

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**RAIMUNDO NONATO DA COSTA NETO**

**RESÍDUOS DE VIDRO COMO SUBSTITUTO DO AGREGADO MIÚDO EM  
MISTURAS ASFÁLTICAS USINADAS A QUENTE**

São Luís  
2024

**RAIMUNDO NONATO DA COSTA NETO**

**RESÍDUOS DE VIDRO COMO SUBSTITUTO DO AGREGADO MIÚDO EM  
MISTURAS ASFÁLTICAS USINADAS A QUENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Mayssa Alves da Silva Sousa

São Luís

2024

Costa Neto, Raimundo Nonato da

Resíduos de vidro como substituto do agregado miúdo em misturas asfálticas usinadas a quente / Raimundo Nonato da Costa Neto. – São Luís, 2024.

123f.

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Maranhão, 2024.

Orientador: Profa. Dra. Mayssa Alves da Silva Sousa

1.Misturas asfálticas. 2.Agregado natural. 3.Pó de vidro. 4.Areia. 5.Sustentável I. Título.

CDU:628.4:502.2

**RAIMUNDO NONATO DA COSTA NETO**

**RESÍDUOS DE VIDRO COMO SUBSTITUTO DO AGREGADO MIÚDO EM  
MISTURAS ASFÁLTICAS USINADAS A QUENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Civil da Universidade Estadual do  
Maranhão, como requisito para obtenção  
do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 13/08/2024

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **MAYSSA ALVES DA SILVA SOUSA**  
Data: 21/08/2024 11:53:09-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Profa. Dra. Mayssa Alves da Silva Sousa (Orientadora)**

Doutora em Engenharia Civil  
Universidade Estadual do  
Maranhão

Documento assinado digitalmente  
 **MARIA TERESINHA DE MEDEIROS COELHO**  
Data: 21/08/2024 14:34:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Profa. Dra. Teresinha de Medeiros Coelho**

Doutora em Urbanismo Universidade  
Estadual do Maranhão

Documento assinado digitalmente  
 **WALTER CANALES SANTANA**  
Data: 22/08/2024 15:49:51-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana**

Doutor em Engenharia de Transportes  
Universidade Estadual do Maranhão

A Deus, por toda a sua glória e bênçãos. Aos meus pais, Glacimar e Sandra, e à minha vó, Lusimar, pelo apoio e incentivo constantes em minha vida acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar saúde e perseverança durante a caminhada da minha vida acadêmica. Sem Ele, nada seria possível.

Agradeço aos meus pais, Glacimar e Sandra, e a minha vó, Lusimar, por todo o apoio incondicional e incentivo a sempre continuar estudando. Graças à educação que vocês me deram, sou a pessoa que sou hoje.

À minha namorada, Clara, por sempre acreditar na minha capacidade e estar ao meu lado, me encorajando a enfrentar e superar os desafios desta jornada.

Aos meus amigos, Luciano e Guilherme, com quem compartilhei minha jornada acadêmica. Graças a vocês esta caminhada tornou-se mais leve e agradável.

Ao professor Adilto e ao mestrando Sóstenes, pela assistência e colaboração que foram fundamentais para a realização da análise microscópica.

E, por fim, a minha professora e orientadora, Profa. Dra. Mayssa Alves, por me dar a oportunidade de participar de pesquisas dentro da Universidade e por toda a confiança e ensinamentos que foram imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho.

*“A mente que se abre a uma nova ideia  
jamais voltará ao seu tamanho original”*

Albert Einstein

## RESUMO

A pavimentação asfáltica é uma técnica que consiste na execução de misturas asfálticas, compostas por ligante asfáltico e agregados naturais. Nesse sentido, necessita-se da constante exploração destes recursos naturais para a pavimentação de vias e manutenção dos pavimentos rodoviários. Desse modo, tornam-se úteis estudos que buscam materiais alternativos para substituição dos agregados, no qual pode-se citar o vidro, material que, no Brasil, apresenta baixas taxas de reciclagem e cujo principal destino final são os aterros sanitários. Assim sendo, este trabalho objetivou o estudo da substituição da areia por pó de vidro em misturas asfálticas usinadas a quente em proporções de 20%, 50% e 100%. Para isso, a metodologia consistiu em ensaio para caracterização dos agregados e do pó de vidro, ensaios de estabilidade Marshall e resistência à tração, para a avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas. Os resultados da granulometria da areia e do pó de vidro demonstraram que ambos materiais possuem curvas granulométricas similares. Logo, tal achado o contribuiu para que não houvesse alterações significativas para a faixa de trabalho utilizada na presente pesquisa, faixa C. Assim, no que se refere ao comportamento mecânico, todas as proporções estudadas apresentaram resultados acima do mínimo definido pela Norma DNIT 031/2006, no qual a proporção com 50% de substituição da areia pelo pó de vidro atendeu tanto aos ensaios mecânico, quanto aos parâmetros volumétricos analisado, desta forma, demonstrando ser a opção mais adequada para substituição. Portanto, entende-se que a substituição do agregado natural pelo pó de vidro é uma solução viável para aplicação em misturas asfálticas, além de ser um meio sustentável para a diminuição da exploração do agregado natural e fornecer uma utilidade extra ao vidro.

**Palavras-chave:** misturas asfálticas; agregado natural; pó de vidro; areia; sustentável.

## ABSTRACT

Asphalt paving is a technique involving the creation of asphalt mixtures composed of asphalt binder and natural aggregates. In this context, there is a constant need to exploit these natural resources for road paving and maintenance. Therefore, studies that seek alternative materials to replace aggregates are useful. One such material is glass, which in Brazil has low recycling rates and is primarily disposed of in landfills. Thus, this study aimed to investigate the replacement of sand with glass powder in hot-mix asphalt at proportions of 20%, 50%, and 100%. The methodology involved testing to characterize the aggregates and glass powder, as well as conducting Marshall stability tests and tensile strength tests to evaluate the mechanical behavior of the asphalt mixtures. The results of the granulometric analysis of sand and glass powder showed that both materials have similar granulometric curves. Consequently, this finding indicated that there were no significant changes for the working range used in this research, Range C. Regarding mechanical behavior, all studied proportions yielded results above the minimum defined by DNIT Standard 031/2006. Specifically, the proportion with 50% sand replacement with glass powder met both mechanical and volumetric parameters, demonstrating it as the most suitable option for replacement. Therefore, it is understood that replacing natural aggregate with glass powder is a viable solution for use in asphalt mixtures and provides a sustainable way to reduce natural aggregate exploitation while giving an additional use to glass.

**Keywords:** asphalt mixtures; natural aggregate; glass powder; sand; sustainable.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do pavimento flexível.....	23
Figura 2 - Estrutura do pavimento semirrígido .....	24
Figura 3 - Estrutura típica do pavimento rígido.....	25
Figura 4 - Exploração dos agregados naturais.....	31
Figura 5 – (a) - (c) Aspectos visuais das graduações .....	32
Figura 6 - Curva granulométrica típica das graduações.....	33
Figura 7 - Comportamento de resfriamento das substâncias.....	40
Figura 8 - Estrutura base da rede de sílica .....	43
Figura 9 – a) Estrutura molecular da areia; b) Estrutura molecular do vidro .....	44
Figura 10 - Hierarquia de propriedades para o gerenciamento de resíduos .....	46
Figura 11 - Localização da empresa fornecedora dos materiais.....	50
Figura 12 – (a) – (c) Acondicionamento dos materiais.....	50
Figura 13 - Localização do fornecedor do vidro .....	51
Figura 14 - Máquina “Los Angeles” .....	52
Figura 15 – a) Separação das garrafas; b) Separação das esferas.....	53
Figura 16 - Material resultante da quebra.....	53
Figura 17 - Peneira nº10 (2,00mm).....	53
Figura 18 – a) Material retido na peneira nº10; b) Material passante na peneira nº 10 .....	54
Figura 19 – a) Peneira de 4,75 mm; b) Jogo de peneiras .....	55
Figura 20 - Material lavado na peneira de nº4 .....	55
Figura 21 – a) Eliminação das películas visíveis de água; b) Pesagem hidrostática.....	56
Figura 22 - Jogo de peneira para obtenção da graduação.....	57
Figura 23 – a) Separação dos materiais; b) Lavagem do material na peneira nº 12.....	58
Figura 24 – a) Material passante na peneira nº4; b) Separação da amostra .....	58
Figura 25 – (a) – (d) Procedimentos para o ensaio de Equivalente de Areia .....	59
Figura 26 – (a) – (c) Sequência do ensaio de Equivalente de Areia .....	60
Figura 27 - Peneiras selecionadas para separação da amostra .....	61
Figura 28 – (a) – (c) Procedimentos executados no ensaio de massa específica ....	61
Figura 29 – a) Peneiras para o agregado graúdo. b) Peneiras para o agregado miúdo .....	62

Figura 30 – a) Peneiramento do agregado graúdo; b) Peneiramento do agregado miúdo .....	63
Figura 31 - Microscópio Zeiss Primotech .....	64
Figura 32 – (a) – (f) Amostras de vidro retidas nas peneiras.....	64
Figura 33 – (a) – (f) Amostras de areia retidas nas peneiras .....	65
Figura 34 - Penetrômetro .....	66
Figura 35 – a) Preparação do ligante; b) Penetração da agulha.....	66
Figura 36 - Preenchimento dos anéis.....	67
Figura 37 - Aquecimento do béquer .....	68
Figura 38 – (a) – (e) Separação dos agregados.....	70
Figura 39 – a) Aquecimento dos agregados; b) Aquecimento do ligante .....	71
Figura 40 - Pesagem do CAP 50/70 .....	76
Figura 41 - Temperatura de Compactação .....	72
Figura 42 - Compactador Marshall .....	77
Figura 43 - Golpes para acomodação .....	73
Figura 44 - Extrator de amostra.....	77
Figura 45 - Medição dos CP's .....	73
Figura 46 – (a) – (d) Separação dos corpos de prova por traço.....	74
Figura 47 - Determinação da massa do CP seco.....	75
Figura 48 - Pesagem hidrostática do CP.....	75
Figura 49 - CP seco em pano umedecido .....	76
Figura 50 - Corpos de prova em banho-maria.....	77
Figura 51 - Colocação do CP no molde e na prensa.....	78
Figura 52 - Colocação do CP no molde e na prensa.....	79
Figura 53 - Análise microscópica do R-16 e R-16' no aumento de 50x.....	91
Figura 54 - Análise microscópica do R-30 e R-30' no aumento de 50x.....	92
Figura 55 - Análise microscópica do R-40 e R-40' no aumento de 50x.....	93
Figura 56 - Análise microscópica do R-50 e R-50' no aumento de 50x.....	93
Figura 57 - Análise microscópica do R-100 e R-100' no aumento de 50x.....	94
Figura 58- Análise microscópica do R-100 e R-100' no aumento de 100x e 200x ....	95
Figura 59 - Análise microscópica do R-200 e R-200' no aumento de 50x.....	96
Figura 60 - Análise microscópica do R-200 e R-200' no aumento de 100x e 200x ...	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção dos agregados em 2021 .....	36
Tabela 2 - Composições químicas das diferentes cores de garrafas .....	45
Tabela 3 - Teores de CAP para a mistura asfáltica.....	69
Tabela 4 - Traço base da mistura asfáltica .....	69
Tabela 5 - Temperaturas de aquecimento dos materiais .....	69
Tabela 6 - Quantitativos de material para cada traço.....	70
Tabela 7 - Absorção e massa específica gos agregados graúdos .....	80
Tabela 8 - Abrasão “Los Angeles” .....	81
Tabela 9 - Equivalente de areia.....	81
Tabela 10 - Massa específica dos agregados miúdos .....	82
Tabela 11 - Penetração do ligante .....	97
Tabela 12 - Densidade Máxima Teórica.....	98
Tabela 13 - Dados da análise granulométrica da brita 1 .....	113
Tabela 14 - Dados da análise granulométrica da brita 0 .....	113
Tabela 15 - Dados da análise granulométrica do pó de pedra .....	114
Tabela 16 - Dados da análise granulométrica da areia .....	114
Tabela 17 - Dados da análise granulométrica do pó de vidro .....	115
Tabela 18 - Faixa de Trabalho para TB.....	116
Tabela 19 - Faixa de Trabalho para T-20%.....	116
Tabela 20 - Faixa de Trabalho para T-50%.....	117
Tabela 21 - Faixa de Trabalho para T-100%.....	117
Tabela 22 - Massa do CP em condições distintas.....	118
Tabela 23 - Parâmetros Físicos dos CP's .....	119
Tabela 24 - Dimensões dos corpos de prova.....	120
Tabela 25 - Resultados do ensaio de estabilidade Marshall .....	121
Tabela 26 - Resultados do ensaio de resistência à tração .....	122

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Produção de agregado em milhões de toneladas .....	35
Gráfico 2 - Consumo dos agregados na área da pavimentação entre 2006 e 2009 .	35
Gráfico 3 - Principais componentes químicos do vidro.....	42
Gráfico 4 - Gravimetria de reciclagem pela logística reversa .....	47
Gráfico 5 - Curva granulométrica da brita 1 e brita 0.....	83
Gráfico 6 - Curva granulométrica do pó de pedra .....	84
Gráfico 7 - Curva granulométrica da areia .....	85
Gráfico 8 - Curva granulométrica do pó de vidro.....	86
Gráfico 9 – Encaixe granulométrico de TB na Faixa de Trabalho .....	87
Gráfico 10 - Encaixe granulométrico de T-20% na Faixa de Trabalho .....	88
Gráfico 11 - Encaixe granulométrico de T-50% na Faixa de Trabalho .....	89
Gráfico 12 - Encaixe granulométrico de T-100% na Faixa de Trabalho .....	90
Gráfico 13 - Comparação das curvas granulométricas dos traços .....	91
Gráfico 14 - Massa específica aparente.....	99
Gráfico 15 - Volume de vazios .....	99
Gráfico 16 - Vazios com Betume.....	100
Gráfico 17 - Vazios do agregado mineral .....	100
Gráfico 18 - Relação betume/vazios .....	101
Gráfico 19 - Resultados estabilidade Marshall .....	103
Gráfico 20 - Resultado da resistência à tração.....	104

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIVIDRO	– Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos
ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREMA	– Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
AD	– Asfalto diluído
AMB	– Anuário Mineral Brasileiro
C	– Celcius
CAP	– Cimento asfáltico de petróleo
cm	– Centímetros
CNT	– Confederação Nacional de Trânsito
CONAMA	– Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	– Corpo de prova
DMT	– Densidade máxima teórica
DNER	– Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	– Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	– Emulsão asfáltica de petróleo
g	– Grama
Gmb	– Densidade aparente
IBRAM	– Instituto Brasileiro de Mineração
Kg	– Quilograma
L	– Litro
LEV	– Local de entrega voluntária
LSP	– Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
mm	– Milímetros
n°	- Número
NBR	– Norma Brasileira
PEV	– Ponto de entrega voluntária
PNRS	– Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	– Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil

RBV	– Relação betume/vazios
RCD	– Resíduo de construção e demolição
RSU	– Resíduo sólido urbano
RT	– Resistência à Tração
s	- Segundo
SISNAMA	– Sistema Nacional de Meio Ambiente
T-100%	- Traço com 100% de substituição da areia
T-20%	- Traço com 20% de substituição da areia
T-50%	- Traço com 50% de substituição da areia
TB	– Traço Base
UEMA	– Universidade Estadual do Maranhão
VAM	– Vazios do agregado mineral
VCB	– Vazios com betume
Vv	– Volume de vazios

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>19</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>20</b>
1.2.1 Objetivo Geral .....	20
1.2.2 Objetivos Específicos .....	20
<b>1.3 Estrutura do Trabalho</b> .....	<b>21</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1 Pavimento</b> .....	<b>22</b>
2.1.1 Tipos de Pavimento.....	22
2.1.1.1 Pavimento Flexível .....	22
2.1.1.2 Pavimento Semirrígido .....	23
2.1.1.3 Pavimento Rígido .....	24
2.1.2 Camadas do Pavimento .....	25
2.1.2.1 Subleito .....	25
2.1.2.2 Sub-base .....	26
2.1.2.3 Base .....	26
2.1.2.4 Revestimento .....	26
<b>2.2 Misturas Asfálticas</b> .....	<b>27</b>
2.2.1 Ligantes Asfálticos .....	28
2.2.1.1 Cimento Asfáltico .....	28
2.2.1.2 Asfalto Diluído .....	29
2.2.1.3 Emulsão Asfáltica .....	29
2.2.2 Agregados .....	29
2.2.2.1 Natureza.....	30
2.2.2.2 Tamanho dos Grãos.....	31

2.2.2.3 Distribuição dos Grãos .....	31
<b>2.3 Substituição de Agregados na Pavimentação .....</b>	<b>33</b>
2.3.1 Exploração de Agregados Naturais .....	34
2.3.2 Substituição de Agregados Naturais por Resíduos de Vidro .....	37
<b>2.4 Vidro .....</b>	<b>39</b>
2.4.1 Tipos de Vidro .....	41
2.4.2 Composição e Estrutura do Vidro .....	42
2.4.3 Reciclagem do Vidro .....	45
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1 Materiais .....</b>	<b>49</b>
3.1.1 Mistura Asfáltica .....	49
3.1.2 Vidro .....	51
3.1.3 Preparo do Pó de Vidro .....	51
<b>3.2 Ensaio de Caracterização .....</b>	<b>54</b>
3.2.1 Absorção e Massa Específica do Agregado Graúdo .....	54
3.2.2 Ensaio de Abrasão “Los Angeles” .....	56
3.2.3 Equivalente de Areia .....	58
3.2.4 Ensaio de Massa Específica por meio do frasco Chapman .....	60
3.2.5 Análise Granulométrica .....	62
3.2.6 Análise Microscópica .....	63
3.2.7 Ensaio de Penetração .....	65
3.2.8 Ensaio de Ponto de Amolecimento .....	67
<b>3.3 Ensaio Mecânicos .....</b>	<b>68</b>
3.3.1. Dosagem Marshall .....	68
3.3.2. Ensaio de Resistência à Tração .....	78
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>80</b>
<b>4.1 Ensaio de Absorção e Massa Específica .....</b>	<b>80</b>

<b>4.2 Ensaio de Abrasão “Los Angeles”</b> .....	<b>80</b>
<b>4.3 Ensaio de Equivalente de Areia</b> .....	<b>81</b>
<b>4.4 Ensaio de Massa Específica por meio do frasco Chapman</b> .....	<b>82</b>
<b>4.5 Análise Granulométrica</b> .....	<b>82</b>
4.5.1 Análise Granulométrica do Agregado Graúdo .....	82
4.5.2 Análise Granulométrica do Agregado Miúdo .....	84
4.5.3 Análise Granulométrica do Pó de Vidro.....	85
<b>4.6 Encaixe Granulométrico na Faixa de Trabalho – CAUQ Faixa C</b> .....	<b>87</b>
<b>4.7 Análise Microscópica</b> .....	<b>91</b>
<b>4.8 Ensaio de Penetração</b> .....	<b>97</b>
<b>4.9 Ensaio de Ponto de Amolecimento</b> .....	<b>98</b>
<b>4.10 Análise dos parâmetros volumétricos da mistura</b> .....	<b>98</b>
<b>4.11 Ensaio de Comportamento Mecânico</b> .....	<b>102</b>
4.11.1 Estabilidade Marshall .....	102
4.11.1 Resistência à Tração.....	103
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>105</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>107</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>112</b>
<b>APÊNDICE A – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA</b> .....	<b>113</b>
<b>APÊNDICE B – FAIXAS DE TRABALHO</b> .....	<b>116</b>
<b>APÊNDICE C – PARÂMETROS FÍSICOS DOS CP’S</b> .....	<b>118</b>
<b>APÊNDICE D – ENSAIO DE ESTABILIDADE MARSHALL</b> .....	<b>120</b>
<b>APÊNDICE E – ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO</b> .....	<b>122</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O revestimento asfáltico é a camada de topo do pavimento, sendo responsável por resistir aos esforços horizontais exercidos pelos veículos com o propósito de tornar mais durável a superfície de rolamento, e para isso, assim como nas outras camadas é constituída de materiais que possibilitam que a mesma exerça a função requerida. Desta forma, dentre os materiais utilizados na mistura asfáltica, segundo Ferrão e Moizinho (2017) tem-se que os agregados irão atuar na transferência de carga do pavimento para o solo através da resistência ao atrito, o cimento asfáltico de petróleo (CAP) atuará unindo os agregados utilizados e o filler será responsável por preencher os vazios existentes entre os agregados.

Contudo, há estudos que buscam materiais que possam vir a substituir estes materiais convencionalmente utilizados na mistura asfáltica, uma vez que a sua obtenção é feita através da exploração destes recursos na natureza, podendo gerar impactos ambientais à região explorada, de acordo com Simone *et al.*, (2017). Sendo assim, o uso de materiais alternativos na confecção do revestimento asfáltico pode ser um meio sustentável pois visa reduzir a exploração dos agregados naturais, tal como pode-se citar o uso do pó de vidro substituindo a areia na mistura. Nesse sentido, vale ressaltar que esta substituição deve ocorrer de tal forma que o revestimento continue exercendo a sua função e atenda aos requisitos previstos em normas, como a de estabilidade Marshall e resistência à tração.

No Brasil, segundo dados da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2023), a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no ano de 2022 foi de aproximadamente 77,1 milhões de toneladas de RSU, sendo que deste total apenas 61,1% tiveram sua disposição final adequada. Do total de resíduos apresentados, o vidro representa cerca de 2%, contudo, segundo dados da Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (ABIVIDRO, 2022), apenas 25% do total de resíduos de vidro gerados são reaproveitados. Conforme a AMBIPAR (2023), grande parte desta dificuldade, quanto ao reaproveitamento, está relacionado a problemas com transporte, riscos e baixo valor agregado, fazendo com que boa parte dos resíduos sejam destinados a aterros sanitários e lixões.

Logo, essa baixa taxa de reaproveitamento está associada a um baixo investimento, uma vez que o beneficiamento do vidro é realizado por meio da logística

reversa, no qual, por meio deste programa o município realiza o transporte do resíduo de vidro gerado para uma determinada localidade do país onde será realizado este beneficiamento. Conseqüentemente, municípios sem este tipo de programa, ou seja, sem condições de aplicar a logística reversa, tendem a destinar os resíduos produzidos em aterros, sendo uma preocupação quanto ao acúmulo deste tipo de material que poderia ser reaproveitado.

Desta forma, a utilização do vidro em misturas asfáltica pode vir a se tornar um meio alternativo quanto ao seu reaproveitamento, pois o vidro a ser utilizado nesta composição da mistura asfáltica deverá ser proveniente dos resíduos, uma vez que sua aquisição pode ser feita em aterros sanitários ou centros de reciclagem. Assim, segundo Ewa *et al.* (2022), a preparação do pó de vidro é feita por meio da lavagem e trituração dos resíduos até atingir a finura necessária. Em seus estudos é possível constatar que a substituição da areia pelo pó de vidro fez com que a mistura asfáltica apresentasse melhoria quanto a resistência à fadiga e módulo de rigidez em comparação com a mistura convencional.

Portanto, o objetivo do presente trabalho é verificar se a substituição da areia natural por pó de vidro na mistura asfáltica irá atender aos requisitos normativos, bem como apresentar resistência necessária quando submetidos a ensaios laboratoriais. Para isso, vale ressaltar que a substituição será feita de forma completa do agregado e em menores proporções a fim de observar os diferentes comportamentos da mistura com porcentagens distintas de pó de vidro presente na mistura asfáltica, com intuito de identificar uma proporção ideal para o pó de vidro a ser utilizado.

## **1.1 Justificativa**

Para a execução do revestimento asfáltico os agregados presentes na mistura são oriundos da exploração de recursos na natureza. Então, a tendência é que o cenário de exploração destes agregados só cresça, em decorrência da construção de novas vias e manutenção das já existentes, sabendo que o modal de maior uso no Brasil é o rodoviário e que segundo o Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2021) o país possui 1.720.909,0 km de rodovias pavimentadas.

Sob esse viés, a possibilidade da substituição do agregado utilizado por outro material sem que a mistura asfáltica perca a sua funcionalidade faz com que

haja alternativas viáveis mais sustentáveis na realização do revestimento asfáltico. Isso posto, verifica-se que o pó de vidro pode ser um destes materiais alternativos, porém deve ser observado a proporção com que este material deverá ser utilizado na mistura, já que a depender de suas proporções a mistura pode não obter suas características ideais de resistência aos esforços horizontais e garantir conforto ao rolamento.

Além disso, constata-se no Brasil uma deficiência com relação ao beneficiamento do vidro, e que há um grande acúmulo de resíduos de vidro nos aterros sanitários. Então, fazer uso do pó de vidro proveniente da trituração destes resíduos, é uma forma de fazer o reuso deste material que tem como destino a logística reversa ou a disposição final em aterros sanitários.

Desse modo, o estudo do presente trabalho torna-se importante investigar a utilidade do pó de vidro quanto a substituição da areia no traço da mistura asfáltica, bem como encontrar a proporção ideal para esta substituição considerando as características dos agregados locais.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica contendo pó de vidro como substituto da areia na composição do revestimento asfáltico.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- a) Realizar ensaios de caracterização do pó de vidro e comparar com o agregado miúdo utilizado;
- b) Identificar a proporção ideal da substituição do pó de vidro em relação a areia na mistura asfáltica;
- c) Realizar ensaios mecânicos de estabilidade Marshall e resistência à tração nos corpos de prova (CP's);
- d) Analisar a viabilidade quanto a substituição da areia pelo pó de vidro na mistura asfáltica.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho conta com 5 capítulos para abordar e desenvolver o tema proposto.

O primeiro capítulo oferece uma introdução a respeito do tema, apresentado a justificativa para a realização do estudo e define os objetivos desta pesquisa.

O capítulo 2 exibe uma revisão bibliográfica relevante, abordando tópicos pertinentes sobre o assunto da pesquisa.

O terceiro capítulo demonstra as metodologias aplicadas no estudo, bem como os procedimentos executados.

O capítulo 4 expõe os resultados obtidos a partir dos ensaios descritos na metodologia, além de discutir e analisar os motivos dos resultados.

O quinto capítulo apresenta a conclusão do estudo realizado e as sugestões para pesquisas futuras voltadas a este assunto.

Além disso, o trabalho possui também as referências utilizadas para a sua elaboração e os apêndices necessários para a melhor compreensão dos gráficos apresentados ao longo do corpo do trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Pavimento

Pavimento é uma estrutura composta por uma sequência de camadas projetadas com espessuras finitas e rigidez, sendo projetado de forma técnica e econômica a de resistir aos esforços submetidos pelo tráfego dos veículos e pelas condições climáticas. Assim, proporciona aos usuários melhores condições ao rolamento, ressaltando vertentes relacionadas a conforto, economia e segurança (Bernucci *et al.*, 2008).

Para Balbo (2007), o pavimento é uma estrutura não perene, ou seja, possui um tempo de vida útil estipulado, e para atender esta prospectiva, sua estrutura deve receber e transmitir esforços com intuito de armazenar pressões nas camadas inferiores do pavimento. Dessa forma, para o seu pleno funcionamento cada camada constituinte do pavimento é projetada para resistir aos esforços, que por se tratar de ações oriundas dos veículos e de intempéries, podendo ser ocasionadas tanto na forma cíclica como na repetitiva, gerando tensões ao longo da estrutura do pavimento. Nesse sentido, os esforços são horizontais e verticais, o que implicará em diferentes tipos de solicitações de resistência na estrutura, assim os materiais utilizados em cada camada do pavimento devem ser escolhidos com base na sua capacidade de suporte aos esforços solicitantes característicos da camada em que está situado.

Desse modo, conforme a demanda de tráfego e situações a qual será submetido, às camadas estruturais do pavimento podem ser constituídas de diversos tipos de materiais e revestimento (Bernucci *et al.*, 2008). Para isso, o DNIT (2006), classifica os pavimentos em flexíveis, semirrígidos e rígidos.

#### 2.1.1 Tipos de Pavimento

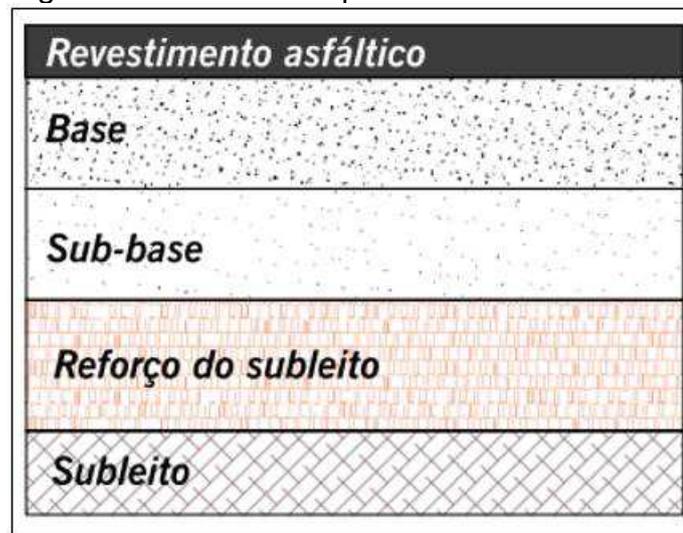
##### 2.1.1.1 Pavimento Flexível

Segundo o DNIT (2006), pavimento flexível é caracterizado por sofrer grandes deformações elásticas em decorrência das cargas a que é submetido, no entanto, não é levado ao rompimento da estrutura e os esforços são distribuídos nas demais camadas do pavimento. Em relação a seu dimensionamento, Senço (2007, p. 23) define que: “São dimensionados normalmente a compressão e tração na flexão,

provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformação permanente, e ao rompimento por fadiga”.

A composição deste tipo de pavimento é denotada por uma camada de topo feita com revestimento asfáltico e as suas camadas subsequentes sendo executadas com materiais granulares, solos ou misturas de solos. Ressalta-se que estas camadas não são executadas com a adição de agentes cimentantes ou aglutinantes para aumentar a rigidez destas camadas (Bernucci *et al.*, 2008). Na Figura 1, é possível observar a estrutura do pavimento flexível.

Figura 1 - Estrutura do pavimento flexível



Fonte: Bernucci *et al.* (2008, p.536)

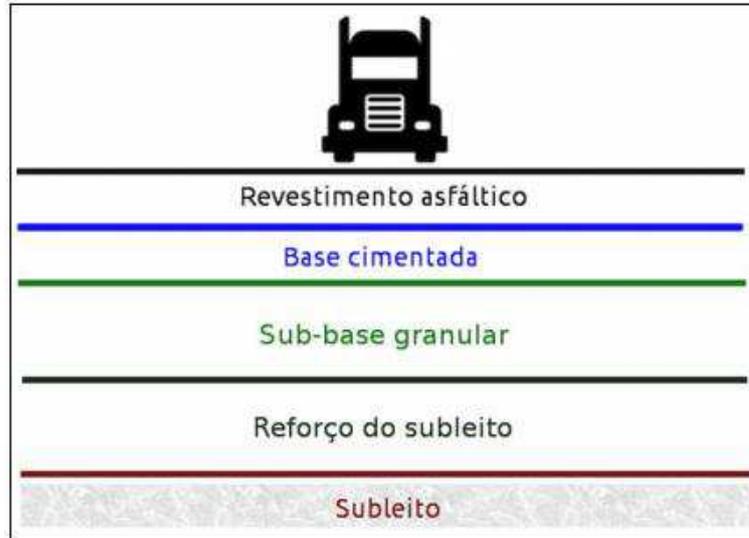
#### 2.1.1.2 Pavimento Semirrígido

O pavimento semirrígido difere-se do pavimento flexível quanto a execução da sua camada de base, uma vez que é feita com a adição de aglutinante com propriedades cimentícias, que por sua vez proporciona ao pavimento uma maior resistência quanto às cargas aplicadas, se comparado ao comportamento diante aos esforços do pavimento flexível (DNIT, 2006).

