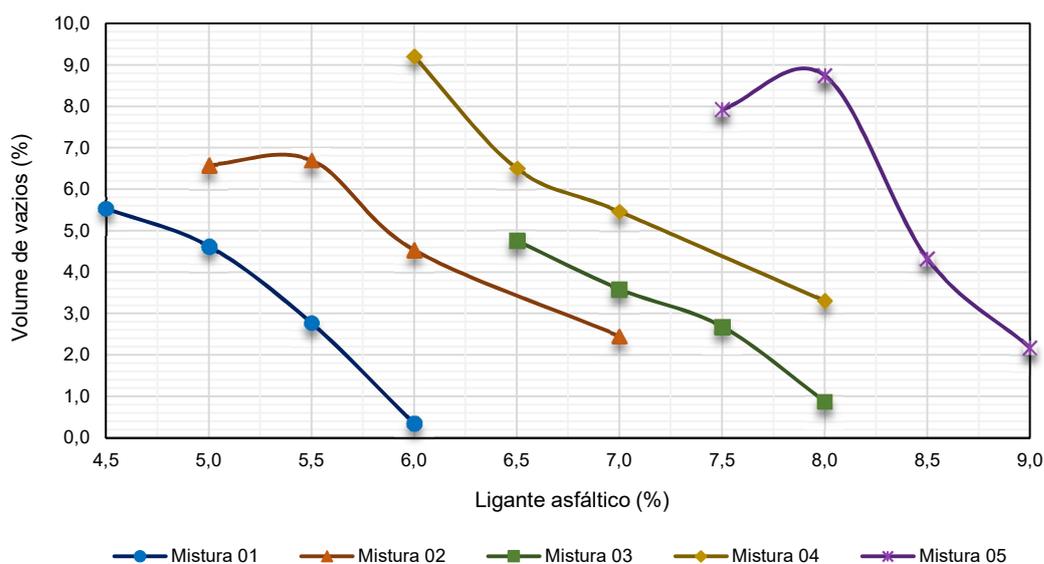
Fonte: Autor

Relacionando a Figura 41 com os dados apresentados na Tabela 33, notou-se que, de forma geral, os teores de ligante asfáltico mais baixos foram responsáveis por resultados mais expressivos de VV e, simultaneamente, por menores valores de  $G_{mb}$ , corroborando para a afirmativa que são inversamente proporcionais. Ademais, constatou-se que as Misturas 04 e 05, constituídas predominantemente ARM, manifestaram valores inferiores de  $G_{mb}$  mesmo em concentrações elevadas de ligante asfáltico, em virtude da elevada taxa de absorção e da porosidade intrínseca dos materiais reciclados (BAZUCO, 1999; MOTTA, 2005; MOTTER, 2013).

Cabe ressaltar que os ARM englobam uma ampla gama de materiais heterogêneos, deste modo, alguns resultados podem não corresponder às expectativas previamente estabelecidas. Posto isto, é imprescindível considerar estas particularidades ao avaliar os resultados apresentados e interpretá-los de forma criteriosa (ZORDAN, 2002; ÂNGULO, ZORDAN e JOHN, 2022).

Para o início da análise dos parâmetros volumétricos torna-se inevitável o estudo do volume de vazios (VV) da mistura asfáltica, uma vez que alguns comportamentos do pavimento flexível, quando solicitado pelas cargas de tráfego, podem ser previstos pela simples aferição de sua porcentagem (COSTA FILHO, 2017; QUEIROZ NETO, 2019). Deste modo, a Figura 42 apresenta as curvas referentes a porcentagem de vazios em relação ao teor de ligante asfáltico adotado para as cinco misturas traçadas.

Figura 42 - Representação gráfica do volume de vazios (VV) em função das porcentagens de ligante asfáltico adotadas



Fonte: Autor

A partir da análise gráfica dos resultados obtidos, constatou-se que o aumento do teor de ligante asfáltico na mistura asfáltica acarreta uma redução crescente no volume de vazios (VV), fato que já havia sido verificado por outros estudos, tais como Motter (2013), Costa Filho (2017) e Queiroz Neto (2019). Este comportamento pode ser justificado pela ação do produto betuminoso em preencher os vazios existentes nos agregados residuais (QUEIROZ NETO, 2019).

Verificou-se que nas concentrações de 5,5% - 6,0% e 7,5% - 8,0% de ligante asfáltico, respectivamente nas Misturas 01 e 03, ocorreu uma diminuição acentuada no volume

de vazios (VV), sendo prejudicial ao revestimento asfáltico, uma vez que não haverá espaço suficiente para o acomodamento das deformações internas e alívio das tensões quando submetido à carga (BERNUCCI et al., 2008; QUEIROZ NETO, 2019). Costa Filho (2017) sugere que este comportamento pode ser explicado pela maior presença de partículas finas no traço da mistura, resultando em um maior preenchimento vazios.

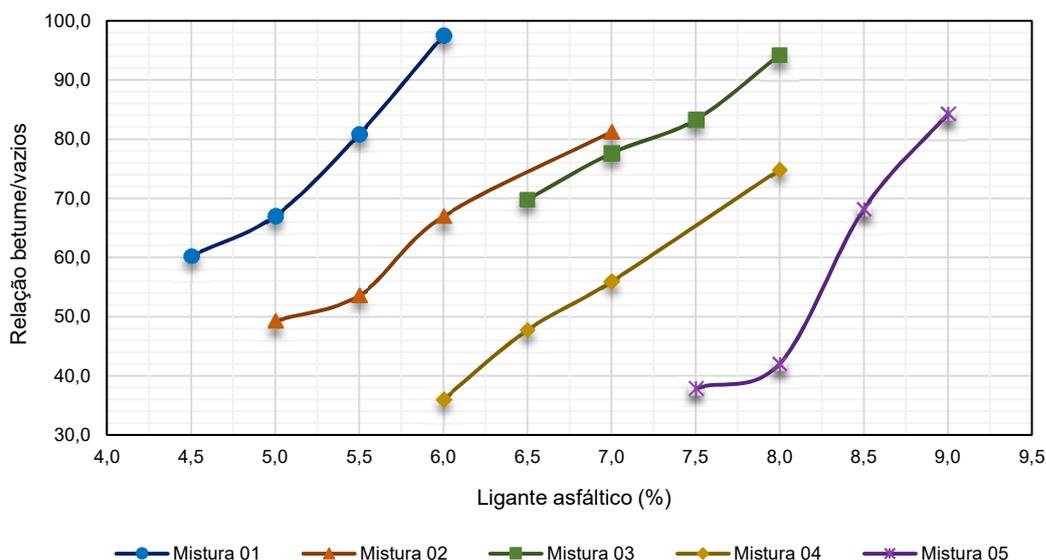
Além disso, constatou-se que na Mistura 04 o volume de vazios (VV) apresentou percentual muito superior quando comparado às outras composições, mesmo para concentração de ligante asfáltico de 8,0%. A causa deste comportamento pode ser justificada pela má adesão dos ARM, bem como pela granulometria mais grossa destes agregados (BAZUCO, 1999; COSTA FILHO, 2017).

