

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL DOUTORADO**

ALEX GOMES PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS CONTENDO MATERIAL
FRESADO E LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO COM GRAFITE**

São Leopoldo

2023

ALEX GOMES PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS CONTENDO MATERIAL
FRESADO E LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO COM GRAFITE**

Tese de doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

Orientador(a): Prof(a). Dra. Regina Célia Espinosa Modolo

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes

São Leopoldo

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação - CIP

P436d Pereira, Alex Gomes.

Desenvolvimento de misturas asfálticas contendo material fresado e ligante asfáltico modificado com grafite. / Alex Gomes Pereira. – São Leopoldo, 2023.

153 f. ; 30 cm.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, 2023.

Orientação Profa. Dra. Regina Célia Espinosa Modolo.

1. Engenharia Civil. 2. Mistura Asfáltica. 3. Ligante Modificado.
4. Grafite. I. Título. II. Modolo, Regina Célia Espinosa.

CDU 625.85(043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dares muito mais do que eu preciso, e por me abençoares muito mais do que eu mereço.

Aos meus pais, Alberto de Souza Pereira e Marinês Gomes de Araújo Pereira, por todo apoio e paciência. Por estarem sempre presentes em todos os momentos mais importantes da minha vida. Obrigado por me derem tanta força e amor.

Aos meus irmãos, Alberto Gomes Pereira e Mariane Vitória Gomes Pereira, pelo constante apoio, incentivo e confiança.

Aos professores Regina Célia Espinosa Modolo e Carlos Alberto Mendes Moraes, pela orientação, apoio, dedicação e ensinamentos prestados na realização deste trabalho.

Aos professores que tive ao longo do curso no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Ao meu grande amigo, segundo pai e professor, Benício de Moraes Lacerda, por sempre está presente em toda minha vida acadêmica.

Aos laboratoristas Tailson Campos Melo, Pablo Henrique Freitas Alves e Michael Anderson Maia de Brito, pela colaboração na realização dos ensaios.

Ao meu aluno de graduação Cleversson Rossi e a Secretaria Municipal de Obras e Pavimentação pela doação do material fresado utilizado nesta pesquisa.

Às empresas Madecon Engenharia – Construtora e Participações e Refinaria Isaac Sabbá pela doação dos materiais empregados neste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

RESUMO

No Brasil, o estudo e o desenvolvimento de misturas asfálticas modificadas são justificados em razão da escassez de matéria prima e do elevado contingente de sintomas patológicos identificados nas rodovias. Dentro deste contexto, o desenvolvimento de novas misturas asfálticas é um assunto que desperta elevado interesse, mas que requer pesquisas mais aprofundadas. Esta pesquisa teve por objetivo geral verificar a viabilidade técnica de utilização de material fresado e ligante asfáltico modificado com grafite como componente de misturas asfálticas. Nela são apresentados e discutidos resultados referentes ao comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas simultaneamente por material reciclado e por ligante modificado utilizando grafite comercial e cominuído em moinho de alta energia. Para atingir os objetivos específicos desta pesquisa, para além da caracterização dos materiais testados (resíduos e grafite) foram produzidas dez composições de concretos asfálticos, sendo elas: CA-REF110, CA-REF120, CA-GRAF210, CA-GRAF220, CA-GRAF310, CA-GRAF320, CA-GRAFC410, CA-GRAFC420, CA-GRAFC510 e CA-GRAFC520 que foram submetidas aos testes de resistência à tração indireta estática e módulo de resiliência. Os ensaios de resistência mecânica mostraram um comportamento superior nas composições produzidas simultaneamente com material reciclado e ligante modificado com grafite cominuído na ordem de 31,86% e 19,81%, seguido pelo comportamento das misturas produzidas com material reciclado e ligante modificado com grafite comercial na ordem de 66,56% e 84,69% comparada as misturas convencionais. Na avaliação do módulo de resiliência, as misturas CA-GRAF210, CA-GRAF220, CA-GRAF310 e CA-GRAF320 apresentaram módulo de resiliência superior em 9,55%, 12,76%, 17,36% e 17,18%, respectivamente, frente aos concretos convencionais. Enquanto as misturas CA-GRAFC410, CA-GRAFC420, CA-GRAFC510 e CA-GRAFC520 evidenciaram um aumento de módulo de resiliência na ordem de 20,77%, 18,39%, 25,39% e 26,74% em comparação às composições de referência, constituindo-se, assim, num forte instrumento para proporcionar melhorias ao setor rodoviário do país. Portanto, os resultados dos ensaios mecânicos evidenciaram um desempenho positivo das misturas asfálticas modificadas. Tal conclusão contribui para ratificar que o emprego do RAP em composições asfálticas pode ser uma alternativa aos agregados convencionais para a produção de misturas asfálticas.

Palavras-chave: Mistura asfáltica; Ligante modificado; Grafite.

ABSTRACT

In Brazil, the study and development of modified asphalt mixtures are justified due to the scarcity of raw materials and the high number of pathological symptoms identified on the highways. Within this context, the development of new asphalt mixtures is a subject that arouses great interest, but requires further research. The general objective of this research was to verify the technical viability of using milled material and graphite-modified asphalt binder as a component of asphalt mixtures. It presents and discusses results regarding the mechanical behavior of asphalt mixtures produced simultaneously with recycled material and modified binder using commercial graphite and comminuted in a high-energy mill. In order to achieve the specific objectives of this research, in addition to the characterization of the tested materials (waste and graphite), ten asphalt concrete compositions were produced, namely: CA-REF110, CA-REF120, CA-GRAF210, CA-GRAF220, CA-GRAF310 , CA-GRAF320, CA-GRAFC410, CA-GRAFC420, CA-GRAFC510 and CA-GRAFC520 that were subjected to static indirect tensile strength and modulus tests. The mechanical resistance tests showed a superior behavior in the compositions produced simultaneously with recycled material and binder modified with comminuted graphite in the order of 31.86% and 19.81%, followed by the behavior of the mixtures produced with recycled material and binder modified with commercial graphite in the order of 66.56% and 84.69% compared to conventional mixtures. In the evaluation of the resilience modulus, the mixtures CA-GRAF210, CA-GRAF220, CA-GRAF310 and CA-GRAF320 presented superior resilience modulus in 9.55%, 12.76%, 17.36% and 17.18%, respectively, compared to conventional concrete. While the mixtures CA-GRAFC410, CA-GRAFC420, CA-GRAFC510 and CA-GRAFC520 showed an increase of modulus of resilience in the order of 20.77%, 18.39%, 25.39% and 26.74% compared to the reference compositions, thus constituting a strong instrument to provide improvements to the road sector in the country. Therefore, the results of the mechanical tests showed a positive performance of the modified asphalt mixtures. This conclusion contributes to confirm that the use of RAP in asphalt compositions can be an alternative to conventional aggregates for the production of asphalt mixtures.

Keywords: Asphalt mix; Modified linker; Graphite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema das camadas de um pavimento	21
Figura 2 - Estruturas representativas do fracionamento do ligante asfáltico pelo método SARA	33
Figura 3 – Representação esquemática de diferentes alótropos de carbono: a) Grafite natural; b) Diamante; c) Fulereno; d) Nanotubo de carbono de parede simples; e) Nanotubo de carbono de parede múltipla; f) Grafeno	43
Figura 4 – a) Arranjo cristalino; b) Estrutura hexagonal.....	44
Figura 5 – Diagrama mostrando as diferentes formas de impacto e fragmentação que podem ocorrer durante o processo de moagem no moinho de bolas.....	46
Figura 6 – a) Moinho de bolas; b) cilindro com as esferas de aço.....	47
Figura 7 - Estrutura global das composições asfálticas.....	49
Figura 8 – Vista do trecho da Rua Tenreiro Aranha em que foi realizada a fresagem, cujo material retirado foi utilizado como objeto de estudo.	50
Figura 9 – Serviço de fresagem na Rua Tenreiro Aranha: a) processo de fresagem; e b) retirada do material fresado.....	51
Figura 10 – Coleta do material fresado.....	51
Figura 11 – Granulometria do material fresado	52
Figura 12 – Agregados	53
Figura 13 – Curvas granulométricas dos materiais.....	54
Figura 14 – Grafite comercial.....	55
Figura 15 – Moinho de bolas e o cilindro com as esferas de aço	56
Figura 16 – Imagens do grafite: a) antes da moagem; b) após o processo de moagem de 4 horas.....	57
Figura 17 - Equipamento utilizado no ensaio de penetração	61
Figura 18 - Ponto de Amolecimento.....	62
Figura 19 - Processo de preparação dos corpos de prova: a) pesagem do agregado; b) pesagem do ligante; c) aquecimento dos agregados minerais; d) adição do ligante asfáltico; e) homogeneização da mistura; f) processo de envelhecimento; g) introdução da mistura no molde; h) compactação dos corpos de prova; i) processo de cura dos corpos de prova; e j) extração dos corpos dos corpos de prova	65
Figura 20 - Ensaio de módulo de resiliência	70

Figura 21 - Micrografias comparativas do precursor (grafite comercial e moído): a) grafite comercial; b) grafite moído por 30 minutos; c) grafite moído por 1 hora; d) grafite moído por 4 horas	73
Figura 22: Classificação morfológica do grafite	76
Figura 23 - Difrátogramas de raios-x, analisados individualmente a) grafite comercial; b) 30 minutos de moagem; c) 1 hora de moagem; e d) 4 horas de moagem	77
Figura 24 - Difrátogramas de raios-x do grafite comercial e moídos por diferentes tempos: 30 minutos, 1 hora e 4 horas	79
Figura 25 - Tamanho dos cristalitos (Lc002)	80
Figura 26 - Comparação da intensidade dos picos característicos (002) das amostras de grafite	81
Figura 27 - Distância interplanar das amostras em função do tempo de moagem....	82
Figura 28 - Distribuição granulométrica dos materiais.....	84
Figura 29 - Resultados de penetração dos CAP 50/70, CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%, CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%, CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%, CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%.....	86
Figura 30 - Resultados de ponto de amolecimento dos CAP 50/70, CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%, CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%, CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%, CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%.....	87
Figura 31 - Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura, CAP 50/70.....	89
Figura 32 - Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura, CAP 50/70 + 4% grafite comercial	90
Figura 33 - Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura, CAP 50/70 + 4% grafite cominuído.....	91
Figura 34 - Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura, CAP 50/70 + 5% grafite comercial.....	92
Figura 35 - Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura, CAP 50/70 + 5% grafite cominuído.....	93
Figura 36 - Composição granulométrica da mistura de agregados com 10% de RAP	95
Figura 37 - Composição granulométrica da mistura de agregados com 20% de RAP	95

Figura 38 - Resistência à tração por compressão diametral.....	99
Figura 39 - Módulo de resiliência.....	101
Figura 40 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-REF110	131
Figura 41 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-REF120	131
Figura 42 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAF210.....	132
Figura 43 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAF220.....	133
Figura 44 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAF310.....	133
Figura 45 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAF320.....	134
Figura 46 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAFC410	134
Figura 47 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAFC420	135
Figura 48 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAFC510	135
Figura 49 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAFC520	136
Figura 50 - Características de projeto, CA-REF110	136
Figura 51 - Características de projeto, CA-REF120	137
Figura 52 - Características de projeto, CA-GRAF210.....	137
Figura 53 - Características de projeto, CA-GRAF220.....	138
Figura 54 - Características de projeto, CA-GRAF310.....	138
Figura 55 - Características de projeto, CA-GRAF320.....	139
Figura 56 - Características de projeto, CA-GRAFC410	140
Figura 57 - Características de projeto, CA-GRAFC420	141
Figura 58 - Características de projeto, CA-GRAFC510	142
Figura 59 - Características de projeto, CA-GRAFC520	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de moinhos bolas de alta energia	47
Tabela 2 - Resultados dos ensaios de caracterização do material fresado.....	53
Tabela 3 – Caracterização física dos agregados virgens.....	54
Tabela 4 - Critérios para indicação de resultados	61
Tabela 5 - Dosagens dos concretos asfálticos	64
Tabela 6 - Especificações para misturas do tipo concreto asfáltico	67
Tabela 7 - Resultados de área superficial específica obtidos nos diferentes tempos de moagens.....	83
Tabela 8 - Temperaturas de confecção das misturas betuminosas	94
Tabela 9 – Parâmetros volumétricos correspondente as misturas.....	96
Tabela 10 - Resultado da granulometria do material fresado.....	128
Tabela 11 – Granulometria brita 1	128
Tabela 12 – Granulometria brita 0.....	129
Tabela 13 – Granulometria pó de brita	129
Tabela 14 - Resultados de penetração do CAP	130
Tabela 15 - Resultados de ponto de amolecimento do CAP.....	130