Além disso, segundo Jiménez (2014), o rompimento deste pavimento é originado pela tração na flexão imposta na camada de base, em decorrência da mesma possuir elevada rigidez em virtude da adição do aglutinante, fazendo com que esta camada absorva maior parte das cargas e não realize a transferência destes esforços para as camadas subsequentes. Assim, o fim da vida útil do pavimento é marcado pelo aparecimento de fissuras em sua superfície. No entanto, vale ressaltar

que alterações quanto a espessura da camada de base afeta a duração da sua vida útil. A Figura 2, ilustra as camadas deste pavimento.

Figura 2 - Estrutura do pavimento semirrígido



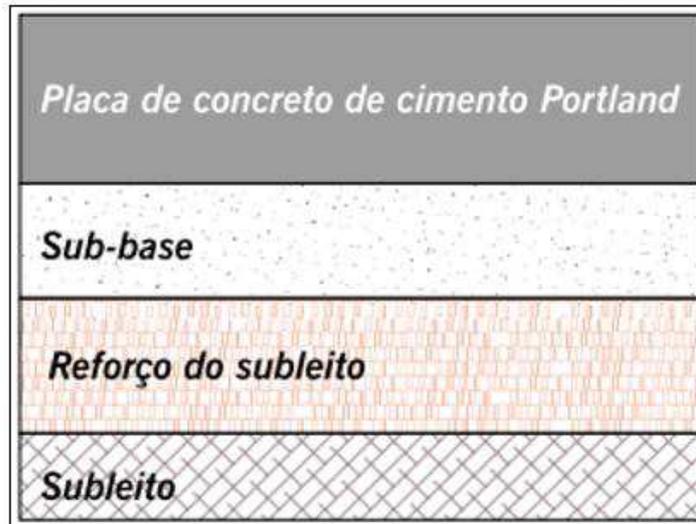
Fonte: [masterplate.com.br/o-que-e-pavimento-semi-rigido/](http://masterplate.com.br/o-que-e-pavimento-semi-rigido/)

### 2.1.1.3 Pavimento Rígido

Senço (2007, p. 23) conceitua pavimento rígido como: “[..] são aqueles pouco deformáveis, constituídos principalmente de concreto cimento. Rompem por tração na flexão, quando sujeitos a deformação”. Desta forma, o DNIT (2006) atribui que em função da camada de revestimento ser cimentada, a mesma irá apresentar elevada rigidez, proporcionando assim que esta camada seja responsável por absorver praticamente todas as cargas impostas sobre o pavimento, o que contribui para que as camadas inferiores não sejam submetidas a esforços solicitantes se comparado com os outros pavimentos citados.

Quanto aos materiais utilizados para a construção do pavimento rígido, pode-se inferir que o revestimento é geralmente constituído por placas de concreto de cimento Portland, no qual é apoiado na camada de sub-base, que é realizada com material granular ou material estabilizado com cimento (Bernucci *et al.*, 2008). Na Figura 3, tem-se a estrutura do pavimento rígido, destacando-se que a laje de concreto presente exerce a função de camada de revestimento e base para o pavimento.

Figura 3 - Estrutura típica do pavimento rígido



Fonte: Bernucci *et al.* (2008, p.535)

### 2.1.2 Camadas do Pavimento

De acordo com Balbo (2007), o pavimento é composto das seguintes camadas: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. Contudo, a existência ou não destas camadas varia de caso a caso, uma vez que depende do tipo de pavimento escolhido, do volume de tráfego em uma via e da capacidade de suporte do subleito. Algumas dessas camadas podem ser dispensáveis, no entanto, é exigido no mínimo a aplicação de um revestimento e subleito para que a estrutura seja considerada um pavimento.

#### 2.1.2.1 Subleito

O subleito é considerado a fundação do pavimento, no qual sua execução varia conforme a situação do terreno original, onde para o caso da pavimentação de uma estrada vicinal, basta avaliar a qualidade do terreno e corrigir eventuais irregularidades da superfície. Porém, para a execução de um novo traçado, deve-se adequar o subleito ao traçado proposto da via, bem como definir a sua elevação em relação a seção transversal típica do pavimento, corrigindo as falhas na terraplenagem e elencando os pontos de corte e aterro (Senço, 2007).

Quanto as cargas aplicadas sobre esta camada, Balbo (2007) definiu que os esforços serão dispersados no primeiro metro de camada. Portanto, faz-se necessário uma maior preparação da parte superior do subleito, uma vez que esta faixa é fundamental para resistir aos esforços solicitantes vindos das camadas

superiores. Já a sua composição se dá por material natural compactado, ou seja, o material de origem do terreno, nos pontos de corte do terreno natural e constituído por material transportado e compactado em pontos em que será necessário a execução de aterramento.

#### 2.1.2.2 Sub-base

A sub-base é a camada complementar à base, executada quando não é aconselhável a construção da camada de base sobre as camadas inferiores do pavimento. Sendo assim, é constituída principalmente por solo estabilizado naturalmente ou quimicamente, misturas de solos e agregados, brita graduada e brita graduada trabalhada com cimento, onde o material utilizado deverá ter características tecnológicas superiores ao material do subleito (Senço, 2007; Balbo, 2007).

#### 2.1.2.3 Base

A base, de acordo com o DNIT (2006), é a camada do pavimento que tem a função de resistir e distribuir os esforços solicitantes provenientes do tráfego, além de servir como suporte para a camada de revestimento. Em geral, esta camada pode ser constituída dos mesmos materiais citados na camada de sub-base como solo estabilizado naturalmente ou quimicamente, misturas de solos e agregados, brita graduada e brita graduada trabalhada com cimento. Porém, é necessário que possuam características tecnológicas superiores.

#### 2.1.2.4 Revestimento

O revestimento é a camada superior do pavimento, cuja principal função é resistir aos esforços horizontais e transmitir os esforços verticais para as camadas subsequentes, além destas caras originadas pelo contato da roda dos veículos com o revestimento, esta camada também está sujeita a ações de intempéries como chuva, vento e sol. Sendo assim, esta camada será executada conforme a demanda de tráfego, podendo assim ser composta por uma camada delgada in situ, uma camada de rolamento ou duas camadas com misturas asfálticas constituídas de agregados e ligantes distintos (Leite *et al.*, 2021).

Além do mais, segundo Senço (2007), o revestimento deve ser tanto quanto possível impermeável, ressaltando que não deve ser totalmente impermeável e com taxas de permeabilidade variando entre 3% a 5%. Quando a sua espessura varia de acordo com o tráfego previsto para a via em que será aplicado, ainda assim, é comum observar espessuras de 3,0 a 5,0 cm para vias simples e de 7,5 a 10,0 cm para autoestradas. Assim sendo, atendendo a esses e outros critérios, o revestimento proporciona condições de conforto ao rolamento e segurança aos usuários do pavimento.

O revestimento é constituído da mistura entre agregados e ligante, variando apenas quanto ao seu local de fabricação, que pode ser em usina específica ou na pista e quanto a sua temperatura, podendo ser executado usinado a quente, com uso de cimento asfáltico de petróleo (CAP), ou usinado a frio, com uso de emulsão asfáltica de petróleo (EAP). Além disso, o revestimento geralmente possui proporções de 95% em massa de agregados e 5% de ligante asfáltico, contudo, estes valores dependem do estudo de dosagem para a seleção adequada dos agregados e ligante asfáltico, bem como suas proporções ideais para resistir aos esforços solicitantes (Leite *et al.*, 2021).

## **2.2 Misturas Asfálticas**

Segundo Bernucci *et al.* (2008), as misturas asfálticas utilizadas no revestimento são constituídas de agregados minerais, que variam conforme as dimensões, e quanto a fonte de extração, sendo processada junto ao ligante asfáltico com o intuito de proporcionar impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade às deformações permanentes, resistência a derrapagem dos pneus, resistência a fadiga e ao trincamento térmico.

Nesse sentido, Fabbri e Faxina (2020) definiram que a estabilidade da mistura asfáltica está associada à capacidade de resistir à deformação imposta pelas cargas dos veículos, tendo seu desempenho dependente tanto do atrito interno como da coesão. Isto se dá pelo fato de o atrito interno ser em função da graduação do agregado e forma das partículas, bem como a proporção de ligante utilizado. Este fator evidencia a necessidade da escolha adequada de ligante e dos agregados, para evitar eventuais problemas no pavimento asfáltico e encurtando o seu período de vida útil.

Todavia, os pavimentos asfálticos tendem a apresentar patologia em excesso antes de seu tempo estipulado, onde estes problemas geralmente estão associados a mistura asfáltica, em especial ao ligante, apesar de constituir apenas 5% da mistura. Outro fator está relacionado a má qualidade de agregados quanto ao seu processo de extração, que devem ser bem estudados e submetidos a diversos ensaios para qualificar e garantir um comportamento adequado para a mistura asfáltica (Leite *et al.*, 2021).

### 2.2.1 Ligantes Asfálticos

De acordo com Senço (1997 *apud* Madureira, 2023a), os ligantes asfálticos são produtos obtidos a partir da evaporação natural de depósitos situados na superfície terrestre ou através da destilação em unidades industriais, as refinarias de petróleo. Estes materiais são constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos de elevada massa molar, sendo composto em sua maioria por carbono e hidrogênio, além de também possuir outros elementos como oxigênio, enxofre e alguns outros metais.

#### 2.2.1.1 Cimento Asfáltico

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) é definido como um material semissólido à temperatura ambiente, sendo assim, necessita ser aquecido para que alcance uma consistência necessária para realizar a mistura com os agregados. Dessa forma, esta propriedade permite que o CAP tenha uma melhor trabalhabilidade quando aquecido ao mesmo tempo que quando resfriado forneça ao pavimento características necessárias para o seu funcionamento. Contudo, vale ressaltar que o CAP não deve ser aquecido a temperaturas superiores a 177 °C, pois estes níveis de temperatura podem causar perdas nas suas características viscoelásticas (Pinto e Pinto, 2015).

Assim sendo, o CAP é um material capaz de resistir a ação da maioria dos produtos inorgânico e duráveis, assim contribuindo no seu desempenho, além de ser a matéria-prima para os demais tipos de asfaltos existentes, como o asfalto diluído, emulsão asfáltica e o asfalto modificado (Madureira, 2023a). O cimento asfáltico pode ser classificado conforme a Norma DNIT 095/2006-EM em CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200, sendo designadas de acordo com os resultados do

ensaio de penetração que busca encontrar o grau de consistência e viscosidade que apresenta o ligante.

#### 2.2.1.2 Asfalto Diluído

O asfalto diluído (AD) é definido por Pinto e Pinto (2015) como o material proveniente da diluição do cimento asfáltico em solventes derivados do petróleo de volatilidade adequada, sendo realizado quando se busca eliminar o aquecimento do CAP ou utilizar um aquecimento moderado. No entanto, após a aplicação do asfalto diluído em campo, ele passa pelo processo de evaporação do solvente que deixará no asfalto como resíduo o CAP, proporcionando assim ao AD uma consistência semelhante ao cimento asfáltico. Este processo de evaporação é chamado de cura, tido como o fator para classificação do asfalto diluído, uma vez que a cura pode ser rápida, média ou lenta.

#### 2.2.1.3 Emulsão Asfáltica

Segundo Pinto e Pinto (2015):

A emulsão asfáltica de petróleo (EAP) é uma dispersão coloidal de uma fase asfáltica em uma fase aquosa (direta) ou, então, de uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica (inversa), com a ajuda de um agente emulsificante. É obtida pela combinação de água com asfalto aquecido, em um meio intensamente agitado e na presença dos emulsificantes, cujo objetivo é oferecer certa estabilidade ao conjunto, favorecer a dispersão e revestir os glóbulos de betume de uma película protetora, mantendo-os em suspensão.

Portanto, o emulsificante é o agente tensoativo responsável por reduzir a tensão superficial da molécula, e assim evitando a ruptura dos glóbulos de asfalto. Nesse contexto, o agente emulsificante confere uma carga elétrica para realizar este processo, logo a classificação da emulsão asfáltica é feita conforme a carga da partícula, assim a EAP pode ser catiônica, aniônica, neutra ou anfotérica (Madureira, 2023a).

#### 2.2.2 Agregados

De acordo com Leite *et al.* (2021, p. 18), “O termo agregado é usado para indicar um material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de misturas asfálticas. Agregado é um termo

genérico para as areias, os pedregulhos e as rochas minerais britadas”. Dessa forma, o seu estudo aprofundado é essencial para caracterizá-los visando verificar e analisar as propriedades de cada material, bem como o seu comportamento quando utilizado na mistura asfáltica, uma vez que, além dos agregados serem classificados quanto a natureza, tamanho e distribuição dos grãos, cada material citado tem a sua devida função dentro da mistura asfáltica (Bernucci *et al.*, 2008).

### 2.2.2.1 Natureza

Os agregados podem ser classificados quanto à natureza, onde são divididos em naturais, artificiais e recicláveis, no qual os naturais abrangem todos aqueles oriundos de um meio natural, sendo obtidos através de processos como desmonte, escavação e dragagem. Como exemplo destes materiais, pode-se citar britas, seixos e areias, sendo que estes podem ser utilizados na pavimentação com o mesmo tamanho e forma quando encontrados na natureza, porém, em alguns casos podem passar pelo processo de britagem para fragmentar os agregados (Bernucci *et al.*, 2008).

Os agregados artificiais são aqueles provenientes de processos industriais, como por exemplo a escória de alto-forno e de aciaria, ou aqueles que são oriundos de processos específicos como a argila calcinada e expandida. Dentro desta classificação também podem ser incluídos os resíduos de construção e demolição (RCD), contudo, devem ter uma seleção criteriosa para serem empregados na pavimentação em virtude de possuírem características de alta porosidade, acarretando assim na necessidade de maior consumo de ligante na produção da mistura asfáltica. (Leite *et al.*, 2021).

Para Pinto e Pinto (2015):

Agregados reciclados são aqueles provenientes do reuso de diversos materiais, por exemplo, da reciclagem de revestimentos asfálticos e de resíduos sólidos da construção civil. Nos últimos anos, o Brasil tem utilizado este tipo de agregados em vias urbanas e rodovias de baixo volume de tráfego. Segundo a NBR 15115/2004, o agregado reciclado aplicável à pavimentação é por definição o material granular, obtido por meio de britagem ou beneficiamento mecânico de resíduos de construção civil.

Na Figura 4, pode ser observado a obtenção dos agregados naturais.

Figura 4 - Exploração dos agregados naturais



Fonte: Leite *et al.* (2021, p.18)

#### 2.2.2.2 Tamanho dos Grãos

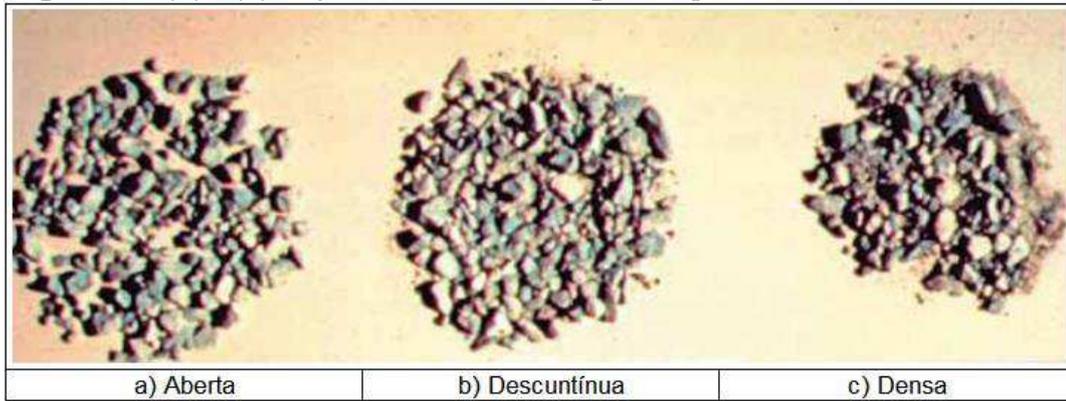
De acordo com o DNIT (2006), quanto ao tamanho dos grãos, os agregados podem ser divididos em graúdo, miúdo e de enchimento. O agregado graúdo é definido como o material retido na peneira de nº 10 (2,0 mm), o agregado miúdo será compreendido pelo passante na peneira de nº 10 (2,0 mm) e retido na peneira de nº 200 (0,075 mm), já o material de enchimento será o que passar ao menos 65% de seu material na peneira de nº 200 (0,075 mm).

A análise prévia da granulometria de cada um dos materiais a ser utilizado na mistura asfáltica é essencial, pois conforme Bernucci *et al.* (2008), a presença de uma determinada porcentagem de material de enchimento pode reduzir os vazios presente na mistura, bem como melhorar a sua trabalhabilidade. Porém, a presença deste material em grande porcentagem nas misturas prejudica a sua funcionalidade devido a diminuição do contato entre os agregados graúdo e miúdo, além de interferir na sua capacidade de compactação.

#### 2.2.2.3 Distribuição dos Grãos

A distribuição dos grãos será obtida com base na análise do peneiramento dos agregados, sendo observado as porcentagens da amostra que fica retida em cada peneira utilizada para o peneiramento em relação a amostra total peneirada, assim definindo os grossos e finos presentes no agregado. Sendo assim, a distribuição é dividida em aberta, descontínua, uniforme e densa (Leite *et al.*, 2021), onde, na Figura 5, pode-se observar a comparação entre a granulometria de um determinado agregado.

Figura 5 – (a) - (c) Aspectos visuais das graduações

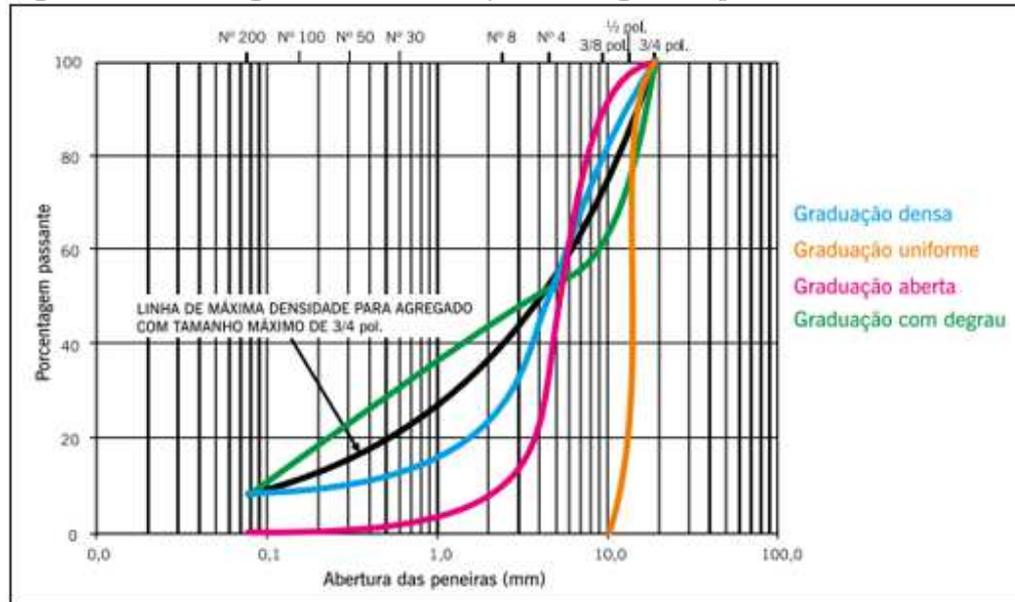


Fonte: Leite *et al.* (2021, p.22)

Nesse contexto, Leite *et al.* (2021) define como graduação densa a caracterizada por possuir granulometria contínua em todos os grãos, ou seja, é denotado por uma amostra de agregado onde há quantidade equivalente de material retida em cada peneira. Enquanto a graduação aberta também apresenta granulometria contínua, porém é limitado até certa faixa do peneiramento, uma vez que, possui baixa quantidade de material fino, ou seja, o passante na peneira de nº 200.

A graduação uniforme é definida por aquela que apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa estreita, ou seja, a amostra de agregado não apresenta grande variação em relação ao tamanho de seus grãos. E a graduação descontínua apresenta pequena porcentagem de agregado com tamanhos intermediários, assim sendo caracterizado pela presença equivalente nas peneiras de extremidade e ausência na faixa central, o que representa na curva granulométrica o chamado patamar (Bernucci *et al.*, 2008). Na Figura 6, é representado o comportamento das graduações citadas na curva granulométrica.

Figura 6 - Curva granulométrica típica das graduações



Fonte: Bernucci *et al.* (2008, p.226)

### 2.3 Substituição de Agregados na Pavimentação

A pavimentação sustentável consiste em executar uma ou mais camadas do pavimento com técnicas e materiais que diminuam o impacto ambiental proveniente da exploração dos agregados. Para isso, deve-se atentar a execução do pavimento de tal forma que ele seja durável e resista aos esforços a qual é submetido. Sendo assim, este é o fator essencial devido a sua execução de forma correta evitar manutenções recorrentes no pavimento, que por sua vez requerem ao maior uso de agregados adicionais para o recapeamento de vias (Vila Betume, 2021).

Em decorrência do ligante asfáltico ser proveniente do petróleo e possuir características específicas que o tornam imprescindível na execução da mistura asfáltica, colabora para que a substituição de materiais do revestimento seja voltada aos agregados graúdo, miúdo e material de enchimento. À vista disso, essa substituição é feita por materiais que tendem a ser encontrados facilmente ou que estejam sendo inutilizados, contribuindo assim, para a preservação de recursos naturais, diminuindo a exploração dos agregados naturais e a geração de resíduos, além do aproveitamento de materiais recicláveis (Vila Betume, 2021; Pancionato, 2023).

Contudo, apesar da substituição dos agregados naturais colaborar com o meio ambiente e apresentar viabilidade econômica, deve ser realizado todo o estudo pelo qual os agregados convencionais são submetidos, visando não haver perdas nas

características necessárias na composição da mistura asfáltica, que implica em atender a capacidade de suporte, sendo analisado o comportamento mecânico da mistura (Suzuki e Bonfim, 2017).

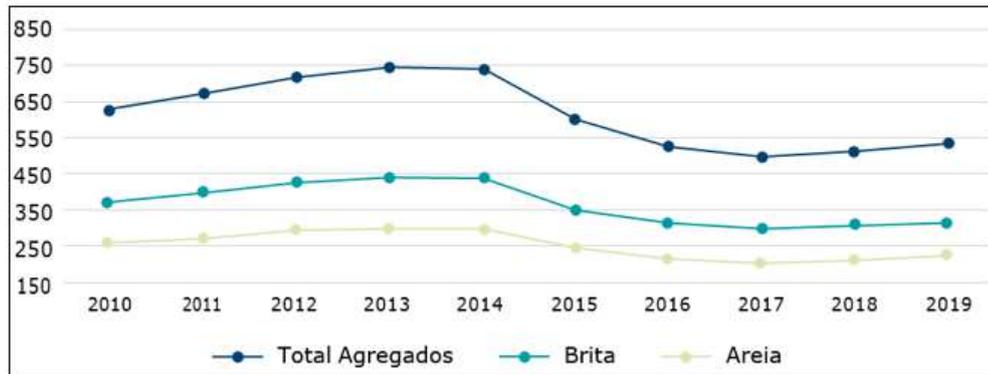
### 2.3.1 Exploração de Agregados Naturais

Os agregados minerais, comumente usados como areia e pedra britada são as substâncias minerais mais consumidas no mundo, de acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2019). Dessa forma, ainda expõe que seu uso está empregado principalmente na construção civil, sendo caracterizado por um material produzido através da matéria-prima mineral bruta ou beneficiada, possuindo diversos tipos de tamanhos que como já mencionado são previamente caracterizados antes de seu uso.

Desta forma, os agregados possuem alta demanda comercial, uma vez que é utilizada na construção de casas e edifícios, obras de saneamento, construção de ferrovias, portos, aeroportos e na pavimentação. Logo, por ser um produto extremamente requisitado, há sempre a exploração constante de jazidas para atender a necessidade do mercado, e assim, a extração da matéria-prima ocorre em diversas localidades visando lucros quanto a diminuição de gastos no que se refere ao transporte dos agregados (IBRAM, 2019).

Assim sendo, o beneficiamento e produção dos agregados geralmente é realizado no entorno de áreas urbanas, já que o custo dos transportes está estimado em  $\frac{1}{3}$  do custo final da areia e  $\frac{2}{3}$  do custo final da brita. Conseqüentemente, para o caso da areia que é explorada em regiões de várzea, leitos de rios e mantos de decomposição de rocha, pode apresentar jazidas localizadas muito distante de seu mercado consumidor, além de haver casos de restrição ambiental quanto a extração em determinadas localidades (De La Serna, 2009). No Gráfico 1, nota-se a quantidade de agregados como brita e areia que são produzidos no Brasil, observando o seu alto consumo com baixa variância ao decorrer dos anos, o que demonstra que em aspectos mercadológicos, há uma busca constante por estes materiais.

Gráfico 1 - Produção de agregado em milhões de toneladas

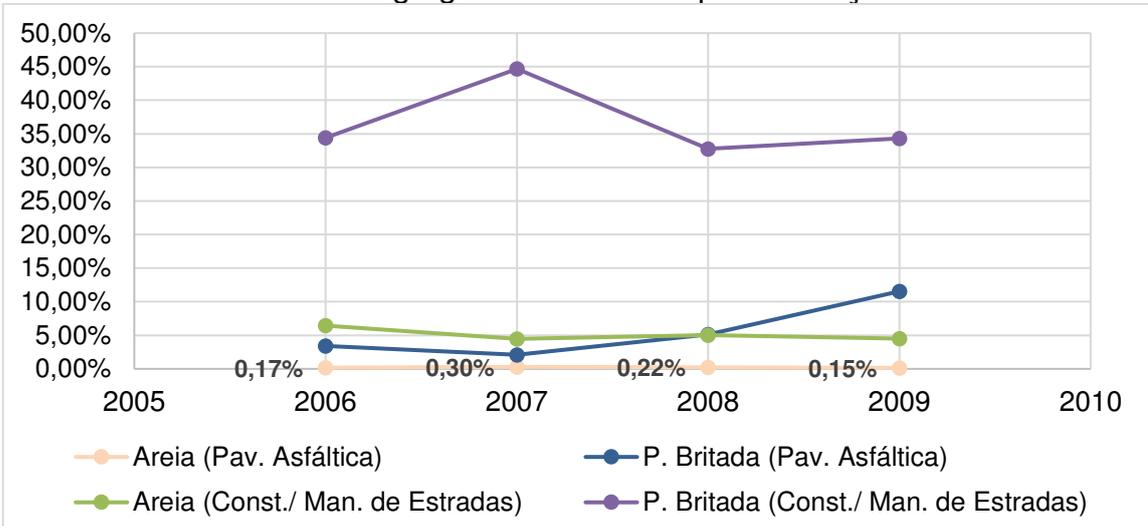


Fonte: IBRAM (2019, p.69 *apud* Sindipedras/ANEPAC, 2020)

Sendo assim, é necessário analisar o mercado consumidor brasileiro para observar a quantidade de agregados naturais explorados e quais os destinados ao uso em obras de pavimentação. Para isso, tem-se o Anuário Mineral Brasileiro (AMB) realizado de 2007 a 2010, que pode ser utilizado para compreender o cenário de uso de agregados naturais no Brasil. Dentre os produtos brutos e beneficiados, são utilizados na pavimentação asfáltica a areia, rochas britadas, saibro e calcário (AMB, 2007).

Todavia, vale ressaltar que o AMB diferencia e realiza contagem a parte para a construção e manutenção de estradas. No Gráfico 2, é possível observar a quantidade de pedra britada e areia utilizadas exclusivamente para o pavimento asfáltico e na construção/manutenção de estradas durante o período de 2006 até 2009. Além disso, a análise reflete ao uso destes agregados na pavimentação em relação ao seu uso com um todo no mercado consumidor (AMB, 2007).

Gráfico 2 - Consumo dos agregados na área da pavimentação entre 2006 e 2009



Fonte: Adaptado de ANM (2007 a 2010)

No geral, deve-se destacar o uso dos agregados em diversos setores da construção civil, o que contribui para que haja sua grande exploração e necessidade no mercado como visto no Gráfico 1. Sendo assim, de acordo com dados da Agência Nacional de Mineração - ANM (2023), em 2021, mesmo tendo sido um ano afetado em parte do mercado devido a pandemia, a produção de rocha britada e de areia representaram 15,07% e 7,48% de toda a produção mineral brasileira, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Produção dos agregados em 2021

Substância Mineral	Produção no Brasil	
	Toneladas	%
Ferro	568,40	32,67
Cobre	99,60	5,73
Ouro	199,20	11,45
Alumínio (Bauxita)	46,30	2,66
Estanho	37,40	2,15
Rochas (Britadas)	262,20	15,07
Argilas	52,20	3,00
Areia	130,20	7,48
Fosfato	39,70	2,28
Níquel	12,50	0,72
Nióbio	15,50	0,89
Saibro	16,00	0,92
Outros	260,50	14,97
<b>Total</b>	<b>1739,7</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Adaptado de ANM (2023, p.9)

Na pavimentação asfáltica, o consumo dos agregados irá variar conforme o tamanho da via, a sua capacidade de suporte ao tráfego e a espessura do revestimento, assim, estima-se que para a construção de uma rodovia pavimentada é consumido cerca de 9800 toneladas por quilômetro (IBRAM, 2012). Entretanto, este parâmetro é voltado para vias de grande tráfego, assim Calaes (2005), define que vias com 10 metros de largura possuem consumo de cerca de 3000 toneladas por quilômetro.

Portanto, diante da exploração frequente destes materiais na natureza, é necessário compreender o agravante que as constantes extrações dos agregados podem provocar no meio ambiente e nos seres humanos. Nesse sentido, a atividade

provoca a supressão vegetal e a remoção de capeamento de solo que, por sua vez, podem afetar em larga escala as regiões próximas às jazidas, tendo em vista que há grandes volumes de escavação nestes locais (Baptisti *et al.*, 2004).

Já os problemas em relação aos seres humanos são decorrentes da já citada necessidade de proximidade do mercado consumidor para diminuir custos com transporte. Desta forma, a exploração dos agregados próximos a áreas urbanas afeta no aumento de ruídos, da presença de partículas em suspensão no ar que podem provocar doenças respiratórias, a sob pressão atmosférica e mudança do uso do solo, além de problemas como a depreciação de imóveis próximos a locais de extração (Ferreira e Lima, 2013).