Bernucci et al. (2008) ressaltam a importância de atendimento dos intervalos estipulados por Norma para este parâmetro, uma vez que altas concentrações de ligante asfáltico podem prejudicar o desempenho do revestimento, causando deformações permanentes na mistura devido à fluência e/ou exsudação. Por outro lado, baixas concentrações deste composto podem enfraquecer a mistura asfáltica e, conseqüentemente, reduzir sua resistência à tração, levando à formação de trincas no pavimento. Neste sentido, o material asfáltico passa a ter sua vida útil reduzida (QUEIROZ NETO, 2009).

De forma geral, Motter (2013) indica que o VV é um dos principais fatores que afetam a durabilidade de misturas asfálticas em serviço. Ainda, a autora evidencia que a permeabilidade das misturas é influenciada por vários fatores, no entanto, as Normas nacionais e internacionais têm estabelecido critérios de aceitabilidade arbitrários para VV, onde acredita-se que valores entre 3,0% e 5,0% são considerados baixos e indicam misturas impermeáveis, enquanto valores acima de 14% indicam misturas permeáveis. Para Marinho (2011), percentuais de VV entre 6,0% e 13,0% não podem ser caracterizadas como drenantes ou impermeáveis, sendo mais suscetíveis a danos induzidos pela umidade.

Ainda sobre os parâmetros volumétricos, efetuou-se o desenvolvimento gráfico da relação betume/vazios em função das concentrações de ligante asfáltico adotadas para cada mistura realizada. A Figura 43 apresenta os resultados obtidos.

Figura 43 - Representação gráfica da relação betume/vazios (RBV) em função das porcentagens de ligante asfáltico adotadas



Fonte: Autor

De modo geral, constatou-se um aumento contínuo da RBV à medida que as concentrações de ligante asfáltico aumentavam, corroborando com as pesquisas de Queiroz Neto (2019), que indica a existência de uma condição diretamente proporcional entre os parâmetros. Costa Filho (2017) aponta que os resultados mais acentuados de RBV podem ser justificados pela maior quantidade de ligante presente nas misturas asfálticas ou pela diminuição dos valores de VV, possivelmente devido a uma compactação mais eficiente ou ao uso de agregados com menor angularidade. Ao correlacionar as curvas da RBV com os dados apresentados na Tabela 33, foi possível observar que a Mistura 01, com um teor de 6,0%, apresentou uma RBV média de 97,5, enquanto a Mistura 05, com a maior concentração de ligante asfáltico da dosagem, alcançou o valor de 84,3. Estudos realizados por Lourenço e Cavalcante (2015) apresentaram resultados semelhantes, com valores de RBV de 75,2 e 77,2 para teores de 8,0% e 9,0%, respectivamente. Os dados sugerem que os AR requerem uma quantidade maior de ligante asfáltico para alcançar resultados semelhantes aos dos AN, o que pode ser explicado pela alta quantidade de material cerâmico presente na composição.

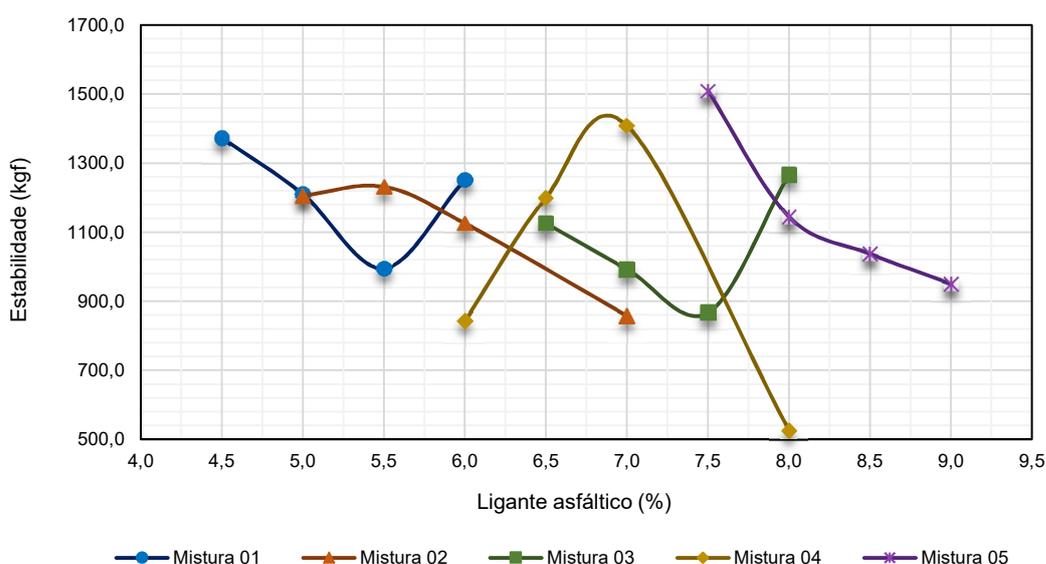
De acordo com Motter (2013), a RBV é influenciada diretamente pelas densidades dos materiais que compõem as misturas asfálticas (agregados e ligante asfáltico), bem como pelo percentual de ligante adotado durante o processo de dosagem.

Estudos posteriores, como de Costa Filho (2017) e Queiroz Neto (2019), indicam que valores baixos de RBV podem resultar na desintegração dos materiais e tornar os pavimentos mais susceptíveis a infiltração de água, comprometendo a durabilidade da estrutura.