LISTA DE SIGLAS

4PB	Pneumatic 4 Point Bending Apparatus
A	Massa ao ar da amostra seca
AAT	Advanced Asphalt Technologies
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AMP	Asfaltos Modificados por Polímeros
B	Massa na condição saturada de superfície seca
<i>B</i>	Largura na metade da altura do pico mais intensivo de difração
C	Massa da amostra imersa em água
ARRA	Asphalt Recycling And Reclaiming Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	Brunauer, Emmett e Teller
CA	Concreto Asfáltico
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CA-REF110	Concreto Asfáltico com Agregados Virgens, 10% de RAP e CAP 50/70
CA-REF120	Concreto Asfáltico com Agregados Virgens, 20% de RAP e CAP 50/70
CA-GRAF210	Concreto Asfáltico com Agregados Virgens, 10% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%
CA-GRAF220	Concreto Asfáltico com Agregados Virgens, 20% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%).
CA-GRAF310	Concreto Asfáltico com Agregados Virgens, 10% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%
CA-GRAF320	Concreto Asfáltico com Agregados Virgens, 20% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%
CA-GRAFC410	Concreto Asfáltico com Agregados Virgens, 10% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%
CA-GRAFC420	Concreto Asfáltico com Agregados Virgens, 20% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%

CA-GRAFC510	Concreto Asfáltico com Agregados Virgens, 10% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%
CA-GRAFC520	Concreto Asfáltico com Agregados Virgens, 20% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
C/C	Carbono/Carbono
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CIR	Cold In-Place Recycling
CPCR	Central Plant Cold Recycling
CPHR	Central Plant Hot Recycling
cm ³	Centímetro cúbico
CNT	Confederação Nacional do Transporte
cP	Centipoise
CP	Corpo de Prova
CRFC	Compósito Carbono Reforçado com Fibras de Carbono
Cu	Cobre
D	Massa do recipiente cheio de água a 25 °C
D	Diâmetro
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DRX	Difratometria de Raios-x
E	Estabilidade
E	Massa do recipiente com a amostra e água a 25 °C
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EN	European Standard
F	Frequência de carregamento
FN	Flow Number
FRX	Fluorescência de Raios-X
FTIR	Transformada de Fourier
G	Grama
g/cm ³	Grama por metro cúbico
Ga	Massa específica real do cimento asfáltico de petróleo

Gmb	Massa Específica Aparente
Gmm	Densidade Máxima Medida
h	Altura
h	Hora
HIR	Hot In-Place Recycling
Hz	Hertz
INPA	Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
ISSO	International Organization for Standardization
ITT FOSSIL	Instituto Tecnológico de Micropaleontologia
KDOT	Kansas Department of Transportation
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
kV	Quilovolt
LabMat	Laboratório de Materiais
LAS	Varredura Linear de Amplitude
LcvMat	Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LTMN	Laboratórios Temático de Microscopia Eletrônica e Nanotecnologia
LVDT	Linear Variable Differential Transducers
m	Metro
mA	Miliampère
MAPA	MISSOURI ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION
MD	Módulo Dinâmico
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
min	Minuto
mm	Milímetro
mm/s	Milímetro por segundo
MPa	Megapascal
MSCR	Tensões Múltiplas
MMT	Argila Montmorilonita Pura
N	Newton
N	Número Médio de Camadas por Empilhamento

NA	Nanoargila
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NTC	Nanotubo de Carbono
OMMT	Modificado por Argila Montmorilonita Organofílica
PET	Polietileno Tereftalato
PG	Grau de Desempenho
RAP	Pavimento asfáltico reciclado/Recycled Asphalt Pavement
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção Civil e Demolição
RO	Rondônia
RS	Resíduos Sólidos
RT	Resistência à Tração
RTCD	Resistência à Tração por Compressão Diametral
RTFOT	Rolling Thin-Film Oven Test
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
s	Segundo
S	Massa na Condição Saturada de Superfície Seca
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SEMOB	Secretaria Municipal de Obras e Pavimentação
t	Tempo
T	Temperatura de ensaio
ton	Tonelada
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
Va	Volume de vazios
RBV	Volume de vazios com betume
VFA	Volume de Vazios Preenchidos com Ligante
VAM	Volume de Vazios do Agregado Mineral

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Hipótese.....	17
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo Geral.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	17
1.3 Justificativa e Relevância da Pesquisa.....	18
1.3.1 Ambiental.....	19
1.3.2 Técnica	19
1.3.3 Ineditismo e originalidade	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 Pavimentos Rodoviários	21
2.1.1 Revestimento Asfáltico	22
2.2 Pavimentos Alternativos	23
2.2.1 Reciclagem de Pavimentos	24
2.2.1.1 <i>Reciclagem a quente</i>	26
2.2.1.1.1 <i>Reciclagem HIR</i>	27
2.2.1.1.2 <i>Reciclagem CPHR</i>	28
2.2.1.1.3 <i>Misturas asfálticas produzidas com RAP</i>	28
2.3 Ligante Asfáltico	31
2.3.1 Composição química do ligante asfáltico.....	32
2.3.2 Ligantes Asfálticos Modificados.....	35
2.4 Materiais Carbonosos	42
2.4.1 Grafite.....	44
2.5 Moagem de Alta Energia	45
2.5.1 Moinho Spex.....	47
3. METODOLOGIA.....	49
3.1 Etapa 1 – Obtenção dos Materiais.....	50
3.1.1 RAP	50
3.1.2 Agregados	53
3.1.3 Ligante asfáltico convencional	55
3.1.4 Grafite.....	55
3.2 Etapa 2 – Processo de preparação do grafite	55

3.3 Etapa 3 – Caracterização das amostras de grafite	57
3.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	57
3.3.2 Análise de distribuição do tamanho de partículas por espalhamento de luz (Granulometria por Difração a Laser)	58
3.3.3 Área Superficial (Brunauer, Emmett e Teller - BET).....	58
3.3.4 Difração de Raios-X (DRX)	59
3.4 Etapa 4 – Modificação do Ligante Asfáltico 50/70 e Caracterização dos Ligantes Modificados.....	59
3.4.1 Propriedades CAP	61
3.4.1.1 <i>Ensaio de penetração</i>	61
3.4.1.2 <i>Ponto de amolecimento</i>	62
3.4.2 Propriedades Reológicas	62
3.4.2.1 <i>Viscosidade Aparente</i>	62
3.5 Etapa 5 – Projeto das Composições Asfálticas em Laboratório	62
3.6 Etapa 6 - Moldagem dos Corpos de Prova Asfálticos.....	68
3.7 Etapa 7 - Avaliação das Propriedades Mecânicas de Composições Asfálticas Usinadas a Quente Produzidas com Grafite Comercial e Cominuído	68
3.7.1 Resistência Mecânica	68
3.7.2 Rigidez	69
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
4.1.1 Grafite.....	73
4.1.1.1 <i>MEV</i>	73
4.1.1.2 <i>DRX</i>	76
4.1.1.2.1 <i>Característica dos grafites cominuídos</i>	79
4.1.1.3 <i>BET</i>	83
4.1.1.4 <i>Granulometria por difração a laser</i>	84
4.1.2 Ligantes Asfálticos.....	85
4.1.2.1 <i>Avaliação das propriedades empíricas</i>	86
4.1.2.2 <i>Avaliação das propriedades reológicas</i>	88
4.2 Dosagem das Misturas Asfálticas.....	94
4.2.1 Composições Granulométricas de Projeto	94
4.2.2 Parâmetros volumétricos.....	96
4.3 Ensaio Mecânicos.....	98
4.3.1 RTCD	98

4.3.2 Módulo de resiliência	101
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	105
5.1 Conclusões	105
5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros	106
REFERÊNCIAS	108
ANEXO 1	128

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2021), o modal rodoviário é o principal meio de transporte do país, concentrando, aproximadamente, 61% da movimentação de mercadorias e 95% da movimentação de passageiros. Entretanto, 52,2% (56.970 quilômetros) da extensão das vias pavimentadas apresenta algum tipo de problema. Segundo o estudo, entre os fatores que têm contribuído para o processo de degradação precoce do pavimento é o não atendimento às imposições técnicas tanto da capacidade de suporte das camadas do pavimento quanto à qualidade dos materiais empregados no revestimento, o aumento do fluxo de veículos, aspectos ambientais, frequência e práticas de manutenção periódica. Como resultado tem-se o aparecimento de diferentes manifestações de patologias e, conseqüentemente, elevados custos de manutenção com a reparação desses pavimentos para atingir condições ideais de tráfego. Regionalmente, o boletim estatístico do CNT (2019) mostra uma pesquisa mais completa em que avalia os aspectos do pavimento geral, da sinalização e da geometria das vias, o que permite a classificação dos trechos como ótimo, bom, regular, ruim e péssimo. Em resumo, o pavimento rodoviário do estado de Rondônia (RO) se apresenta em 89,4% (1.697 km) com problema e apenas 10,6% (116 km) da extensão encontra-se com classificação denominada como sendo boa (CNT, 2019).

Considerando as atuais e as futuras necessidades do modal rodoviário, bem como as particularidades físicas, econômicas e sociais de cada região, o Plano CNT de Transporte e Logística (2018) calcula que o país precisa investir R\$ 496,1 bilhões em cerca de 980 projetos para a infraestrutura rodoviária, englobando intervenções de construção, pavimentação, duplicação, recuperação e outras atividades. Por outro lado, o governo federal investiu cumulativamente, no período de 2011 a 2020, apenas 21,3% do montante estimado no Plano CNT, o que corresponde a 105,6 bilhões de reais.

Carlesso (2017) explica que esses problemas estão relacionados ao aumento progressivo do volume de tráfego de veículos e das cargas provenientes destes, a ausência de controle eficiente destes carregamentos e o mal dimensionamento, a caracterização e a escolha de materiais. Silva e Farias (2020) também ressaltam que a deterioração verificada nos pavimentos brasileiros é causada em grande parte pelo excesso de carga por eixo dos veículos transportadores e pela falta de manutenção

das rodovias, aliada às intempéries. Esta questão tem sido amplamente debatida pelo meio técnico rodoviário e tem estimulado o interesse por soluções viáveis. Nesta temática, a ocorrência prematura da perda das características funcionais e estruturais dos pavimentos asfálticos levou ao desenvolvimento e adoção de soluções inovadoras para aumentar a vida útil das camadas asfálticas (MORENO-NAVARRO, IGLESIAS e RUBIO-GÁMEZ, 2016).

1.1 Hipótese

As deficiências presentes nos pavimentos rodoviários têm sido frequentemente avaliadas em muitas pesquisas, bem como a escassez de matérias primas usadas nessas estruturas. Deste modo, a hipótese de trabalho que orienta essa tese está relacionada à viabilidade técnica do desenvolvimento de concretos asfálticos com propriedades mecânicas e reológicas superiores à mistura convencional.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral verificar a viabilidade técnica de utilização de material fresado e ligante asfáltico modificado com grafite como componentes de misturas asfálticas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar as características físicas das amostras de grafite comercial e cominuídas;
- b) Avaliar os efeitos dos teores de incorporação dos materiais, grafite comercial e grafite cominuído, nos parâmetros volumétricos, no teor de projeto, nas propriedades empíricas do ligante asfáltico convencional (cimento asfáltico de petróleo – CAP 50/70);
- c) Avaliar, de maneira comparativa, a influência do teor de material fresado nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas; e

- d) Verificar a viabilidade técnica de utilização do material fresado e ligante asfáltico modificado com grafite como componente de misturas asfálticas.

1.3 Justificativa e Relevância da Pesquisa

Segundo Costa et al. (2021), o emprego de materiais alternativos em pavimentos consiste em alcançar uma economia significativa nos gastos, visto que são produzidos bilhões de toneladas de resíduos anualmente em todo o mundo e que podem ser reutilizados ou reciclados em aplicações de pavimentação, resultando na proteção do meio ambiente, redução do acúmulo de aterros industriais, substituição de materiais tradicionais e redução do consumo de energia, especialmente a produzida pela queima de combustíveis não renováveis, no processo de mistura e transporte de materiais virgens, além de favorecer a implementação de políticas de manutenção e recuperação de obras geotécnicas (CHEN e WANG, 2018; JAHANBAKHSI et al., 2020; COSTA et al., 2021).

Para Gonçalves (2000), a utilização de resíduos no setor da construção civil apresenta-se como uma oportunidade de contribuir sustentavelmente para o desenvolvimento do setor, dado que a indústria da construção civil consome grandes volumes de recursos finitos, tornando assim um dos setores mais indicados para absorver os resíduos sólidos (RS). Isto significa que a geotecnia pode ter um papel fundamental no gerenciamento de resíduos, por meio do desenvolvimento de pesquisas que estudem sua aplicação nas mais diversas áreas da engenharia geotécnica.

Além disso, Lee et al. (2013) e Turner et al. (2015) destacam que o uso de material reciclado promove a sustentabilidade na construção de estradas, reduzindo o consumo de energia e a emissão de gases do efeito estufa produzidos no processo de mineração de agregados naturais. Em relação a isso, Costa et al. (2021) relatam que em muitos países, diferentes tipos de materiais vêm sendo utilizados em composições asfálticas com o objetivo de agregar valor à execução, recuperação e manutenção dos pavimentos, já que estas representam técnicas sustentáveis e alternativas economicamente viáveis.

1.3.1 Ambiental

O setor de pavimentação, quando comparado com outros setores de engenharia, requer grandes extensões de áreas e mobilização de materiais geotécnicos (LUCENA, 2012). Essa situação proporciona uma alternativa para o uso de resíduos sólidos (RS) em misturas asfálticas substituindo de forma parcial ou total os materiais tradicionalmente utilizados.