### 2.3.2 Substituição de Agregados Naturais por Resíduos de Vidro

Tendo em vista estes problemas, tanto em âmbito ambiental quanto no social e os gastos relacionados ao transporte, são realizadas diversas pesquisas com o intuito de encontrar materiais alternativos ao convencionalmente utilizado visando solucionar estes problemas. Assim, os estudos possuem foco de buscar materiais tanto para as camadas de base e sub-base, como também para o revestimento, substituindo os agregados. Além disso, os materiais geralmente estudados são aqueles que não possuem utilidade ou que apresentam descarte irregular no meio ambiente, podendo ser citado o uso de borracha de pneu, garrafas pet, resíduos de construção e demolição, rejeitos de minério e resíduos de vidro.

Nesse sentido, os estudos de Simone *et al.* (2017) tiveram por intuito substituir o material de enchimento, para o caso o calcário, por pó de vidro proveniente de indústrias de ourivesaria. Onde, este material passa por procedimentos como a moagem, britagem e lavagem, que proporcionam um resultado com partículas em geral de tamanho inferior a 0,075 mm. Sendo assim, a pesquisa objetivou a caracterização do pó de vidro quanto a granulometria, densidade e de solubilidade, além de realizar ensaios de resistência a tração e teste axial de carga repetida na mistura asfáltica contendo pó de vidro, constatando que a sua utilização proporcionou significativo desempenho no que tange a capacidade de suporte e resistência a deformações.

Já os estudos de Ewa *et al.* (2022) buscaram substituir o pó de pedra utilizado como material de enchimento pelo pó de vidro, sendo inicialmente analisada

a granulometria para verificação da viabilidade da substituição, além da análise da massa específica do material. Desta forma, dado que o pó de pedra corresponde a 5% da mistura asfáltica do estudo, Ewa *et al.* (2022) determinaram uma substituição do material de enchimento pelo pó de vidro em valores de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 50% e 100%, visando observar o comportamento dos traços em relação a estabilidade e fluência Marshall e em parâmetros como volume de vazios e relação betume/vazios. Portanto, notou-se que os traços estipulados atenderam aos requisitos normativos quanto a estabilidade Marshall, no entanto, constatou-se que a o uso de alguns traços levaram a mistura a apresentar alto teor de vazios, além da valores abaixo do mínimo especificado no que se refere a relação betume/vazios, culminando assim para um teor ideal de substituição de 10%.

Abendeh (2017) estudou a possibilidade da substituição do agregado miúdo, para a pesquisa em questão sendo utilizado o calcário, pelo resíduo de vidro triturado. Assim, definiu que o material a ser utilizado deveria ser o passante na peneira de 2,36mm, e ainda realizando a comparação granulométrica dos dois materiais. Com a definição completa do resíduo de vidro, estipulou a substituição em teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% em relação ao peso total da mistura asfáltica, para assim submeter corpos de prova com os respectivos traços a ensaio de estabilidade e fluência Marshall e análise de teor de vazios e relação betume/vazios. Desta forma, a partir dos resultados verificou-se que os valores mais próximos da mistura convencional com 0% de substituição e que atende aos requisitos normativos esteve presente na mistura com teor de 10% de resíduo de vidro triturado.

Choudhary *et al.* (2021) buscou a substituição do material de enchimento, assim como Simone *et al.* (2017), onde o material em questão substituído foi o pó de pedra pelo pó de vidro com granulometria semelhante ao material originalmente utilizado na mistura. Desta forma, estabeleceu proporções de pó de vidro de 4%, 5,5%, 7% e 8,5% em relação à massa total de agregados presente na mistura, e assim, submetendo corpos de prova a ensaios mecânicos e análise de propriedades físicas. No geral, todos os traços estipulados atenderam aos requisitos normativos apresentados na pesquisa, além de possuir resultados equiparáveis a de uma mistura com a utilização do pó de pedra.

Issa (2016) abordou questões relacionadas a geração de resíduos de vidro e problemáticas associadas ao alto custo de manutenção de vias, e para isso, investigou a aplicação deste tipo de resíduo na pavimentação asfáltica. Portanto, seus

estudos objetivaram a substituição de agregados passante na peneira de 4,75mm, de pedregulho fino até areia fina, pelo resíduo de vidro triturado, onde foram feitas substituições de 5%, 10% e 15% em relação a massa total de agregados. Vale destacar que não foram mencionados ensaio prévios para caracterização do resíduo de vidro empregado. Desta forma, foram executados ensaio de estabilidade Marshall, além da verificação de parâmetros dos corpos de prova, no qual observou-se que houve diminuições gradativas na massa específica e no volume de vazios dos corpos de prova que à medida que a massa de resíduo de vidro na mistura aumentava. No entanto, a autora constatou que a substituição apresentou resultados significativamente melhores na estabilidade Marshall em comparação a mistura asfáltica convencional, sendo fixado que a melhor porcentagem de substituição foi a de 10%.

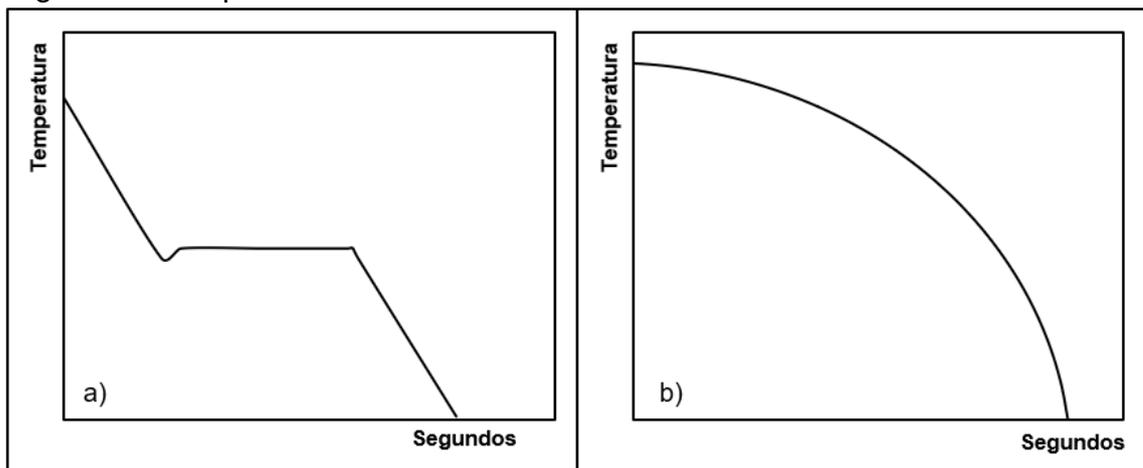
Já os estudos de Iskender *et al.* (2020) pretenderam observar a comportamento de misturas asfálticas com substituição do basalto por resíduos de vidro a serem utilizados como filler (passante na peneira nº200) e frações utilizadas como agregado (passante na peneira de 2,00mm e retido na de 0,425mm), onde foram submetidos ao ensaio de dano por umidade induzida. Desta forma, foi caracterizado o resíduo utilizado para verificação da granulometria, além de teste químicos para fosse observado a composição química do vidro. Nesse sentido, a substituição do basalto foi realizada em 20%, 30% e 40%, constatando ao final do estudo que os resultados se apresentaram positivos em relação a substituição, no qual se demonstraram mais significativos para substituição da porção de filler utilizada na mistura asfáltica.

## **2.4 Vidro**

O vidro é definido de acordo com o Cadernos Temáticos de Química Nova Alves *et al.* (2001, p.16) como: “[...] ‘o vidro é um produto inorgânico fundido, que atinge por resfriamento uma condição rígida, sem que ocorra cristalização’”. Desta forma, é o material que passa pelo processo de fusão e de resfriamento, onde a alteração de temperatura durante os processos afeta a sua viscosidade, sendo essencial para colaborar na sua trabalhabilidade quanto a possibilidade de moldar o produto final fabricado (Alves *et al.*, 2001).

Assim, essa característica das substâncias sólidas que, quando aquecidas a altas temperaturas passam pelo processo de fusão e, em seguida, solidificam-se ao serem resfriadas sem que haja variação da temperatura em decorrência da compensação do calor perdido pelo calor de cristalização formando cristais, fibras ou grãos. Contudo, no caso do vidro, o comportamento da temperatura neste processo se dá de forma diferente, já que não haverá um recorte de tempo com temperatura constante durante a solidificação, ou seja, o vidro não irá possuir cristais, fibras ou grãos (Morey, 1939 *apud* Barros, 2010). Na comparação, a Figura 7.a apresenta o comportamento de uma substância sólida, onde observa-se que há um ponto em que a temperatura se mantém constante, já na Figura 7.b observa-se o comportamento do vidro, onde caracteriza-se pela ausência deste patamar.

Figura 7 - Comportamento de resfriamento das substâncias



Fonte: Adaptado de Barros (2010, p.4)

De certa forma, o vidro possui diversas utilidades dentro do âmbito comercial, no qual alguns tipos de vidro podem resistir a extremas temperaturas, tanto quentes quanto frias, além de apresentar meios para conduzir ou bloquear luz. Isto se dá pelo fato deste material ser detentor de ligações interatômicas e possuir uma vasta quantidade de composições químicas, lhe permitindo, a depender do tipo específico de vidro e de uma gama de variação quanto a sua produção, a capacidade de atender a diversas necessidades (Akerman, 2000).

Dentre outras características do vidro, pode-se citar a capacidade de sua alta utilidade quando se trata de seu pós uso, como por exemplo, o vidro utilizado em embalagens, como as garrafas de refrigerante, que podem ser retornáveis. Além disso, é um material com potencial de ser reciclado infinitamente sem que tenha perda na sua qualidade ou pureza, além de não haver perda de material durante o processo

de reciclagem, ou seja, para cada 1 kg de resíduo de vidro obtém-se 1 kg de vidro reciclado (ABIVIDRO, 2009).

As diversas características citadas propiciam ao vidro uma enorme demanda comercial, onde os mais empregados são os vidros planos, de embalagens e de produtos de mesa ou domésticos. Além disso, o vidro é utilizado em fibras de reforço, fibras ópticas, lã de vidro, tubos, iluminação, onde cada material possui característica e processo produção específica, o que acarreta diferentes métodos de beneficiamento após o uso destes materiais (Akerman, 2014).

Os vidros planos são divididos em dois tipos, podendo ser impresso ou float. Dentro do mercado comercial é empregado em automóveis, no qual é utilizado apenas vidro do tipo float que sofre transformação posterior como laminação e têmpera. Este tipo de vidro também é utilizado em eletrodomésticos, como uso tanto do float como do impresso, além de ser utilizado na construção civil, passando por processos de transformação como a laminação e têmpera, para ser colocado em revestimentos superficiais, ou como próprio vidro (Akerman, 2014).

Os vidros para embalagens são muito utilizados em virtude de ser totalmente inerte, o que proporciona a melhor conservação de alimentos e bebidas. O seu maior uso está concentrado no setor de bebidas, porém também é empregado para alimentos em conserva, produtos farmacêuticos e de higiene pessoal. Já os vidros domésticos são os copos, xícaras e objetos de decoração, ressaltando que alguns destes materiais devem apresentar resistência a mudanças intensas de temperatura, uma vez que podem ser utilizados em fornos e microondas (ABIVIDRO, 2009).

#### 2.4.1 Tipos de Vidro

No intuito de produzir os vidros destinados a diversos setores comerciais, observa-se que há uma enorme variedade de materiais que podem ser utilizados na produção do vidro, e assim existir uma vasta possibilidade de composições químicas distintas e diferentes desempenhos. Dessa maneira, a variedade dos vidros está intrinsecamente relacionada a sua composição química e a porcentagem de cada elemento que é usado em sua fabricação, logo, quanto ao grupo químico, os vidros podem ser classificados em: de soda-cal, de sílica fundida, de borossilicato e de silicato de alumínio (Giacomini, [2004-2008]).

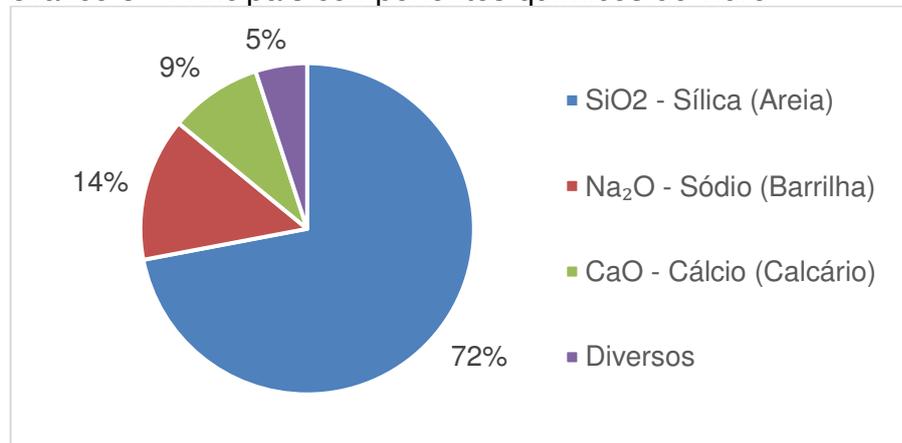
Os vidros de soda-cal representam cerca de 90% dos vidros produzidos, além de ser o mais barato. Dentre suas características, apresenta baixa resistência a bruscas variações de temperatura e a compostos químicos corrosivos, o que delimita o seu uso para embalagens e para automóveis e eletrodomésticos (ABIVIDRO, 2009).

Os vidros de sílica fundida são caracterizados por altas temperaturas de fusão e trabalho, sendo resistente às variações de temperatura e possui alta resistência química. Assim, estas virtudes fazem com que seja mais empregado em vidrarias de laboratório (Giacomini, [2004-2008]).

Os vidros de borossilicato são geralmente utilizados para utensílios domésticos, laboratórios e lâmpadas. Eles possuem características de alta resistência a corrosão química e com coeficiente de expansão térmica baixo (Giacomini, [2004-2008]).

Os vidros de silicato de alumínio são caracterizados por conter alumínio em sua composição, conferindo-lhes maior resistência a produtos químicos em comparação ao borossilicato. Além disso, é um material complexo de ser produzido e capaz de suportar altas temperaturas (ABIVIDRO, 2009). No Gráfico 3, pode ser observado os principais materiais constituintes do vidro.

Gráfico 3 - Principais componentes químicos do vidro



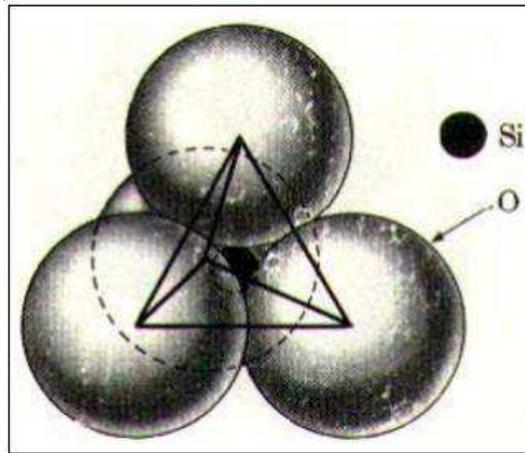
Fonte: Adaptado de ABIVIDRO (2009, p.10)

#### 2.4.2 Composição e Estrutura do Vidro

Como mencionado anteriormente, o vidro passa por um processo de fusão e resfriamento durante a sua produção. Sendo assim, durante este procedimento o material apresenta alta viscosidade, que está diretamente relacionada a dificuldade das moléculas se moverem uma em relação às outras. Assim, à medida que ocorre o

resfriamento do material, observa-se o aumento da viscosidade que alcança um determinado ponto onde as moléculas não conseguem mais se movimentar, e mesmo possuindo neste estado a semelhança com um líquido, o material possui características de um sólido. Corroborando assim, para que o vidro seja um material sólido que se apresenta como um líquido, uma vez que suas moléculas não são organizadas como cristais (Akerman, 2014). Segundo Akerman (2000, p. 13), “Vidros silicatos, assim como minerais, não são compostos por moléculas discretas, mas redes conectadas tridimensionalmente. A unidade básica da rede de sílica é o tetraedro sílica-oxigênio [...]”. Essa estrutura está presente na Figura 8.

Figura 8 - Estrutura base da rede de sílica

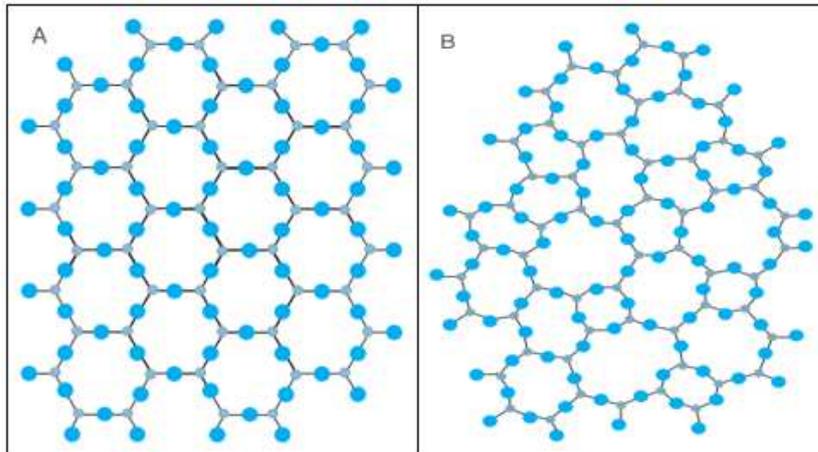


Fonte: Akerman (2000, p.13)

De acordo com Zacharisen (1932 *apud* Alves *et al.*, 2001) a formação atômica do vidro é caracterizada por uma rede tridimensional estendida, cuja principal particularidade a ausência de simetria e periodicidade nesta rede, com as forças interatômicas sendo equiparáveis ao cristal de origem. Sendo assim, os parâmetros de periodicidade e simetria na rede são os fatores responsáveis por diferenciar o vidro do cristal, que pode ser formado por areia, quartzo, dentre outros materiais.

Desta forma, materiais como quartzo e areia são os representantes da chamada sílica cristalina, composta pela organização das moléculas em simetria. Contudo, quando é executado o processo de fundição nesses materiais, proporciona a desorganização destas moléculas que, ao serem resfriadas de forma rápida, não conseguem retomar ao seu estado inicial, e tornando-se assim a sílica vítreica ou vidro de sílica (Akerman, 2014). Abaixo, observa-se a estrutura típica do quartzo e areia (Figura 9.a) e a estrutura do vidro (Figura 9.b).

Figura 9 – a) Estrutura molecular da areia; b) Estrutura molecular do vidro



Fonte: Alves *et al.* (2021, p.16)

Além da comparação a nível molecular, pode-se analisar o vidro e o cristal em seu comportamento quanto ao resfriamento, uma vez que o vidro possui uma queda brusca em seu volume se comparado a de um cristal. Este fator ocorrer devido ao fato da reorganização estrutural já mencionado, além disso, o vidro passa por uma temperatura chamada de transição vítrea, onde ocorre a passagem do estado vítreo, no qual o material não apresenta deformação permanente nem elasticamente, para o estado viscoelástico, onde o comportamento será elástico sem a presença de deformação permanente (Alves *et al.*, 2001).

De forma geral, não há uma maneira de expressar o vidro em uma única fórmula, dada sua grande variação de quantidade de óxidos presentes em sua composição química. Assim, durante a sua fabricação, a quantidade de cada componente químico utilizado é dada em porcentagem em relação ao peso total do produto fabricado (Akerman, 2009).

Este aspecto da presença de diversos componentes químicos pode ser observado na cor das embalagens de bebida, onde a depender do óxido utilizado para a confecção do vidro fará com que a garrafa tenha uma coloração específica. Sendo assim, tem-se por exemplo o uso do cromo que fornece coloração verde, o cobalto para a cor azul e o níquel para tons de marrom (Jaime *et al.*, 2018). Desta forma, na Tabela 2 é apresentada as composições químicas das principais embalagens de garrafas.

Tabela 2 - Composições químicas das diferentes cores de garrafas

	Embalagem Incolor (%)	Embalagem Âmbar (%)	Embalagem Verde (%)
SiO <sub>2</sub>	72,97	71,46	71,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,90	2,40	2,40
CaO	11,00	10,70	10,70
MgO	0,30	1,00	1,00
Na <sub>2</sub> O	12,80	13,20	13,20
K <sub>2</sub> O	0,80	0,80	0,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,40	0,40
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,20
SO <sub>3</sub>	0,18	0,04	0,04
Total	100	100	100

Fonte: Adaptado de Akerman (2014, p.33)

### 2.4.3 Reciclagem do Vidro

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2010) nº 452 define reciclagem como:

[...] processo de transformação de resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vista a transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) [...]

Além disso, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS, 2010) define como resíduos sólidos os materiais descartados provenientes da ação humana, que vem a ter uma destinação final podendo haver ou não a alteração do estado original do material. Nesse contexto, o vidro é classificado como um resíduo classe II B - Inerte, ou seja, é um material residual caracterizado como não perigoso e que não se solubiliza em água.

Contudo, há outras formas de destinar os resíduos sólidos que não seja por meio da reciclagem, uma vez que o Artigo 9º da PNRS (2010) define uma hierarquia de propriedade tal qual a apresentada na Figura 10, onde a base da pirâmide representa a forma menos favorável de gerenciamento até o topo representando o mais favorável. Assim, a prática de destinação final de resíduos sólidos em aterro sanitário não é o mais aconselhável para a maior parte dos materiais gerados pela

população, já que em suma maioria poderia passar por um processo de reuso, transformação ou tratamento. Ainda assim, segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (PRSB) (2023), apenas 14,7% da população brasileira possui coleta seletiva e cerca de 38,9% (27.917.624 ton) no ano de 2022 não foram sequer destinadas a aterros sanitários.

Figura 10 - Hierarquia de propriedades para o gerenciamento de resíduos



Fonte: Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010)

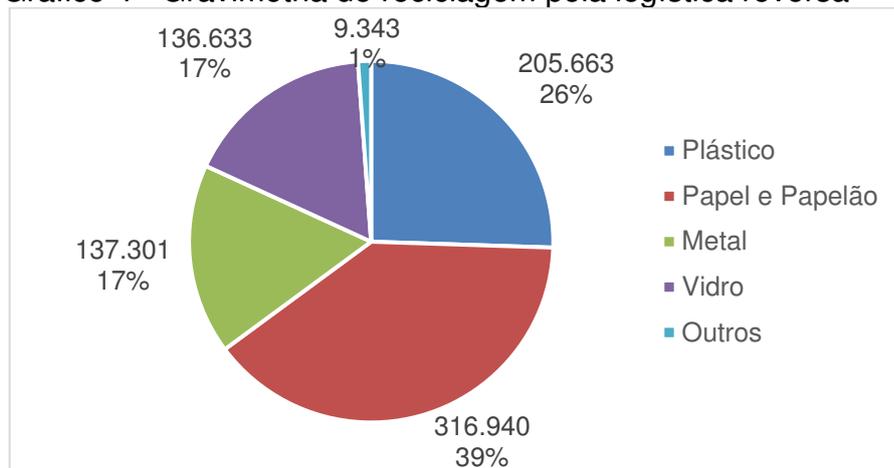
Nesse contexto, os principais meios de coletar materiais reciclados como o vidro se dá através das coletas seletivas ou nos pontos de entrega voluntária/local de entrega voluntária (PEV/LEV), que são locais estratégicos onde recebe-se da população apenas materiais recicláveis. Conseqüentemente, após o processo de coleta do vidro, o mesmo deve passar por uma limpeza visando a eliminação de materiais orgânicos, metálicos e inorgânicos, devido à presença destes materiais indesejados durante o processo de reciclagem poder causar impactos na qualidade e na perda de algumas propriedades particulares do vidro (Manual da Reciclagem, 2024).

Desse modo, sempre deve ser observado o tipo de vidro que está sendo reciclado, pois como já mencionado anteriormente que cada tipo possui uma composição, então é necessário a separação para que não haja mistura de algumas substâncias. No entanto, alguns tipos de vidro não podem ser reciclados como os espelhos, cristais, televisores e lâmpadas, já que estes são constituídos de materiais que os impossibilitam de passar pelo processo de reciclagem. Sendo assim, dentre os vidros recicláveis pode-se destacar as embalagens de bebidas, que são recicladas até 136,6 mil ton de acordo com a Central de Custódia de Logística Reversa de

Embalagens (2023), representando cerca de 17,0% de todas as embalagens recicladas (PRSB, 2023).

Desta forma, de acordo com os dados da ABIVIDRO (2023) a reciclagem do vidro é de em média 300 mil ton por ano, ou seja, a reciclagem de embalagens de vidro por meio do processo de logística reversa representa 46% do vidro reciclado no Brasil. Isto ocorre devido a Lei nº 12305/2010, que institui a PNRS, assim atribuindo a produtores de implementar um sistema de logística reversa para embalagens pós-consumo, cujo objetivo é promover ações para viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, assim reaproveitando os materiais em seu próprio ciclo ou em outros ciclos produtivos (PRSB, 2023; PNRS, 2010). No Gráfico 4, é possível observar a gravimetria dos principais materiais reciclados por este processo, bem como o reaproveitamento do vidro em relação aos demais materiais recicláveis.

Gráfico 4 - Gravimetria de reciclagem pela logística reversa



Fonte: PRSB (2023, p.45)

Todavia, a implementação da logística reversa pode apresentar diversos problemas de acordo com Saggin *et al.* (2021), que em seus estudos dividiram as perspectivas em relação aos grandes geradores de resíduos de vidro em comparação aos resíduos provenientes de consumo doméstico. Assim, observou-se que não há conscientização por parte da população sobre o descarte adequado, bem como a dificuldade relacionada ao seu manuseio e por ser um material cortante. Enquanto isso, os grandes geradores ainda possuem empecilhos quanto ao custo logístico e as dinâmicas de operação, em decorrência dos pontos que realizam o beneficiamento do

vidro coletado se localizarem longe de alguns municípios que fazem o uso deste programa.

### **3 METODOLOGIA**

O presente trabalho teve como foco principal a execução de uma pesquisa experimental para que fossem caracterizados os materiais de estudo, bem como feitos os ensaios de comportamento mecânico com a mistura asfáltica escolhida para análise. Além disso, para a sua realização foram realizadas as coletas dos materiais para estudo e levantamento bibliográfico para verificação de estudos voltados ao tema abordado.

Assim, com base nos materiais coletados, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados graúdo, miúdo e no ligante asfáltico, para verificar se os materiais a serem utilizados na mistura atendiam aos requisitos normativos. Além disso, o vidro coletado passou por um processo de quebra para a obtenção do pó de vidro, sendo destinado aos mesmos ensaios a qual foram submetidos os agregados miúdos.

Logo, após este procedimento foram confeccionados corpos de prova (CP's) para serem submetidos a ensaios laboratoriais. A priori, a proporção de substituição da areia pelo pó de vidro foi realizada de três formas, uma substituição completa, ou seja, o pó de vidro foi utilizado substituindo 100% da areia utilizada na mistura, uma proporção com o resíduo substituindo 50% do material e outra com uso de apenas 20% do pó de vidro na proporção do agregado.

Além do mais, em laboratório os CP's foram submetidos ao Ensaio de Estabilidade Marshall de acordo com a Norma DNER-ME 043/95 e o Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) segundo a Norma DNIT 136/2018 - ME. Sendo assim, para cada proporção de 20%, 50% e 100%, foram executados 6 CP's, onde serão destinados 3 para cada ensaio, sendo que também foram confeccionados 6 CP's que representam a mistura asfáltica com os agregados convencionalmente utilizados nos pavimentos asfálticos, sendo chamada de traço convencional, para posterior comparação dos resultados.

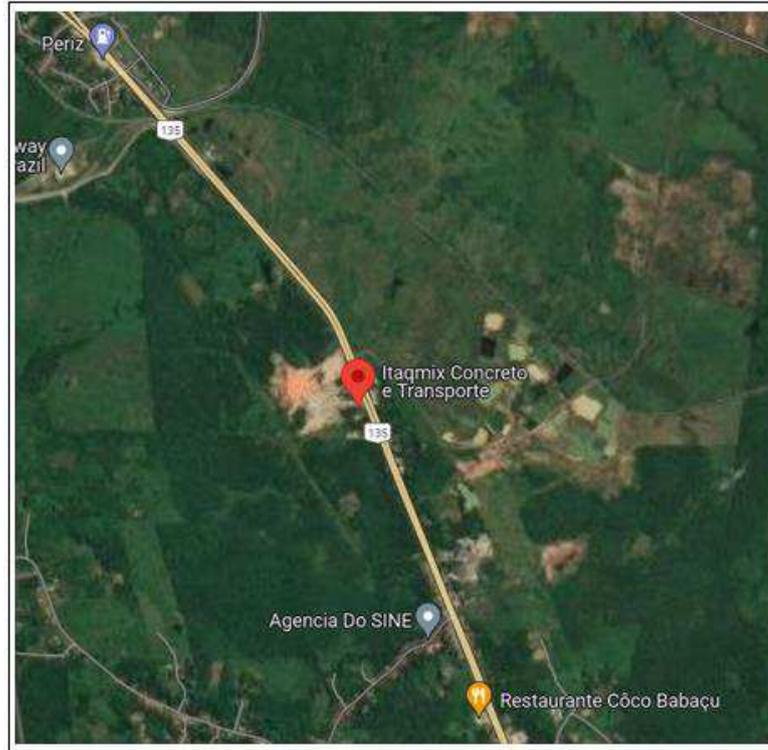
#### **3.1 Materiais**

##### **3.1.1 Mistura Asfáltica**

O material utilizado nesta pesquisa foi fornecido pela empresa ItaquiMix Concreto e Asfalto Ltda, localizada na BR-135, km 46, na cidade de Bacabeira no

Maranhão, como consta na Figura 11. Para a confecção dos corpos de prova foram utilizados os seguintes materiais: brita 1, brita 0, pó de pedra, areia e o ligante asfáltico (CAP 50/70). Na Figura 12, pode ser observado o espaço de acondicionamento dos materiais na empresa, bem como seu armazenamento no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LSP) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

Figura 11 - Localização da empresa fornecedora dos materiais



Fonte: Google Maps (2024)

Figura 12 – (a) – (c) Acondicionamento dos materiais



a) Acondicionamento da areia

b) Acondicionamento da brita 0

c) Recipiente com CAP 50/70

Fonte: Autor (2023)

### 3.1.2 Vidro

Priorizou-se inicialmente selecionar os vidros que mais são descartados de forma inadequada pela população, assim como aqueles gerados em grande quantidade e que não possuam um processo de logística reversa. Nesse contexto, optou-se pela escolha de garrafas de bebida do tipo long neck, que comercialmente não são retornáveis e o seu descarte fica a critério do próprio usuário ou do proprietário do estabelecimento. Mediante ao exposto, constata-se que na cidade de São Luís no Maranhão não possui coleta seletiva, sendo assim, as garrafas são geralmente colocadas junto aos restantes dos resíduos produzidos cujo destino é o aterro sanitário.

Desta forma, a coleta das garrafas de vidro foi realizada em um estabelecimento comercial, localizado na Unidade 205, rua 19, na Cidade Operária em São Luís, como pode ser vista na localização presente na Figura 13. Desta forma, a coleta das garrafas de vidro foi realizada em um estabelecimento comercial, desse modo, para a realização do estudo foram utilizadas 50 garrafas.

Figura 13 - Localização do fornecedor do vidro



Fonte: Google Maps (2024)

### 3.1.3 Preparo do Pó de Vidro

A partir do vidro, tem-se que o intuito do presente trabalho é usar o pó de vidro em misturas asfálticas, e para isso, as garrafas de vidro coletadas foram

trituras a fim de atingir dimensões de caco de vidro semelhante à dimensão dos grãos de areia a qual foi substituído. Assim, foram separadas 50 garrafas que foram lavadas com o intuito da retirada de impurezas para que não haja interferência em futuros resultados e em seguida colocadas para secagem.