No que se refere aos vazios de agregado mineral (VAM), é estabelecido pela Norma DNIT 031/2006 – ME que os projetos de misturas asfálticas devem priorizar o atendimento do critério da RBV. No entanto, não sendo possível o cumprimento dos critérios de aceitabilidade deste parâmetro, realiza-se a verificação do VAM a partir do tamanho máximo nominal (TMN) da mistura. Conforme mencionado na seção 2.3.2.4.1.8 deste estudo, o teor de projeto é determinado por meio da relação gráfica dos parâmetros de VV e RBV, portanto, neste primeiro momento não foi realizada a análise dos resultados de VAM, que será discutida posteriormente durante a verificação dos parâmetros para o teor de projeto.

No que tange a caracterização mecânica analisadas neste trabalho, foram aplicadas as especificações da Norma DNER-ME 043/95 para determinação da estabilidade e fluência dos corpos de prova. A Figura 44 apresenta as curvas de estabilidade obtidas em relação aos percentuais de ligante asfáltico adotados durante o processo de dosagem.

Figura 44 - Representação gráfica da estabilidade em função das porcentagens de ligante asfáltico adotadas



Fonte: Autor

Com base nos resultados apresentados na Figura 44, foi constatado que os corpos de prova correspondentes às Misturas 04 e 05 alcançaram os maiores valores de estabilidade, possivelmente atribuído ao fato de apresentarem menores quantidades de finos presentes em sua composição (COSTA FILHO, 2017). Além disso, observou-se que a curva de estabilidade referente à Mistura 03 não apresentou comportamento disperso, como ocorreu com as demais, o que pode ser justificado pela maior estabilidade e empacotamento das partículas da fração graúda, bem como por uma compactação mais eficiente dos traços (BRASILEIRO, 1983; COSTA FILHO, 2017; QUEIROZ NETO, 2019).

Zhu, Zhong e Wang (2012) e Shen e Du (2004) constataram que as misturas asfálticas que incorporavam RCD reciclados demonstraram valores de estabilidade e fluência Marshall comparáveis ou até superiores às misturas compostas exclusivamente por AN. Estes resultados foram atribuídos à maior rugosidade e angularidade dos AR, o que conferiu maior coesão à mistura asfáltica.

É válido destacar que em todos os traços de mistura, em seu ponto de pico, foram obtidos valores de estabilidade acima de 500,0 kgf, apresentando conformidade com o requisito mínimo recomendado pela Norma DNIT 031/2006 – ES, para a camada de rolamento de pavimentos asfálticos usinados a quente.

Após a obtenção dos resultados médios de VV e RBV para os diferentes teores testados, tornou-se viável a determinação do teor de projeto para cada uma das misturas avaliadas, como demonstrado nas Figuras 46 a 49. Adicionalmente, a Tabela 34 apresenta os teores centrais obtidos e a média correspondente ao teor ótimo de projeto.