Assim, com o objetivo de reduzir custos e manutenção e, ainda, mitigar a exploração dos materiais convencionais, recursos naturais não renováveis, tradicionalmente usados nessas estruturas, verifica-se na literatura diversos estudos relacionados a utilização de diferentes materiais, provenientes de processos industriais (KIM *et al.*, 2003; SPECHT, 2004; SPECHT e CERATTI, 2006; FAXINA, 2006; SPECHT *et al.*, 2007; BOCK *et al.*, 2009; SPECHT *et al.*, 2012; YAN, XU e YOU, 2015; TORRES *et al.*, 2019).

De acordo com o panorama da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019), em 2018, foram gerados no Brasil, 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU). Desse total, 40 a 60% dos RSU produzidos são provenientes da indústria da construção civil (SILVA e FERNANDES, 2012).

Entre os RSU, especificamente, resíduos de construção e demolição (RCD), destaca-se o Pavimento Asfáltico Recuperado (*Recycled Asphalt Pavement* - RAP) que vem sendo foco de atenção crescente por parte dos gestores públicos e pesquisadores, tanto pelo aumento da geração, em função de obras de pavimentação, quanto pela necessidade de otimizar a sua disposição de forma correta. Neste contexto, a possibilidade de utilização deste material em pavimentos pode se apresentar como um meio de destinação viável para este coproduto. E também reforça que a geotecnia pode ter um papel fundamental no gerenciamento de resíduos, por meio do desenvolvimento de pesquisas que avaliem sua aplicação nas mais diversas áreas da engenharia geotécnica.

1.3.2 Técnica

Na Geotecnia, uma subárea da Engenharia Civil, os pavimentos são estruturas em multicamadas que visam resistir aos esforços e assegurar uma superfície de

rolamento, com segurança e conforto, para o fluxo de veículos e aeronaves. Quando se tem pavimentos do tipo flexíveis, estes constituem-se de uma camada superior (revestimento asfáltico), responsável por transmitir as cargas às camadas inferiores (base, sub-base e o reforço do subleito) (SENÇO, 2007; BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os componentes que integram o revestimento asfáltico são um ligante usualmente obtido da destilação fracionada do petróleo que promove a aglutinação entre os agregados pétreos (graúdos, miúdos e fíler), normalmente oriundos de rochas extraídas de recursos naturais não renováveis, e, assim, tem-se uma composição responsável pelo contato direto com os esforços provenientes do tráfego e clima (PAVIANI, 2015; MOURA, 2021). Porém, ao longo de sua história, a construção de pavimentos rodoviários, enfrenta a degradação precoce, em razão do aumento de tráfego, além dos obstáculos tecnológicos e financeiros (SILVA e FARIAS, 2020; CNT, 2021).

Em vista disso, surge a necessidade de uma opção alternativa às metodologias convencionais, entre as técnicas, destacam-se reciclagem de pavimento, essas que permitem a reutilização dos pavimentos degradados como fonte de matéria prima para medidas de restauração quer seja no pavimento degradado ou em novos pavimentos (SILVA e FARIAS, 2020). A fim de favorecer a implementação de políticas de manutenção, recuperação e projetos de pavimentos mais econômicos pela sua maior adequabilidade técnica a longo prazo, e, em especial, o aumento da vida útil desses tipos de estruturas (CENTOFANTE, 2016; SILVA e FARIAS, 2020).

1.3.3 Ineditismo e originalidade

No que diz respeito aos aspectos de ineditismo e originalidade, a tese incorpora o uso de materiais modificados e aborda de forma prática a avaliação do desempenho de misturas de concreto asfáltico modificado, com base nas propriedades reológicas e mecânicas adequadas para aplicação em obras de pavimentação, o que aumenta a importância deste trabalho e pode trazer subsídios para aplicação de novas técnicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

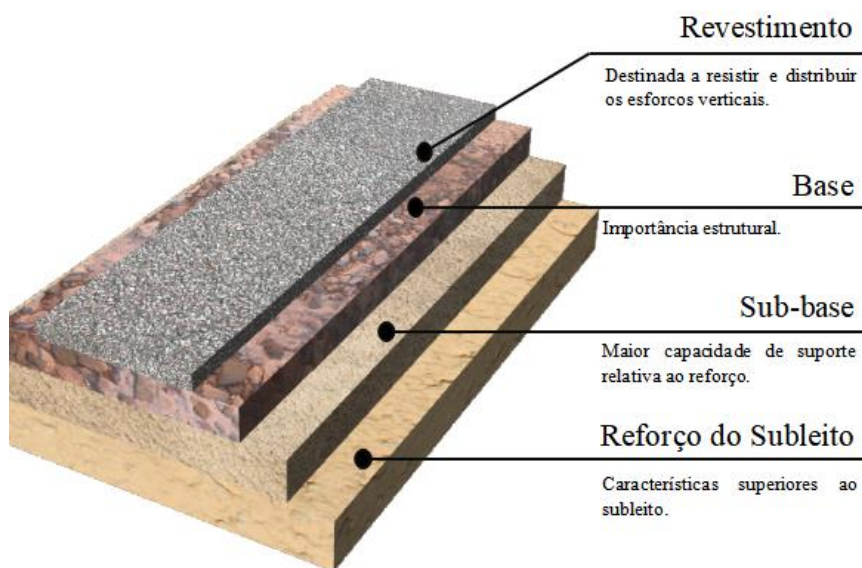
O presente capítulo descreve e introduz os temas que serão apresentados e discutidos neste trabalho.

2.1 Pavimentos Rodoviários

Os pavimentos rodoviários compreendem um conjunto complexo de múltiplas camadas de espessuras finitas, composto por diferentes materiais, que visam resistir, de forma direta, tensões provenientes do tráfego e condições ambientais, e transmiti-las de forma atenuada ao subleito, limitando as tensões verticais produzidas na superfície pela ação do tráfego e, conseqüentemente, garantindo aos usuários segurança, conforto e melhores condições de deslocamento, assim como a proteção da estrutura do pavimento contra as deformações excessivas durante a vida útil de projeto (YODER e WITCZAK, 1975; SENÇO, 2007; BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008; PAPAGIANNAKIS e MASSAD, 2008; KIM, 2008; MARQUES e MENDES, 2012; SOL-SÁNCHEZ *et al.*, 2015; MORENO-NAVARRO e RUBIO-GÁMEZ, 2016).

Eles são constituídos, em regra, por quatro camadas, sendo elas, o revestimento de base asfáltica, a base, a sub-base e o reforço do subleito, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema das camadas de um pavimento



Fonte: Autor (2023).

2.1.1 Revestimento Asfáltico

O revestimento asfáltico é a camada superior do pavimento que tem como objetivo, resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las às camadas inferiores, impermeabilizando o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança). Na composição dos pavimentos flexíveis, o revestimento asfáltico é uma das soluções mais tradicionais empregadas na construção e restauração de vias urbanas (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Entre os tipos de revestimento, segundo Balbo (2007), Mallick *et al.* (2017), Chen e Wang (2018) e Mo *et al.* (2020), o concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) ou apenas concreto asfáltico (CA), também chamado de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) consiste no mais comum e tradicional revestimento asfáltico empregado em obras de pavimentação asfáltica em todo o mundo. Trata-se de uma mistura a quente previamente dosada por agregados minerais (naturais ou artificiais), material de enchimento (pó de pedra, finos de calcários ou cimento Portland) e CAP (BALBO, 2007; HAFEEZ *et al.*, 2012; MILIUTENKO, BJÖRKLUND e CARLSSON, 2013). É também amplamente empregado para a construção de pistas de aeroportos, estacionamentos, túneis, plataformas de pontes e outras instalações (CHEN e WANG, 2018; MO *et al.*, 2020).

De acordo com a *National Asphalt Pavement Association* (NAPA, 2011) e *European Asphalt Pavement Association* (EAPA, 2011), estima-se que cerca de 1,6 trilhão de toneladas de misturas asfálticas sejam produzidas anualmente para a construção, reabilitação e manutenção das infraestruturas rodoviárias pavimentadas.

A expectativa de vida dos revestimentos de CBUQ varia de alguns anos a várias décadas. Ao final de sua vida útil, os revestimentos de CBUQ precisam ser retirados, gerando uma grande quantidade de RCD de pavimentação (YANG e LEE, 2016; MO *et al.*, 2020; YAO *et al.*, 2021). Para se ter uma ideia de grandeza da geração desses resíduos, no Estados Unidos da América, por exemplo, cerca de 100 milhões de toneladas de pavimentos asfálticos são fresados anualmente nos procedimentos de recapeamento e alargamento de pistas (MISSOURI ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION – MAPA, 2019).

Estes materiais fresados, no entanto, sem uma destinação correta, formam uma fonte significativa de RS não-inertes. Portanto, a reciclagem do pavimento asfáltico tornou-se uma prática comum para economia de redução de custos e preservação do meio ambiente (ALAM *et al.*, 2010; WANG, 2016). Todavia, apesar da disponibilidade abundante de material fresado em todo o mundo, na Europa, os dados de 19 países disponibilizado à EAPA mostram apenas 47% do RAP existente foi utilizado em aplicações de pavimentação em 2012, enquanto 22 milhões de toneladas foram usadas em outras aplicações ou estocadas (EAPA, 2012).

2.2 Pavimentos Alternativos

Segundo Silva e Farias (2020), o meio técnico rodoviário tem trabalhado para buscar novas tecnologias e desenvolver soluções mais econômicas de restauração dos pavimentos. Entre os novos métodos estudados, que a cada dia ganham força entre os pesquisadores, está a utilização de RS na construção desses pavimentos.

Bardini (2008), por exemplo, estudou a viabilidade do aproveitamento do rejeito de cinzas da queima da casca de *Pinus* como fíler na produção de misturas asfálticas. As propriedades mecânicas das amostras de misturas asfálticas foram analisadas por meio dos ensaios de RTCD, módulo de resiliência, vida de fadiga, dano por umidade induzida, estabilidade e fluência Marshall. Com base nos resultados mecânicos, verificou melhor desempenho dos concretos asfálticos contendo fíler mineral quando comparados aos concretos com resíduo. Bardini (2008) relata, no entanto, que, embora os resultados indicarem uma piora de características com a utilização do resíduo, no geral, os valores obtidos foram superiores aos limites mínimos estabelecidos pelas normas técnicas.

Kato e Souza (2017) avaliaram a adição de um resíduo proveniente da mineração do cobre em concretos asfálticos. As composições asfálticas foram submetidas ao ensaio de abrasão. Em linhas gerais, os resultados mostraram que houve uma redução considerável do desgaste a abrasão (em 48% e 62%) com a adição de 20% e 25% de resíduo em relação a areia.

Kato (2018) avaliou o desempenho de misturas asfálticas com resíduo de mineração de cobre frente às propriedades Marshall do cobre em sua composição. Os resultados obtidos na pesquisa permitiu concluir que as composições asfálticas com resíduo de cobre apresentaram uma significativa redução do teor de cimento

asfáltico. Tal fato foi justificado em função das características granulométricas do rejeito que possibilitou maior fechamento dos vazios nas misturas. Os autores ainda complementam, que houve uma significativa melhora dos parâmetros Marshall com adição do rejeito.

Portanto, estudos voltados ao tema são imprescindíveis para aprimorar o uso de diferentes materiais nas composições de concreto asfáltico, buscando garantir o adequado desempenho dos componentes estruturais executados com este material e, conseqüentemente, mitigando a perda de funcionalidade e estrutural dos pavimentos rodoviários.

2.2.1 Reciclagem de Pavimentos

Outra metodologia que vem ganhando força é a reciclagem das misturas asfálticas, que além de apresentar rápida execução e custos competitivos, preza pelos aspectos ambientais (destinação aos resíduos resultantes da fresagem de pavimentos asfálticos e minimizando dos impactos aos recursos naturais para a obtenção de agregados virgens) (ASPHALT INSTITUTE, 2007; SILVA, 2011).

Segundo a resolução CONAMA 307 (BRASIL, 2002), os resíduos da construção civil (RCC) são definidos como resíduos provenientes das atividades de construção, reformas, demolições, preparação e escavação de terrenos, compreendendo concreto em geral, tijolos, blocos cerâmicos, metais, argamassa, madeiras, entre outros. De maneira geral, os resíduos de asfalto se enquadram na classe II B da NBR 10004 (ABNT, 2004), uma vez que por serem considerados inertes são caracterizados por ensaios “submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor” (NBR 10006/2004).

Conforme o art. 3º da resolução CONAMA 307 de 2002, o RAP se enquadra na Classe A, visto que são o grupo de resíduos que podem ser reaproveitados na própria obra ou encaminhados a usinas de reciclagem de agregados.

De acordo com Bonfim e Domingues (1995), a reciclagem dos revestimentos asfálticos vem sendo empregada no Brasil desde meados da década de 80, especialmente depois da introdução das fresadoras de asfalto no país. Esta técnica consiste na reciclagem do material da capa asfáltica fresado, em seguida utilizado

com revestimento ou *binder* a partir da inserção de agentes rejuvenescedores que recuperam as características do ligante asfáltico original envelhecido.