Portanto, após este procedimento foi realizado a quebra das garrafas sendo utilizada a máquina “Los Angeles” (Figura 14), para inicialmente quebrar a garrafa e posteriormente com as rotações fracionar em partículas menores os cacos de vidro. Com esse propósito, foram realizadas etapas com base na Norma DNER-ME 035/98 de Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. A utilização da máquina “Los Angeles” também foi feita por Silva (2021) para a obtenção de pó de vidro para a estabilização de solos.

Figura 14 - Máquina “Los Angeles”



Fonte: Autor (2024)

Sabendo que cada garrafa possui peso variando de 195g a 205g, foram utilizadas 25 garrafas, totalizando 5 kg conforme mostra a Figura 15.a. Desta forma, de acordo com a Norma DNER-ME 035/98 foi estabelecida para uso nesta pesquisa a Graduação “A”, assim devendo ser colocada na máquina “Los Angeles”, 5 kg de vidro e 12 esferas que totalizam 4.659,45g, como pode ser visto na Figura 15.b. Ambos os materiais foram colocados na máquina e em seguida submetidos a 500 rotações para a quebra e fracionamento do vidro, ressaltando que este processo foi realizado duas vezes para totalizar 50 garrafas separadas.

Figura 15 – a) Separação das garrafas; b) Separação das esferas



Fonte: Autor (2024)

Após o vidro ser submetido a 500 rotações, ele foi retirado da máquina “Los Angeles”, no qual foi obtido o material das duas quebras, conforme exposto na Figura 16. Em decorrência desta pesquisa objetivar a substituição do agregado miúdo, foi realizado o peneiramento do material com intuito de trabalhar apenas com os finos resultantes do processamento, e para isso, foi utilizado a peneira de nº10 (2,00 mm), apresentada na Figura 17. Sendo assim, foi possível separar o vidro no material retido na peneira de nº10, presente na Figura 18.a, e no material passante na peneira (Figura 18.b), que foi utilizado no restante da pesquisa.

Figura 16 - Material resultante da quebra



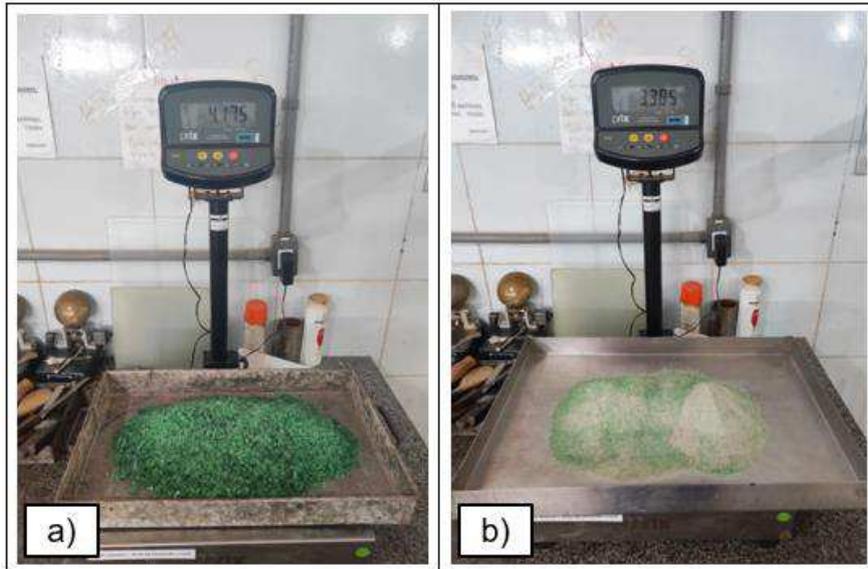
Fonte: Autor (2024)

Figura 17 - Peneira nº10 (2,00mm)



Fonte: Autor (2024)

Figura 18 – a) Material retido na peneira nº10; b) Material passante na peneira nº 10



Fonte: Autor (2024)

### 3.2 Ensaios de Caracterização

Os ensaios de caracterização foram executados para verificar se os materiais fornecidos atendem aos requisitos normativos, bem como identificar as diferenças entre a areia e o pó de vidro, com o intuito de elencar os diferentes comportamentos que estes materiais podem apresentar quando misturados nos corpos de prova. Além de apresentar a composição das misturas asfálticas em relação ao traço a ser utilizado com 0%, 20%, 50% e 100% de substituição da areia pelo pó de vidro.

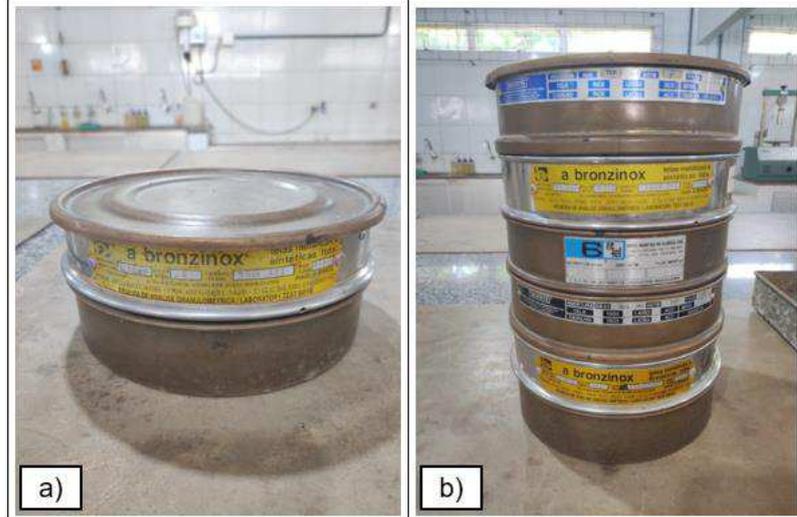
#### 3.2.1 Absorção e Massa Específica do Agregado Graúdo

Este ensaio tem como objetivo encontrar o grau de absorção e a massa específica de agregados como a brita 1 e a brita 0, através das diferentes condições da superfície do agregado, assim será seguida a Norma DNER-ME 195/97 de Agregados - determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo.

Sendo assim, foi utilizado a peneira de nº4 (4,75 mm), apresentada na Figura 19.a, para realizar o peneiramento dos dois tipos de brita utilizados na pesquisa, visando desprezar o material passante. Além disso, também foi determinada a dimensão máxima característica de cada agregado para que fosse definido a massa mínima, em kg, da amostra. Sendo assim, de acordo com a quantidade necessária da amostra, foi realizado o peneiramento com o jogo de

peneiras apresentado na Figura 19.b, contendo: 50mm - 38mm - 25mm - 19mm - 12,5mm.

Figura 19 – a) Peneira de 4,75 mm; b) Jogo de peneiras



Fonte: Autor (2024)

Diante disso, a seleção da quantidade de material necessário foi realizada de acordo com a dimensão máxima característica do agregado. Posteriormente, o material foi lavado na peneira de nº4 (4,8 mm) e levado à estufa com temperatura entre 105 °C e 110 °C. Na sequência, após a amostra se apresentar seca, foi retirada e colocada para resfriar a temperatura ambiente por um período de 2 horas. Após este período, a amostra foi imersa em água a temperatura ambiente por um período de (24±4) horas. O processo de lavagem pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Material lavado na peneira de nº4



Fonte: Autor (2024)

Depois do período estabelecido da amostra submersa em água, ela foi retirada e espalhada sobre um pano para que a fosse eliminada as películas visíveis de água (Figura 21.a), tendo o devido cuidado para que não houvesse evaporação da água nos poros durante o procedimento, e em seguida foi pesado a amostra, obtendo, assim, a massa na condição saturada superfície seca (B). Logo após, é preparado com cesta metálica, balde d'água e balança (Figura 21.b), o esquema necessário para obter-se a massa do agregado imerso em água ( C). Portanto, com o término do procedimento, a amostra foi levada novamente à estufa e em seguida retirada e resfriada por 2 horas para verificar a massa do agregado seco (A).

Figura 21 – a) Eliminação das películas visíveis de água; b) Pesagem hidrostática



Fonte: Autor 2024

A massa específica na condição seca do agregado será obtida pela Equação (1):

$$\gamma_s = \frac{A}{B - C} \quad (1)$$

Já a absorção do agregado em porcentagem é obtida pela Equação (2):

$$a = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (2)$$

### 3.2.2 Ensaio de Abrasão “Los Angeles”

Este ensaio visa determinar a perda de massa do agregado graúdo, avaliando assim a sua capacidade de resistir ao tráfego. Logo, consiste em submeter o agregado a rotações na máquina “Los Angeles”, conforme a Norma DNER-ME

035/98 de Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles” para a execução do ensaio.

Desta forma, inicialmente, verificou-se a granulometria do agregado para identificar a qual graduação a amostra melhor se encaixa. Sendo utilizado o seguinte jogo de peneiras: 75mm - 63mm - 50mm - 38mm - 25mm - 19mm - 12,5mm - 9,5mm - 6,3mm - 4,8mm - 2,4mm - 2,0mm - 1,7mm (Figura 22). Após o peneiramento, com a devida identificação da graduação, foi separada a amostra do material conforme a Norma DNER-ME 035/98. Sendo assim, dada a graduação selecionada, foram separadas as esferas para serem colocadas juntamente ao agregado na máquina “Los Angeles”.

Figura 22 - Jogo de peneira para obtenção da graduação



Fonte: Autor (2024)

Em seguida, o total de 5.000g de agregado foi colocado na máquina “Los Angeles” junto a quantidade de esferas determinadas (Figura 23.a), e assim o material foi submetido a 500 rotações com a velocidade do tambor variando de 33 a 35 rotações por minutos. Conseqüentemente, após o término do procedimento, o agregado deve ser retirado da máquina e lavado na peneira de 1,7 mm (Figura 23.b), onde será desprezado o material passante e o retido levado até a estufa com temperatura de 105 °C a 110 °C para ser seco. E assim, quando retirado da estufa deve ser verificado a massa do agregado restante do processo.

Figura 23 – a) Separação dos materiais; b) Lavagem do material na peneira nº 12



Fonte: Autor (2024)

Logo, a abrasão “Los Angeles” do agregado é obtida pela Equação (3):

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$A_n$  – Abrasão “Los Angeles” da graduação  $n$  (%);

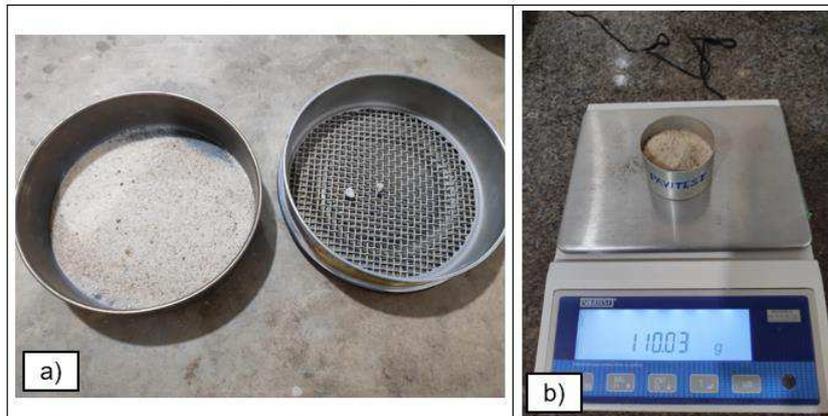
$m_n$  – Massa total da amostra seca colocada na máquina (kg);

$m'_n$  – Massa total da amostra lavada e seca, após ensaio (kg).

### 3.2.3 Equivalente de Areia

De acordo com a Norma DNER-ME 054/97 de Equivalente de Areia define este ensaio como a relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível da areia e da altura de argila obtida no ensaio. A sua realização consiste em utilizar o agregado miúdo passante na peneira de nº 4 (4,8 mm) (Figura 24.a) e separar 110g do material, presente na Figura 24.b.

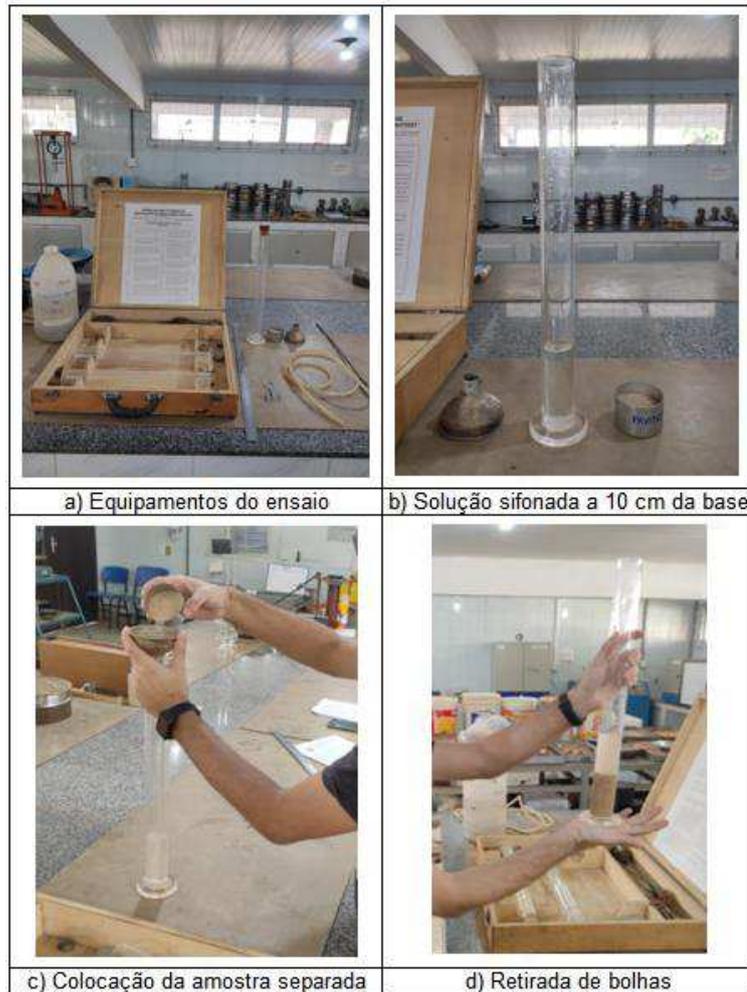
Figura 24 – a) Material passante na peneira nº4; b) Separação da amostra



Fonte: Autor (2024)

Logo depois, com o conjunto apresentado na Figura 25.a, deve-se com auxílio do sifão colocar a solução de equivalente de areia até a marca de 10 cm da base da proveta (Figura 25.b). Assim, a amostra do agregado foi despejada na proveta com uso do funil, conforme apresentado na Figura 25.c. Devendo após esta etapa bater no fundo da proveta para que haja deslocamento das bolhas e a amostra seja molhada, este procedimento pode ser observado na Figura 25.d.

Figura 25 – (a) – (d) Procedimentos para o ensaio de Equivalente de Areia

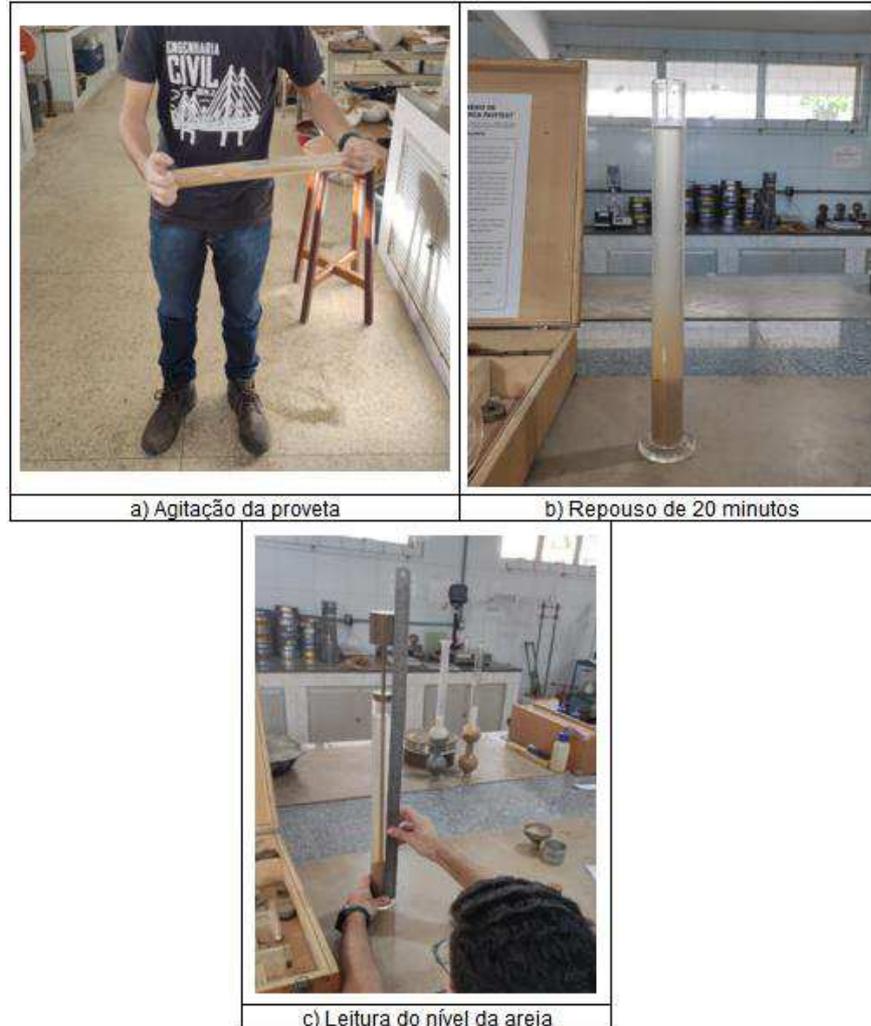


Fonte: Autor (2024)

A proveta foi deixada em repouso por 10 minutos e em seguida tampada com a rolha para que fosse realizada a sua agitação, no qual foram executados 90 ciclos em 30 segundos (Figura 26.a), onde ao fim do processo a proveta foi sifonada com a solução até a marca a 38 cm da base (Figura 26.b) e deixado novamente em repouso por um período de 20 minutos. Ao fim do tempo definido, foi aferida a altura do nível da suspensão argilosa com o auxílio da régua, já para a determinação do nível da areia foi inserido o pistão até que ele assentasse completamente na areia

(Figura 26.c), onde a leitura foi realizada com base ponto em que o pistão ficou assentado.

Figura 26 – (a) – (c) Sequência do ensaio de Equivalente de Areia



Fonte: Autor (2024)

Dessa forma, o equivalente de areia é determinado pela Equação (4):

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \times 100 \quad (4)$$

### 3.2.4 Ensaio de Massa Específica por meio do frasco Chapman

Este ensaio tem por objetivo determinar a massa específica dos agregados miúdos, sendo realizado conforme a Norma DNER-ME 194/98 de Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. A sua execução foi iniciada através do peneiramento do material previamente seco em estufa, tendo sido selecionado 500g da porção passante na

peneira de nº 4 (4,8 mm) e retido na peneira de nº 200 (0,075 mm), com disposição conforme a Figura 27.

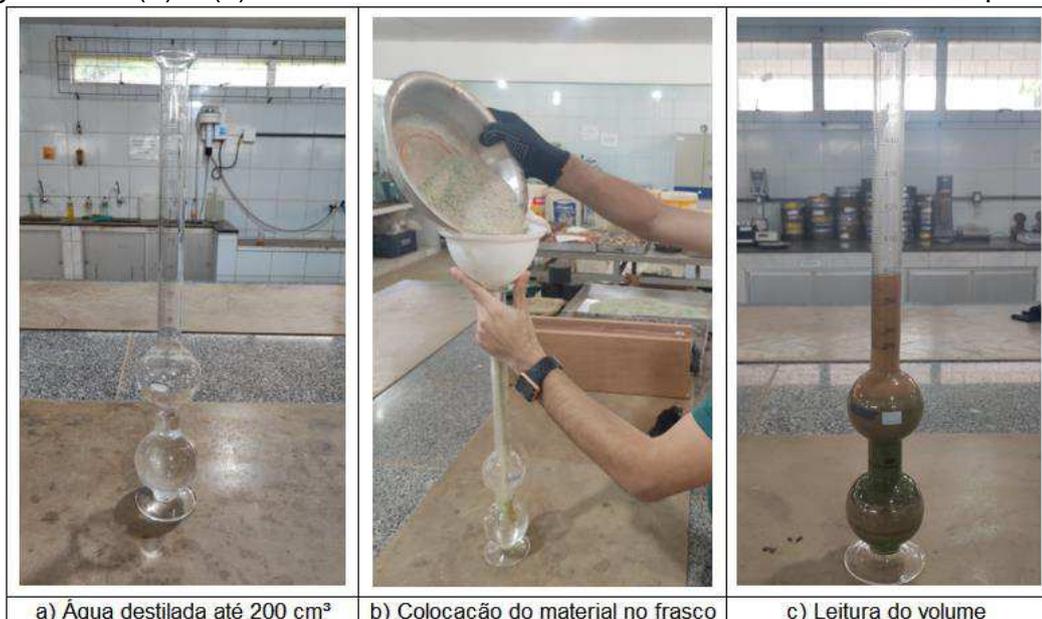
Figura 27 - Peneiras selecionadas para separação da amostra



Fonte: Autor (2024)

Com o material já separado, foi colocada água destilada no frasco Chapman até a marca de 200 cm<sup>3</sup> (Figura 28.a), e deixado em repouso para que a água presente nas paredes do frasco pudesse escorrer até a base. Em seguida, foram colocadas as 500g do agregado no frasco com auxílio do funil (Figura 28.b) e posteriormente agitado para a eliminação de bolhas. Desta forma, é possível realizar a leitura do nível atingido (L), tal qual representado na Figura 28.c, indicando o volume atingido pelo conjunto agregado mais água destilada em cm<sup>3</sup>.

Figura 28 – (a) – (c) Procedimentos executados no ensaio de massa específica



a) Água destilada até 200 cm<sup>3</sup>

b) Colocação do material no frasco

c) Leitura do volume

Fonte: Autor (2024)

Sendo assim, o cálculo da massa específica é dado pela Equação (5):

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (5)$$

### 3.2.5 Análise Granulométrica

A análise granulométrica tem por objetivo definir a granulometria dos agregados através do peneiramento das amostras, seguindo a Norma DNER-ME 083/98 de Agregados - Análise granulométrica. Para a sua execução foram utilizados dois jogos de peneiras, o primeiro para os agregados graúdos contendo as seguintes peneiras: 50mm - 38mm - 25mm - 19mm - 12,5mm - 9,5mm - 4,8mm - 2,0 mm (Figura 29.a); já para os agregados miúdos será utilizado as peneiras: 0,42mm - 0,18mm - 0,075mm (Figura 29.b).

Figura 29 – a) Peneiras para o agregado graúdo. b) Peneiras para o agregado miúdo



Fonte: Autor (2024)

Para os agregados graúdos utilizados nesta pesquisa, foram peneirados de forma manual (Figura 30.a) no jogo de peneiramento grosso. Neste caso, para os materiais que ficaram no fundo, ou seja, os passantes na peneira de 2,0 mm, este material foi peneirado novamente só que no jogo de peneira para os finos, presente na Figura 29.b.

Já para os agregados miúdos, foi realizado um peneiramento prévio na peneira de 2,0 mm para separar os grossos dos finos, assim, o material retido nesta peneira foi peneirado no jogo de peneiramento grosso e os passantes foram

peneirados no jogo de peneiramento fino, ressaltando que o peneiramento foi realizado de forma manual (Figura 30.b).

Para o vidro, foi utilizado apenas o jogo de peneiramento fino, uma vez que o material definido como pó de vidro anteriormente já havia sido todo o material passante na peneira de 2,0 mm. Desta forma, foi realizado o peneiramento fino da amostra de forma manual.

Figura 30 – a) Peneiramento do agregado graúdo; b) Peneiramento do agregado miúdo



Fonte: Autor (2024)

A curva granulométrica é obtida através da relação entre a massa da amostra passante em cada peneira e a massa total da amostra, dada em porcentagem. Este procedimento é essencial para observar se a granulometria do pó de vidro se assemelha com o da areia, além de verificar se a substituição proposta do agregado graúdo atenderá a faixa de trabalho previsto para esta pesquisa.

### 3.2.6 Análise Microscópica

A análise microscópica objetivou identificar o tamanho dos grãos existentes no pó de vidro utilizado na pesquisa, além de observar a diferença entre a presença de vidro e areia dentro da composição para a comparação com a areia utilizada no traço base, e para isso foi utilizado o microscópio Zeiss Primotech (Figura 31). Desta forma, com o intuito de comparar o pó de vidro com a areia em diversos tamanhos foi utilizado um jogo de peneiras distinto do apresentado na análise granulométrica, onde fez-se o uso das seguintes peneiras: 1,2 mm - 0,60mm - 0,42mm - 0,30mm - 0,15mm - 0,075mm.

Figura 31 - Microscópio Zeiss Primotech



Fonte: Autor (2024)

Sendo assim, as amostras separadas para análise no microscópio foram as que ficaram retidas em cada peneira durante o novo peneiramento realizado exclusivo para esta análise. Desta forma, cada material retido na peneira foi colocado em uma cápsula, assim sendo nomeados em R-16, R-30, R-40, R-50, R-100 e R-200, onde na Figura 32 pode-se observar o aspecto visual de cada amostra retida.

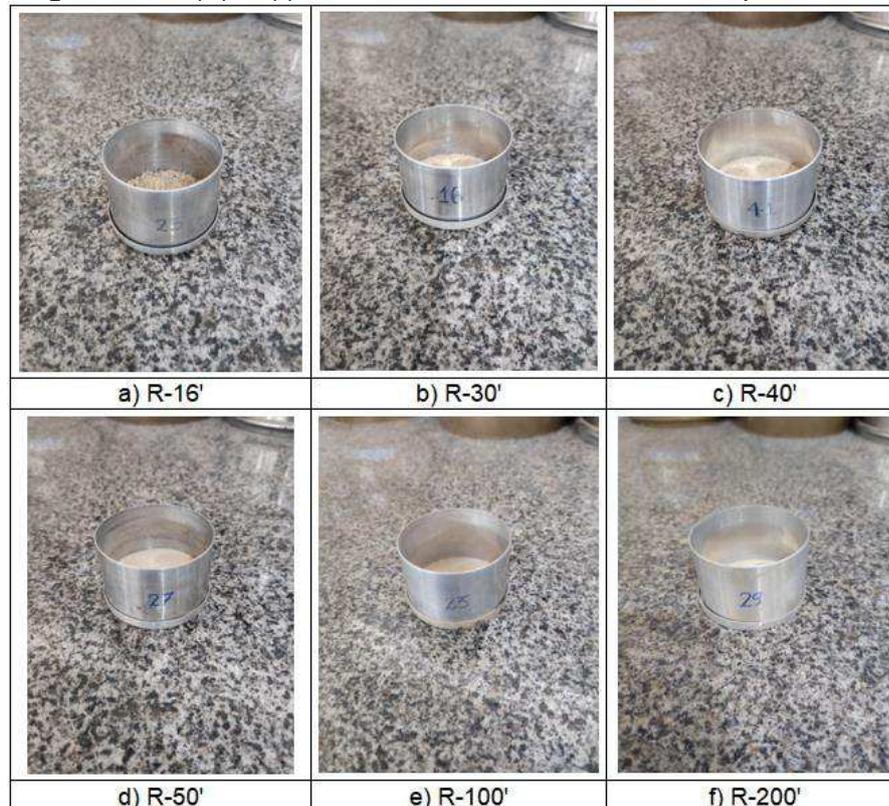
Figura 32 – (a) – (f) Amostras de vidro retidas nas peneiras



Fonte: Autor (2024)

Da mesma forma foi realizada a separação da amostra de areia, sendo também colocadas em cápsulas e nomeadas como R-16', R-30', R-40', R-50', R-100' e R-200', como pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 – (a) – (f) Amostras de areia retidas nas peneiras



Fonte: Autor (2024)

### 3.2.7 Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração tem o intuito de identificar o quanto a agulha utilizada no ensaio penetra verticalmente na amostra do ligante, onde este processo é essencial para determinar a classificação do CAP e definir a viscosidade e consistência do ligante, uma vez que quanto maior a viscosidade, maior será a consistência e por consequência, culmina para uma baixa penetração da agulha no ligante (Madureira, 2023b).

Esse ensaio é normatizado pelo DNIT 155/2010 - ME de Material asfáltico - Determinação da penetração - Método de ensaio, que apresenta como aparelhagem necessária para o ensaio os itens presentes na Figura 34. Assim, tem-se o penetrômetro, com o mostrador onde serão executadas as leituras de penetração e a

junção haste mais agulha que totaliza a massa de 50g e o peso de 50g para que todo o conjunto tenha 100g.

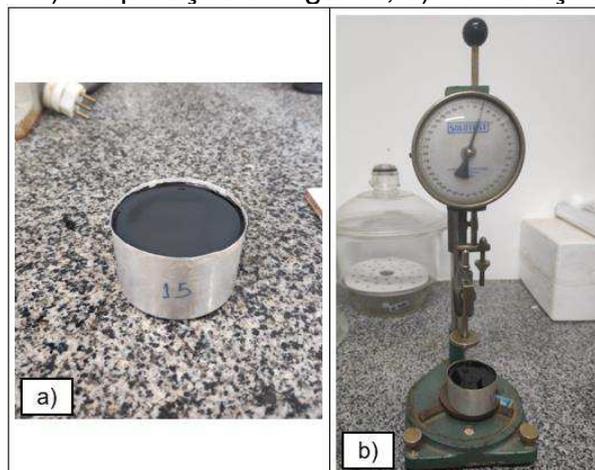
Figura 34 - Penetrômetro



Fonte: Autor (2024)

Para a execução do ensaio, foi inicialmente aquecido o ligante asfáltico para que se tornasse fluido e melhorasse sua trabalhabilidade para que ele fosse transferido ao recipiente de penetração (Figura 35.a), que posteriormente foi tampada e aguardado o seu resfriamento. Em seguida, após a amostra já resfriada, deu-se início ao ensaio, onde foi considerado o ambiente com temperatura de 25 °C, o peso total do conjunto de 100g e o tempo de penetração de 5 segundos. Sendo assim, a amostra de CAP foi submetida a três determinações de penetração (Figura 35.b), no qual cada furo realizado estava distante de outro furo e da borda em uma distância maior que 10 mm. Logo, o valor da penetração será obtido através da média das três determinações realizadas.

Figura 35 – a) Preparação do ligante; b) Penetração da agulha



Fonte: Autor (2024)

### 3.2.8 Ensaio de Ponto de Amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento é realizado para determinar a temperatura necessária para que a esfera utilizada no ensaio atravesse o anel preenchido com ligante asfáltico até atingir a placa inferior da estrutura (Madureira, 2023b). Logo, para a realização deste ensaio foi utilizado a Norma DNIT 131/2010 de Materiais Asfálticos - Determinação de ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola.

Portanto, primeiramente foi realizado o aquecimento do ligante asfáltico a uma temperatura de 135 °C para que se tornasse fluido, possibilitando assim encher os anéis (Figura 36), ressaltando que não houve transbordamento durante o processo. Desta forma, após o preenchimento dos anéis com o ligante, o material permaneceu sem que houvesse manuseio por um período de 30 minutos para que pudesse esfriar.