Figura 46 - Teor ótimo Mistura 1

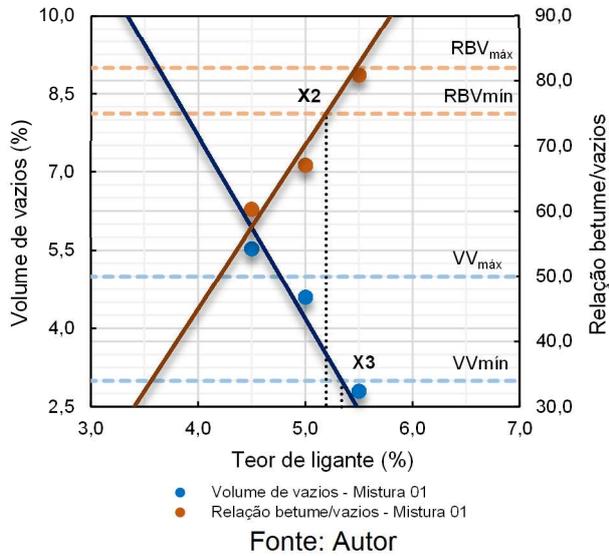


Figura 45 - Teor ótimo Mistura

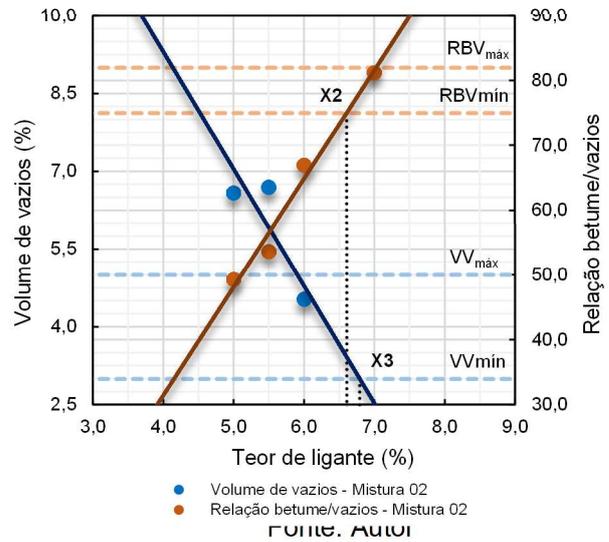


Figura 47 - Teor ótimo Mistura 3

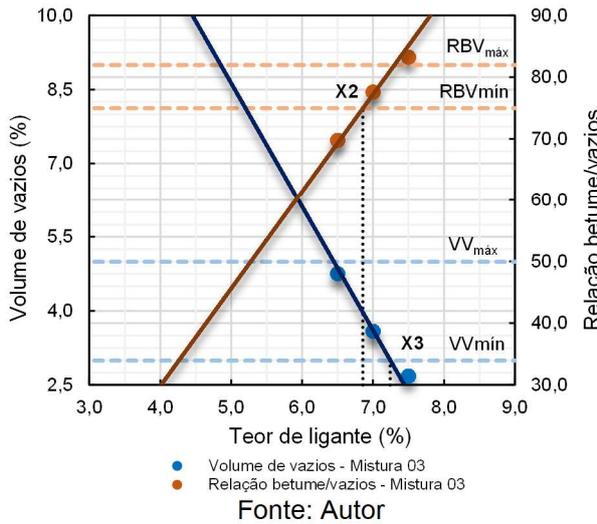


Figura 48 - Teor ótimo Mistura 4

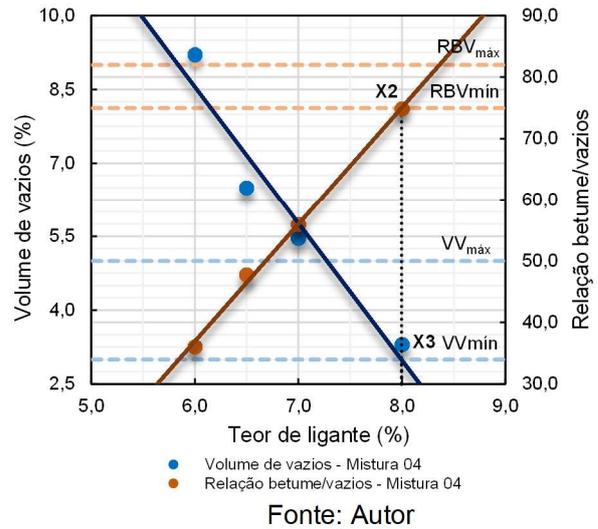


Figura 49 - Teor ótimo Mistura 5

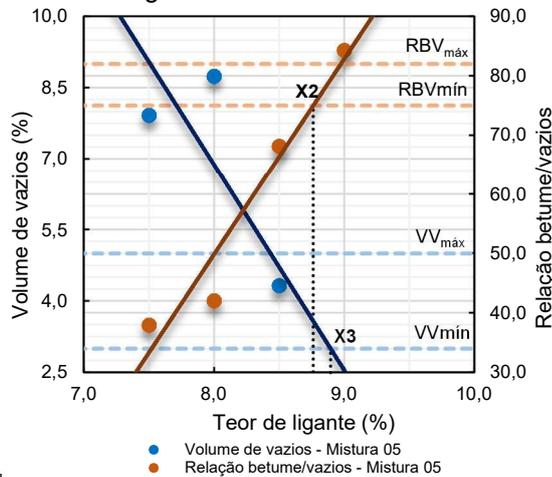


Tabela 34 - Teores centrais e teor de projeto

Mistura	Teores centrais		Teor de projeto
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	
<b>01</b>	5,2%	5,3%	5,3%
<b>02</b>	6,6%	6,8%	6,7%
<b>03</b>	6,9%	7,2%	7,0%
<b>04</b>	8,0%	8,0%	8,0%
<b>05</b>	8,8%	8,9%	8,9%

Fonte: Autor

Com base nos dados fornecidos na Tabela 34, observou-se que a porcentagem dos teores de projeto aumentou proporcionalmente à adição de ARM nas composições, evidenciando que a Mistura 05 praticamente alcançou o limite máximo estabelecido pela Norma (DNIT, 2006).

Frota, Menta e Nunes (2003, apud MOTTA, 2005) conduziram uma análise de AR provenientes da cidade de Manaus (AM) como uma alternativa de substituição dos seixos em misturas asfálticas, que são agregados tradicionalmente utilizados para esta finalidade e que causam um grande impacto ambiental devido à exploração. O estudo envolveu a produção de três misturas: (i) uma composta exclusivamente com seixo e outras duas com AR em proporções diferentes, (ii) 50% e (iii) 60%, todas incluindo areia e cimento Portland como filer. Observou-se que as misturas com AR exigem maiores concentrações de ligante, sendo justificado devido à maior porosidade desses materiais em comparação aos convencionais. O teor de projeto para misturas com seixo foi de 5,5%, enquanto para as outras duas misturas com AR foram de 6,4% e 6,5%, respectivamente. Além disso, os autores concluíram que a aplicação de AR em misturas asfálticas, como proposta de substituição aos seixos, é tecnicamente viável.

Motta (2005) indica que as utilizações de AR em misturas asfálticas resultam em maiores valores de teor de projeto, o que pode desestimular o uso desse tipo de material para esta finalidade, uma vez que haverá uma elevação significativa dos custos de execução da obra. Deste modo, torna-se fundamental que se avalie cuidadosamente o custo-benefício da aplicação de AR em pavimentos, levando em consideração não só os aspectos econômicos, mas também as vantagens ambientais, a sustentabilidade e a efetividade em diferentes situações de pavimentação.

Visto que foram obtidos os valores de teor de projeto para cada mistura, procedeu-se à verificação dos parâmetros correspondentes ao teor determinado, tal como indicado na seção 2.3.2.4.1.9 deste estudo e os resultados estão apresentados na Tabela 35. De modo geral, a análise dos resultados apresentados na Tabela 35 indicou aspectos análogos aos obtidos durante o processo de dosagem, conforme já comentado nesta seção. No entanto, é importante destacar que, embora os comportamentos volumétricos das misturas tenham sido semelhantes, o teor de ligante asfáltico das misturas mostraram-se assimétricos, uma vez que para atingir as mesmas condições da mistura asfáltica com AN (Mistura 01), foi necessário aumentar significativamente a concentração do ligante nas misturas com ARM (como por exemplo, as Misturas 04 e 05). O que além de se tornar inviável economicamente vai de encontro ao conceito de sustentabilidade.

Tabela 35 - Verificação dos parâmetros para o teor de projeto

Mistura	Ligante asfáltico	Massa do corpo de prova (g)			Absorção de água	Densidade relativa		Parâmetros volumétricos			Estabilidade			Fluência	
		Seco ao ar	Imerso em água	Saturado		Aparente (G <sub>mb</sub> )	Máxima (G <sub>mm</sub> )	VV	VAM	RBV	Altura mm	Fator de correção	Leitura (kgf)		Corrigida (kgf)
01	5,3%	1217,70	732,97	1219,70	0,4%	2,502	2,592	3,5%	14,6%	76,2	61,9	1,06	1276,3	1578,5	1,47 mm
02	6,7%	1188,05	700,13	1191,80	0,8%	2,416	2,501	3,4%	13,4%	75,7	61,9	1,06	1178,0	1210,1	3,32 mm
03	7,0%	1161,33	660,87	1165,43	0,8%	2,302	2,382	3,4%	15,5%	78,3	63,9	1,00	1051,0	1051,0	3,24 mm
04	8,0%	1150,77	638,90	1155,97	1,0%	2,226	2,329	4,4%	14,0%	75,6	64,7	0,98	843,3	828,1	3,29 mm
05	8,9%	1054,63	558,63	1059,60	1,0%	2,105	2,178	3,4%	13,6%	75,3	59,7	1,14	1042,3	1192,7	2,20 mm

Fonte: Autor

Simultaneamente ao processo de verificação, ensaiou-se o segundo grupo de corpos de prova para a determinação da resistência à tração por compressão diametral (RT), consoante as especificações da Norma DNIT 136/2018 – ME. A Tabela 36 apresenta os resultados obtidos durante a execução dessa etapa.