A reciclagem de pavimentos rodoviários consiste em uma técnica de restauração estrutural de um pavimento flexível degradado, que surge como alternativa às técnicas de restauração reabilitação convencionais e, também, proporciona inúmeras vantagens em benefícios econômicos e ambientais (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, 2006; CUNHA, 2010; VIDAL *et al.*, 2013; CHEN e WANG, 2018; CURADO, 2019; MO *et al.*, 2020). Entre as vantagens da tecnologia de reciclagem do pavimento asfáltico, o DNIT (2006), Kazmierowski (2008), Cunha (2010), Zhang *et al.*, (2011), Liu (2012), Turk *et al.*, (2016) e Curado (2019), relatam: a conservação de matéria-prima, ligantes asfálticos e de energia, assim como a preservação ambiental e, ainda, a reabilitação das condições geométricas presentes, além da diminuição dos custos com implantação.

Apesar de vários motivos influência rem a utilização de material reciclado no pavimento asfáltico, a economia e benefícios ambientais se destacam com os principais fatores (CENTOFANTE, 2016). Estudo realizado pela *Federal Highway Administration* (FHWA) em 1996 mostrou que os benefícios do material fresado vão além da redução de gastos. Segundo Silva e Farias (2020), a reciclagem dos pavimentos é uma alternativa útil, visto que diminui o consumo de recursos minerais e a quantidade de ligante asfáltico virgem para produção de misturas asfálticas. Os autores ainda complementam, que a utilização de material reciclado também economiza energia, reduz os custos de transporte necessários para obtenção dos agregados e conservação dos recursos naturais.

Além disso, usando material fresado, pode-se diminuir a quantidade de RCD dispostos em aterros, em que a reciclagem de asfalto velho cria um ciclo que melhora o uso dos recursos naturais e ampara a indústria do pavimento asfáltico. Nesta perspectiva, a reciclagem de pavimentos asfálticos possibilita economia de espaço em aterros industriais, bem como redução de custos logísticos no transporte (FHWA, 1996).

Para Momm e Domingues (1995), a reciclagem de pavimentos compreende a reciclagem total ou parcial dos materiais presentes no revestimento asfáltico, base, sub-base ou em ambas as camadas. O Manual de Restauração de Pavimentos

Asfálticos (DNIT, 2006) apresenta informações sobre as diversas opções de reciclagem, que dependem de diferentes fatores, os quais são citados a seguir:

- Análise dos defeitos do pavimento;
- Determinação das prováveis causas dos defeitos, a partir dos estudos de laboratório e de campo;
- Informações do projeto e histórico das intervenções de conservação;
- Custos;
- Histórico do desempenho do pavimento asfáltico;
- Restrições quanto à geometria da rodovia (horizontal e vertical);
- Fatores ambientais; e
- Tráfego.

Shao *et al.* (2017) e Cao *et al.* (2019) descrevem que os métodos de reciclagem de pavimentos podem ser divididos em:

- Reciclagem a frio (*central plant cold recycling – CPCR*);
- Reciclagem em central a quente (*Central Plant Hot Recycling – CPHR*);
- Reciclagem a quente no local ou *in situ* (*Hot In-Place Recycling – HIR*); e
- Reciclagem a frio *in situ* (*Cold In-Place Recycling – CIR*).

Segundo Bilitewski *et al.* (1994), os métodos de reciclagem do asfalto variam muito em termos de efetividade, maquinários, requisitos de energia, vida útil dos produtos, impactos ambientais, dependência do clima e outros efeitos colaterais.

2.2.1.1 Reciclagem a quente

Para Lima (2003), a reciclagem a quente consiste, basicamente, em um processo em que o revestimento asfáltico existente é removido por meio da utilização de um equipamento fresador, capaz de arrancar a camada superficial do pavimento a uma profundidade pré-determinada, o qual é transportada a um local de estocagem para que seja reciclada em usina.

De acordo com DNIT (2006), Cunha (2010) e Silva (2011) a reciclagem a quente é dividida em dois métodos de reciclagem, reciclagem HIR e reciclagem CPHR.

Atualmente, a reciclagem a quente dos revestimentos asfálticos do pavimento, é feita por meio das seguintes normas regulamentadoras:

- a) DNIT 033/2021-ES – Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação do Serviço; e
- b) DNIT 034/2005-ES – Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de Serviço.

2.2.1.1.1 Reciclagem HIR

Segundo o *Asphalt Recycling And Reclaiming Association* (ARRA, 1997), DNIT (2006) e Cunha (2010), a técnica de reciclagem HIR compreende o processo de corte e fragmentação do pavimento existente ou parte dele (espessura pré-determinada), com a finalidade de reduzir as dimensões do material para ser misturada a frio na construção de uma nova camada, onde são misturados com agente rejuvenescedor, agregado e cimento asfáltico.

Entre as vantagens do método é não precisar de transporte e armazenamento, resultando em menores gastos quando comparado com a reciclagem CPHR (AZEVEDO e CARDOSO, 2003). As fissuras superficiais podem ser eliminadas, assim como afundamentos no pavimento podem ser corrigidos e os asfaltos envelhecidos podem ser rejuvenescidos, onde a interrupção do tráfego é mínima e os custos são minimizados (ARRA, 1997).

Além de ser um método mais econômico, a reciclagem HIR possui outras vantagens, como: dispensa do uso de depósitos, construção rápida, alta qualidade, aproveitamento de todo material existente no pavimento, menor consumo de energia e redução do impacto ambiental (BRANCO, SANTOS e PEREIRA, 2008; SILVA, OLIVEIRA e JESUS, 2012; PAN *et al.*, 2021).

Branco, Santos e Pereira (2008) ressaltam que apesar da reciclagem HIR possuir diversas vantagens, o método apresenta algumas desvantagens, apesar de algumas poderem ser mitigadas. Entre as desvantagens, destacam-se a dependência do processo às condições locais de execução, as quais podem afetar a qualidade do serviço; metodologia dependente das condições meteorológicas; e avarias de alguns equipamentos mais complexos no local.

2.2.1.1.2 Reciclagem CPHR

De acordo com Cunha (2010), no método de reciclagem CPHR, o material fresado é transportado para a central de produção de misturas betuminosas, sendo em seguida introduzido na produção das misturas asfálticas, os quais que podem ser aplicadas no local de origem do próprio material fresado ou outras obras. Entre as vantagens do método, destaca-se maior qualidade e confiabilidade do produto alcançado (AZEVEDO e CARDOSO, 2003; CUNHA, 2010). A principal desvantagem associada desta técnica consiste no custo adicional no transporte do material, do local da obra para a central e desta novamente para o local de aplicação.

2.2.1.1.3 Misturas asfálticas produzidas com RAP

De acordo com Mo *et al.* (2020), os estudos feitos nessa área estão concentrados principalmente na utilização do RAP. Diversos estudos envolvendo materiais fresados comprovam que esses materiais são capazes de gerar resultados positivos na melhoria das propriedades de engenharia geotécnica (AL-BAYATI, TIGHE e ACHEBE, 2018; DING *et al.*, 2019; JAHANBAKHSI *et al.*, 2020; YAO *et al.*, 2021).

Um estudo realizado por Valdés *et al.* (2011) avaliou o efeito de altas taxas de RAP sobre o comportamento mecânico de misturas de concreto asfáltico. Para isto, os autores avaliaram duas misturas semi-densas de tamanho máximo de agregado de 12 e 20mm e contendo 40% e 60% de material fresado, respectivamente, usadas para a recuperação de um trecho da rodovia. Foram avaliadas as propriedades mecânicas de módulo de rigidez, RTCD e comportamento de rachaduras e fadiga. O estudo concluiu que altas taxas de material reciclado aumenta a rigidez e que os parâmetros de fadiga de misturas recicladas e mistura de alto módulo são muito similares.

Sabouri *et al.* (2015) investigaram o desempenho de misturas RAP a partir da análise do comportamento quanto à porcentagem do material reciclado incorporado e às alterações do teor de CAP e do tipo de ligante. No estudo foram desenvolvidos nove concretos asfálticos em laboratório, dosadas por meio da metodologia Superpave, sendo empregado dois tipos de ligantes (PG 58-28 e PG 64-28) e teores de material reciclado de 0%, 20% e 40%. Os autores também variaram o teor ótimo

de ligante em -0,5% e +0,5% do teor de projeto obtido. As amostras foram submetidas ao ensaio de módulo complexo e fadiga. Para avaliar as propriedades de fadiga foi utilizado o modelo de dano contínuo viscoelástico simplificado (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model – S-VECD*) e para a previsão do desempenho de fadiga a longo prazo foi empregado o software *Layered ViscoElastic analysis for Critical Distresses* (LVECD).

Os resultados obtidos indicaram que o uso do CAP menos consistente se mostrou como um tratamento promissor entre os diferentes parâmetros, visto que as previsões do software LVECD evidenciaram uma melhora relevante na resistência à fadiga. Quanto às previsões do programa LVECD de trincas por fadiga para os pavimentos finos e grossos foi observado que altas porcentagens de RAP podem ser toleradas facilmente com o aumento da espessura da camada. Os autores concluíram, que para incorporar altas porcentagens de RAP nas misturas asfálticas seria necessário incluir o uso de um ligante de base macia e controlar o teor ótimo de ligante asfáltico, ou aumentar a espessura da camada de asfalto.

Por meio da pesquisa desenvolvida por Nascimento *et al.* (2013), comprovou-se que o uso de material fresado em diferentes proporções é capaz de gerar melhorias no desempenho e resistência mecânica do asfalto. Os mesmos autores investigaram o desempenho mecânico de composições asfálticas recicladas com diferentes proporções de material fresado de pavimentos antigos: 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. O estudo concluiu que as amostras asfálticas que têm em sua composição 10%, 15% e 20% de material fresado podem ser aplicadas em pavimentos rodoviários.

Centofante *et al.* (2018) estudaram o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado em diferentes porcentagens. Foram estudadas misturas contendo 10%, 20% e 30% de adição de fresado. Na referida pesquisa, os concretos asfálticos foram submetidos aos ensaios de rigidez, resistência mecânica e adesão/coesão. Para avaliação de rigidez, os autores realizaram ensaios de módulo de resiliência e módulo dinâmico uniaxial. Para o ensaio de módulo de resiliência, as amostras asfálticas foram ensaiadas em uma *Universal Test Machine* (UTM), com frequências de carregamento: 5Hz, 10Hz e 25Hz, com coeficiente de Poisson igual à 0,30 e temperatura de 25°C. O ensaio de módulo dinâmico também foi determinado na UTM, com frequências: 25Hz, 20Hz, 10Hz, 5Hz, 2Hz, 1Hz, 0,5Hz, 0,2Hz, 0,1Hz e 0,01Hz e temperaturas: -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C. Quanto à resistência mecânica, as composições asfálticas foram avaliadas pelo

ensaio de RTCD e *flow number* (FN). Em relação a perda de adesão/coesão, duas técnicas laboratoriais foram utilizadas (dano por umidade induzida e perda de massa). Para determinação do dano por umidade induzida foi o ensaio Lottman Modificado e a perda de massa foi realizado pelo ensaio de desgaste Cântabro.

No geral, os resultados de rigidez e RTCD indicaram superioridade dos concretos asfálticos com material fresado em comparação ao concreto asfáltico de referência, em torno de 30% e 40%, respectivamente, para as misturas asfálticas com 30% de agregado reciclado, quando comparados com os valores obtidos nos mesmos ensaios para a mistura convencional. Quanto aos resultados de FN, os autores observaram que o material fresado aumenta a resistência em quase 90%, com a adição de 30% deste material, comparada ao concreto de referência. Por fim, a perda de massa e resistência ao efeito deletério da água, Centofante *et al.* (2018) verificaram que não houve perdas significativas quanto ao desgaste e adesividade, ou seja, as perdas encontradas não comprometem a utilização deste material em pavimentos rodoviários.

Além disso, Centofante *et al.* (2018) constataram uma redução do teor de ligante asfáltico adicionado na mistura. Conforme os autores, estas reduções são em virtude de o material fresado conter ligante envelhecido. A redução de ligante novo variou de 12,9% até 35,7% para misturas com 10% e 30% de material reciclado, respectivamente.

Já Cunha *et al.* (2018) estudaram a adição de material fresado em misturas asfálticas. No estudo apresentado foram produzidas composições com incorporação de 50% e 100% de material fresado. As amostras foram submetidas aos ensaios de estabilidade, fluência e RTCD. Em linhas gerais, os resultados obtidos indicaram que teores de incorporação estudados atenderam os preconizados das normas técnicas.

Além disso, o uso de RAP em novas misturas asfálticas possibilita a redução da utilização de materiais virgens, economia de custos e diminuição do uso de recursos naturais (ZHU, MA e DONG, 2020). Por conseguinte, o uso de RAP em misturas do tipo CBUQ é economicamente atraente (NOFERINI *et al.*, 2017). Nesta perspectiva, Chen e Wang (2018) e Xiao *et al.* (2019) relatam que a aplicação de RAP como material residual na estrutura do pavimento diminui a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera levando à melhoria das condições de meio ambiente e de saúde das populações.