Figura 36 - Preenchimento dos anéis



Fonte: Autor (2024)

Em seguida, completa-se o béquer com água destilada até a marca de 600 mL de forma que quando for colocado a estrutura, os anéis com ligante fiquem submersos na água. Dito isso, coloca-se a estrutura dentro do béquer com os anéis sendo colocados sob o suporte e posteriormente as guias de centralização e as esferas. Com o aparelho já montado, submeteu-se o mesmo ao aquecimento (Figura 37) com a adição do termômetro para a aferição da temperatura. Assim, observou-se o aquecimento do recipiente até que a primeira esfera toque a placa, sendo assim, anotada a temperatura deste momento, e em sequência anotada a temperatura em que a segunda esfera toca a placa, onde o ponto de amolecimento será dado pela média das temperaturas.

Figura 37 - Aquecimento do béquer



Fonte: Autor (2024)

### 3.3 Ensaios Mecânicos

Os ensaios executados nesta pesquisa têm por objetivo avaliar o comportamento mecânico dos diferentes traços utilizados para as misturas asfálticas. Sendo assim, foram identificados os fatores aplicáveis quanto a dosagem Marshall e aos principais ensaios de comportamento mecânico visando atender aos requisitos mínimos dispostos na Norma DNIT 031/2006 de Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.

#### 3.3.1. Dosagem Marshall

A dosagem Marshall é necessária para a escolha adequada do teor de ligante a ser utilizado na mistura asfáltica. Sendo essencial pois, o excesso de ligante na mistura pode ocasionar deformações permanente ao decorrer do tráfego de veículos e a ausência de uma quantidade adequada de ligante favorece a aparição de fissuras no pavimento, além do desgaste superficial, ou seja, encurtando a sua vida útil (Soares e Cavalcante, 2000).

Contudo, a presente pesquisa contou com dados já fornecidos para o traço da mistura asfáltica da empresa ItaquiMix Concreto e Asfalto Ltda, que consiste em uma mistura do tipo concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), no qual foram utilizados 5 teores diferentes de CAP 50/70 para a confecção de corpos de prova. Na

Tabela 3, constam as respectivas porcentagens de CAP utilizado em cada mistura, bem como a massa de agregados constituinte de cada CP.

Tabela 3 - Teores de CAP para a mistura asfáltica

Massa do CP (g): 1200,00					
Teor de Ligante (%)	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50
Massa do Ligante (g)	42,00	48,00	54,00	60,00	66,00
Massa do Agregado (g)	1158,00	1152,00	1146,00	1140,00	1134,00

Fonte: ItaquiMix Concreto e Asfalto Ltda (2023)

Desta forma, definiu-se como traço para o concreto asfáltico usinado a quente as porcentagens apresentadas na Tabela 4, onde este traço definido já pela empresa será nomeado nesta pesquisa como traço base (TB). Já as temperaturas de aquecimento dos materiais e da compactação de misturas foram também definidas sendo apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 - Traço base da mistura asfáltica

Material	% do Agregado	
	Mistura	Peso (g)
Brita 1	15,00	14,30
Brita 0	40,00	38,12
Pó de Pedra	35,00	33,36
Areia	10,00	9,53
Fíller	0,00	0,00
CAP	-	4,70

Fonte: ItaquiMix Concreto e Asfalto Ltda (2023)

Tabela 5 - Temperaturas de aquecimento dos materiais

Material	Temperatura (°C)
Ligante	150
Agregados	160
Compactação	140

Fonte: ItaquiMix Concreto e Asfalto Ltda (2023)

No entanto, o objetivo deste trabalho está centrado em realizar modificações no TB para a confecção de CP's com diferentes substituições do agregado miúdo (areia) pelo pó de vidro produzido conforme o item 3.1.3. Para isso, ressalta-se que foram feitas substituições em 20%, 50% e 100% em relação a porcentagem da areia utilizada no traço base, assim obtendo os traços T-20%, T-50% e T-100%, apresentados na Tabela 6 juntamente com a massa dos agregados e do ligante.

Tabela 6 - Quantitativos de material para cada traço

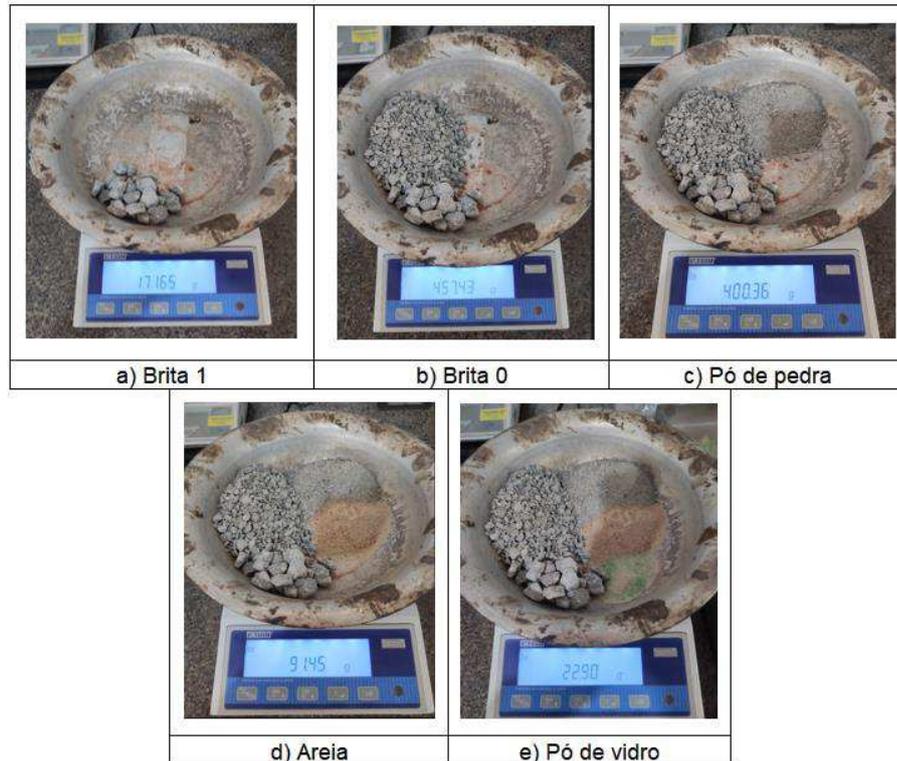
Traço	Mistura	Material					
		Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra	Areia	Pó de Vidro	CAP
TB	% na Mistura	4,3	38,12	33,36	9,53	0	4,7
	Peso (g)	171,6	457,44	400,32	114,36	0	56,4
T-20%	% na Mistura	14,3	38,12	33,36	7,624	1,906	4,7
	Peso (g)	171,6	457,44	400,32	1,906	22,87	56,4
T-50%	% na Mistura	14,3	138,12	33,36	4,765	4,765	4,7
	Peso (g)	171,6	457,44	400,32	57,18	57,18	56,4
T-100%	% na Mistura	14,3	38,12	33,36	0	9,53	4,7
	Peso (g)	171,6	457,44	400,32	0	114,36	56,4

Fonte: Autor (2024)

Com os traços de cada CP definido, foram necessários para esta etapa, que busca encontrar a Estabilidade Marshall e os parâmetros físicos, a execução de 3 Cp's para cada traço. Ressaltando que também foram executados corpos de prova com o traço base para comparação de futuros resultados, onde para este processo foi utilizado a Norma DNIT 447/2024-ME de Misturas asfálticas - Ensaio de estabilidade e fluência Marshall - Método de ensaio.

Além disso, para a confecção dos CP's foi utilizada a Norma DNIT 178/2018-PRO de Pavimentação Asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall. Sendo assim, com os agregados previamente secos em estufa com temperatura de 105°C a 110°C, foi realizada a separação dos materiais para cada traço de acordo com a massa de agregados presente na Tabela 6. Na Figura 38, observa-se a separação dos agregados para o T-20%.

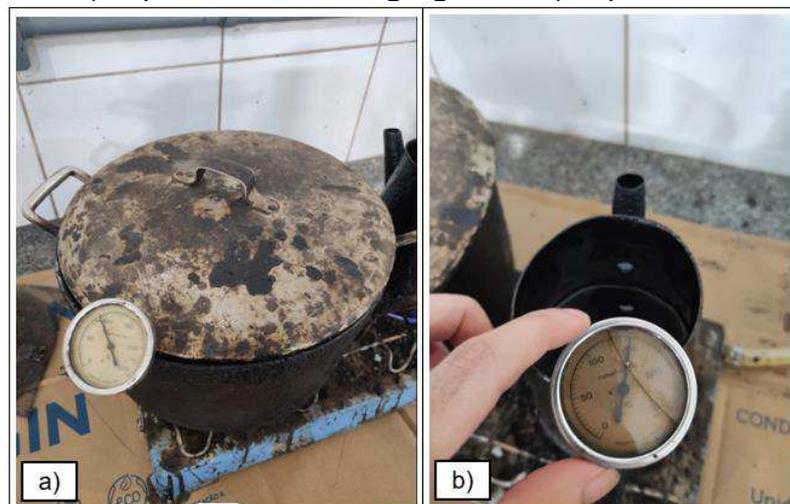
Figura 38 – (a) – (e) Separação dos agregados



Fonte: Autor (2024)

Em seguida, as porções de agregados separadas de cada CP foram levadas à estufa para serem pré-aquecidas, antes de serem submetidas ao aquecimento até 160°C. Logo, após o período de 24 horas, o material foi retirado da estufa e aquecido até 160°C (Figura 39.a), da mesma forma o ligante foi aquecido até 150°C (Figura 39.b), destacando que a diferença entre as temperaturas deve ser de aproximadamente 10°C a 15°C.

Figura 39 – a) Aquecimento dos agregados; b) Aquecimento do ligante



Fonte: Autor (2024)

Desta forma, após ambos os materiais atingirem a temperatura pré-definida, foi realizada uma cratera no recipiente contendo os agregados para o recebimento do ligante, sendo colocado a massa necessária de CAP 50/70 para a mistura (Figura 40). Após este processo, foi realizado rapidamente a mistura do agregado com o ligante por um período de 60 segundos até que houvesse total cobertura dos agregados, e assim, novamente aferida a temperatura (Figura 41) para que a mistura fosse levada a molde de compactação.

Figura 40 - Pesagem do CAP 50/70      Figura 41 - Temperatura de Compactação



Fonte: Autor (2024)



Fonte: Autor (2024)

Para a compactação do CP, foi utilizado o compactador Marshall mecânico, presente na Figura 42, no qual foi colocada a mistura asfáltica no molde e executado 15 golpes com auxílio da espátula no perímetro do molde e em seu centro para assentar a mistura no molde (Figura 43). Dado este procedimento, o equipamento foi colocado em funcionamento para a aplicação de 75 golpes em cada face do corpo de prova.

Figura 42 - Compactador Marshall



Fonte: Autor (2024)

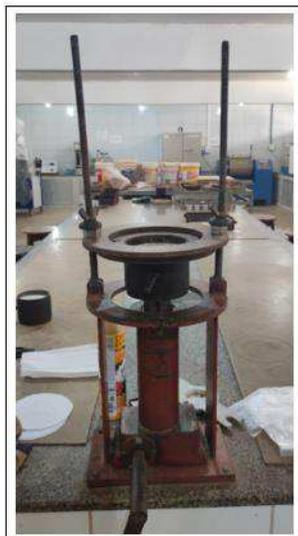
Figura 43 - Golpes para acomodação



Fonte: Autor (2024)

Após a compactação, o CP foi colocado sobre uma superfície lisa e plana por algumas horas antes da extração da amostra no molde (Figura 44). Sendo assim, após a extração dos CP foram verificadas as medidas da espessura e da altura com o auxílio do paquímetro (Figura 45), ressaltando que foram executadas quatro medições em posições equidistantes, onde o valor adotado da espessura e altura é referente a média aritmética das quatro medições.

Figura 44 - Extrator de amostra



Fonte: Autor (2024)

Figura 45 - Medição dos CP's



Fonte: Autor (2024)

Dado os ensaios previstos para a análise de comportamento mecânico, tem-se a necessidade da confecção de 3 CP's para cada um dos ensaios, ressaltando que foram executados a quantidade prevista para cada um dos traços definidos para

esta pesquisa. Sendo assim, os corpos de prova foram nomeados para a sua identificação ao longo dos experimentos.

Desta forma, foram confeccionados ao total 24 corpos de prova, dos quais: para o TB foram feitos os corpos de prova de CP-1 a CP-6; para o T-20% foram realizados do CP-7 a CP-12; para o T-50% foram executados do CP-13 a CP-18; e para o T-100% foram feitos os corpos de prova de CP-19 a CP-24. Assim, na Figura 46, pode-se observar a disposição da divisão dos CP's em relação aos traços.

Figura 46 – (a) – (d) Separação dos corpos de prova por traço



Fonte: Autor (2024)

Dessa forma, são obtidos dados referentes a densidade e massa específica de cada corpo de prova utilizando a ABNT NBR 15573:2012 de Mistura asfáltica - Determinação de densidade aparente e da massa específica de corpos de prova compactados. Portanto, os CP' já extraídos do molde foram colocados expostos por um período de no mínimo 2 horas a uma temperatura de 26°C, e assim pesados para a determinação da massa do corpo de prova seco (A) (Figura 47).

Figura 47 - Determinação da massa do CP seco



Fonte: Autor (2024)

Na sequência, o corpo de prova foi submerso em banho d'água com temperatura de 26°C, com o auxílio da cesta metálica conectada a balança através do fio para que o CP fique em suspensão, possibilitando assim a obtenção por pesagem hidrostática, da massa do CP na água (B). O período do corpo de prova submerso foi de 3 minutos para a obtenção da massa, onde na Figura 48 pode-se observar o conjunto utilizado para esta etapa do ensaio.

Figura 48 - Pesagem hidrostática do CP



Fonte: Autor (2024)

Em seguida, o corpo de prova foi retirado do banho d'água e secado rapidamente com pano levemente umedecido (Figura 49), e posteriormente pesado para a obtenção da sua massa saturada superfície seca (C).

Figura 49 - CP seco em pano umedecido



Fonte: Autor (2024)

Assim, a partir dos parâmetros obtidos deve-se encontrar a porcentagem de água absorvida pelo CP para efetuar o restante dos cálculos. Logo, utiliza-se a Equação (6):

$$\% \text{ água absorvida} = 100x \frac{C - A}{C - B} \quad (6)$$

Dessa maneira, para a taxa de absorção anterior, tem-se que a densidade aparente ( $G_{mb}$ ) e a massa específica aparente ( $M_{ea}$ ) podem ser obtidas respectivamente pelas Equações (7) e (8).

$$G_{mb} = \frac{A}{C - B} \quad (7)$$

$$M_{ea} = 0,9971xG_{mb} \quad (8)$$

Portanto, para obter parâmetros necessários em relação ao volume de vazios ( $V_v$ ), vazios com betume ( $VCB$ ), vazios do agregado mineral ( $VAM$ ) e relação betume/vazios ( $RBV$ ), deve ser calculada a densidade máxima teórica ( $DMT$ ) dada pela Equação (9), onde para o caso dos CP's do traço base a porcentagem de vidro será 0, assim como no T-100% a porcentagem de areia será 0.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%cap}{G_{cap}} + \frac{\%brita1}{G_{b1}} + \frac{\%brita0}{G_{b0}} + \frac{\%ppedra}{G_{pp}} + \frac{\%areia}{G_{are}} + \frac{\%pvidro}{G_{pdv}}} \quad (9)$$

Onde:

$\%cap$ ,  $\%brita1$ ,  $\%brita 0$ ,  $\%ppedra$ ,  $\%areia$  e  $\%pvidro$  – porcentagem de cada material utilizado na mistura (%);

$G_{cap}$ ,  $G_{b1}$ ,  $G_{b0}$ ,  $G_{pp}$ ,  $G_{are}$ ,  $G_{pdv}$  – massa específica calculada de cada material ( $g/cm^3$ );

Assim, calculando o volume de vazios pela Equação (10):

$$V_v = \frac{DMT - M_{ea}}{DMT} \times 100 \quad (10)$$

O valor dos vazios com betume é obtido pela Equação (11):

$$VCB = \frac{M_{ea} \times \%cap}{G_{cap}} \quad (11)$$

E os vazios do agregado mineral é dado pela Equação (12):

$$VAM = V_v + VCB \quad (12)$$

Sendo assim, a relação betume/vazios é obtida pela Equação (13):

$$RBV = \frac{VAM - V_v}{VAM} \times 100 \quad (13)$$

Sendo assim, com estes cálculos realizados é dado prosseguimento ao ensaio para que seja determinada a estabilidade Marshall dos CP's. Para isso, os corpos de prova foram levados ao banho-maria ficando submersos na água do equipamento (Figura 50), onde ficaram por um período de 30 a 40 minutos.

Figura 50 - Corpos de prova em banho-maria

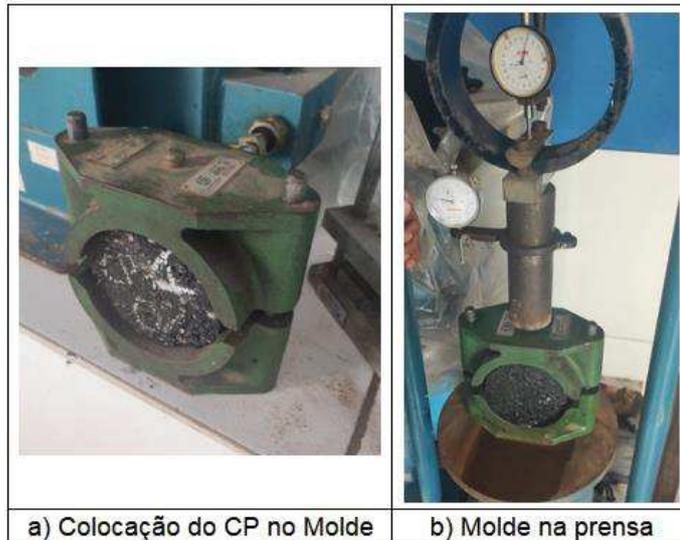


Fonte: Autor (2024)

Logo após o período definido, o CP foi retirado do banho-maria e rapidamente o excesso de água é retirado, e o corpo de prova foi colocado no molde para rompimento, conforme a Figura 51.a. Assim, o molde foi posicionado de forma adequada na prensa manual (Figura 51.b), da empresa Edeconsil, sendo submetido

a uma taxa de deslocamento de 50 mm/min, onde o ensaio foi interrompido quando identificado o decréscimo do relógio comparador, e assim, registrada a carga máxima suportada de cada CP, destacando que a prensa utilizada possui coeficiente de ajuste do valor obtido de 2,1532.

Figura 51 - Colocação do CP no molde e na prensa



Fonte: Autor (2024)

No entanto, a estabilidade obtida no ensaio ainda deve ser corrigida em função da espessura do corpo de prova, com dados provenientes da Tabela A1 da Norma DNIT 447/2024-ME, onde a estabilidade corrigida é dada pela Equação (14).

$$E' = fxE \quad (14)$$

Onde:

$E'$  – Estabilidade corrigida (kgf);

$E$  – Estabilidade obtida no ensaio (kgf);

$f$  – fator de correção, obtido através da Tabela A1;

### 3.3.2. Ensaio de Resistência à Tração

Para este ensaio, foi seguida a Norma DNIT 136/2018-ME de Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio. Assim, foram confeccionados 3 CP's para cada um dos traços definidos, sendo executados conforme a Norma DNIT 178/2018-PRO, onde após a extração dos CP's foram medidas suas respectivas

alturas e diâmetros em quatro posições equidistantes, sendo adotado o valor da média das quatro leituras.

Em seguida, o corpo de prova em um ambiente com temperatura de 25°C foi colocado no molde para o ensaio de resistência à tração (RT), sendo posicionado com sua superfície cilíndrica entre os dois frisos metálicos, conforme a Figura 52.a. Na sequência, foi posicionado na prensa manual (Figura 52.b), da empresa Edeconsil, e aplicado uma velocidade de deformação de 0,8 mm/s, sendo interrompido o ensaio quando identificou-se decréscimo no relógio comparador, e assim, foi registrado o valor da carga de ruptura obtido pelo CP.

Figura 52 - Colocação do CP no molde e na prensa



Fonte: Autor (2024)

Desta forma, com o valor da carga de ruptura obtida, pode ser calculado a resistência à tração indireta do CP rompido através da compressão diametral pela Equação (15).

$$\sigma_R = \frac{2.F}{\pi.D.H} \quad (15)$$

Onde:

$\sigma_R$  – Resistência a tração (MPa);

F – Carga de ruptura (N);

D – Diâmetro médio do CP (mm);

H – Altura média do CP (mm);

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Ensaio de Absorção e Massa Específica

O presente ensaio foi realizado com as britas 1 e 0, sendo utilizados para cada material respectivamente 3 kg e 2 kg, de acordo com o diâmetro nominal máximo definidos através do peneiramento das amostras. Assim, com estes materiais obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Absorção e massa específica gos agregados graúdos

Material	Condição	Massa (g)	Absorção (%)	Massa Específica ( $\gamma_s$ ) (g/cm <sup>3</sup> )
Brita 1	Saturada Superfície Seca	2994,5	0,15	2,731
	Saturada em Água	1899,85		
	Seca	2989,95		
Brita 0	Saturada Superfície Seca	1995,19	1,17	2,675
	Saturada em Água	1257,96		
	Seca	1972,1		

Fonte: Autor (2024)

Desta forma, de acordo com definido por Latham *et al.* (2006 apud Bernucci *et al.*, 2008), tem-se que o grau de absorção para os agregados graúdos atendem aos requisitos para uma boa qualidade, onde a brita 1 conforme o resultado obtido pode ser descrita como uma excelente qualidade, e a brita 0 como boa qualidade.

### 4.2 Ensaio de Abrasão “Los Angeles”

O ensaio foi realizado com brita 1, no qual através do peneiramento da amostra, constatou-se que a graduação que mais se adequaria a amostra selecionada era a “B”. Desta forma, foram separados 5,0 kg do material, sendo 2,5 kg para cada fração de peneiras descrita na Norma DNER-ME 035/98, além disso, foram separadas 11 esferas que totalizaram 4.584 g. Portanto, com a execução do ensaio foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Abrasão “Los Angeles”

Material	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Abrasão "Los Angeles" (%)
Brita 1	5000,41	4380,87	12,39

Fonte: Autor (2024)

Sendo assim, observa-se que houve uma perda de massa entre início e fim do ensaio de 619,54g, o que representa um resultado de desgaste “Los Angeles” de 12,39%. Nesse sentido, constata-se que a brita 1 utilizada na pesquisa satisfaz o mínimo necessário para o desgaste “Los Angeles” previsto pela Norma DNIT 031/2006 - ES de Pavimentos Flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço, já que obteve um resultado inferior a 50%. Assim, representa que a brita utilizada na mistura asfáltica deste trabalho possui resistência ao tráfego adequada para pavimentos flexíveis.

### 4.3 Ensaio de Equivalente de Areia

Para este ensaio, foi aplicado apenas o uso da areia como material, onde foram executados três ensaios com o objetivo de verificar se haveria variação nos resultados obtidos. Dessa maneira, para a obtenção do resultado foi realizada a média aritmética dos três ensaios realizados, como consta na Tabela 9.

Tabela 9 - Equivalente de areia

Material	Topo da areia (mm)	Topo da argila (mm)	Equivalente de Areia	Média
Areia	83,00	85,00	0,98	0,97
	84,00	87,00	0,97	
	82,00	85,00	0,96	

Fonte: Autor (2024)

Em resumo, observa-se um alto índice de equivalente de areia que atende ao requisito mínimo presente na Norma DNIT 031/2006 - ES, que descreve que o equivalente de areia deve possuir valor igual ou superior a 55%. Por consequência, o resultado obtido reflete que a areia utilizada na pesquisa está em sua maior parte isenta da presença de torrões de argila, substâncias nocivas e materiais diversos. Apesar de apresentar valor final extremamente elevado para uma areia considerada natural, entende-se que pelos restantes dos ensaios de caracterização realizados com

o material, tal qual análise granulométrica observa-se que o resultado está dentro do esperado.

#### 4.4 Ensaio de Massa Específica por meio do frasco Chapman

Os ensaios de massa específica realizados no frasco Chapman englobam os seguintes materiais: pó de pedra, areia e pó de vidro. Diante a execução do ensaio, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Massa específica dos agregados miúdos

Material	Leitura do Nível (L) (cm <sup>3</sup> )	Massa Específica ( $\gamma$ ) (g/cm <sup>3</sup> )
Areia	390	2,632
Pó de Pedra	383	2,732
Vidro	400	2,500

Fonte: Autor (2024)

Portanto, observa-se para o resultado da massa específica do pó de vidro, apresenta-se um valor maior em comparação as pesquisas de Ewa *et al.* (2022) e de Choudhary *et al.* (2021), que encontraram massa específica de 2,21 g/cm<sup>3</sup> e 2,37 g/cm<sup>3</sup> respectivamente, porém apresenta resultado semelhante ao encontrado por Simone *et al.* (2017), que apresentou massa específica igual a 2,47 g/cm<sup>3</sup>. No entanto, pode-se inferir que a variação dos valores está relacionada a diferença dos materiais de cada pesquisa, bem como o processo de produção pelo qual cada resíduo de vidro passou. Além disso, vale destacar que a massa específica encontrada para o pó de vidro é inferior ao dos agregados naturais utilizados nesta pesquisa.

#### 4.5 Análise Granulométrica

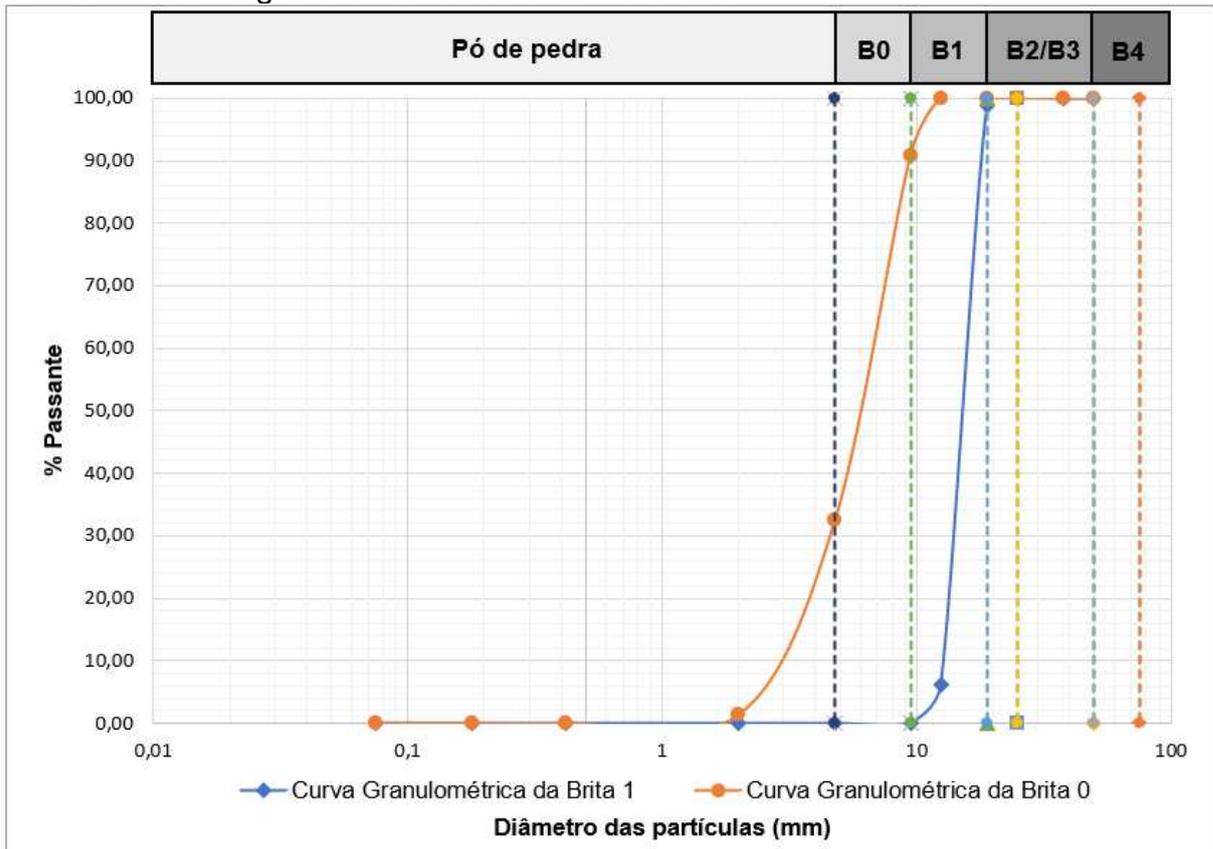
A análise granulométrica foi realizada para todos os agregados a serem utilizados na mistura asfáltica, assim como o pó de vidro, sendo parte essencial para compreender o diâmetro dos grãos de cada material e observar a faixa de trabalho da mistura com base nos traços designados.

##### 4.5.1 Análise Granulométrica do Agregado Graúdo

Conforme o peneiramento realizado da amostra, obtém-se o Gráfico 5 que representa a curva granulométrica para a brita 1. Onde, os dados referentes a

quantidade de material retido em cada peneira e a porcentagem passante constam no Apêndice A - Tabela 13. No Gráfico 5 também pode ser observado a curva granulométrica da brita 0, onde as informações como a quantidade de material retido em cada peneira, bem como as porcentagens de material retido constam no Apêndice A - Tabela 14.

Gráfico 5 - Curva granulométrica da brita 1 e brita 0



Fonte: Autor (2024)

Portanto, constata-se que a brita 1 utilizada nesta pesquisa é constituída em sua maioria por grãos situados entre as peneiras de malha de 19,00mm e 12,5mm, o que a caracteriza como sendo da categoria de brita 1, com baixa quantidade de material sendo caracterizado como brita 2, estando presente 1,10% na amostra, e material de brita 0, equivalente 0,10% em relação a amostra analisada. Ainda pode-se inferir pela curva granulométrica que a amostra de brita 1 apresenta uma graduação uniforme, ou seja, sem grandes variações no diâmetro dos grãos.