Tabela 36 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT)

Mistura	Corpo de prova			Resultado
	01	02	03	
01	1,34 MPa	1,45 MPa	1,33 MPa	1,37 MPa
02	1,12 MPa	1,02 MPa	0,96 MPa	1,03 MPa
03	0,95 MPa	0,86 MPa	1,05 MPa	0,95 MPa
04	1,21 MPa	1,17 MPa	1,29 MPa	1,22 MPa
05	1,07 MPa	1,14 MPa	1,08 MPa	1,10 MPa

Fonte: Autor

No que se refere aos valores de RT, verificou-se que a Mistura 05 apresentou uma diminuição de aproximadamente 20% em relação à Mistura 01, respectivamente compostas por ARM e AN. De acordo com Bairagi, Ravande e Pareek (1993), os agregados graúdos reciclados tendem a apresentar valores de RT moderadamente menores em comparação aos convencionais. Ainda, Bazuco (1999) observou que a adição de agregados miúdos reciclados em misturas asfálticas pode resultar em uma redução de 10 a 20% deste parâmetro. Por fim, a Tabela 37 relaciona os parâmetros exigidos pelo DNIT (2006) com os resultados obtidos laboratorialmente nesta pesquisa, expressando sua conformidade aos limites solicitados pela Norma.

Tabela 37 - Análise de conformidade dos resultados das dosagens Marshall para aplicação em camadas de rolamento

DNIT 031/2006 – ES					
Parâmetros	Dosagem				
	01	02	03	04	05
Enquadramento na faixa C	●	●	●	●	■
Análise do agregado miúdo	●	◆	◆	◆	◆
Abrasão Los Angeles	●	●	●	●	●
Índice de forma	●	●	●	■	●
Durabilidade	●	●	●	■	■
Equivalente de areia	●	●	●	●	●
Adesividade	●	■	■	■	■
Teor de projeto	●	●	●	●	●
Volume de vazios	●	●	●	●	●
Relação betume/vazios	●	●	●	●	●
Vazios do agregado mineral	TMN	12,7	19,1	19,1	19,1
	mm	■	■	●	■
Estabilidade	●	●	●	●	●
Resistência à tração por compressão diametral	●	●	●	●	●

●: Em conformidade    ◆: Atenção    ■: Não conformidade

Fonte: Autor

Em linhas gerais, a substituição parcial de AN por ARM demonstrou ser uma estratégia eficaz na produção de misturas asfálticas. Contudo, é crucial que sejam tomados cuidados na seleção destes materiais, especialmente em relação à fração miúda, a fim de evitar a presença de impurezas. As Misturas de 02 a 05 foram categorizadas como "atenção", devido à necessidade de se implementar um controle mais eficaz dos finos. Para Lima (1999), essa questão pode ser facilmente resolvida com um manejo mais rigoroso do processo de seleção dos materiais.

Ainda, com relação aos vazios de agregado mineral (VAM), embora os parâmetros das Misturas 01, 02, 04 e 05 não tenham atingido níveis satisfatórios, foi constatado que o parâmetro RBV alcançou o limite mínimo estabelecido pela Norma (DNIT, 2006). Desta forma, pode-se concluir que todas as misturas realizadas estão em conformidade com as diretrizes previstas pela normatização em questão.

## **CONCLUSÕES**

O uso de veículos leves eletrificados e pavimentos compostos por resíduos da construção e demolição fazem parte de uma abordagem sustentável para o transporte e a infraestrutura viária. Os veículos leves movidos por energia elétrica contribuem para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação das mudanças climáticas. Por sua vez, o uso de pavimentos reciclados reduz a necessidade de materiais virgens, promovendo a conservação dos recursos naturais. O uso de agregados reciclados da construção civil em pavimentos para veículos leves apresenta-se como uma solução promissora e sustentável, embora não existam normativas específicas para o dimensionamento desses pavimentos específicos, de forma que adotou-se a premissa de que se algo funciona bem em uma situação mais abrangente, deve funcionar igualmente bem ou até melhor em uma situação mais limitada ou específica, desde que as circunstâncias sejam comparáveis. Assim, ao utilizar RDC em pavimentos, buscando-se o atendimento das normativas DNIT e ABNT, que abrangem tráfegos de veículos pesados, conclui-se que os pavimentos para veículos leves também estarão aptos ao uso.

A crescente demanda por materiais de construção e a necessidade de reduzir o impacto ambiental da indústria da construção civil tornam esses agregados uma alternativa viável.

Primeiramente, a utilização de agregados reciclados reduz a quantidade de resíduos sólidos provenientes da demolição e da construção civil, minimizando o descarte inadequado e promovendo a economia circular. Materiais estes, obtidos a partir de concreto, tijolos, cerâmicas e outros elementos da construção, que, de outra forma, seriam destinados a aterros ou descartados de maneira inadequada.

Neste estudo buscou-se a verificar a possibilidade de utilização de resíduos da construção e demolição gerados no município de Campo Grande MS, em pavimentos a serem utilizados por veículos leves, tendo como premissa técnica o alcance de parâmetros mínimos determinados nas normativas do DNIT e da ABNT.

Em geral, a substituição parcial de Agregados Naturais (AN) por Agregados Reciclados (ARM) mostrou-se uma estratégia eficaz na produção de misturas asfálticas. No entanto, é crucial tomar cuidados na seleção desses materiais, especialmente em relação à fração fina, a fim de evitar a presença de impurezas. Essa questão pode ser facilmente resolvida com uma seleção mais rigorosa dos materiais durante o processo.

Os materiais alternativos, como agregados reciclados ou provenientes de fontes não convencionais, possuem características distintas dos agregados naturais comumente utilizados. Portanto, é necessário adotar abordagens e ensaios específicos para avaliar corretamente esses materiais alternativos, levando em consideração suas propriedades únicas.

É essencial desenvolver métodos de avaliação adequados, que considerem as características específicas dos materiais alternativos, como sua origem, processo de produção e propriedades físicas e químicas. Isso garantirá uma avaliação precisa e confiável desses materiais, assegurando sua adequação e segurança para as aplicações desejadas.

A utilização de agregados reciclados de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) na pavimentação demonstrou ser viável do ponto de vista técnico, contribuindo para a promoção da sustentabilidade global, sendo importante destacar que esses agregados reciclados são provenientes de materiais que já foram utilizados para outros fins, o que implica em algumas limitações em relação à sua qualidade.