Por outro lado, alguns estudos demonstraram que altos teores de RAP na mistura asfáltica afeta o desempenho das misturas asfálticas. O projeto do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) revelou que a adição de alto RAP afeta as propriedades volumétricas do concreto asfáltico, o que pode causar influências negativas nas propriedades mecânicas das misturas betuminosas (WEST *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2016). Exemplos disso podem ser encontrados nos trabalhos de McDaniel *et al.* (2000) e Al-Qadi *et al.* (2012), que verificaram que a alta porcentagem de RAP reduz a resistência à fadiga e/ou fratura.

McDaniel *et al.* (2000) e Islam *et al.* (2014) observaram que resistência à fissuração por trincas térmicas do concreto asfáltico diminui com altos teores de RAP. Já os resultados obtidos pelo órgão estadunidense *Kansas Department of Transportation* (KDOT) indicaram que altos teores de RAP resultam na fissuração prematura de concreto asfáltico (SABAHFAR, HOSSAIN e HOBSON, 2016).

2.3 Ligante Asfáltico

O asfalto utilizado em revestimentos asfálticos é aglomerante orgânico, de coloração escura, derivado da destilação do petróleo, sendo constituído principalmente por betume (cerca de 99,5% em sua composição) e outros elementos químicos em pequena quantidade, como: oxigênio, nitrogênio e enxofre (ROBERTS *et al.*, 1996). O betume é uma substância aglutinante (adesivo termoviscoelástico) escura, impermeável à água e pouco reativo, que se liquefaz quando aquecido. Com relação a sua constituição, o asfalto é uma mistura química complexa composta principalmente por hidrocarbonetos e heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e os metais vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

No Brasil, os materiais que são aplicados em pavimentação asfáltica são denominados de cimento asfáltico de petróleo (CAP), também chamados de ligantes asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2008). Segundo Senço (2007) e Melo (2014), o CAP é definido como o asfalto produzido por meio da evaporação natural de depósitos localizados na superfície da terra (asfaltos naturais) ou por destilação do petróleo com propriedades específicas para aplicação em serviços de pavimentação. Apresentam natureza complexa e podem apresentar comportamento elástico e viscoso, conforme os fatores como temperatura, nível de tensão e tempo de carregamento, por isso são frequentemente chamados de materiais viscoelásticos (BARTH, 1962).

De acordo com *Advanced Asphalt Technologies* (AAT), em sua norma NCHRP 673, os ligantes asfálticos correspondem a 5% em massa das composições asfálticas, sendo os 95% restantes constituídos pelos agregados minerais. Em termos volumétricos, estas proporções representam aproximadamente 10% de ligantes, 85% de agregados e 5% de vazios.

2.3.1 Composição química do ligante asfáltico

A composição química do asfalto tem grande relevância nas propriedades físicas do ligante asfáltico e afeta diretamente o comportamento das misturas betuminosas (MELO, 2014). Deste modo, o conhecimento da química do ligante asfáltico é essencial para o entendimento das problemáticas que ocorrem na pavimentação.

De acordo Leite (1999) e Fernandes (2007), os ligantes asfálticos são formados por: 90% a 95% de misturas complexas de hidrocarbonetos de elevada massa molar e estrutura química diferentes, 5% a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e alguns metais) com ligações covalentes. Leite (1999) descreve que os ligantes asfálticos brasileiros apresentam baixos teores de enxofre e de compostos organometálicos e alta concentração de nitrogênio em sua composição química.

Conforme o manual o MS-26 do *Asphalt Institute* (2011), as proporções aproximadas de cada fração dos principais componentes do ligante asfáltico de petróleo são:

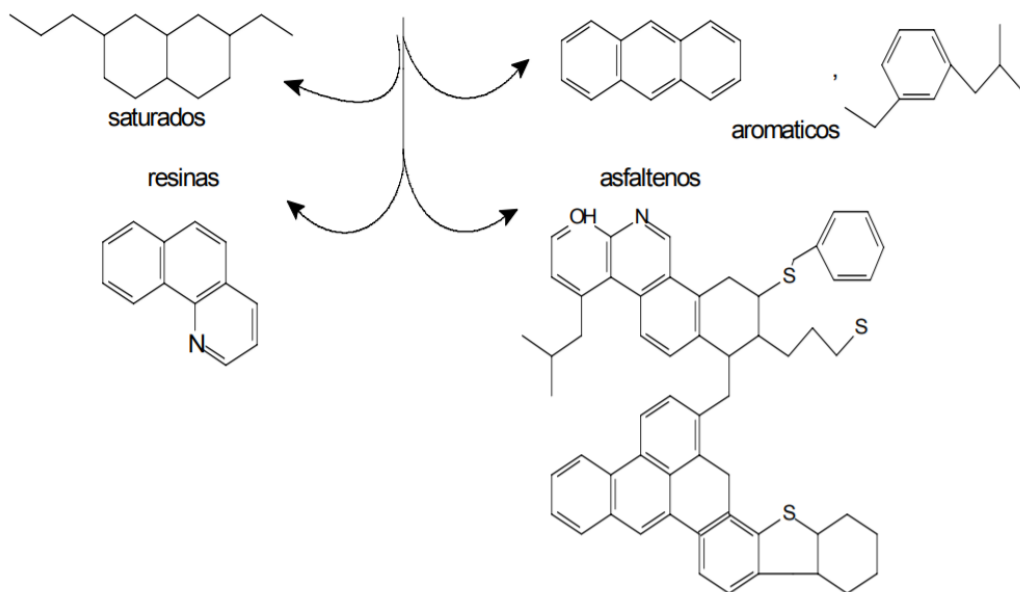
- Carbono (80,2% a 84,3%);
- Hidrogênio (9,8% a 10,8%);
- Nitrogênio (0,2% a 1,2%);
- Enxofre (0,9% a 6,6%);
- Oxigênio (0,4% a 1,0%);
- Níquel (10 ppm a 139 ppm);
- Vanádio (7 ppm a 1590 ppm);
- Ferro (5 ppm a 147 ppm);
- Manganês (0,1 ppm a 3,7 ppm);
- Cálcio (1 ppm a 335 ppm);
- Magnésio (1 ppm a 134 ppm); e

- Sódio (6 ppm a 159 ppm).

Para Morales *et al.* (2004), as características do CAP dependem da origem e dos procedimentos de refino que o originou. Ainda segundo os autores, o ligante asfáltico é constituído basicamente por duas frações, os maltenos que são formados pelos compostos saturados, aromáticos e resinas, que apresentam baixa polaridade e pelos asfaltenos que compõem a fração mais pesada e polar do material asfáltico.

Nos Centros de Pesquisas da Europa e nos Estados Unidos, a técnica de separação do ligante asfáltico mais empregada é o método SARA, o qual compreende em separá-lo em compostos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos (MASSON, PELLETIER e COLLINS, 2001) (Figura 2).

Figura 2 - Estruturas representativas do fracionamento do ligante asfáltico pelo método SARA



Fonte: Masson, Pelletier e Collins (2001).

As propriedades do CAP estão associadas com a proporção relativa dos constituintes destas frações (CORBETT e PETROVSKI, 1978).

Os asfaltenos são sólidos amorfos castanhos ou pretos, contendo carbono e hidrogênio em adição com nitrogênio, enxofre ou oxigênio, e correspondem a fração mais pesada e polar do ligante asfáltico. São materiais complexos, com grupos estruturais distintos e uma distribuição de massa molecular bastante elevada. A

proporção de asfaltenos tem uma grande influência nas características reológicas do ligante asfáltico, visto que o seu aumento resulta em um material mais duro e com menor penetração, com um ponto de amolecimento mais elevado e com maior viscosidade (READ e WHITEOAK, 2003; FERNANDES, 2007).

No ligante asfáltico, os asfaltenos correspondem cerca de 5% a 25% do ligante asfáltico e se encontram como agregados moleculares com as resinas adsorvidas na superfície ou como moléculas isoladas (READ e WHITEOAK, 2003; FERNANDES, 2007).

As resinas possuem carbono e hidrogênio em adição a pequenas proporções de nitrogênio, enxofre ou oxigênio. São sólidas ou semissólidas com coloração marrom escuro e apresentam uma natureza polar fortemente adesiva. São agentes dispersivos ou peptizantes para os asfaltenos e a proporção entre as duas frações conduz a natureza do material asfáltico, isto é, o CAP pode se comportar como uma solução (sol), ou como uma gelatina (gel), o que vai orientar esses comportamentos é a parcela de resinas e de asfaltenos presentes no material (READ e WHITEOAK, 2003).

Os aromáticos possuem o menor peso molecular dentro do ligante asfáltico e se configuram com a maior parte do meio dispersivo dos asfaltenos peptizados. Os aromáticos correspondem 40% a 65% do betume e são líquidos viscosos de cor castanho-escuros. Consistem em uma classe de compostos orgânicos, formados por 2 a 7 anéis não saturados, podem ser de origem natural, produzidos nas queimadas ou por microorganismos em seu metabolismo, ou de origem antropogênica, sendo essa a principal fonte dos aromáticos, tendo ainda uma grande capacidade para dissolver outras moléculas hidrocarbonadas de elevado peso molecular (NETTO *et al.*, 2000; READ e WHITEOAK, 2003).

Os saturados compõem as cadeias de hidrocarbonetos lineares ou ramificadas e são óleos viscosos não polares de coloração clara. O peso molecular médio dos saturados são parecidos ao dos aromáticos e esta fração equivale entre 5% e 20% do CAP (READ e WHITEOAK, 2003).

Segundo Leite (1999) e Fernandes (2007), os componentes do CAP têm significativas influências nas características deste, dentre elas destaca-se:

- Saturados: influência m de forma negativa a suscetibilidade térmica. Em grandes concentrações tornam o ligante asfáltico de menor consistência;

- Aromáticos: atuam como plastificantes, colaborando para a melhoria de suas propriedades físicas;
- Resinas: melhoram a ductibilidade e dispersão dos asfaltenos e estes contribuem com o aumento da viscosidade e tornando os asfaltos menos susceptíveis a variações de temperatura; e
- Asfaltenos: contribuem para a melhoria da suscetibilidade térmica e aumento da viscosidade.

2.3.2 Ligantes Asfálticos Modificados

A aplicação de ligantes asfálticos modificados vem crescendo e ganhando espaço em aplicações geotécnicas nas últimas décadas. Esse fato justifica-se por motivos diversos como o aparecimento do grande avanço das indústrias químicas, a consagração da utilização de materiais poliméricos em obras de reforços e diversas vantagens que surgem como economia, segurança, durabilidade, dentre outras.

Considerando esta abordagem, em tempos mais recentes, diferentes trabalhos foram desenvolvidos em diversas partes do mundo (KUMAR *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2018; BINDU *et al.*, 2020; XIN *et al.*, 2020; VAMEGH, AMERI e CHAVOSHIAN, 2020).

No Brasil (mais especificamente no Grupo Rodovias Verdes/Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina; Laboratório de Polímeros e Inovação de Materiais da Universidade Federal do Ceará; Sistemas de Infraestrutura Sustentáveis da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; e Pavimentos e Novos Materiais de Pavimentos e Novos Materiais) observa-se o desenvolvimento de diferentes trabalhos que têm desenvolvido pesquisa na área de ligantes asfálticos modificados.

Pamplona *et al.* (2012), por exemplo, avaliaram as propriedades de ligantes asfálticos modificados simultaneamente por nanoargilas (Cloisite 20^a, vermiculita e montmorilonita) e por polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS). Para preparação dos compósitos asfálticos foi utilizado um misturador de alto cisalhamento Silverson, modelo L4R. As amostras foram mantidas sob agitação contínua por 2 horas, sob velocidade de 2.000RPM e temperatura de 160°C. Ao fim do processo de modificação, as amostras (exceto o ligante modificado pela nanoargila Cloisite 20^a) foram caracterizadas por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, suscetibilidade térmica e viscosidade rotacional. Os autores verificaram que os

ligantes modificados apresentaram redução da penetração, aumento do ponto de amolecimento e aumento da viscosidade frente ao ligante convencional.

Em relação às propriedades reológicas, Pamplona *et al.* (2012) observaram que todos os ligantes modificados mostraram maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) e menores valores de ângulo de fase (δ) quando comparados ao ligante convencional, o que significa uma maior resistência destes ligantes ao fenômeno de deformação permanente.

Jahromi, Andalibizade e Vossough (2010) também estudaram a modificação de ligantes asfálticos com nanoargila. Na pesquisa, foram empregadas as nanoargilas comerciais Cloisite-15^a e Nanofil-15, sendo estudadas os teores de incorporação de 2%, 4% e 7% nas matrizes asfálticas, em massa do ligante asfáltico 60/70. Os autores observaram uma maior influência na introdução da nanoargila do tipo Cloisite-15^a nas propriedades de penetração e ponto de amolecimento do ligante asfáltico modificado, que mostrou redução significativa na penetração e aumento do ponto de amolecimento. Além das análises das propriedades empíricas do ligante asfáltico, os autores também conduziam os ensaios de resistência à fadiga por compressão diametral das misturas asfálticas modificadas com 7% das nanoargilas. Os ensaios foram realizados nas temperaturas de 5 e 25°C. Os resultados mostraram que na temperatura de 5°C, as composições asfálticas modificadas mostraram desempenho inferior quando confrontadas com o concreto convencional. Entretanto, os autores observaram que na temperatura de 25°C, as misturas asfálticas apresentaram desempenhos superiores quando comparadas à mistura de referência.