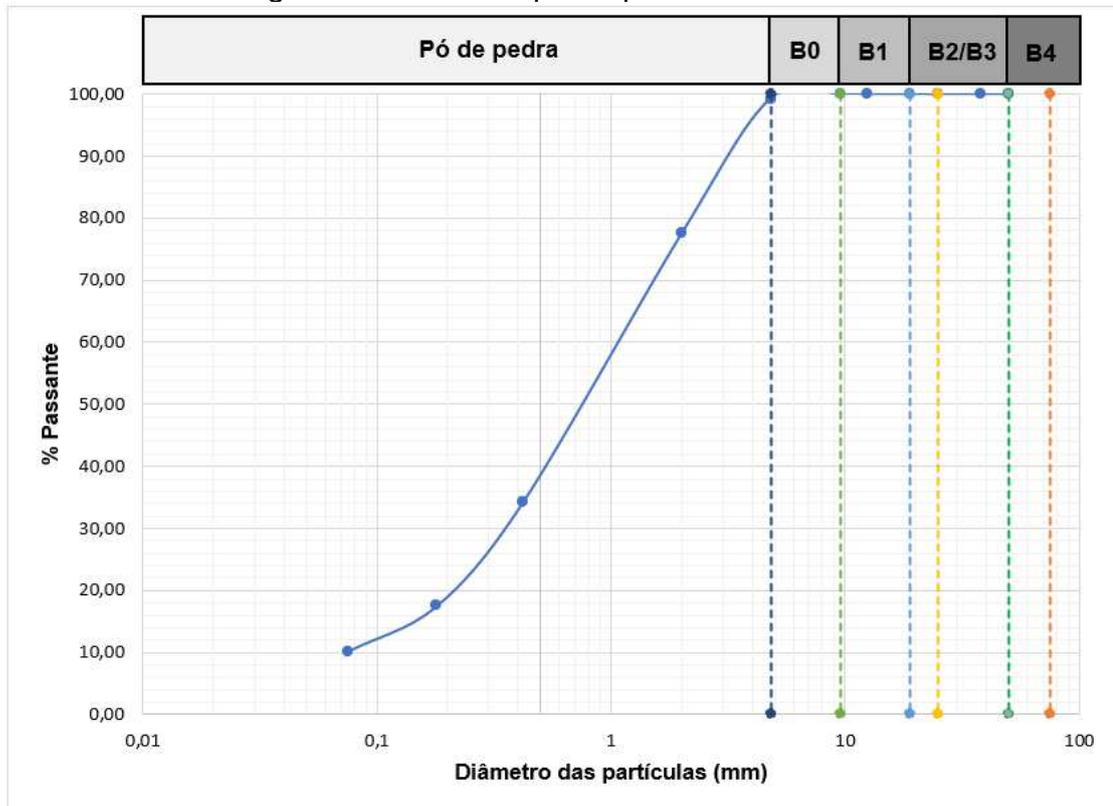
Ainda assim, observa-se que a brita 0 utilizada apresenta 58,25% do seu material situado entre as peneiras de malha de 4,8mm e 9,5mm. No entanto, apesar de ser classificada como brita 0, possui materiais retidos na peneira de 9,5mm, o que representa 9,16%, e materiais passantes na peneira de 4,8mm, representando

32,59%. Esta situação pode ser observada na curva granulométrica do agregado que devido a esta variação quanto ao diâmetro dos grãos apresenta um comportamento de graduação aberta.

#### 4.5.2 Análise Granulométrica do Agregado Miúdo

Para o pó de pedra, tem-se a curva granulométrica apresentada no Gráfico 6. Os dados completos obtidos através do ensaio como os quantitativos de material retidos em cada peneira e as respectivas porcentagem passante são encontradas no Apêndice A - Tabela 15.

Gráfico 6 - Curva granulométrica do pó de pedra



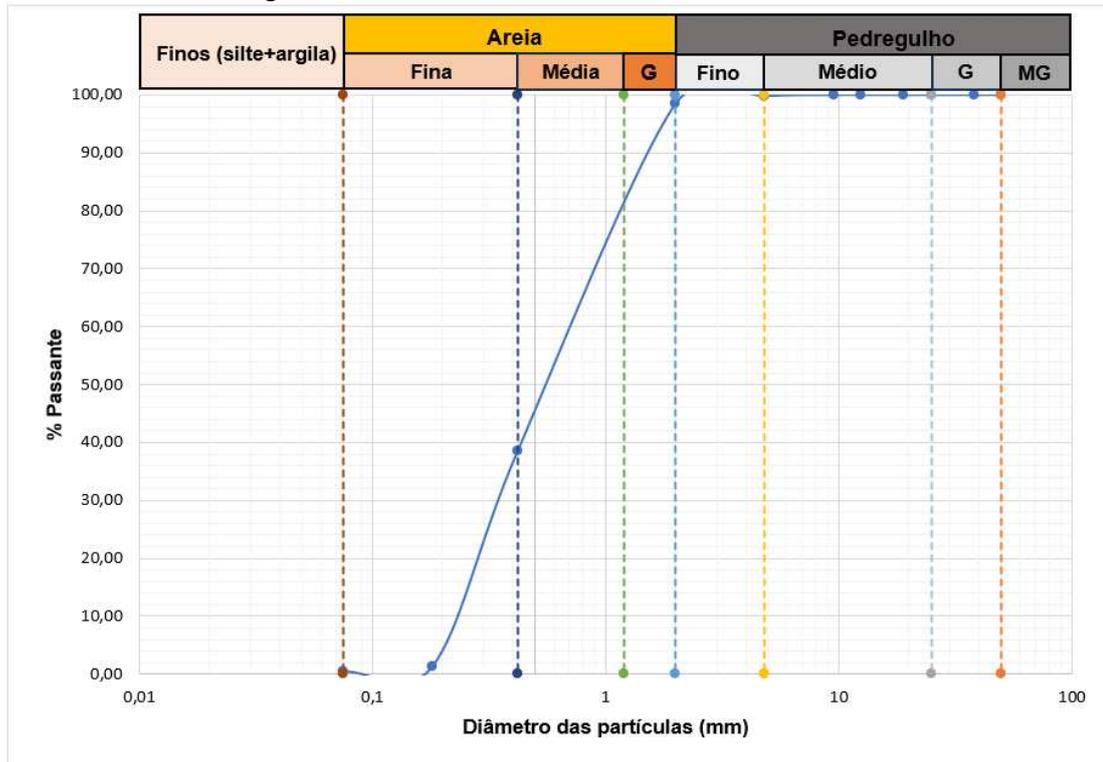
Fonte: Autor (2024)

Desta forma, pode-se inferir que o pó de pedra é constituído de 99,25% de material passante na peneira de 4,8mm, fazendo com que a sua utilização na mistura asfáltica esteja adequada uma vez que especificações para pó de pedra no geral indicam material passante na peneira descrita. Ainda assim, observa-se a presença de 0,75% de material retido na peneira de 4,8mm, podendo ser descrito como grãos característico da brita 0, além disso, vale ressaltar que há na amostra materiais finos passantes na peneira nº 200, totalizando 10,22% em relação a amostra total. Já com

relação a sua graduação, pelo gráfico da curva granulométrica pode-se constatar que apresenta uma graduação densa, devido a apresentar materiais de forma diversificada ao longo do jogo de peneiras utilizado.

A curva granulométrica da areia pode ser observada no Gráfico 7. Os demais dados extraídos do peneiramento da amostra podem ser obtidos no Apêndice A - Tabela 16.

Gráfico 7 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Autor (2024)

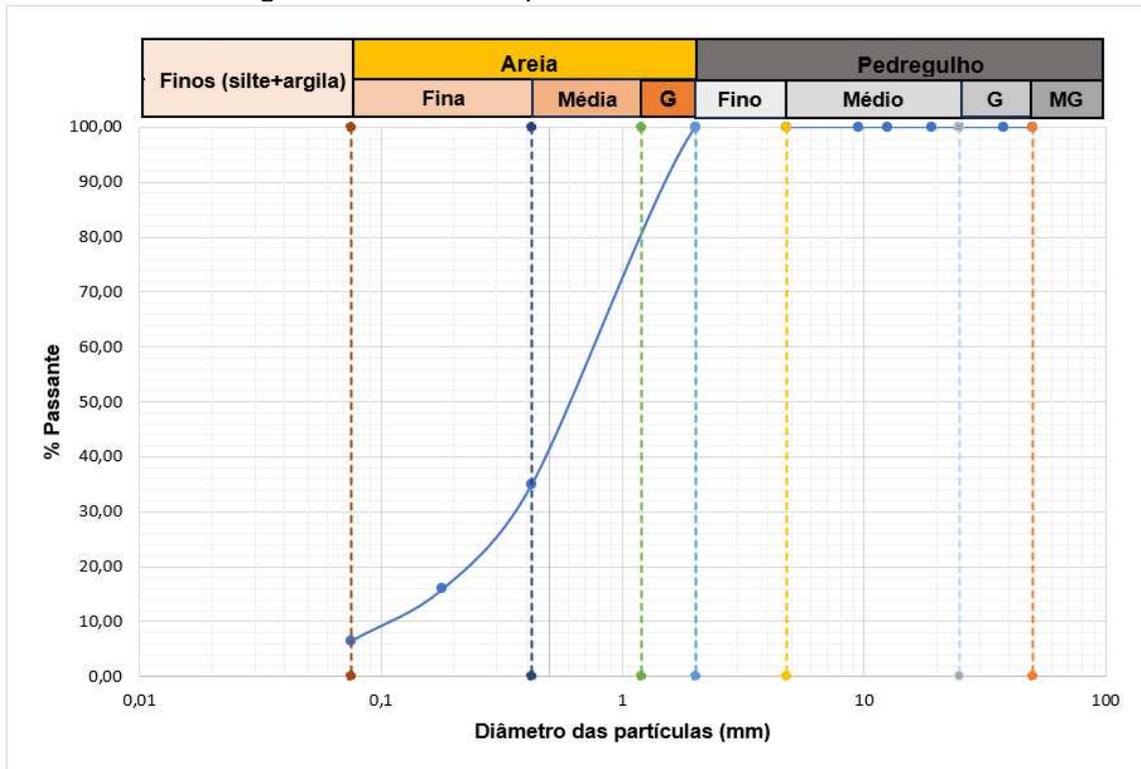
Portanto, diante da curva granulométrica apresentada, observa-se que a areia utilizada nesta pesquisa é formada 1,51% de material considerado pedregulho, além disso, constata-se que é composta por cerca de 16,5% de areia grossa, 44% de areia média e 38% de areia fina. Dessa forma, com base no comportamento da curva granulométrica observa-se que a areia utilizada no estudo possui uma graduação densa, apresentado quantidade significativa de materiais em cada fração do peneiramento.

#### 4.5.3 Análise Granulométrica do Pó de Vidro

O pó de vidro utilizado na pesquisa foi analisado de maneira semelhante ao da areia, uma vez que o presente estudo visa avaliar a sua substituição pelo pó de

vidro. Desta forma, vale ressaltar que durante o processo de produção do pó de vidro foi realizado o seu peneiramento prévio na peneira de 2,00mm, contribuindo assim para o comportamento inicial que pode ser observado em sua curva granulométrica no Gráfico 8. Os dados completos do ensaio como o material retido em cada peneira e as porcentagens passantes constam no Apêndice A - Tabela 17.

Gráfico 8 - Curva granulométrica do pó de vidro



Fonte: Autor (2024)

Sendo assim, pode-se inferir que o pó de vidro utilizado na pesquisa possui uma composição com 18% do que é considerado como areia grossa, para o caso são aqueles cacos de vidro evidentes que compõem a amostra, além de 47% sendo considerada areia média e 28,5% de areia fina, ressaltando que 6,5% da amostra apresentou diâmetro das partículas inferiores a 0,075mm. Portanto, constata-se que a curva granulométrica do pó de vidro apresenta semelhança quanto as frações de areia grossa e média presentes em cada amostra, tendo apenas diferença na quantidade de areia fina que se faz mais presente na amostra da areia.

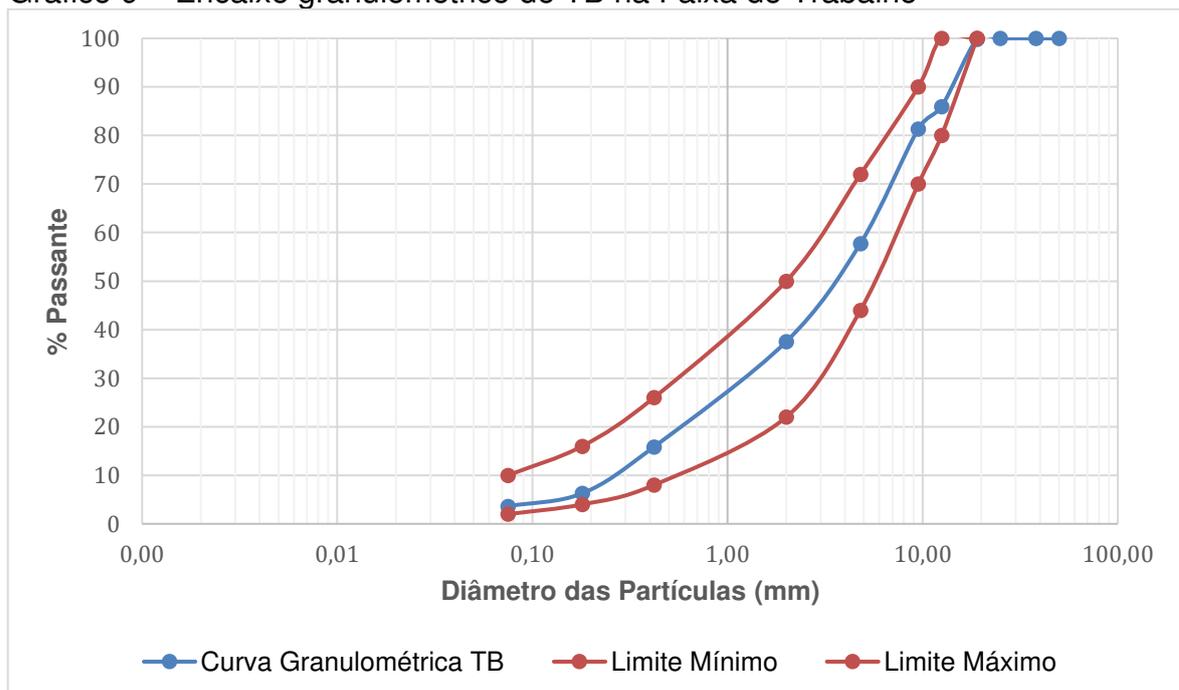
#### 4.6 Encaixe Granulométrico na Faixa de Trabalho – CAUQ Faixa C

A partir dos dados granulométricos de todos os agregados a serem utilizados na mistura asfáltica, deve ser observado a mudança do traço base com a substituição da areia pelo pó de vidro apresentará mudanças significativas quanto a faixa de trabalho definida para esta pesquisa. Desta forma, sabendo que para o traço base foi utilizado como parâmetro a faixa de trabalho C, deve ser analisado se os traços de T-20%, T-50% e T-100% irão atender a faixa estabelecida.

Para isso, foram analisadas as porcentagens passantes de cada material nas respectivas peneiras definidas no ensaio de análise granulométrica. Assim, com base nas % na mistura em relação ao total de agregados de cada material, foi obtida a granulometria proveniente da mistura dos agregados, que posteriormente foram comparados aos limites máximos e mínimos definidos para a faixa C de acordo com a Norma DNIT 031/2006 - ES.

Sendo assim, para o traço base desta pesquisa, pode-se observar a curva granulométrica obtida pela mistura dos agregados do traço base presente no Gráfico 9. No Apêndice B - Tabela 18, constam os dados a respeito da porcentagem passante de cada material nas peneiras, bem como a granulometria da mistura obtida através das porcentagens de uso de cada agregado em relação ao peso total dos agregados.

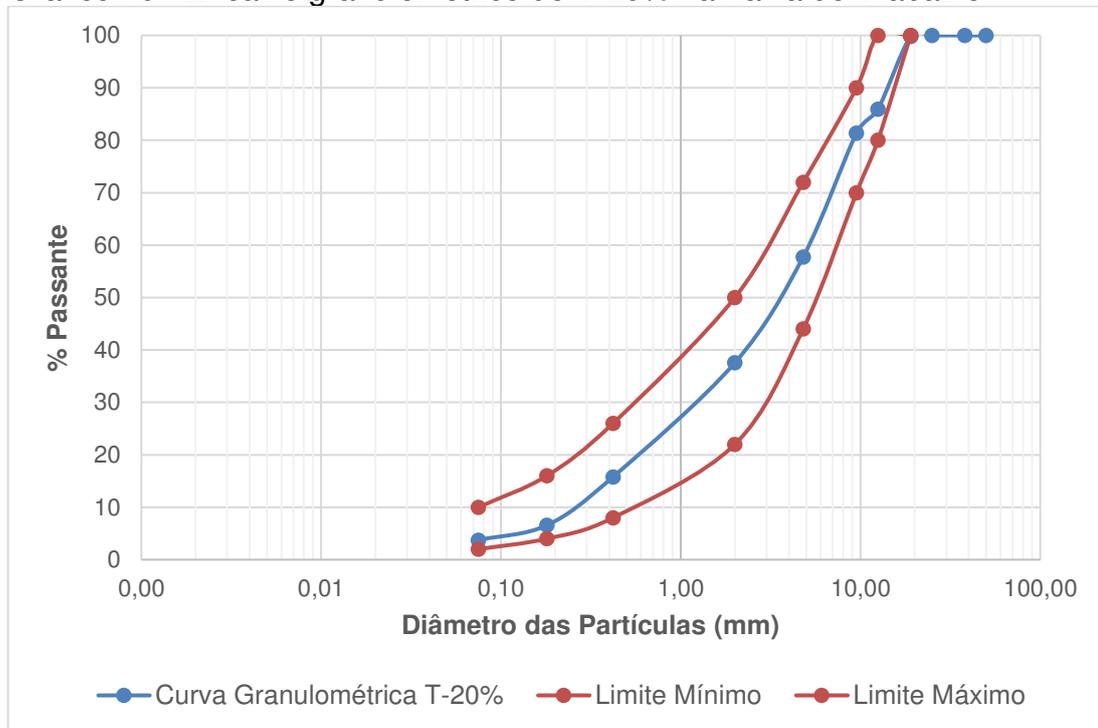
Gráfico 9 – Encaixe granulométrico de TB na Faixa de Trabalho



Fonte: Autor (2024)

Para o traço com 20% de substituição, pode-se observar o Gráfico 10. Os demais dados para a obtenção do gráfico podem ser vistos no Apêndice B - Tabela 19, com o acréscimo do pó de vidro na mistura asfáltica.

Gráfico 10 - Encaixe granulométrico de T-20% na Faixa de Trabalho

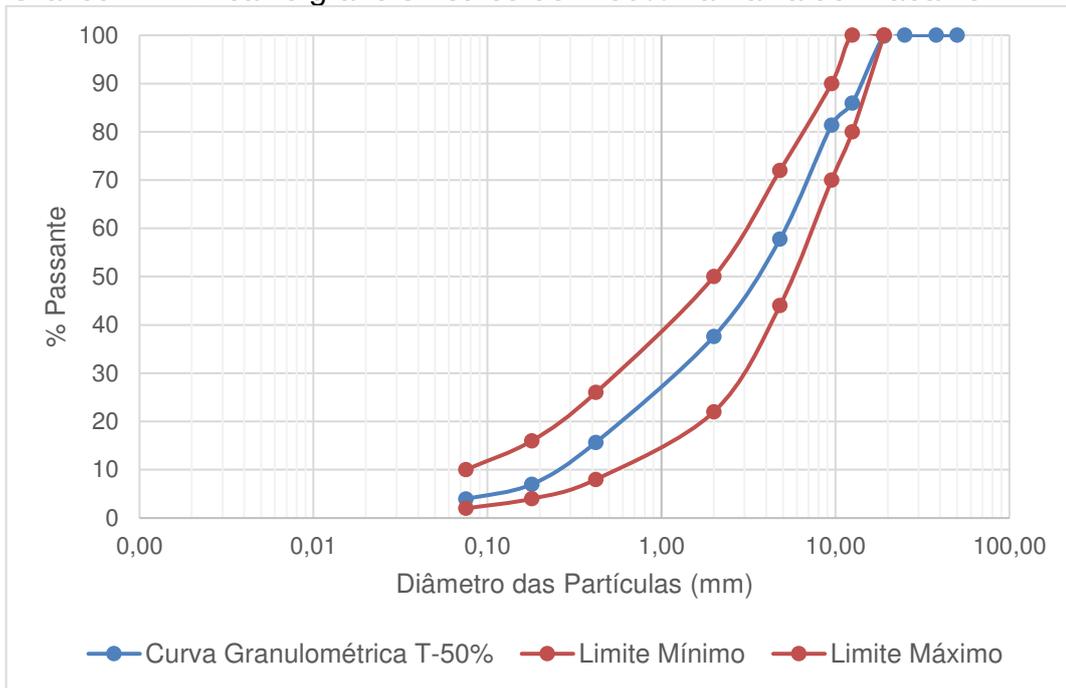


Fonte: Autor (2024)

Portanto, dada que a granulometria do pó de vidro apresenta leve diferença em comparação a granulometria da areia, observa-se que a sua substituição na mistura em termos de 20% do peso da areia apresentou mudança pouco significativa, uma vez que como é constituída por finos não irá alterar na parte do gráfico até o diâmetro de 2,00mm. Sendo assim, percebe-se apenas uma leve mudança na porcentagem passante nas peneiras de malha 0,42mm, 0,18mm e 0,075mm, mesmo assim, a mistura ainda atende aos requisitos da faixa de trabalho C definido pela Norma DNIT 031/2006 - ES.

Para o traço com 50% de substituição da areia pelo pó de vidro, obtém-se o Gráfico 11. As informações complementares quanto às porcentagens passantes da mistura asfáltica em cada peneira podem ser encontradas no Apêndice B - Tabela 20.

Gráfico 11 - Encaixe granulométrico de T-50% na Faixa de Trabalho

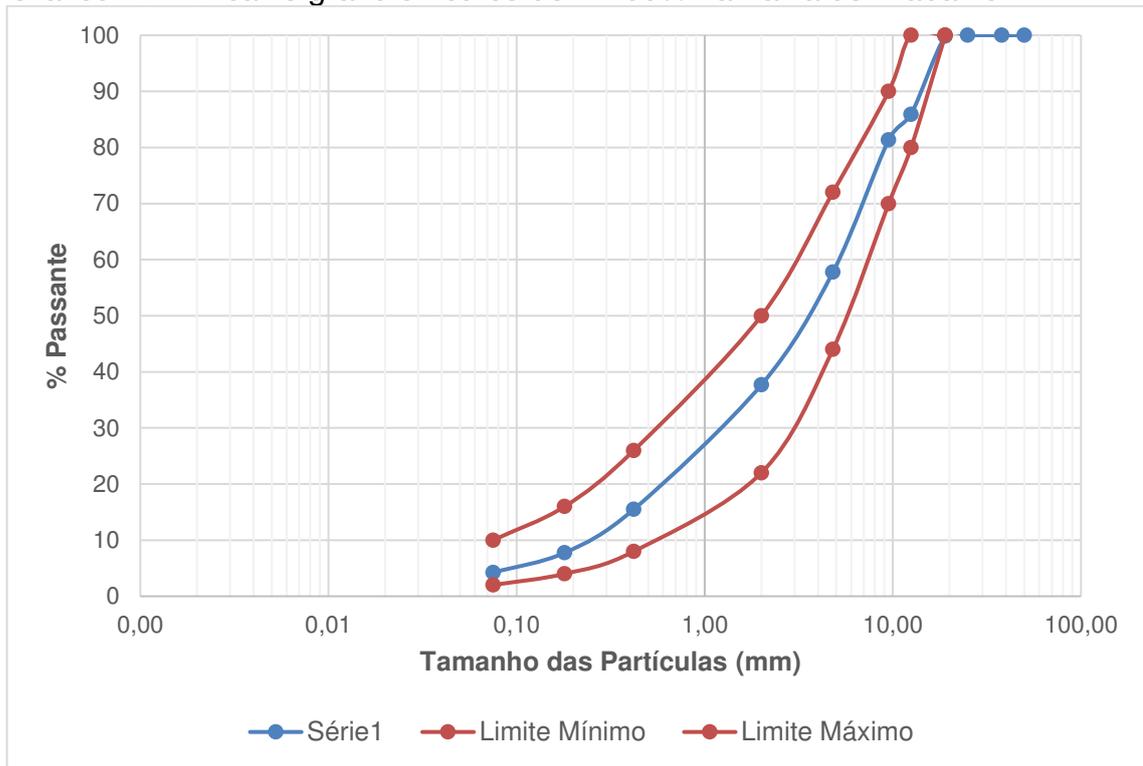


Fonte: Autor (2024)

Assim, com base na curva granulométrica para o traço T-50%, observa-se que não há grande variação em relação às demais curvas apresentadas anteriormente. No entanto, assim como no traço T-20%, houve apenas mudanças nos valores de material passante nas últimas três peneiras, o que não apresenta mudanças significativas e mantém a mistura dentro das especificações da faixa de trabalho.

Já para T-100%, no qual foi realizada a total substituição da areia, obteve-se o Gráfico 12. No Apêndice B - 21, constam os dados referentes a granulometria da mistura asfáltica para este traço.

Gráfico 12 - Encaixe granulométrico de T-100% na Faixa de Trabalho

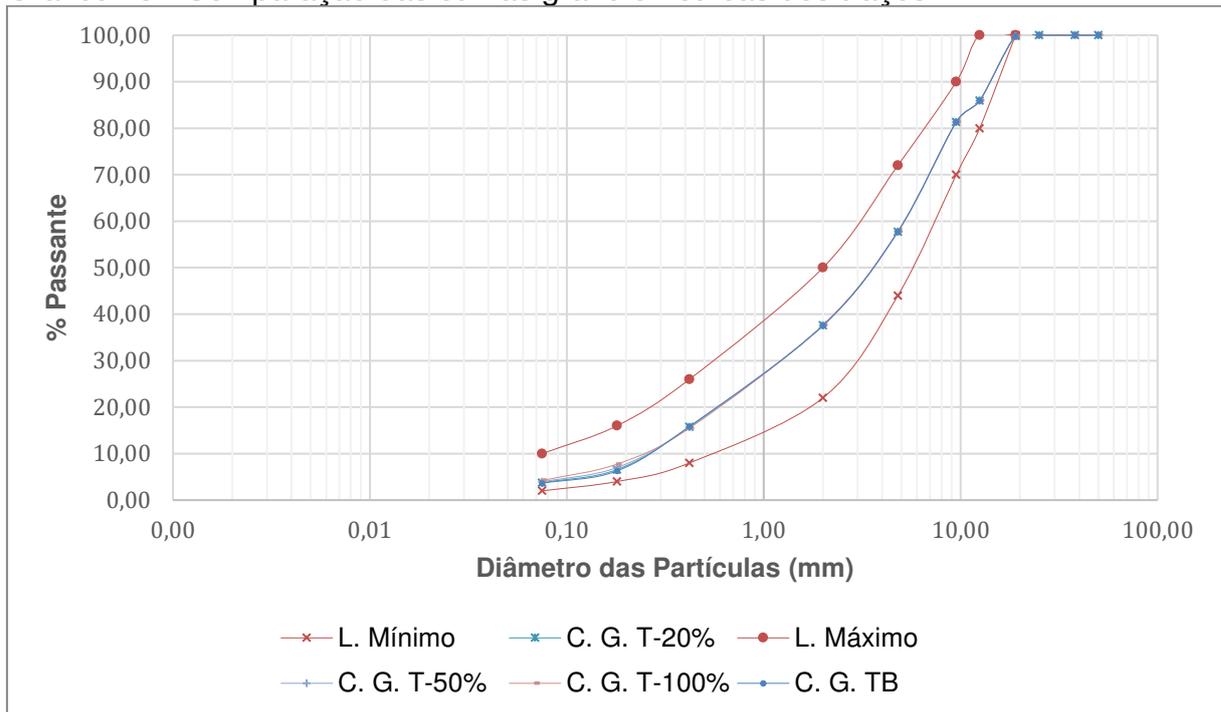


Fonte: Autor (2024)

Desta forma, com a curva granulométrica da mistura, constata-se que mesmo com uma substituição completa da areia não houve grande discrepância dos valores se comparados os traços TB e T-100%, o que contribui para confirmar a análise realizada anteriormente a respeito da granulometria de ambos os materiais. Além disso, pode-se observar que a mistura atende aos requisitos previstos para a faixa de trabalho C.

Ainda assim, pode ser obtido o Gráfico 13 com todos os gráficos supracitados que permite analisar o quão próximas estão as curvas granulométricas da mistura. Onde, ocorre pequenas mudanças na angulação no final da curva granulométrica, observando que as misturas asfálticas que possuem pó de vidro em sua composição apresentam uma maior quantidade de finos se comparados ao traço que utiliza apenas areia na mistura.

Gráfico 13 - Comparação das curvas granulométricas dos traços

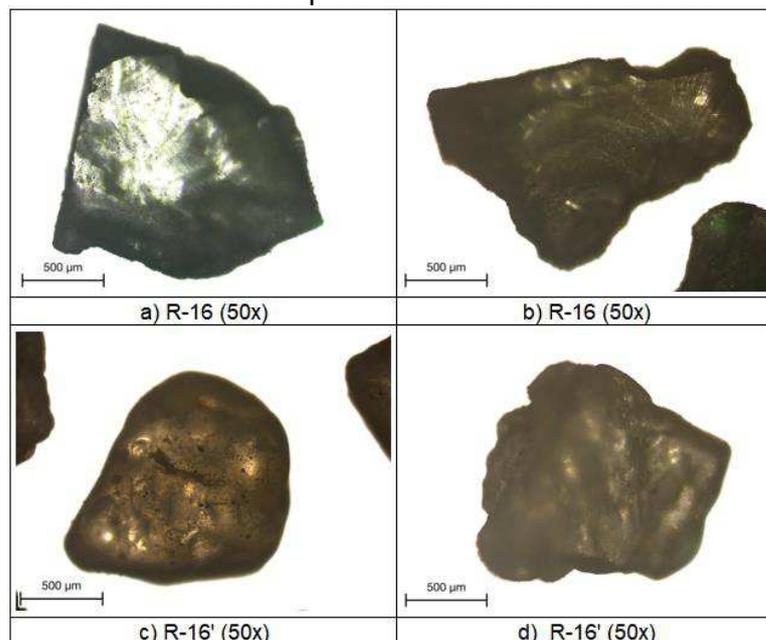


Fonte: Autor (2024)

#### 4.7 Análise Microscópica

Diante a realização do ensaio, foram obtidas as imagens, a) e b) para o pó de vidro e c) e d) para areia, presentes na Figura 53 para a comparação entre os materiais R-16 e R-16', retidos na peneira de nº 16 (1,20 mm), com o aumento de 50x.

Figura 53 - Análise microscópica do R-16 e R-16' no aumento de 50x



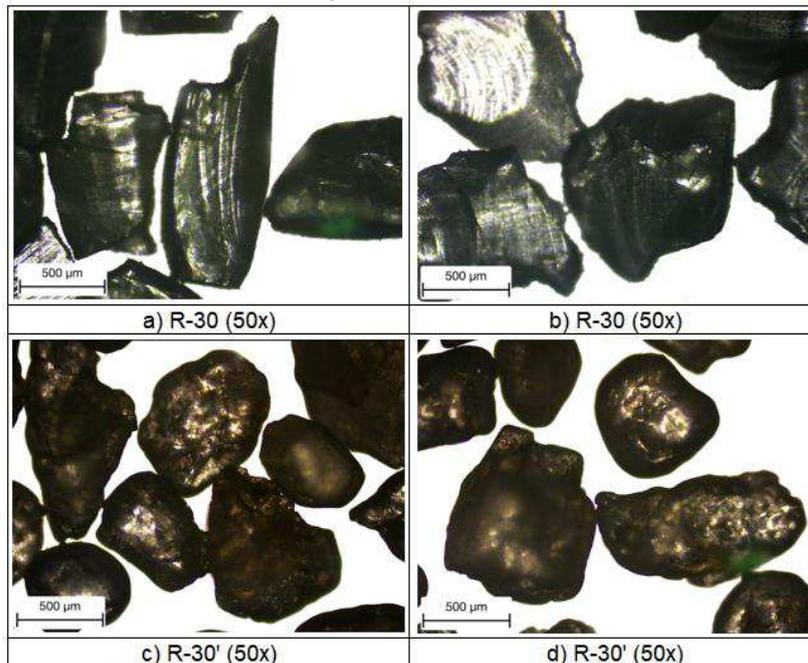
Fonte: Autor (2024)

Desta forma, pode-se observar que as amostras analisadas em R-16, ou seja, do pó de vidro possuem forma diversificada, com a presença de contornos pontiagudos. Em contrapartida, nota-se que para as amostras de R-16', da areia, possui contornos mais arredondados, o que corrobora para que os grãos existentes tenham características semelhantes.