Ao utilizar agregados reciclados na pavimentação, é possível reduzir a demanda por agregados naturais, o que contribui para a preservação dos recursos naturais e para a sustentabilidade ambiental. Além disso, a reutilização de materiais provenientes de

resíduos da construção e demolição promove uma gestão adequada desses resíduos, evitando sua disposição inadequada em aterros e promovendo a economia circular. Em suma, a possibilidade de utilizar agregados reciclados na pavimentação apresenta vantagens técnicas e contribui para a construção de um mundo mais sustentável. Sugere-se como oportunidade de novos estudos a Análise do Ciclo de Vida do agregado reciclado, uma vez que um determinado sistema de reciclagem só é ambientalmente justificado se for considerado todo o ciclo de vida do processo (“cradle-to-grave”), demonstrando que a alternativa de gestão é a de menor impacto ambiental, salientando que o estudo apresentado buscou avaliar a viabilidade técnica do uso dos Resíduos da Construção e Demolição em pavimentos.

## REFERÊNCIAS

- ABDULJABBAR, R. L.; LIYANAGE, S.; DIA, H. The role of micro-mobility in shaping sustainable cities: A systematic literature review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 92, 2021. Article.
- ANASTASIOU, E. K.; LIAPIS, A.; PAPAYIANNI, I. Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, p. 1-8, 2015. Article.
- ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. 2001, Anais. São Paulo: IBRACON, 2001.
- ARAÚJO, B. C. de; SANTOS, O.; AYRES, M. da C. Análise da utilização de RCD em obras de pavimentação na cidade de Fortaleza. *MIX Sustentável*, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 65–72, 2019.
- ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPA, J.; BO, M. W.; SIVAKUGAN, N. Geotechnical characteristics of recycled crushed brick blends for pavement sub-base applications. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 49, n. 7, p. 796-811, 2012.
- ASPHALT INSTITUTE. Asphalt Mix Design Methods. Manual Series n. 02 (MS-2). 7th Edition. 2014.
- ASPHALT INSTITUTE. Superpave mix design: Superpave serie SP-2. 3 ed. [S.l.]: [s.n.], 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.
- AZEVEDO, N. L. Estudo comparativo de recuperação rodoviária por aplicação dos sistemas whitetopping e CBUQ. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário Luterano de Palmas, [S. l.], 2018.
- BAPTISTA JUNIOR, J. V.; ROMANEL, C. Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras. 2013.
- BARBUDO, A.; AGRELA, F.; AYUSO, J.; JIMÉNEZ, J. R.; POON, C. S. Statistical analysis of recycled aggregates derived from diferente sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials*, v. 28, n. 1, p. 129-138, 2012.
- BAZAZ; J. B.; KAHAYATI, M.; AKRAMI, N. Performance of concrete produced with crushed bricks as the coarse and fine aggregate. *Geol. Soc. Lond.*, 2006.
- BAZUCO, R. S. Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999, p. 100.
- BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. ABEDA, Petrobras, Rio de Janeiro, 2008.
- BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Avaliação da Resistência ao Polimento e a Degradação de Agregados Utilizando a Abrasão Los

- Angeles e o Processamento Digital de Imagens. In: Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Foz do Iguaçu, 2011.
- BODI, J.; BRITO, J. A. F.; ALMEIDA, S. Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, 1995. 1995.
- BRASILEIRO, F. E. Estudo Comparativo do Comportamento de Concretos Betuminosos a Quente, Fabricados com Agregados Graúdos Convencionais e não Convencionais, Quando Utilizado o Ensaio de Estabilidade Marshall, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande/PB, 1983.
- BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. 2015.
- CAMARGO, B. V.; JUSTO, A. M. IRAMUTEQ: Um Software Gratuito para Análise de Dados Textuais. 2013.
- CAMILO, B. Q.; CARDOSO, C. N. P.; BATISTA, S. B. S.; MARQUES, A. T. et al. Resíduos sólidos na construção civil: análise da gestão frente aos impactos causados ao meio ambiente. 2022.
- CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, p. 219, 1987.
- CARDOSO, R.; SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. Waste Management, 2015, p. 131-145.
- CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C.; ALBERTI, E. P. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. Projeto Entulho Bom. 2001.
- CAVALCANTE, R. B.; CALIXTO, P.; PINHEIRO, M. M. K. ANÁLISE DE CONTEÚDO: considerações gerais, relações com a pergunta de pesquisa, possibilidades e limitações do método. 2014.
- CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. Manual de dosagem de concreto asfáltico. São Paulo: Instituto Pavimentar, Oficina de Textos, 2011.
- CHAN, C. Use of Recycled Aggregate in Shotcrete and Concrete. B.A.Sc. (Civil Engineering), The University of British Columbia, 1998.
- CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. Teoria e prática do tratamento de minérios – Britagem, Peneiramento e Moagem. 2ed. São Paulo: Signus, 2003, v.3.
- CHEN, M.; LENG, B.; SHAOPENG, W.; SANG, Y. Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders. Construction and Building Materials, 66, p. 286- 298, 2014.
- CHO D. W.; KIM K. The Mechanisms of Moisture Damage in Asphalt Pavement by Applying Chemistry Aspects. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 14, n. 3, p. 333-342, 2010.
- COSTA, U.; URSELLA, P. Construction and demolition waste recycling in Italy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ENVIRONMENTAL AND TECHNICAL IMPLICATIONS OF CONSTRUCTION WITH ALTERNATIVE MATERIALS – WASCON, 5., San Sebastián, 2003. Anais. San Sebastián: Inasmet, p. 231-239.