Melo (2014) avaliou o desempenho reológico e mecânico de composições asfálticas modificadas com nanoargila (NA) e nanotubo de carbono (NTC). A NA comercial utilizada na pesquisa foi a Dellite 67G, fornecida pela *Laviosa Chimica Mineraria*. O NTC foi adquirido junto à *Nanostructured & Amorphous Materials, Inc.* Nestes nanocompósitos asfálticos foram estudadas a inclusão dos nanomateriais variando em 3% para NA e 2% para NTC em relação à massa do ligante asfáltico de petróleo 50/70. O procedimento de modificação do ligante convencional foi realizado em um misturador de alto cisalhamento, modelo L5M-A Silverson, com velocidade de 5.000RPM, em temperatura de 150°C, durante um período de compatibilização de 1 hora e 40 minutos. Quanto à caracterização dos ligantes estudados, o autor verificou a diminuição na penetração e o aumento no ponto de amolecimento com a adição de materiais nanométricos. Segundo os resultados obtidos, a incorporação de

nanomateriais ao ligante asfáltico proporcionou a diminuição da penetração e o aumento do ponto de amolecimento dos ligantes, tornando os materiais menos suscetíveis à temperatura. Ainda segundo o autor, todos os ligantes modificados exibiram maior viscosidade se comparados à matriz asfáltica de referência.

Além dos estudos no campo dos ligantes modificados pelos nanomateriais, Melo (2014) também estudou o desempenho mecânico e reológico dos concretos asfálticos produzidos com os nanocompósitos. Para isto, as misturas asfálticas foram avaliadas por meio dos ensaios de ação deletéria da água (Lottman Modificado), deformação permanente, no simulador de tráfego Orniéreur, e ensaios de fadiga e de módulo complexo.

No que diz respeito aos testes que avaliaram a ação deletéria da água (Lottman Modificado) e deformação permanente por meio do simulador francês *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), o autor observou melhor comportamento das misturas asfálticas nanomodificadas quando comparadas com a mistura convencional. Para avaliação das características reológicas das amostras estudadas, Melo (2014) utilizou o aparelho 4PB. As amostras foram submetidas às frequências de 0,1Hz, 0,2Hz, 0,5Hz, 1Hz, 2Hz, 5Hz, 10Hz, 20Hz e 0,1Hz, temperaturas de 0°C a 30°C, com carregamento sinusoidal contínuo e amplitude de deformação de 50µm/m. Os testes reológicos mostraram que as misturas asfálticas com nanocompósitos apresentaram maiores valores de menores valores de módulo complexo E^* e menores valores de δ .

Quanto aos resultados de resistência à fadiga, novamente as misturas nanomodificadas mostraram-se superiores à mistura convencional. Por fim, o autor concluiu que, em geral, os resultados apontaram vantagens técnicas das formulações nanomodificadas frente ao concreto asfáltico convencional.

Além disso, a partir dos resultados obtidos de módulo complexo, Melo (2014) conduziu estudos com simulações numéricas por meio do software ViscoRoute 2.0. Os resultados foram aplicados às curvas de fadiga, apresentaram ganhos de desempenho, em relação ao revestimento asfáltico convencional, sendo 4,6 vezes para o revestimento modificado com 3% de NA e de 6,0 vezes para o revestimento modificado com 2% de NTC.

Dando continuidade à bem-sucedida pesquisa de nanomodificação dos ligantes asfáltico, iniciado por Melo em 2014, Marcon (2016) e Carlesso (2017) estudaram os parâmetros mecânicos e reológicos de concretos asfálticos modificados

como novos materiais. Marcon (2016) estudou misturas asfálticas nanomodificadas por polímero SBS, borracha moída de pneu, NA e NTC. As características mecânicas e reológicas das amostras foram obtidas mediante aos experimentos de resistência à ação deletéria da água no ensaio de Lottman Modificado, à deformação permanente, módulo complexo e resistência à fadiga no aparato quatro pontos.

Quanto aos resultados, as amostras nanomodificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu mostraram desempenho superiores quanto ao dano por umidade induzida. Quanto aos resultados de resistência à ação deletéria da água, as composições asfálticas nanomodificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu mostraram desempenho superiores quanto ao dano por umidade induzida. No estudo reológico, as misturas asfálticas modificadas por SBS e borracha moída de pneu apresentaram valores de E^* e δ inferiores aos valores encontrados para as misturas de nanomodificadas por nanoargila organofílica e nanotubo de carbono.

No mesmo contexto, Carlesso (2017) investigou as propriedades de ligantes asfálticos modificados simultaneamente por nanoargila e o polímero SBS. A modificação da matriz asfáltica por SBS foi conduzida em temperatura de 180°C e velocidade de cisalhamento 5.000RPM, durante um período de 180 minutos. Após a produção dos nanocompósitos, os compósitos asfálticos foram submetidos aos ensaios de ação deletéria da água (Lottman Modificado), à deformação permanente, módulo complexo e resistência à fadiga no equipamento *Pneumatic 4 Point Bending Apparatus* (4PB) e a simulações numéricas. Na avaliação do efeito da ação deletéria da água e deformação permanente, a mistura 3% NA + 2% SBS mostrou-se superior às demais. O autor apresentou módulos complexos relativamente elevados e os menores valores de ângulo de fase. Os resultados dos testes de resistência à fadiga indicaram o comportamento superior das amostras modificadas em comparação à mistura convencional. Contudo, com base nas simulações numéricas, evidenciou-se a viabilidade da mistura 3% NA + 2% SBS frente à mistura de referência. Após a realização dos ensaios, o autor constatou que a composição asfáltica modificada por nanoargila e SBS torna-se uma alternativa promissora como material aplicável em pavimentos rodoviários.

Em estudos de ligantes modificados com SBS, Modarres (2013) também estudou misturas asfálticas modificadas por SBS. No trabalho, o autor adotou o teor de 5% de SBS para modificação dos ligantes asfálticos 60/70 e 85/100, com respectivos PG 64-28 e PG 58-28. O processo de modificação consistiu na utilização

de misturador de alto cisalhamento e as misturas asfálticas foram confeccionadas por meio da metodologia Marshall. As misturas asfálticas produzidas foram avaliadas por meio do ensaio de tração indireto nas temperaturas de -10, 20 e 50°C e sob 6 níveis de tensão distintos. Os resultados mostraram que para todas as temperaturas ensaiadas, os concretos asfálticos modificados com polímero SBS apresentaram melhor desempenho à fadiga, principalmente a médio e alto nível de deformação inicial.

Andrade *et al.* (2017) investigaram o comportamento reológico de ligantes modificados com 4% de resina do tipo fenol-formaldeído, obtida a partir do cardanol. Para o processo de modificação, os autores utilizaram um agitador de cisalhamento IKA, modelo RW20, com velocidade de agitação de 1.600RPM durante um período de 1 hora e 30 minutos na temperatura de 160°C ± 5°C.

Em relação às propriedades físicas, Andrade *et al.* (2017) observaram que os ligantes modificados apresentaram diminuição do valor de penetração e aumento do valor de ponto de amolecimento e viscosidade quando comparado ao ligante convencional. Quanto à caracterização dos ligantes estudados, os autores verificaram a diminuição na penetração e o aumento no ponto de amolecimento com a adição de materiais nanométricos.

No estudo reológico, comparando-se com o ligante de referência, Andrade *et al.* (2017), assim como observado em outras pesquisas, verificaram o aumento do G^* e diminuição do δ . Esses resultados foram justificados em virtude das características surfactantes do oligômero, proporcionando uma melhor afinidade entre as moléculas apolares do ligante, assim como nos asfaltenos, estabilizando o sistema coloidal. Além disso, moléculas polares tendem a contribuir para um aumento na rigidez, isto significa, a resina polimérica possibilitou ao ligante asfáltico uma maior rigidez e elasticidade, melhorando, assim, o desempenho do ligante em relação à deformação permanente.

Portugal *et al.* (2017) estudaram a incorporação de 1%, 2% e 3% de óleo de milho (novo e residual) em dois tipos de ligante asfálticos: ligante convencional 50/70 e asfaltos modificados por polímeros (AMP 55/75). As amostras asfálticas foram caracterizadas por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (*rolling thin-film oven test* – RTFOT), especificação do grau de desempenho, fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR) e varredura de frequência. Os ligantes

modificados foram preparados por meio de um agitador mecânico de baixo cisalhamento Fisatom, modelo 722D, com velocidade de 406RPM e temperatura de 135°C, durante um período de compatibilização de 20 minutos. De modo geral, os resultados mostraram que a adição de 1% de óleo de soja e milho (novo e residual) mantém as características físicas e reológicas sem comprometer o desempenho do CAP 50/70 ou do AMP 55/75. Os autores também relataram que não foi observada diferença significativa na utilização de óleo novo ou residual.

Carvalho (2018) analisou o comportamento mecânico de misturas asfálticas modificadas por etileno acrilato de metila e metacrilato de glicidila (S74), terpolímero de alta densidade (SX500) e ácido polifosfórico (PPA116%). Após o processo de modificação foram confeccionadas as misturas asfálticas com 1,8%S74, 0,3%SX500 associadas a teores variados de 0,15; 0,3 e 0,5%PPA116%. As características mecânicas foram analisadas por meio dos ensaios RTCD, módulo de resiliência, módulo dinâmico (MD), FN, Lotman modificado e desgaste Cântabro. Como resultado, o autor verificou que as misturas asfálticas modificadas com polímero reativo/não-reativo associados ao ácido polifosfórico nos teores de 0,3 e 0,5%PPA116% mostrou maior resistência à deformação permanente quando submetidos a altas temperaturas, maior resistência ao desgaste e menor susceptibilidade à umidade.

Santos, Rodrigues e Mendonça (2018) avaliaram as propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico modificado por lignina kraft proveniente da madeira de eucalipto. O procedimento de modificação consistiu na adição de 3%, 6% e 9% de lignina em relação ao peso do ligante asfáltico 50/70. Os autores observaram que os ligantes modificados por lignina se mostraram mais resistentes à variação de temperatura, à deformação permanente e ao envelhecimento.

Silva *et al.* (2018) analisaram as propriedades de ligantes asfálticos modificados por polietileno tereftalato (PET). No estudo dos autores, o procedimento de modificação do ligante convencional em um misturador de asfalto Modelo 722D, com rotações de 2.000RPM, sob temperatura de 165°C e por um período de mistura de 2 horas. Os autores concluíram que o ligante modificado apresentou comportamento superior ao ligante convencional em todos os ensaios realizados.

Recentemente, observa-se um crescente interesse no uso de óleos vegetais como modificador de ligante asfáltico. Esses materiais mostram muita versatilidade quanto à sua utilização, custo relativamente baixo e grande disponibilidade. Luz *et al.*

(2019) averiguaram as propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição de óleos de milho e de soja (novo e residual).

No estudo, os corpos de prova foram confeccionados em três temperaturas diferentes, no qual a primeira temperatura foi definida pelas curvas logarítmicas viscosidade x temperatura e as outras foram 10 e 20°C inferiores à primeira temperatura, respectivamente. Para avaliar o desempenho mecânico das misturas asfálticas, os autores conduziram os ensaios de RTCD, Lottman Modificado, módulo de resiliência, FN e Módulo Dinâmico.

De acordo com os resultados obtidos por Luz *et al.* (2019), a incorporação dos óleos vegetais na matriz asfáltica resultou na diminuição do comportamento mecânico e no desempenho reológico quando comparado ao ligante convencional.

Há também outros trabalhos como a adição de óleos vegetais, investigados por Zargar *et al.* (2012), Wen, Bhusal e Wen (2013), Chen *et al.* (2014), Maharaj, Ramjattan-Harry e Mohamed (2015), Sun *et al.* (2016), Guarin *et al.* (2016), Azahar *et al.* (2017) e Al-Omari *et al.* (2018). Todos relataram que algumas mudanças ocorreram nas propriedades tecnológicas dos ligantes asfálticos modificados com óleos vegetais. Estas mudanças estão relacionadas ao melhor desempenho ao trincamento térmico, à fadiga e no alívio de tensões das amostras asfálticas. Ainda, enfatizam a redução dos danos ambientais, no qual é reaproveitado parte desses RS, colaborando para um desenvolvimento mais sustentável. Contudo, os autores salientam que a adição de óleos vegetais proporciona o aparecimento de afundamento de trilha de roda e diminui a recuperação elástica dos ligantes asfálticos.