Desse modo, a amostra do pó de vidro caracteriza-se por ser mais heterogênea em relação ao formato de seus cacos de vidro, já a areia denota-se uma característica homogênea. Nesse sentido, observa-se no pó de vidro há presença da clivagem, termo utilizado na geologia para definir uma tendência de divisão dos minerais em um determinado plano.

Para a análise das amostras R-30 e R30', materiais retidos na peneira de nº 30 (0,60 mm), tem-se as imagens a) e b) para o pó de vidro e c) e d) para a areia, onde podem ser observadas na Figura 54.

Figura 54 - Análise microscópica do R-30 e R-30' no aumento de 50x

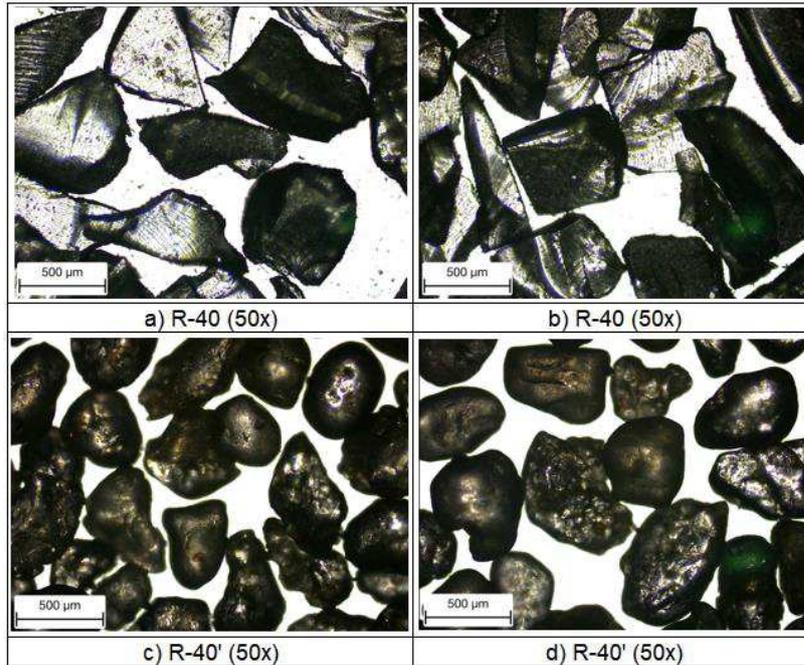


Fonte: Autor (2024)

As imagens obtidas das amostras R-30 e R-30' confirmam o observado anteriormente para as amostras retidas na peneira de nº16, onde nota-se os grãos de areia com formatos semelhantes se comparado a amostra do pó de vidro. Vale ressaltar que a partir da análise visual realizada, verifica-se a mesma diferença entre as partículas tanto visualmente quanto no aumento de 50x no microscópio.

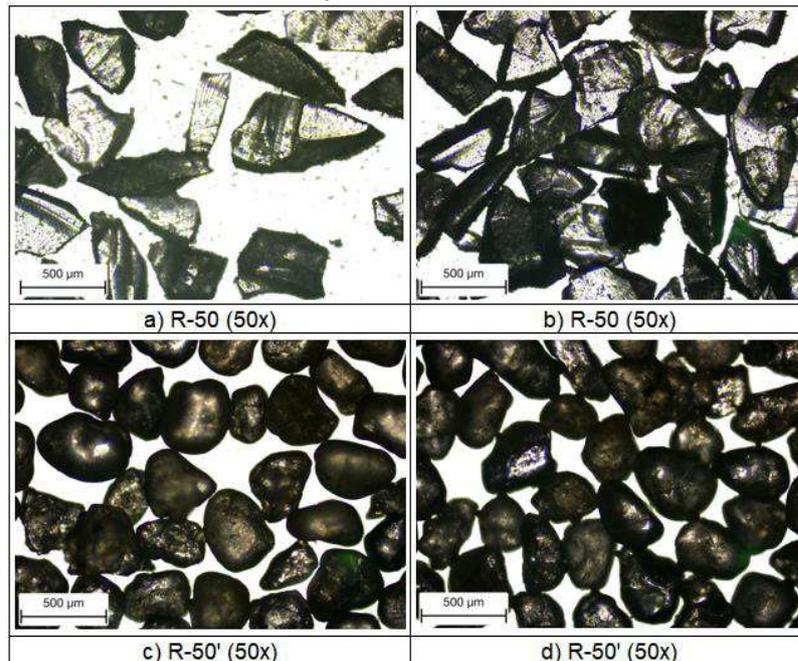
Na Figura 55, podem ser observadas as imagens tiradas com o microscópio de a) e b) para o pó de vidro e c) e d) para areia, com as amostras retidas na peneira de nº 40 (0,42 mm), R-40 e R-40'. Já na Figura 56, estão presentes as amostras retidas na peneira de nº 50 (0,30 mm), R-50 e R-50', com pó de vidro nas imagens a) e b), e a areia em c) e d).

Figura 55 - Análise microscópica do R-40 e R-40' no aumento de 50x



Fonte: Autor (2024)

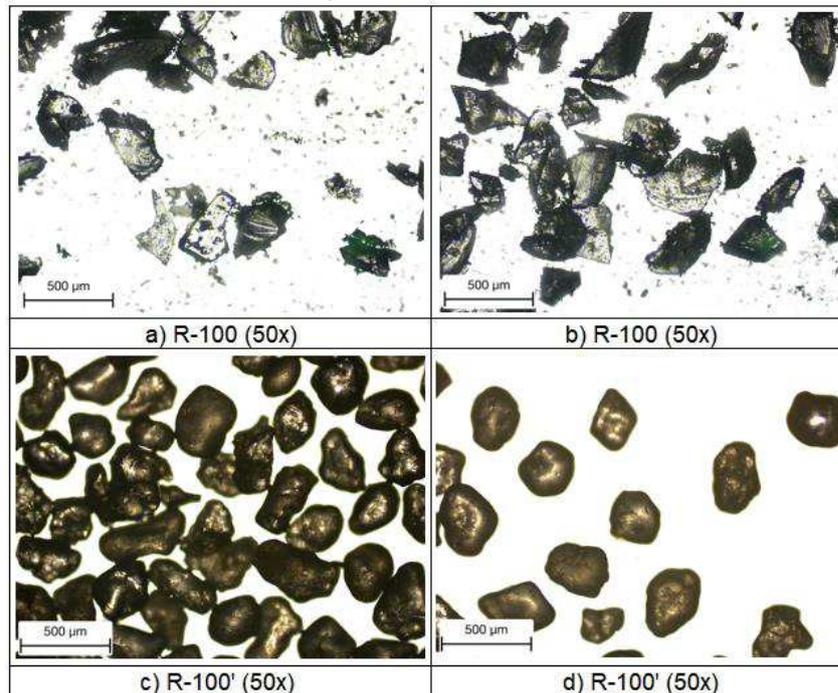
Figura 56 - Análise microscópica do R-50 e R-50' no aumento de 50x



Fonte: Autor (2024)

A partir das imagens obtidas, pode-se inferir que há uma constância em relação ao formato dos grãos nestas primeiras amostras apresentadas. No entanto, observa-se que o pó de vidro possui cacos com cantos mais pontiagudos em comparação as primeiras amostras de R-16 e R-30. Já na Figura 57, podem ser observar as imagens a) e b) para o pó de vidro e c) e d) para a areia, contendo as amostras R-100 e R-100' com o aumento de 50x, que representam os materiais retidos na peneira de nº 100 (0,150 mm).

Figura 57 - Análise microscópica do R-100 e R-100' no aumento de 50x



Fonte: Autor (2024)

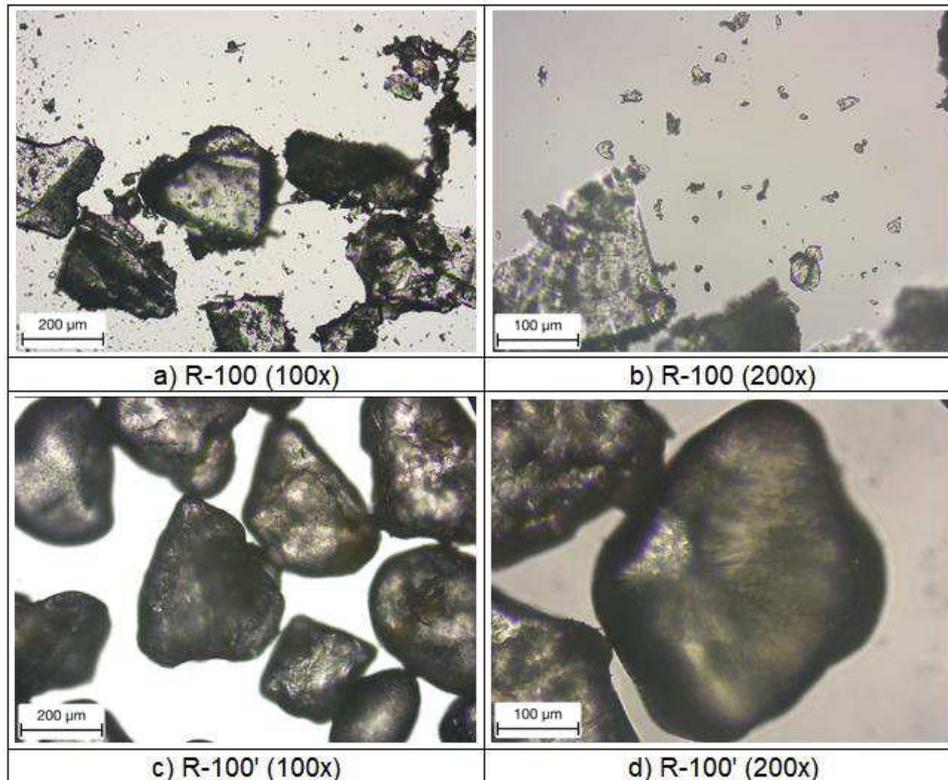
Desta forma, pode-se observar que as amostras analisadas de R-100' continuam com as mesmas características das anteriores. Contudo, para a amostra do pó de vidro, verifica-se uma mudança quanto a presença de partículas menores junto ao material analisado, além de observa que os cacos de vidro aparentam ter espessuras mais finas.

Nesse contexto, a aparição de partículas menores junto ao material retido de pó de vidro se dá em decorrência de fatores como a superfície do material que se apresenta em determinados pontos como uma superfície plana e pelo fato do vidro possuir uma energia superficial, fazendo com que estas partículas sejam atraídas e fiquem retidas nas partículas maiores. Assim, este material particulado em questão tornou-se evidente nas imagens microscópicas em virtude de ter sido utilizadas placas

de vidro liso para a visualização da amostra que ao ser prensada corroborou para que este material acabasse sendo segregado das partículas maiores e interagisse diretamente com a placa de vidro.

Portanto, com a presença deste material particulado foram realizadas imagens com aumento de 100x e 200x, conforme apresenta a Figura 58.

Figura 58- Análise microscópica do R-100 e R-100' no aumento de 100x e 200x

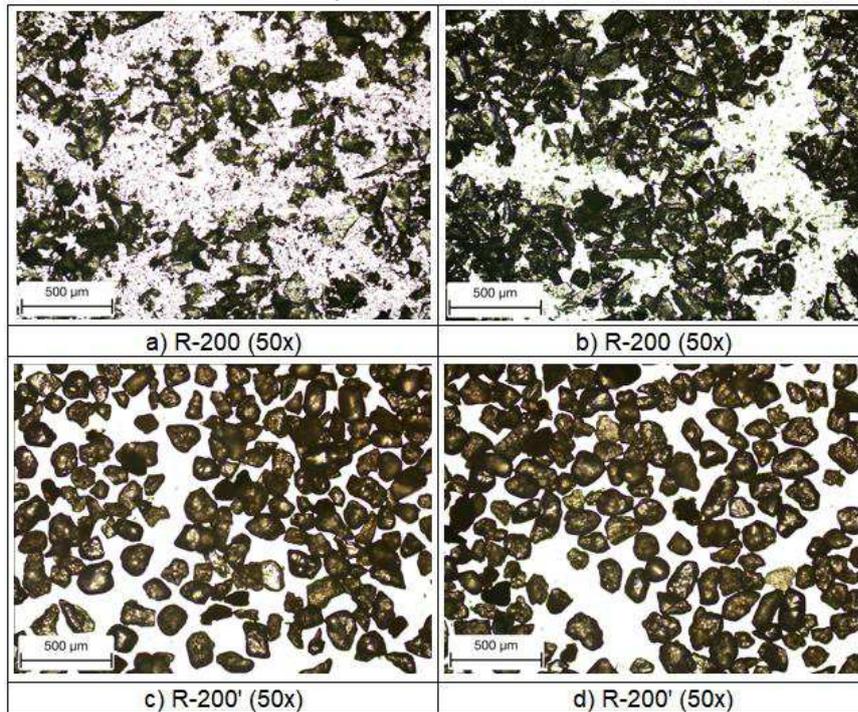


Fonte: Autor (2024)

Sendo assim, com o aumento de 100x e 200x, pode-se observar a ausência por completa de partículas inferiores à da granulometria da areia, já para o pó de vidro nota-se que os materiais particulados possuem formato semelhante ao já observado nas amostras anteriores, contudo com dimensões menores, o que evidencia que a quebra do material é igual para variadas faixas granulométrica, não havendo homogeneidade entre as partículas.

Na Figura 59, são apresentadas as imagens a) e b) para o pó de vidro e c) e d) para a areia, observadas no microscópio para as amostras R-200 e R-200' no aumento de 50x, que representam os respectivos materiais retido na peneira de nº 200 (0,075 mm).

Figura 59 - Análise microscópica do R-200 e R-200' no aumento de 50x



Fonte: Autor (2024)

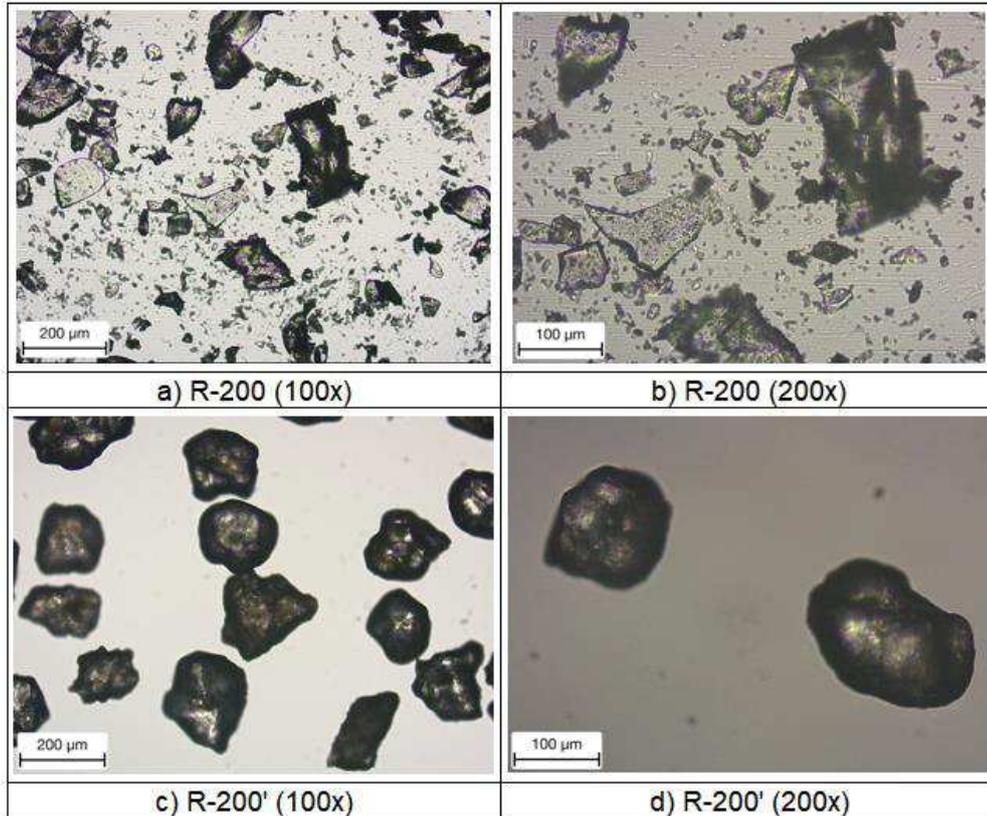
Sendo assim, diante das imagens microscópicas apresentadas, nota-se que há diferenças nítidas entre a constituição das amostras retidas nas peneiras, no qual observa-se que para a areia, os grãos constituintes estão bem definidos em toda a amostra, sendo possível identificar através da imagem partícula por partícula, além das formas arredondadas que foram observadas desde a amostra R-16', ou seja, pode-se inferir que a areia utilizada na pesquisa possui partículas de mesma característica ao longo de toda sua granulometria.

No entanto, esta situação não é observada para o pó de vidro, que se caracteriza por uma amostra variedade no tamanho das partículas, inclusive até para as partículas menores ao tamanho característico da granulometria. Além disso, nota-se extrema dificuldade para identificação individual das partículas, sendo necessário a utilização do aumento de 100x e 200x, conforme pode ser observado na Figura 60, para que fosse possível distinguir os cacos de vidro.

Além do mais, vale ressaltar que para o material retido na peneira de nº 200, a análise visual difere-se do encontrado no microscópio, uma vez que, visualmente a amostra de pó de vidro apresentavam aspectos similares ao da areia retida, possuindo mudanças apenas em sua coloração. Assim, inicialmente poder-se-ia imaginar que seriam identificadas estruturas equivalentes para ambos os materiais,

no entanto, entende-se que devido aos processos de formação dos mesmos, serem distintos (um natural e outro artificial), é perfeitamente justificável as diferenças identificadas na análise.

Figura 60 - Análise microscópica do R-200 e R-200' no aumento de 100x e 200x



Fonte: Autor (2024)

#### 4.8 Ensaio de Penetração

A partir das três determinações realizadas com base no procedimento do ensaio, obteve-se a Tabela 11, com o valor definido para a penetração sendo a média aritmética das determinações, ressaltando que o relógio possui valores de 0,00 mm a 40,00 mm.

Tabela 11 - Penetração do ligante

Material	Leitura Inicial (0,1 mm)	Leitura Final (0,1 mm)	Penetração (0,1 mm)	Penetração Média (0,1 mm)
CAP 50/70	355 (-45)	19,5	64,5	66,5
	352 (-48)	20	68	
	353 (-47)	20	67	

Fonte: Autor (2024)

Portanto, com base no resultado o ligante asfáltico utilizado na pesquisa está conforme a sua descrição, uma vez que está sendo trabalhado como CAP 50/70, e com o valor da penetração obtida constata-se que está de acordo com o definido pela Norma DNIT 095/2006 - EM de Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material.

#### 4.9 Ensaio de Ponto de Amolecimento

Para o ensaio de ponto de amolecimento é importante destacar que a diferença de tempo na queda entre as duas esferas utilizadas foi de 5 segundos. Assim, foi obtido o resultado da temperatura de 45,6°C, o que está de acordo com o requisito para CAP 50/70 conforme a Norma DNIT 095/2006.

#### 4.10 Análise dos parâmetros volumétricos da mistura

A partir dos corpos de prova confeccionados, foram obtidos dados referentes a massa seca, saturada e saturada superfície seca, como pode ser observado no Apêndice C - Tabela 22. Onde, com estes valores podem ser calculados parâmetros como Vv, VCB, VAM e RBV, no entanto, para isso ainda foi calculada a densidade máxima teórica para cada um dos traços, conforme consta na Tabela 12.

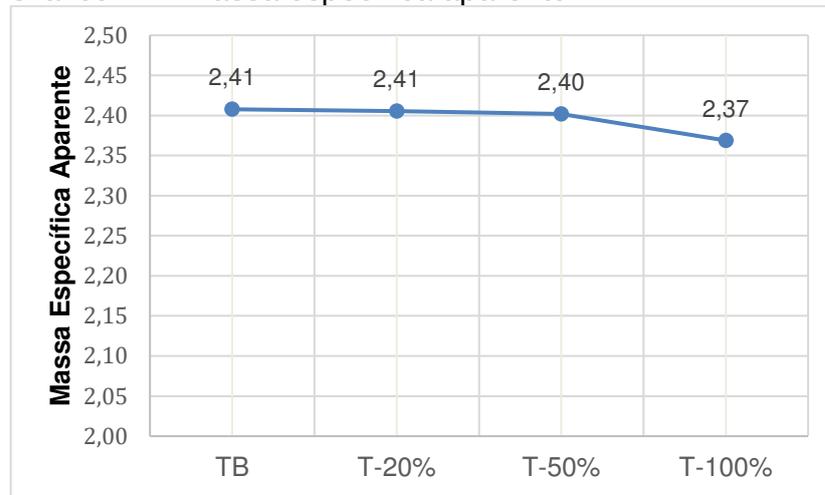
Tabela 12 - Densidade Máxima Teórica

	Traço Base (TB)	Traço com 20% (T-20%)	Traço com 50% (T-50%)	Traço com 100% (T-100%)
DMT	2,499	2,497	2,493	2,487

Fonte: Autor (2024)

Além disso, foram calculadas a porcentagem de água absorvida por cada CP, bem como a sua densidade aparente e massa específica, onde no Gráfico 14 pode ser visto o comportamento da massa específica para cada traço, ressaltando que os valores apresentados são referentes a média obtida com base nos 6 CP's, as informações para cada corpo de prova está presente no Apêndice C - Tabela 23.

Gráfico 14 - Massa específica aparente



Fonte: Autor (2024)

Nesse sentido, observa-se que a mistura para 100% de substituição apresenta baixa massa específica em comparação aos demais traços. Isso se dá pelo fato da substituição completa da areia na mistura, que por sua vez contribui para a presença do pó de vidro em 10% da massa de agregados. Sendo assim, uma vez que, a sua massa específica deste material como visto no resultado obtido no frasco Chapman, apresenta-se menor que o da areia, favorece a uma mistura de baixa massa específica total.

Portanto, a partir da densidade aparente média para cada traço e a sua respectiva DMT, obtém o volume de vazios conforme pode ser observado no Gráfico 15. Os dados completos para cada corpo de prova analisado constam no Apêndice C - Tabela 23.

Gráfico 15 - Volume de vazios

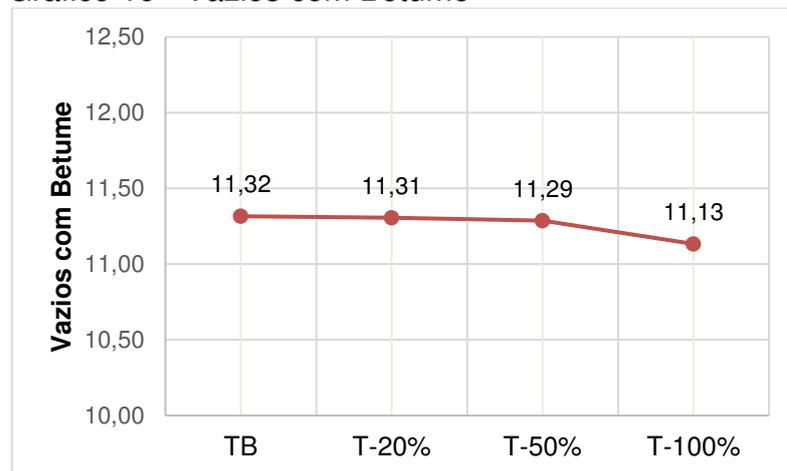


Fonte: Autor (2024)

Desse modo, constata-se que os valores apresentados para o volume de vazios dos traços estão de acordo com o definido pela Norma DNIT 031/2006-ES. No entanto, observa-se que apesar do traço T-100% apresentar volume de vazios maior em comparação aos demais, ainda está dentro do limite definido na norma. Porém, ressalta-se que para a análise de cada corpo de prova verifica-se que o CP-21 e P-24, apresentam excesso em relação ao limite máximo de 0,6% e 1,6% respectivamente.

Com o volume de vazio, podem ser obtidos os demais parâmetros, onde no Gráfico 16 está presente o VCB, no Gráfico 17 encontra-se o VAM e no Gráfico 18 pode-se observar a RBV. Já as informações completas para os corpos de prova são apresentadas no Apêndice C - Tabela 23.

Gráfico 16 - Vazios com Betume



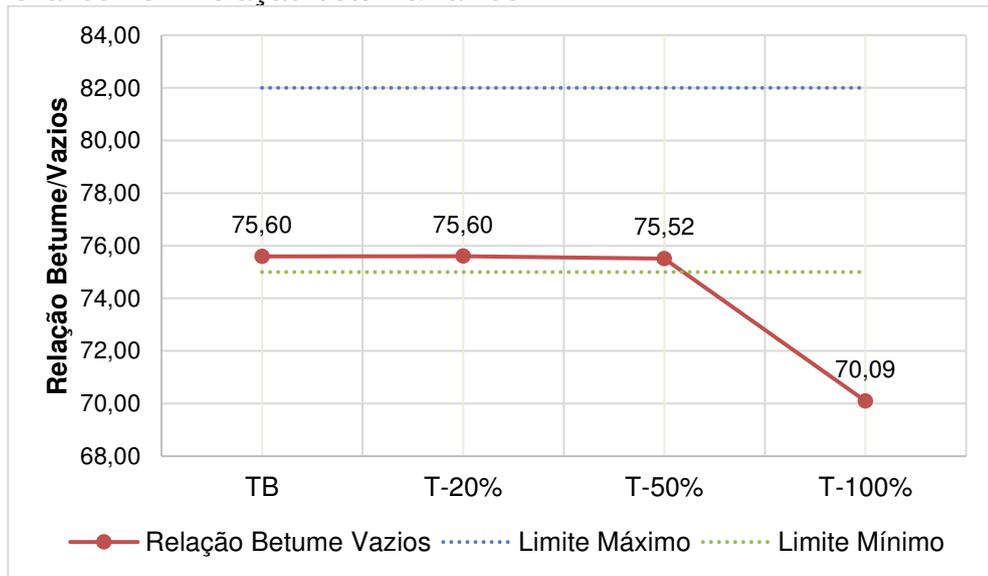
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 17 - Vazios do agregado mineral



Fonte: Autor (2024)

Gráfico 18 - Relação betume/vazios



Fonte: Autor (2024)

Logo, observa-se que os vazios do agregado mineral se apresentam constantes para os traços TB, T-20% e T-50%, apesar de se enquadrarem fora do mínimo exigido pela Norma DNIT 031/2006, uma vez que o diâmetro nominal máximo dos agregados presentes na mistura asfáltica é de 19,1 mm, assim, sendo exigido um VAM de no mínimo 15%. Entretanto, percebe-se diferença mínima em relação ao parâmetro definido por norma, além da análise realizada para cada CP constatou que grande parte dos corpos de prova atenderam ao requisito mínimo.

Contudo, a grande quantidade de teor de VAM atrelado ao alto teor de Vv, proporcionou que o traço T-100% tivesse um RBV fora dos padrões definidos pela Norma DNIT 031/2006, enquanto o restante dos traços atendeu aos requisitos. Este fator indica que as misturas com T-100% devem possuir um teor ligante superior a 4,70% (utilizados em todos os traços desta pesquisa), para que possua um aumento na relação betume vazios.

Os resultados obtidos, apresentam conformidade com outros estudos como os de Abendeh (2017) que identificou que o uso de determinadas porcentagens de vidro residual na mistura asfáltica favorecia ao aumento no volume de vazios, e que por consequência, demonstrava resultados abaixo dos índices normativos para vazios do agregado mineral e na relação betume/vazios. Este resultado pode ser considerado compatível ao analisado nesta pesquisa, pois em seus estudos trabalhou com resíduos semelhantes ao desta pesquisa e com tamanho dos grãos inferiores a 2,36mm.

Da mesma forma, foi constatado parâmetros parecidos por Choudhary (2021), porém com variações menores nos resultados obtidos, uma vez que as porcentagens de substituição utilizadas nestes estudos tiveram diferenças menores. No entanto, ainda podem ser observados comportamento análogos no que se refere a relação betume/vazios da mistura asfáltica. Já os resultados de Issa (2016), apresentaram resultados inversos em relação ao volume de vazios ao obtido nesta pesquisa e nas demais pesquisa dos autores supracitados, no qual foi apenas constata similaridade nos resultados de massa específica, que assim como visto anteriormente os estudos da autora também apresentaram uma diminuição da massa específica à medida que se aumentava a porcentagem de pó de vidro na mistura.

Além disso, outro fator que corrobora para o resultado apresentado está relacionado a presença de grãos menores na composição do pó de vidro utilizado na mistura, como foi constatado a partir da análise microscópica. Nesse sentido, tem-se que quanto maior a presença destas partículas a tendência é que haja maior volume de superfície a ser recoberta pelo ligante asfáltico. Assim, para o T-100%, apresenta uma maior superfície específica em comparação aos demais traços, o que por sua vez, favorece a um maior consumo de CAP, culminando na necessidade de aumentar a porcentagem de ligante na mistura asfáltica para atender o requisito definido para a relação betume/vazios.

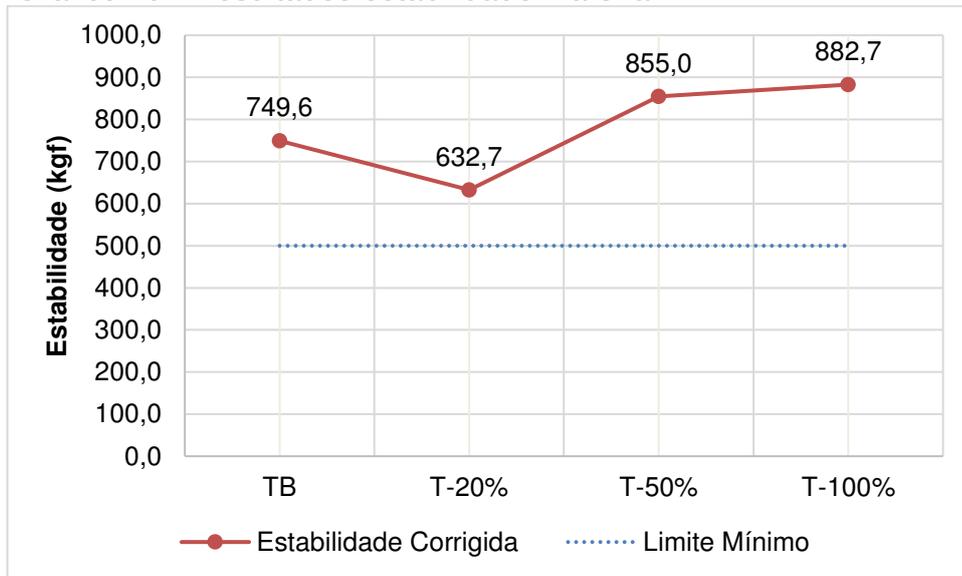
## **4.11 Ensaio de Comportamento Mecânico**

### **4.11.1 Estabilidade Marshall**

O ensaio de estabilidade Marshall forneceu dados proveniente da carga suportada pelo corpo de prova até seu rompimento, no entanto, estes valores ainda foram corrigidos conforme a espessura do corpo de prova obtida através da medição com paquímetro das suas dimensões. Os dados referentes às medições podem ser vistos no Apêndice D - Tabela 24, além disso, também foram realizadas as etapas de correção para cada CP conforme constam no Apêndice D - Tabela 25.