- DANTAS, G. H. G. Manual de Pavimentação. 2 ed. Rio de Janeiro: DNER, 1996.
- DAS, B. M.; SOBHAN, K. Fundamentos de engenharia geotécnica. São Paulo, 2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). DNER-PRO 120/97: Coleta de amostras de agregados. Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_\_\_. DNER-ME 041: Preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. DNER-PRO 199: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996.
- \_\_\_\_\_. DNER-ME 080: Solos – Análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. DNER-ME 035: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.
- DIBALSKI, J. N. Cationic surfactants in asphalt adhesion. Symposium: Antistripping Additives in Paving Mixtures, Transportation Research Board, v. 51, p. 293-297, 1982.
- DIAS, J. F. Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas como contribuição para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004, p. 204.
- DOCHERTY, I.; MARSDEN, G.; ANABLE, J. The governance of smart mobility. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 115, p. 114-125, 2018. Article.
- DOS SANTOS, A. L.; PINTO, C. H. C.; CATUNDA, A. C. M. M. Percepção da legislação ambiental, gestão e destinação final dos RCD –resíduos da construção e demolição: um estudo de caso em Parnamirim/ RN/ Brasil. 2015.
- FERNANDES, C. G. Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ). Rio de Janeiro, 2004, p. 109.
- FERREIRA, W. L. G. Análise do fluxo d’água em revestimentos asfálticos com diferentes permeabilidades. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- FONTES, A. C. S.; NEPOMUCENO, D. V.; BATISTA, J. S. Resíduos sólidos da construção civil: utilização de agregados reciclados em base e sub-base de pavimentação asfáltico, Ceará, 2017.
- FOSTER, C. R. Development of Marshall procedures for design asphalt paving mixtures. National Asphalt Pavement Association, p. 1-22, 1982).
- GARCÍA-MORALES, M. et al. Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen. Fuel, v. 83, n. 1, p. 31-38, 2004.
- GOUVEIA, L. T. Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas. Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo - EESC, São Carlos, SP, 2006.

- GOUVEIA, L. T.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SOARES, J. B. Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. *TRANSPORTES*, 15(1), 2007.
- HAMASSAKI, L. T.; NETO, C. S.; FLORINDO, M. C. Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: *Workshop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção*. Anais. São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1996, p. 107-115.
- HERRADOR, R.; PÉREZ, P.; GARACH, L.; ORDÓÑEZ, J. Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing. *Journal of Transportation Engineering*, v. 138, 2012, p. 182-190.
- IYOMASA, F. B. M. Utilização de agregados reciclados de resíduos da construção civil em camadas de pavimentos de tráfego leve: Estudo de caso no município de Americana. 2013.
- JIMÉNEZ, J. R.; AGRELA, F.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M. Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-base de carreteras. *Materiales de Construcción*, v. 61, n. 302, p. 289-302, 2011.
- JOHN, V. M. J. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. -.
- JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. *Reciclar para Construir: alternativas de Gestão do Resíduo de Gesso*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.
- JUSTO, A. M.; CAMARGO, B. V. *Estudos qualitativos e o uso de softwares para análises lexicais*. 2014.
- Kandhal, P.; Parker Jr, F. *Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements*. National Cooperative Highway Research Program Report 405, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1998.
- KENNEDY, T. W.; ANAGNOS, J. N. Techniques for reducing moisture damage in asphalt mixtures. *Moisture Effects on Asphalt Mixtures*, Research Project 3-9, p. 79-253, 1984.
- KENNEDY, T. W.; MCGENNIS, R. B.; ROBERTS, F. L. Investigation of moisture damage to asphalt concrete and affect on field performance – A case study. *Transportation Research Record*, Washington, 1983.
- KUMAR, P.; REDDY, M. R. Reinforced embankments and sub base using demolition waste. *J. Sci. Ind. Res.* 67 (5), 2008, p. 386–391.
- LARUCCIA, M. M. *Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil*. 2014.
- LEANDRO, R. P. *Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- LEITE, L. M. F. et al. *Informações básicas sobre materiais asfálticos: A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas*. Rio de Janeiro: IBP, 2020.

LIMA, C. E.; AMORIM, E. F.; OLIVEIRA, H. S.; MOURA, L. F. Asfáltico a quente dosado com resíduos de construção e demolição (RCD) aplicado em pavimento flexível. 2021.

LIMA, J. A. R. Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999, p. 246.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O. Influência da Adesividade Agregado-Ligante no Trincamento por Fadiga de Misturas Asfálticas. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

LYONS, G. Getting smart about urban mobility – Aligning the paradigms of smart and sustainable. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 115, p. 4-14, 2018. Article.

MAHARAJ, R.; HARRY, V. R.; MOHAMED, N. Rutting and Fatigue Cracking Resistance of Waste Cooking Oil Modified Trinidad Asphaltic Materials. *The Scientific World Journal*, 2015.

MARTIN, J. R., WALLACE, H. A. Design and construction of asphalt pavements. McGraw-Hill Book Company, Inc. United States of América, 1958.

MATUELLA, M. F. Efeitos da composição de resíduos de construção e demolição em seu comportamento mecânico para utilização em pavimentação. 2017.

MARQUES, R. B. Resíduos da Construção Civil em Araguari-MG: Do Diagnóstico à Proposta de um Modelo Gerencial Proativo. 2007. 174 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

MENICHETTI, D.; VAN VUREN, T. Modelling a low-carbon city. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, 164, n. 3, p. 141-151, 2011. Article.

MINAYO, M. C. D. S. Pesquisa Social. Teoria, método e criatividade. 2001.

MOLENAAR, A. A. A.; VAN NIEKERK; A. A. Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1787, p. 73-82, 2002.

MONISMITH, C. L.; FINN, F. N.; VALLERGA, B. A. A Comprehensive Asphalt Concrete Mixture Design System. In: GARTNER, W. Asphalt Concrete Mix Design: Development of More Rational Approaches. [S.l.]: American Society for Testing and Material, Philadelphia, p. 39-71, 1989.

MORAIS, E. R. Avaliação de índices físicos, mecânicos e estruturas do solo, aplicado a pavimentação. *Revista Vetor*, Rio Grande, v.25, n.2, 2015.

MOTTA, R. D. S. Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego. 2005.

NEMATCHOUA, M.; DEUSE, C.; COOLS, M.; REITER, S. Evaluation of the potential of classic and electric bicycle commuting as an impetus for the transition towards environmentally sustainable cities: A case study of the university campuses in Liege, Belgium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 2020. Article.