Com base nos promissores resultados obtidos nas diversas áreas da ciência, recentemente, diversos tipos de nanomateriais estão sendo incorporados à matriz do ligante asfáltico. Nesse cenário, Santagata *et al.* (2012) analisaram a adição de NTC no ligante asfáltico. Os teores de NTC foram adicionados às matrizes asfálticas por meio de um misturador de alto cisalhamento, nos teores de 0,1, 0,5 e 1% em relação ao peso do ligante.

Silva *et al.* (2018) relatam que durante muitos anos, o desempenho do ligante asfáltico convencional foi considerado aceitável. Contudo, com o aumento do tráfego e das variações climáticas, tornou-se necessário o uso de materiais modificadores utilizados para a melhoria das propriedades das misturas asfálticas. A partir disso, o estudo e o desenvolvimento de novas tecnologias de materiais para pavimentação

têm aumentado bastante motivados pelos diversos problemas que os pavimentos têm enfrentado (SANTOS, RODRIGUES e MENDONÇA, 2018).

No geral, os autores observaram que os ligantes modificados com NTC apresentaram uma melhora significativa nos parâmetros de rigidez e elasticidade. Também são apontados os ganhos referentes ao aumento da resistência ao trincamento térmico e redução da susceptibilidade ao envelhecimento por oxidação.

Santos *et al.* (2015) estudaram o desempenho mecânico do ligante asfáltico (CAP 50/70) modificado por argila montmorilonita organofílica (OMMT) e a argila montmorilonita pura (MMT). O processo de modificação da matriz asfáltica consistiu na utilização de um agitador mecânico de baixo cisalhamento. As misturas asfálticas foram submetidas aos ensaios mecânicos de RTCD e módulo de resiliência. Os resultados indicaram que os ligantes modificados com argilas OMMT e MMT apresentaram aumento no valor do módulo de resiliência e RTCD quando comparados ao ligante asfáltico sem modificador.

Neto (2019) avaliou a incorporação nos teores de 3, 5 e 7% de nanopartículas de óxido de zinco não-modificadas (ZnO) e modificadas superficialmente (ZnO M) na matriz asfáltica CAP 50/70. Os ligantes foram avaliados por meio do ensaio químico de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), ensaios físicos (penetração e ponto de amolecimento) e reológicos (viscosidade rotacional, grau de desempenho (PG), fluência e recuperação sob MSCR, varredura linear de amplitude (LAS) e curva mestra.

Os resultados dos testes mostraram que a adição das nanopartículas de ZnO aumentaram o PG, a vida de fadiga e a resistência à deformação permanente do ligante, especialmente o ligante modificado com 7% de ZnO. Quanto aos ligantes modificados com ZnO M, os autores observaram resultados semelhantes, sendo verificado o aumento da resistência ao envelhecimento a curto prazo RTFO dos ligantes com adição de ZnO M.

2.4 Materiais Carbonosos

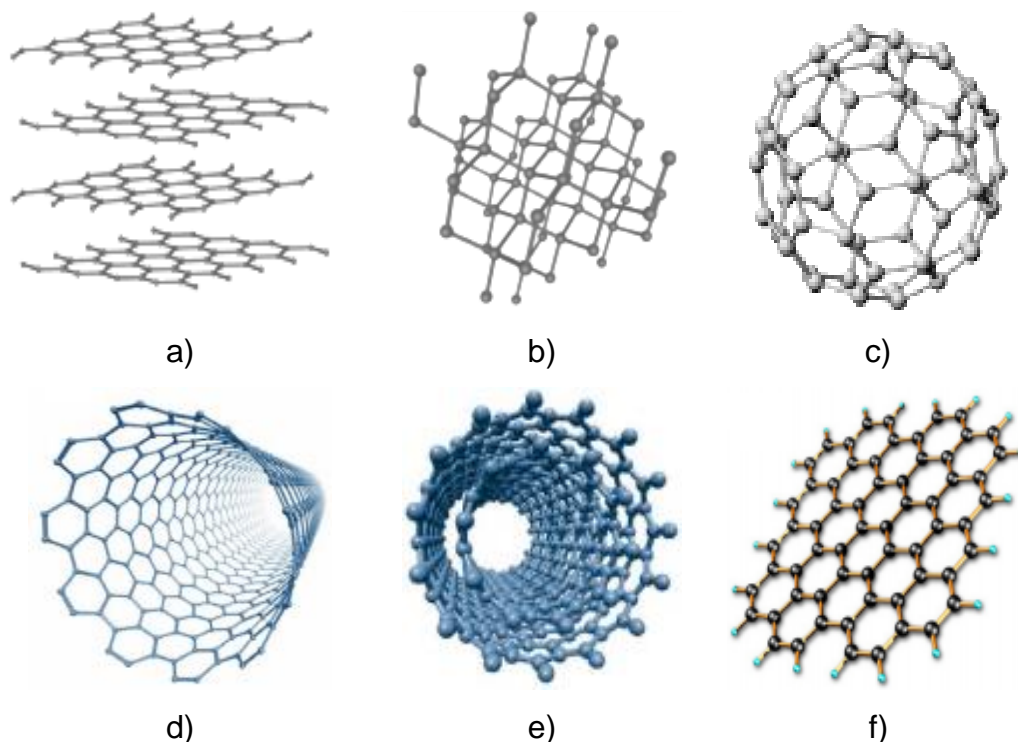
O carbono é um dos elementos químicos mais importantes, por ser indispensável à existência da vida e por exibir aplicações em diferentes áreas do conhecimento. Os materiais carbonosos são aqueles compostos principalmente do elemento carbono, com teores de 99% ou mais, podendo ser encontrados na natureza

ou sintéticos (MANTEL, 1968; MARSH, 1989; SAVAGE, 1993; CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE, 2010).

Para CGEE (2010), os materiais carbonosos podem ser desenvolvidos a partir de diversas matérias primas orgânicas nos estados sólido, líquido ou gasoso. Dependendo das suas condições de formação (natural ou processado), os materiais carbonosos podem ser encontrados de diversas formas.

Os materiais carbonosos naturais apresentam diversas formas alotrópicas, como: o carbono amorfo (negro de fumo, carvão comum, coque, carbono vítreo, etc.), cristalino em forma de grafite natural (estrutura cristalina hexagonal) ou diamante (estrutura cristalina cúbica), fulerenos, o grafeno e o nanotubo de carbono (ZARBIN e OLIVEIRA, 2013). A Figura 3 exemplifica algumas dessas configurações.

Figura 3 – Representação esquemática de diferentes alotrópos de carbono: a) Grafite natural; b) Diamante; c) Fulereo; d) Nanotubo de carbono de parede simples; e) Nanotubo de carbono de parede múltipla; f) Grafeno



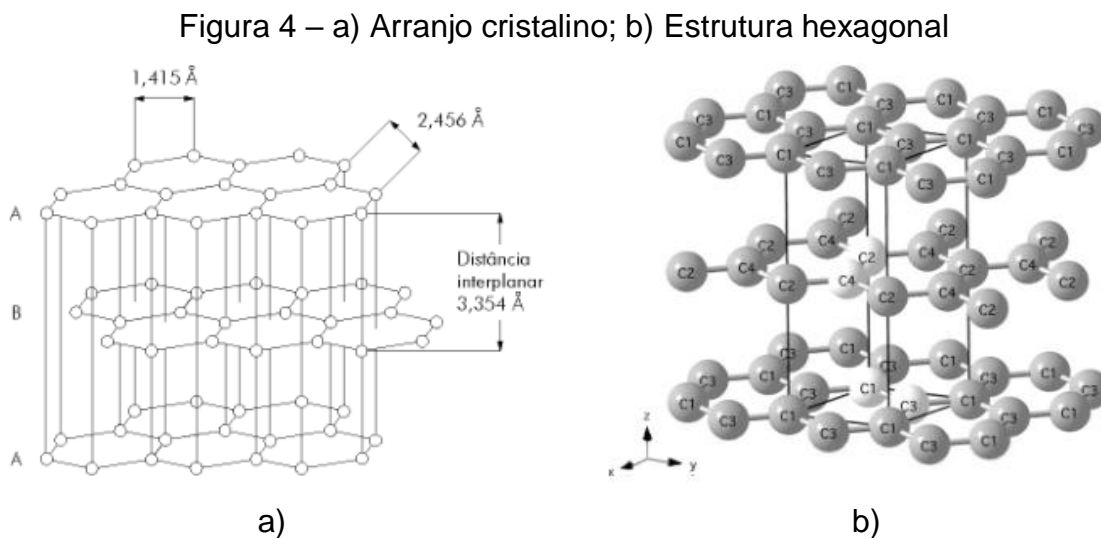
Fonte: Zarbin e Oliveira (2013).

Os materiais carbonosos sintéticos ou processados são obtidos artificialmente, ou seja, apresentam substâncias desenvolvidas em laboratório pelo uso de matérias-primas, tais como: grafite sintético, fibras de carbono, carbono vítreo, compósito

carbono reforçado com fibras de carbono (CRFC), compósito carbono/carbono (C/C), coques, carvões, resinas, piches e gases orgânicos, sendo predominantemente materiais poligranulares, compostos de partículas, fibras e ligantes de origem orgânica (MANTEL, 1968; MARSH, 1989; MARSH, HEINTZ e REINOSO, 1997; CGEE, 2010).

2.4.1 Grafite

O grafite ou grafita é uma das formas alotrópicas do carbono encontrada naturalmente, sendo um exemplo clássico de sólido com estrutura lamelar, em que cada átomo de carbono com hibridização sp^2 está ligado a outros três átomos, formando milhares de folhas (lâminas) bidimensionais com a aparência de uma colmeia (DRESSELHAUS, DRESSELHAUS e EKLUND, 1995). Cada lâmina é denominada de grafeno, e o empilhamento das mesmas, via atrações de Van Der Waals, confere vários planos de átomos de carbono que se arranjam em uma rede com simetria hexagonal (BELÉM, 2006; GEIM e NOVOSELOV, 2007; ZARBIN e OLIVEIRA, 2013). A estrutura do grafite pode ser observada na Figura 4.



Fonte: Oliveira *et al.* (2000) e Stanjek e Häusler (2004).

O grafite no Brasil é produzido por meio do minério extraído das minas de Pedra Azul, Salto da Divisa e Itapeçerica, localizados no estado de Minas Gerais, que são as maiores reservas de grafite do país. No Brasil, destaca-se a empresa Nacional de Grafite Ltda., sendo responsável por 96% da produção total brasileira.

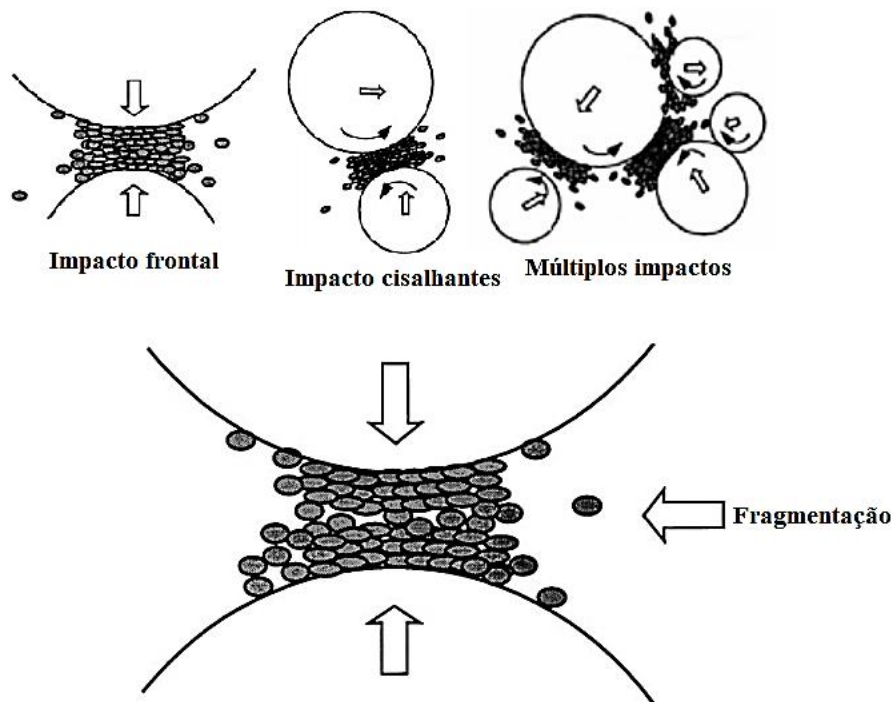
Segundo Harben e Bates (1990), o grafite natural tem sido aplicado em diferentes setores da indústria, em virtude de suas características físico-químicas como a clivagem, plasticidade, baixo coeficiente de atrito e alta temperatura de fusão (3.650°C), além de baixo coeficiente de expansão térmica, lubrificante, ductilidade, compressível, flexível, boa condutividade elétrica e de calor. Já no ramo da engenharia de infraestrutura, Pereira, Lacerda e Modolo (2021) propuseram uma nova aplicação para o grafite natural. Os autores investigaram os parâmetros mecânicos de módulo complexo e ângulo de fase de composições asfálticas com grafite por meio dos ensaios de flexão a quatro pontos. De acordo com os autores, os resultados obtidos mostraram que as misturas asfálticas produzidas com o grafite comercial apresentaram um elevado desempenho mecânico em comparação à mistura convencional. Tal pesquisa contribuiu para a crescente aceitação da utilização do mineral grafite em composições asfálticas e pode ser uma alternativa ao material de enchimento tradicional (cimento Portland) para a produção de misturas asfálticas.