Desta forma, com base nos resultados obtidos, tem-se o Gráfico 19 com a estabilidade Marshall média para cada traço, ressaltando que foram utilizados 3 CP para a obtenção da média.

Gráfico 19 - Resultados estabilidade Marshall



Fonte: Autor (2024)

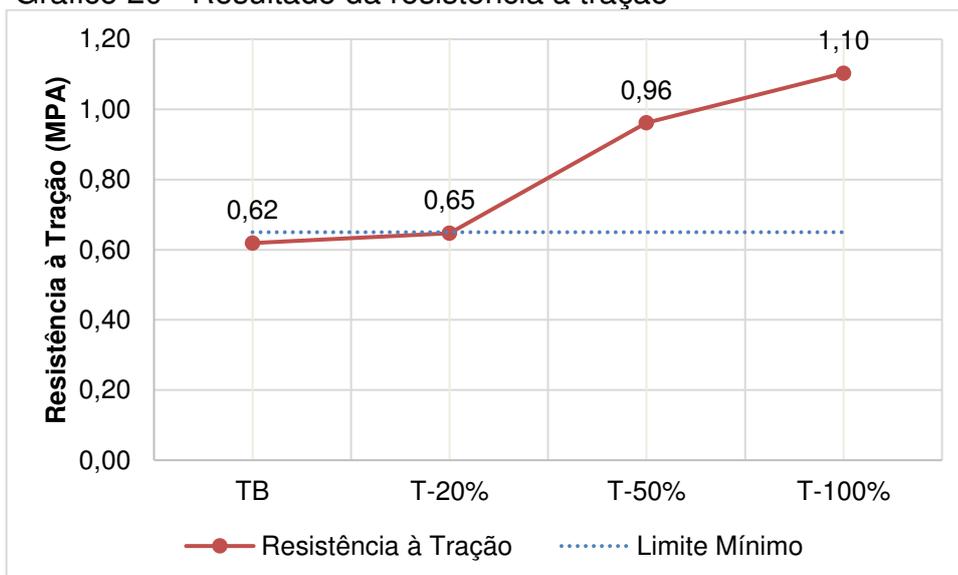
Portanto, com base no Gráfico 19, pode-se observar que todos os traços submetidos ao ensaio satisfazem o mínimo requerido de 500 kgf definido pela Norma DNIT 031/2006. Além disso, o traço T-20% apresenta um decréscimo significativo em sua estabilidade em comparação aos demais.

Já os traços T-50% e T-100% apresentaram aumento em relação a estabilidade Marshall do traço base, em 14% e 17% respectivamente. Este resultado demonstra que houve melhoria no comportamento mecânico destas misturas tendo uma melhor capacidade de suporte a carga aplicada.

#### 4.11.1 Resistência à Tração

Para o ensaio de RT é importante ressaltar que o seu valor final é dado em MPa, desta forma, necessita-se a mudança da força aplicada pela prensa de kgf para N, para a obtenção do resultado. Sendo assim, no Gráfico 20 observa-se a RT para os traços, onde os resultados obtidos para cada corpo de prova constam no Apêndice D - Tabela 26.

Gráfico 20 - Resultado da resistência à tração



Fonte: Autor (2024)

Portanto, o ensaio de RT apresentou que a mistura asfáltica com traço base demonstrou resultado abaixo do mínimo de 0,65 MPa, definido pela Norma DNIT 031/2006. Em contrapartida, os corpos de prova com substituição da areia pelo vidro demonstram melhores desempenhos no ensaio, sendo observado que à medida que aumentava a porcentagem de uso de pó de vidro, apresentava-se melhora nos resultados de resistência a tração, no qual o traço T-100% se provou o de melhor desempenho em comparação aos demais traços.

## 5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar a viabilidade da aplicação do pó de vidro como substituto da areia em misturas asfálticas usinadas a quente. Para isso, buscou realizar a comparação dos materiais e de traços de concreto asfáltico usinado a quente utilizando proporções de substituição em 0%, 20%, 50% e 100%. Além disso, esta análise tornou-se necessária observando a quantidade de exploração de agregados naturais e a baixa reciclagem de vidros no Brasil.

A produção do pó de vidro mostrou-se eficaz utilizando o ensaio de abrasão “Los Angeles”, no qual foi utilizado o material passante na peneira de nº 10 (2,00 mm). Sendo assim, observa-se a partir da análise granulométrica que o pó de vidro apresenta valores na faixa de grãos grossos, médios e finos, semelhantes aos encontrados na areia utilizada para a composição da mistura asfáltica convencional.

Ainda assim, verificou que para as misturas asfálticas confeccionadas com proporções de substituição de 20%, 50% e 100% do agregado natural pelo pó de vidro, apresentaram resultados adequados para a aplicação da faixa de trabalho C. Portanto, a substituição parcial e total da areia na mistura asfáltica não demonstrou alterações significativas na composição granulométrica do traço, mostrando que a aplicação do pó de vidro na composição de pavimentos asfálticos pode ser uma alternativa sustentável, sem que haja necessidade de ajustes para o encaixa da faixa estabelecida em Norma.

Já no que se refere a análise microscópica realizada, pode-se observar que a areia utilizada na pesquisa possui formato de grãos homogêneo ao longo de toda a sua composição. Já para o pó de vidro, observa-se que não há semelhanças entre os formatos dos cacos de vidro, notando-se uma composição heterogênea ao longo de sua composição. Assim, esta característica apresentada pelos agregados analisando implicam diretamente nos parâmetros volumétricos medidos, a exemplo do volume de vazios.

Em relação aos parâmetros volumétricos analisados como,  $V_v$ , VCB, VAM e RBV, notou-se que para os parâmetros volume de vazios, vazios cheios de betume e vazios do agregado mineral, todas as misturas confeccionadas com substituição da areia pelo pó de vidro atenderam aos requisitos estabelecidos pela Norma DNIT 031/2006. Porém, para a relação betume vazios apenas T-20% e T-50% atenderam aos requisitos normativos. E, para o traço com 100% de substituição da areia,

constatou-se alteração significativa no RBV, onde este resultado está diretamente relacionado a um maior teor de ligante, uma vez que, a presença de grãos menores na composição do pó de vidro, resultam em uma maior superfície específica.

No que se refere a estabilidade das misturas analisadas, os traços T-50% e T-100%, apresentaram comportamento mecânico melhor em comparação ao traço de referência. No entanto, para T-20%, houve um decréscimo na capacidade de suporte em comparação a TB, porém, permanece possuindo resultado de acordo com o definido pela Norma DNIT 031/2006.

Para o ensaio de resistência à tração, notou-se que a substituição da areia pelo pó de vidro proporcionou o aumento significativo na RT nos traços com substituição de 50% e 100% da areia, já o traço com 20% de substituição apresentou resultado dentro do estabelecido pela Norma DNIT 031/2006.

Sendo assim, através dos ensaios de comportamento mecânico, observa-se que é viável a substituição da areia pelo pó de vidro, no entanto, ressalta-se a necessidade de delimitar uma porcentagem de substituição para que atenda a todos os requisitos normativos.

Nesse contexto, através desta pesquisa foi possível verificar que o traço o qual demonstrou os melhores resultados e atendeu aos requisitos normativos foi o com substituição de 50% da areia.

Em suma, a pesquisa realizada confirmou a viabilidade da substituição da areia pelo pó de vidro em misturas asfáltica usinadas a quente. Assim, torna-se importante para que possa haver diminuição da exploração de recursos naturais, como a extração de matéria-prima para obtenção dos agregados, além da utilização do vidro como meio sustentável, uma vez que, no cenário atual do Brasil, o destino principal deste tipo de material é o aterro sanitário.

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Repetir ensaio de estabilidade Marshall no T-20%;
- Realizar dosagem para encontrar o teor ótimo de ligante para T-100%;
- Realizar substituição dos agregados graúdos com material retido na peneira de nº 10 (2,00 mm).

## REFERÊNCIAS

- ABENDEH, Raed. **Effect of Waste Glass on Properties of Asphalt Concrete Mixtures**. Jordan Journal of Civil Engineering, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication>. Acesso em: 28 de abril de 2024.
- AKERMAN, Mauro. Economia de baixo carbono: Avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnologias na indústria do vidro. **Relatório final, Ribeirão Preto, SP-dezembro de**, 2014.
- AKERMAN, Mauro. **Natureza, estrutura e propriedades do vidro**. Publicação técnica. Centro técnico de elaboração do vidro. Saint-Gobain, Vidros-Brasil, 2000.
- ALVES, Oswaldo Luiz. *et al.* A arte de fazer vidro. **Química Nova Na Escola Edição Especial**, p. 13-24, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES E PROCESSADORES DE VIDROS PLANOS. ABIVIDRO. **Entenda a importância da reciclagem do vidro**. São Paulo: ABIVIDRO, 2023. Disponível em: <[abravidro.org.br/entenda-importancia-da-reciclagem-de-vidro](http://abravidro.org.br/entenda-importancia-da-reciclagem-de-vidro)>. Acesso em: 3 de fevereiro de 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES E PROCESSADORES DE VIDROS PLANOS. ABIVIDRO. **Anuário ABIVIDRO 2009**. ABIVIDRO, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15573:2012. **Mistura asfáltica - Determinação de densidade aparente e da massa específica de corpos de prova compactados**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. ABREMA. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Publicação: dezembro de 2023. Disponível em: <[abrema.org.br/pdf/Panorama\\_2023\\_P1.pdf](http://abrema.org.br/pdf/Panorama_2023_P1.pdf)>. Acesso em: 3 de fevereiro de 2024.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.
- BAPTISTI, Edson de. *et al.* **Mineração de agregados em área urbana: planejamento integrado e recuperação ambiental**. Exacta, núm 2, 2004, pp. 203-212. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa>. Acesso em: 11 de maio 2024.
- BARROS, Carolina. **Apostila de Vidros**. Rio Grande do Sul: IFMA, 2010.
- BERNUCCI, Leidi Bariani. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. – Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.
- BRASIL. **LEI 12.305/2010, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Brasil, 2010.

CHOUHDARY, Jayvant. *et al.* **Utilization of Waste Glass Powder and Glass Composite Fillers in Asphalt Pavements**. Hindawi, Advances in Civil Engineering, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com>. Acesso em: 28 de abril de 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2021**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2021.

DE LA SERNA, Humberto Almeida. **Agregados para construção civil**. São Paulo: DNPM, Sumário Mineral, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 035/98. **Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 054/97. **Equivalente de Areia**. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 083/98. **Agregados - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 194/98. **Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 195/97. **Agregados - determinação da absorção e da massa específica do agregado gráudo**. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. 3. ed. - Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2006. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Brasília, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 095/2006 – EM. **Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material**. Brasília, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 131/2010. **Materiais Asfálticos - Determinação de ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola**. Brasília, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 136/2018-ME. **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio**. Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 136/2018 – ME. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência a tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 155/2010 – ME. **Material asfáltico - Determinação da penetração - Método de ensaio**. Brasília, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 178/2018-PRO. **Pavimentação Asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall**. Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 447/2024-ME. **Misturas asfálticas - Ensaio de estabilidade e fluência Marshall - Método de ensaio**. Brasília, 2024.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Anuário Mineral Brasileiro - 2007**. 1. ed. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2007.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Anuário Mineral Brasileiro - 2008**. 1. ed. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2008.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Anuário Mineral Brasileiro - 2009**. 1. ed. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2009.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Anuário Mineral Brasileiro - 2010**. 1. ed. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2010.

Diretoria de Estudos e Pesquisas Socioeconômicas e Análises Conjuntural – DIEPSAC. **Boletim da Mineração 2023**. 1. ed. Pará: DIEPSAC, 2023.

EWA, D. E. *et al.* **Use of waste glass fines to improve rigidity ratio of asphalt**. Civil & Environmental Engineering, 2022.

FERRÃO, W. C.; MOIZINHO, J. C. **The influence of unusual materials as prospective fillers in the hot mix asphalt**. IOP Publishing, 2017.

FERREIRA, Aline Ribeiro Lessa; LIMA, Francisco Mariano da Rocha de Souza. **Impactos ambientais e econômicos dos agregados naturais e reciclados na construção civil**. Rio de Janeiro, UFRJ, 2013.

GIACOMINI, Eliana. **MATERIAL O VIDRO**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004-2008.

Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). **Informações e análises da economia mineral brasileira**. 7. ed. Brasília, IBRAM, 2012.

Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). **Informações sobre a economia mineral brasileira 2020 – Ano base 2019**. 1. ed. – Brasília: IBRAM, 2020.

ISKENDER, Erol. *et al.* **Evaluation of the Effect of Glass Granule Size on Water Damage Performance of Asphalt Mixtures**. Turkey, Teknik Dergi, 2020. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.504698>. Acesso em: 28 de abril de 2024.

ISSA, Y. **EFFECT OF ADDING CRUSHED GLASS TO ASPHAL T MIX**. DE GRUYTER OPEN, 2016.

JAIME, Sandra Balan M.; BÓCOLI, Paula F. Janetti; DE FARIA, Taiane Bonfante. Barreira à luz de embalagens de vidro. **Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens**, v. 30, n. 2, 2018.

JIMÉNEZ, Félix Edmundo Pérez. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Lisboa: CEPISA, 2014.

LEITE, Leni Mathias Figueiredo. *et al.* **Informações básicas sobre materiais asfálticos: A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo de Gás, 2021.

MADUREIRA, Letícia Alberto Borges. a. **Misturas asfálticas: Conceituação, Materiais e Dosagem**. Módulo 2. Brasília: IPR – Instituto de Pesquisas em Transportes, 2023.

MADUREIRA, Letícia Alberto Borges. b. **Misturas asfálticas: Conceituação, Materiais e Dosagem**. Módulo 1. Brasília: IPR – Instituto de Pesquisas em Transportes, 2023.

NEVES, Gabriel Rossetto Dantas das. *et al.* **IMPLEMENTAÇÃO DA LOGÍSTICA REVERSA DO VIDRO PÓS CONSUMO: As dificuldades enfrentadas pelas indústrias de bebidas no estado de São Paulo**. São Paulo, 2021.

Owens Illinois. **Manual de Reciclagem do Vidro**. Ohio: Owens Illinois, 2024.

PANCIONATO, Denis. **Prática Sustentáveis Na Pavimentação De Vias: Impactos Positivos**. São Paulo: PAVSINAL, 2023. Disponível em: < [avsinal.com.br/praticas-sustentaveis-na-pavimentacao-de-vias/](http://avsinal.com.br/praticas-sustentaveis-na-pavimentacao-de-vias/)>. Acesso em: 18 de maio de 2024.

PEIXOTO, Viviane Zório. **A utilização do vidro moído como agregado miúdo em revestimento asfáltico: uma revisão sistemática**. Campo Grande – MS: Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, INFI, 2023.

PINTO, Salomão. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: S. Pinto, 2002.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 2007.

SILVA, Tatiane Gomes da. **ESTUDO DA APLICAÇÃO DE PÓ DE VIDRO NA EXECUÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTOS**. São Luís – MA, 2021. Monografia (graduação) – Universidade Estadual do Maranhão, UEMA, 2021.

SIMONE, A. *et al.* **Experimental application of waste glass powder filler in recycled dense-graded asphalt mixtures**. Road Materials and Pavement Design, 2017.

SOARES, Jorge Barbosa; CAVALCANTE, Verônica Teixeira Franco. Dosagem" passo a passo". Fortaleza, UFCE, 2000.

Vila Betume. **Pavimentação sustentável | Entenda a importância de aplicá-la.** Cariacica: Vila Betume, 2021. Disponível em: < <https://vilabetume.com.br/pavimentacao-sustentavel-entenda-a-importancia-de-aplica-la/> >. Acesso em: 18 de maio de 2024.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Tabela 13 - Dados da análise granulométrica da brita 1

Peneira n° (mm)	Massa retida em cada peneira (g)	% retido	Acumulado retido em cada peneira (g)	Passante (g)	% passante
50	0	0	0	1000,27	100,00
38	0	0	0	1000,27	100,00
25	0	0	0	1000,27	100,00
19	10,96	1,10	10,96	989,31	98,90
12,5	927,71	92,75	938,67	61,6	6,16
9,5	60,46	6,04	999,13	1,14	0,11
4,8	1,14	0,11	1000,27	0	0
2	0	0	1000,27	0	0
0,42	0	0	1000,27	0	0
0,18	0	0	1000,27	0	0
0,075	0	0	1000,27	0	0
<b>Soma</b>	<b>1000,27</b>	<b>100</b>			

Fonte: Autor (2024)

Tabela 14 - Dados da análise granulométrica da brita 0

Peneira n° (mm)	Massa retida em cada peneira (g)	% retido	Acumulado retido em cada peneira (g)	Passante (g)	% passante
50	0	0	0	1000,27	100,00
38	0	0	0	1000,27	100,00
25	0	0	0	1000,27	100,00
19	0	0	0	1000,27	100,00
12,5	0	0	0	1000,27	100,00
9,5	91,65	9,16	91,65	908,62	90,84
4,8	582,59	58,25	674,24	326,03	32,58
2	312,07	31,20	986,31	13,96	1,38
0,42	13,4	1,34	999,71	0,56	0,04
0,18	0,29	0,03	1000	0,27	0,01
0,075	0,1	0,01	1000,1	0,17	0
<b>Soma</b>	<b>1000,1</b>	<b>100</b>			

Fonte: Autor (2024)

Tabela 15 - Dados da análise granulométrica do pó de pedra

Peneira nº (mm)	Massa retida em cada peneira (g)	% retido	Acumulado retido em cada peneira (g)	Passante (g)	% passante
50	0	0	0	1000,05	100,00
38	0	0	0	1000,05	100,00
25	0	0	0	1000,05	100,00
19	0	0	0	1000,05	100,00
12,5	0	0	0	1000,05	100,00
9,5	0	0	0	1000,05	100,00
4,8	7,48	0,75	7,48	992,57	99,25
2	217,18	21,72	224,66	775,39	77,54
0,42	432,86	43,28	657,52	342,53	34,25
0,18	166,96	16,70	824,48	175,57	17,56
0,075	73,33	7,33	897,81	102,24	10,22
Fundo	102,24	10,22	1000,05	0	0,00
<b>Soma</b>	<b>1000,05</b>	<b>100</b>			

Fonte: Autor (2024)

Tabela 16 - Dados da análise granulométrica da areia

Peneira nº (mm)	Massa retida em cada peneira (g)	% retido	Acumulado retido em cada peneira (g)	Passante (g)	% passante
50	0	0	0	1000,01	100,00
38	0	0	0	1000,01	100,00
25	0	0	0	1000,01	100,00
19	0	0	0	1000,01	100,00
12,5	0	0	0	1000,01	100,00
9,5	0	0	0	1000,01	100,00
4,8	2,12	0,21	2,12	997,89	99,79
2	13	1,30	15,12	984,89	98,49
0,42	599,61	59,96	614,73	385,28	38,53
0,18	372,54	37,25	987,27	12,74	1,27
0,075	7,73	0,77	995	5,01	0,50
Fundo	5,01	0,50	1000,01	0,00	0,00
<b>Soma</b>	<b>1000,01</b>	<b>100</b>			

Fonte: Autor (2024)

Tabela 17 - Dados da análise granulométrica do pó de vidro

<b>Peneira nº (mm)</b>	<b>Massa retida em cada peneira (g)</b>	<b>% retido</b>	<b>Acumulado retido em cada peneira (g)</b>	<b>Passante (g)</b>	<b>% passante</b>
50	0	0	0	1000	100,00
38	0	0	0	1000	100,00
25	0	0	0	1000	100,00
19	0	0	0	1000	100,00
12,5	0	0	0	1000	100,00
9,5	0	0	0	1000	100,00
4,8	0	0	0	1000	100,00
2	0	0	0	1000	100,00
0,42	649,87	64,99	649,87	350,13	35,01
0,18	189,94	18,99	839,81	160,19	16,02
0,075	95,04	9,50	934,85	65,15	6,51
Fundo	65,15	6,52	1000	0,00	0,00
<b>Soma</b>	<b>1000</b>	<b>100</b>			

Fonte: Autor (2024)

## APÊNDICE B – FAIXAS DE TRABALHO

Tabela 18 - Faixa de Trabalho para TB

Peneira		% Passante da Mistura	Faixa C	
n°	mm		Mínima	Máxima
2"	50,00	100	-	-
1 1/2"	38,00	100	-	-
1"	25,00	100	-	-
3/4"	19,00	99,84	100,00	100,00
1/2"	12,50	85,92	80,00	100,00
3/8"	9,50	81,35	70,00	90,00
n° 4	4,80	57,75	44,00	72,00
n° 10	2,00	37,54	22,00	50,00
n° 40	0,42	15,86	8,00	26,00
n° 80	0,18	6,28	4,00	16,00
n° 100	0,075	3,63	2,00	10,00

Fonte: Autor (2024)

Tabela 19 - Faixa de Trabalho para T-20%

Peneira		% Passante da Mistura	Faixa C	
n°	mm		Mínima	Máxima
2"	50,00	100	-	-
1 1/2"	38,00	100	-	-
1"	25,00	100	-	-
3/4"	19,00	99,84	100,00	100,00
1/2"	12,50	85,92	80,00	100,00
3/8"	9,50	81,35	70,00	90,00
n° 4	4,80	57,75	44,00	72,00
n° 10	2,00	37,56	22,00	50,00
n° 40	0,42	15,78	8,00	26,00
n° 80	0,18	6,57	4,00	16,00
n° 100	0,075	3,74	2,00	10,00

Fonte: Autor (2024)

Tabela 20 - Faixa de Trabalho para T-50%

Peneira		% Passante da Mistura	Faixa C	
n°	mm		Mínima	Máxima
2"	50,00	100	-	-
1 1/2"	38,00	100	-	-
1"	25,00	100	-	-
3/4"	19,00	99,84	100,00	100,00
1/2"	12,50	85,92	80,00	100,00
3/8"	9,50	81,35	70,00	90,00
n° 4	4,80	57,75	44,00	72,00
n° 10	2,00	37,56	22,00	50,00
n° 40	0,42	15,78	8,00	26,00
n° 80	0,18	6,57	4,00	16,00
n° 100	0,075	3,74	2,00	10,00

Fonte: Autor (2024)

Tabela 21 - Faixa de Trabalho para T-100%

Peneira		% Passante da Mistura	Faixa C	
n°	mm		Mínima	Máxima
2"	50,00	100	-	-
1 1/2"	38,00	100	-	-
1"	25,00	100	-	-
3/4"	19,00	99,84	100,00	100,00
1/2"	12,50	85,92	80,00	100,00
3/8"	9,50	81,35	70,00	90,00
n° 4	4,80	57,77	44,00	72,00
n° 10	2,00	37,68	22,00	50,00
n° 40	0,42	15,50	8,00	26,00
n° 80	0,18	7,75	4,00	16,00
n° 100	0,075	4,22	2,00	10,00

Fonte: Autor (2024)

## APÊNDICE C – PARÂMETROS FÍSICOS DOS CP'S

Tabela 22 - Massa do CP em condições distintas

<b>Traço</b>	<b>Corpo de Prova</b>	<b>Massa Seca (g)</b>	<b>Massa Saturada (g)</b>	<b>M. Saturada Sup. Seca (g)</b>
TB	CP-1	1190,81	701,51	1195,1
	CP-2	1186,34	699,44	1189,98
	CP-3	1189,6	699,68	1192,97
	CP-4	1185,96	698,3	1190,01
	CP-5	1193,61	704,4	1197,91
	CP-6	1186,95	699,83	1191,34
T-20%	CP-7	1192,93	705,77	1200,49
	CP-8	1190,06	701,23	1194,14
	CP-9	1183,64	695,67	1187,02
	CP-10	1195,89	705,58	1199,61
	CP-11	1187,05	698,31	1190,86
	CP-12	1183,53	696,12	1187,36
T-50%	CP-13	1194,82	702,39	1198,29
	CP-14	1189,36	699,39	1192,91
	CP-15	1189,22	697,27	1192,67
	CP-16	1190,44	701,19	1194,66
	CP-17	1192,6	700,96	1196,34
	CP-18	1189,28	700,31	1193,27
T-100%	CP-19	1192,61	696,24	1197,44
	CP-20	1190,31	693,19	1194,73
	CP-21	1189,43	692,8	1194,92
	CP-22	1188,68	695,63	1192,32
	CP-23	1186,77	690,69	1191,09
	CP-24	1186,09	691,2	1192,18

Fonte: Autor (2024)

Tabela 23 - Parâmetros Físicos dos CP's

<b>Traço</b>	<b>CP</b>	<b>GMB (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Mea (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vv</b>	<b>VCB</b>	<b>VAM</b>	<b>RBV</b>
TB	CP-1	2,41	2,41	3,74	11,31	15,04	75,16
	CP-2	2,42	2,41	3,50	11,33	14,84	76,39
	CP-3	2,41	2,40	3,78	11,30	15,08	74,95
	CP-4	2,41	2,40	3,76	11,30	15,07	75,02
	CP-5	2,42	2,41	3,50	11,33	14,83	76,43
	CP-6	2,41	2,41	3,64	11,32	14,96	75,65
T-20%	CP-7	2,41	2,40	3,69	11,30	14,99	75,36
	CP-8	2,41	2,41	3,57	11,31	14,89	76,00
	CP-9	2,41	2,40	3,79	11,29	15,08	74,87
	CP-10	2,42	2,41	3,32	11,34	14,66	77,36
	CP-11	2,41	2,40	3,75	11,29	15,04	75,09
	CP-12	2,41	2,40	3,78	11,29	15,07	74,94
T-50%	CP-13	2,41	2,40	3,63	11,29	14,93	75,65
	CP-14	2,41	2,40	3,61	11,29	14,91	75,77
	CP-15	2,40	2,39	3,99	11,25	15,24	73,82
	CP-16	2,41	2,41	3,51	11,31	14,82	76,29
	CP-17	2,41	2,40	3,71	11,28	14,99	75,24
	CP-18	2,41	2,41	3,51	11,31	14,81	76,32
T-100%	CP-19	2,38	2,37	4,60	11,15	15,75	70,78
	CP-20	2,37	2,37	4,85	11,12	15,97	69,63
	CP-21	2,37	2,36	5,03	11,10	16,13	68,81
	CP-22	2,39	2,39	4,05	11,22	15,27	73,45
	CP-23	2,37	2,36	4,92	11,11	16,03	69,32
	CP-24	2,37	2,36	5,08	11,10	16,18	68,58

Fonte: Autor (2024)

## APÊNDICE D – ENSAIO DE ESTABILIDADE MARSHALL

Tabela 24 - Dimensões dos corpos de prova

Corpo de Prova	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Corpo de Prova	Altura (mm)	Diâmetro (mm)
CP-1	62,70	102,55	CP-13	63,25	101,95
	62,40	102,70		63,30	102,10
	62,60	102,70		63,00	102,05
	62,50	102,60		63,20	102,10
CP-2	63,40	101,90	CP-14	62,05	102,90
	63,45	101,80		61,95	102,95
	63,30	102,00		61,85	103,00
	63,30	102,00		61,80	102,90
CP-3	62,95	101,85	CP-15	64,00	102,05
	62,70	102,00		63,70	101,95
	62,90	102,00		64,10	101,80
	62,80	102,00		63,80	101,90
CP-4	62,40	102,95	CP-16	63,40	102,25
	62,45	102,90		63,10	102,05
	62,55	102,70		63,05	102,00
	62,30	102,80		63,20	102,35
CP-5	63,50	101,85	CP-17	62,30	102,75
	63,55	101,80		62,20	102,70
	63,60	101,85		62,50	102,80
	63,60	101,90		62,45	102,90
CP-6	61,70	102,90	CP-18	62,80	102,20
	62,00	102,85		62,70	102,20
	62,00	102,70		62,90	101,95
	61,90	102,80		62,75	102,05
CP-7	64,40	101,95	CP-19	64,00	101,90
	64,15	102,10		64,10	102,10
	64,20	102,00		63,90	101,90
	64,40	101,95		64,00	102,00
CP-8	63,85	101,95	CP-20	62,20	102,85
	63,70	101,80		62,40	102,90
	63,65	101,90		62,70	102,75
	63,80	101,80		62,80	102,95
CP-9	61,75	102,90	CP-21	64,10	102,45
	61,60	102,80		64,05	102,30
	62,00	102,90		64,40	102,10
	61,85	102,90		64,20	102,20
CP-10	63,30	101,95	CP-22	63,60	101,90
	63,00	102,15		63,50	101,95
	63,25	101,90		63,40	101,80
	63,00	102,00		63,55	101,85

CP-11	63,35	102,00	CP-23	63,35	102,75
	63,20	102,05		63,20	102,90
	63,15	101,90		63,40	102,80
	63,10	101,95		63,35	102,70
CP-12	61,80	102,60	CP-24	63,80	102,00
	62,00	102,80		64,00	102,00
	61,80	102,65		63,90	101,90
	61,95	102,75		64,10	102,00

Fonte: Autor (2024)

Tabela 25 - Resultados do ensaio de estabilidade Marshall

Traço	Corpo de Prova	Estabilidade (kg)	Fator de correção	Estabilidade Corrigida (kgf)
TB	CP-1	635,19	1,02	647,90
	CP-2	835,44	1	835,44
	CP-3	757,93	1,01	765,51
T-20%	CP-7	650,27	0,98	637,26
	CP-8	626,58	0,99	620,32
	CP-9	615,82	1,04	640,45
T-50%	CP-13	846,21	1,01	854,67
	CP-14	865,59	1,04	900,21
	CP-15	818,22	0,99	810,03
T-100%	CP-19	904,34	0,99	895,30
	CP-20	874,20	1,02	891,68
	CP-21	869,89	0,99	861,19

Fonte: Autor (2024)

## APÊNDICE E – ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

Tabela 26 - Resultados do ensaio de resistência à tração

Traço	Corpo de Prova	Carga Corrigida (kgf)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Resistência à Tração (MPa)
TB	CP-4	613,66	62,43	102,84	0,60
	CP-5	645,96	63,40	101,85	0,62
	CP-6	648,11	61,90	102,81	0,64
T-20%	CP-10	680,41	63,14	102,00	0,66
	CP-11	561,99	63,20	101,98	0,54
	CP-12	749,31	61,89	102,70	0,74
T-50%	CP-16	633,04	63,19	102,16	0,61
	CP-17	710,56	62,36	62,36	1,14
	CP-18	714,86	62,79	62,79	1,13
T-100%	CP-22	757,93	63,51	63,51	1,17
	CP-23	654,57	63,33	63,33	1,02
	CP-24	732,09	63,95	63,95	1,12

Fonte: Autor (2024)