- NETO, M. L. Q. Aplicação de concreto asfáltico a quente utilizando resíduos da construção e demolição de obras (RCD) em via urbana na cidade de Natal/RN. 2019. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.
- OLIVEIRA, B. T. Uso de resíduos de construção e demolição em argamassas para revestimento de alvenaria. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- OLIVEIRA, J. C. Indicadores de potencialidades de desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis. 2007.
- OLIVEIRA, L. S. Estudo do efeito do equivalente de areia fora dos requisitos de norma nas misturas de areia asfalto a quente. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.
- ORIOLO, M. A. Estudo de agregado reciclado de resíduos de construção e demolição em misturas solo-agregado. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- ORIOLO, M. A. et al. Estudo do Uso de Agregado Reciclado Misto (ARM) em Misturas Soloagregado. ANPET, v. 32, Gramado, 2018, p. 1943–1954.
- PAFFUMI, E.; DE GENNARO, M.; MARTINI, G., 2016, English, Innovative Technologies for Smart Cities: Towards Customer Driven Infrastructure Design for Large Scale Deployment of Electric Vehicles and Vehicle-to-Grid Applications. Elsevier B.V. 4505-4514.
- PAIVA, P.S. Caracterização e Avaliação das Propriedades Geomecânicas para uso em pavimentação de agregados de rochas vulcânicas da porção central do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Santa Maria/RS, p. 164, 2017.
- PEREIRA, P. M.; VIEIRA, C. S. A Literature Review on the Use of Recycled Construction and Demolition Materials in Unbound Pavement Applications. Sustainability, 14, Porto, Portugal, 2022.
- PESSANHA, J. F. M.; PERES, L. A. P.; CALDAS, A. C. I. L.; PARTICELLI, F. M. F. Cenários para o mercado de veículos elétricos na cidade do Rio de Janeiro. 2011.
- PETERSEN, J. C.; PLANCHER, H.; ENSLEY, E. K.; VENABLE, R. L.; MIYAKE, G. Chemistry of asphalt-aggregate interaction: relationship with pavement moisture damage prediction test. Transportation Research Record, p. 95-104, 1982.
- PETERSON, R. L. Superpave Laboratory Compaction Versus Field Compaction. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, p. 201-208, 2003.
- PINTO, T. P. Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- POON, C. S.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong-Kong. Resources, conservation and recycling, v. 50, n. 3, 2007, p. 293-305.
- QUEIROZ NETO, M. L. Aplicação de concreto asfáltico a quente utilizando resíduos da construção e demolição de obras (RCD) em via urbana na cidade de Natal/RN.

2019. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.
- RAMJI, A.; VENUGOPAL, S., 2019, English, Creating a Sustainable Mobility Ecosystem in India: Vision 2030. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- RAMOS, L. R. F.; SAVI, O. Análise da viabilidade técnica e financeira no uso de whitetopping na restauração do pavimento da rodovia PRC-280 em comparação ao uso de CBUQ. Revista Técnico-Científica do CREA-PR, ISSN 2358-5420, Edição Especial. Paraná, 2022.
- RANIERI, L.; DIGIESI, S.; SILVESTRI, B.; ROCCOTELLI, M. A review of last mile logistics innovations in an externalities cost reduction vision. Sustainability (Switzerland), 10, n. 3, 2018. Article.
- RIBEIRO, R. C. C.; CORREIA, J. C. G.; SEIDL, P. R. Aproveitamento de resíduos gerados no corte de rochas ornamentais em pavimentação asfáltica. Rio de Janeiro, 2007.
- ROBERTS, F. L. et al. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA. Maryland, 1996.
- SANCHEZ-IBORRA, R.; BERNAL-ESCOBEDO, L.; SANTA, J. Eco-efficient mobility in smart city scenarios. Sustainability (Switzerland), 12, n. 20, p. 1-15, 2020. Review.
- SANTOS, J.; FLINTSCH, G.; FERREIRA, A. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability. Resources, Conservation and Recycling, 116, p. 15-31, 2017. Article.
- ŠEMANJSKI, I.; MANDŽUKA, S.; GAUTAMA, S., 2018, English, Smart mobility. Croatian Society Electronics in Marine - ELMAR. 63-66.
- SENÇO, W. Manual de técnicas de pavimentação: v. 1, 2ª ed. ampl. São Paulo-SP: Pini, 2007.
- SHERWOOD, P. T. Alternative Materials in Road Construction: A Guide to the Use of Waste Recycled Materials and By-Products. Reimp ed. London: Thomas Telford; 1997.
- SILVA, B. O. S. et. al. Importância da Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) na Execução de Pavimentos Flexíveis. XIV SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS INTEGRADAS DA UNAERP CAMPUS GUARUJÁ. UNAERP, Ribeirão Preto, 2017.
- SOARES, J. B.; FREITAS, F. A. C.; CASTELO BRANCO, J. V.; MOTTA, L. M. G. Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília, 2000.
- SOPJANI, L.; STIER, J. J.; HESSELGREN, M.; RITZÉN, S. Shared mobility services versus private car: Implications of changes in everyday life. Journal of Cleaner Production, 259, 2020. Article.
- SOUSA, J. B. et al. Evaluation Of Laboratory Procedures for Compacting Asphalt-Aggregate Mixtures. Strategic Highway Research Program (SHRP). Washington, D.C., 1991.

SOUZA, M. A. R.; WALL, M. L.; THULER, A. C. M. C.; LOWEN, I. M. V. et al. The use of IRAMUTEQ software for data analysis in qualitative research. Revista da Escola de Enfermagem da U S P, 52, p. e03353, 2018. Article.

SOUZA, C. M. A. de; RAFULL L. Z. L.; VIEIRA, L. B. Determinação do Limite de Liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, Campina Grande, v.4, n.3, p.460-464, 2000.

STRUILLLOU, R. Theoretical study of the kind of stripping called "Phenomene de soupe" – In French. Transportation Research Board, n. 42, p. 102-113, 1969.

SUESCUM-MORALES, D.; ROMERO-ESQUINAS, Á.; FERNÁNDEZ-LEDESMA, E.; FERNÁNDEZ, J. M. et al. Feasible use of colliery spoils as subbase layer for low-traffic roads. Construction and Building Materials, 229, 2019. Article.

TAVARES, P. L. M.; MARQUES, C. S. A.; SANTOS, G. S. S.; NASCIMENTO, J. G. M. et al. UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM BASES E SUBBASES DE PAVIMENTOS RODÓVIÁRIOS. 2013.

VILELA, R. ESTUDOS LABORATORIAIS PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA MISTURA DOSADA PELO MÉTODO MARSHALL. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2018.

ZORDAN, S. E. A Utilização do Entulho Como Agregado, na Confeção de Concreto. Campinas, 1997. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

ZORDAN, S. E. Entulho da indústria da Construção Civil. São Paulo: PCC; EPUSP, 2002.

ZORDAN, S. E. Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos. 2003.

ZYRYANOV, V., 2019, English, Methods for evaluation of mobility in modern cities. IOP Publishing Ltd.