2.5 Moagem de Alta Energia

Com a consolidação e crescimento acelerado da nanociência e nanotecnologia, diferentes procedimentos físicos, químicos e mecânicos foram desenvolvidos para a preparação de materiais nanométricos. Entre os métodos, o mecânico, usualmente chamado de moagem de alta energia (*high-energy milling*), se destaca por sua facilidade de manuseio, eficiência e rapidez para a obtenção de pós em escala reduzida.

A moagem de bolas de alta energia se caracteriza por submeter um material a repetidos ciclos de deformação, soldagem a frio, trituração e fragmentação dentro de uma atmosfera controlada que provoca forças de impacto compressivas de alta energia. A Figura 5 ilustra esquematicamente o impacto e fragmentação das partículas durante o processo de moagem no moinho de bolas.

Figura 5 – Diagrama mostrando as diferentes formas de impacto e fragmentação que podem ocorrer durante o processo de moagem no moinho de bolas



Fonte: Adaptado de Zhang (2004).

Como resultado tem-se a redução do tamanho das partículas e variação estrutural das partículas (SURYANARAYANA, 1994; SURYANARAYANA, 2004). Os moinhos de alta energia produzem ação de cisalhamento ou impacto sobre as partículas dos materiais por meio de bolas com o pó em alta velocidade (MURTY e RANGANATHAN, 1998), gerando um refinamento constante do material (CERQUEIRA, 2014). Esta técnica foi desenvolvida por volta de 1996 no Laboratório de Pesquisa INCO, onde Paul Dyer Merica, cujo objetivo era produzir dispersão de óxido reforçada em uma superliga à base de níquel para aplicações em turbinas a gás (MURTY e RANGANATHAN, 1998).

Para melhorar o desempenho, bem como suprir diferentes tipos de necessidades, são empregados diferentes tipos de moinhos de alta energia, em que se destacam o moinho vibratório SPEX (SPEX-8000 mixer/46il), moinho planetário (*Fritsch and Retsch mills*) e moinho de atrito (*Szegvare Atritor*) (MURTY e RANGANATHAN, 1998; SURYANARAYANA, 2001), nos quais são diferenciados por sua velocidade de operação, capacidade volumétrica e variação de temperatura. A Tabela 1 ilustra as características de cada moinho de alta energia.

Tabela 1 – Tipos de moinhos bolas de alta energia

Tipo de moinho	Capacidade	Velocidade das bolas (m/s)
Moinho SPEX	Até 20g	< 3,9
Moinho planetário	Até 1000g	< 11,24
Moinho de atrito	0,5 – 100kg	< 0,8

Fonte: Adaptado de Murty e Ranganathan (1998).

2.5.1 Moinho Spex

Os moinhos SPEX, também conhecidos como moinhos vibratórios, podem moer entre 10 e 20g de pó de cada vez, e são mais utilizados em laboratórios de pesquisa, cujo principal objetivo é a síntese e cominuição dos materiais. A Figura 6 mostra o moinho de alta energia, modelo SPEX-8000, o jarro e as esferas de aço inoxidável e um sistema de ventilação.

Figura 6 – a) Moinho de bolas; b) cilindro com as esferas de aço



a)

b)

Fonte: Suryanarayana (2001).

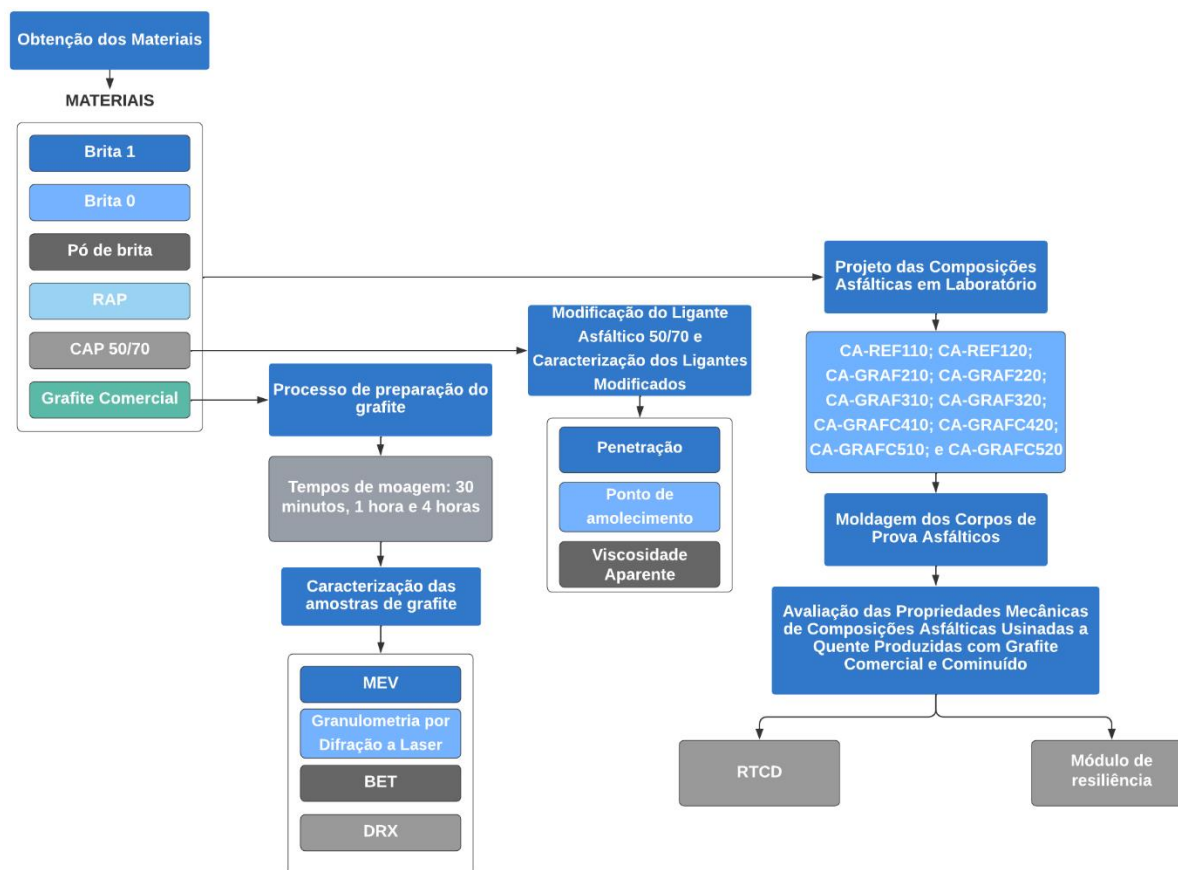
Nesta temática, Castro *et al.* (2019) estudaram o comportamento mecânico de um solo argiloso estabilizado com resíduo de vidro pulverizado em moinho de alta energia, modelo SPEX-8000 mixer/mill. Os resultados encontrados no ensaio de cisalhamento direto, mostraram que houve significativa melhora nas propriedades

físicas e mecânicas do solo regional aditivado com resíduo de vidro pulverizado no moinho de alta energia.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos empregados na confecção e avaliação das composições asfálticas. A Figura 7 apresenta a estrutura global da pesquisa.

Figura 7 - Estrutura global das composições asfálticas



Fonte: Autor (2023).

3.1 Etapa 1 – Obtenção dos Materiais

A primeira etapa deste trabalho consistiu na aquisição dos materiais. Em função de ser uma pesquisa regional, buscou-se utilizar os materiais empregados tradicionalmente na pavimentação asfáltica local, tomando como base o município de Porto Velho, capital do estado de RO.

3.1.1 RAP

Para a realização deste trabalho, foi utilizado material fresado retirado da camada de rolamento da Rua Tenreiro Aranha, que foi parte integrante de um projeto de obras de pavimentação e qualificação em vias urbanas da cidade de Porto Velho, desenvolvido sob a responsabilidade da Secretaria Municipal de Obras e Pavimentação (SEMOB).

Nas Figuras 8, 9 e 10 são mostrados o serviço de fresagem na Rua Tenreiro Aranha e o processo de coleta de amostras do material, respectivamente.

Figura 8 – Vista do trecho da Rua Tenreiro Aranha em que foi realizada a fresagem, cujo material retirado foi utilizado como objeto de estudo.



Fonte: Autor (2023).

Figura 9 – Serviço de fresagem na Rua Tenreiro Aranha: a) processo de fresagem; e b) retirada do material fresado



a)



b)

Fonte: Autor (2023).

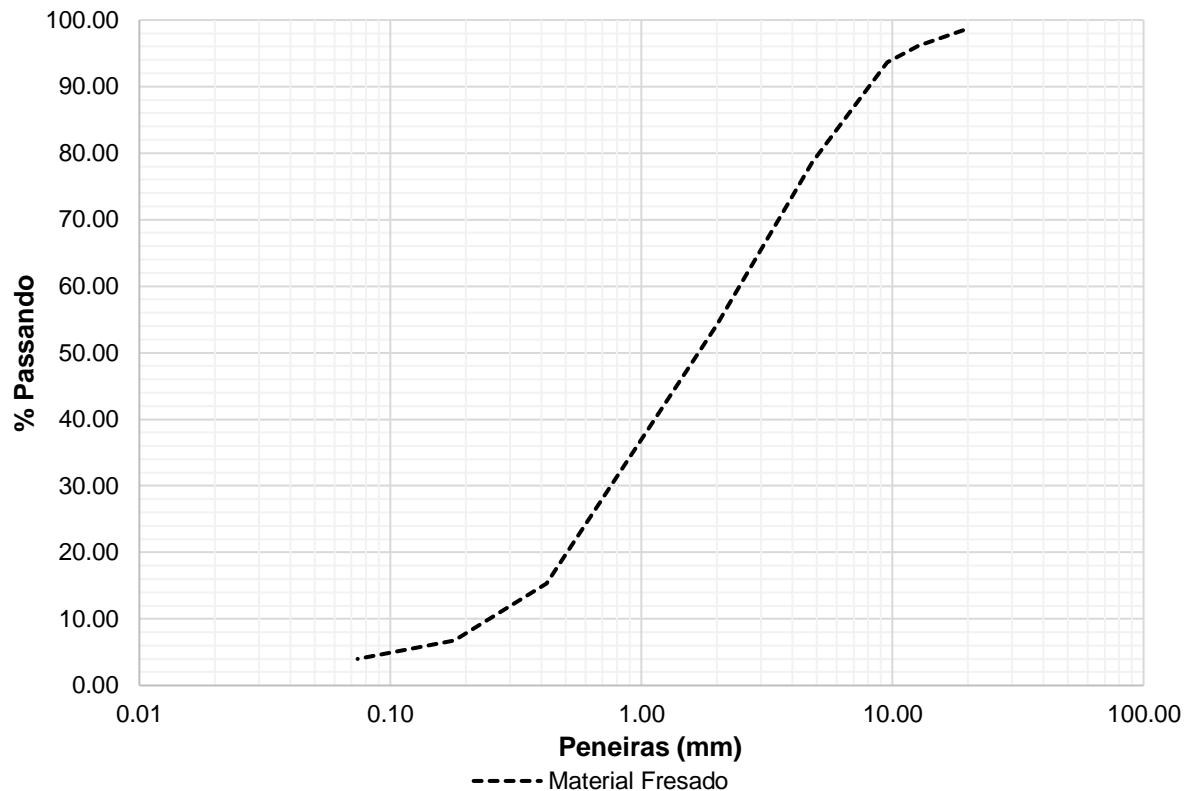
Figura 10 – Coleta do material fresado



Fonte: Autor (2023).

Para a caracterização do material fresado foram realizados os ensaios de granulometria, antes da extração do betume, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Granulometria do material fresado



Fonte: Autor (2023).

As amostras extraídas do trecho monitorado também foram submetidas ao ensaio de extração de betume (CAP) pelo equipamento rotarex, normatizado pela norma ME 053 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER, 1994), com objetivo de verificar o teor de ligante de projeto do trecho estudado, bem como o ensaio para determinação da densidade aparente, recomendado pela norma ME 117 (DNER, 1994), e densidade máxima teórica (DMT).

O teor de betume do material fresado foi determinado pela Equação 1. As características tecnológicas do material fresado constam na Tabela 2.

$$T\% = \frac{Pa - Pd}{Pa} \times 10 \quad (1)$$

Onde:

Pa = massa da amostra antes da extração, e

P_d = massa da amostra após a extração.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de caracterização do material fresado

Parâmetro	Resultado
Teor de betume (%)	4,50
Densidade aparente (g/cm ³)	2,434
DMT (g/cm ³)	2,562

Fonte: Autor (2023).

3.1.2 Agregados

Os agregados minerais, brita 1, brita 0 e pó de brita que foram utilizados nesta pesquisa são de natureza granítica e foram doados por uma empresa de construção civil da cidade de Porto Velho/RO. Na Figura 12 são mostrados os agregados empregados na pesquisa.

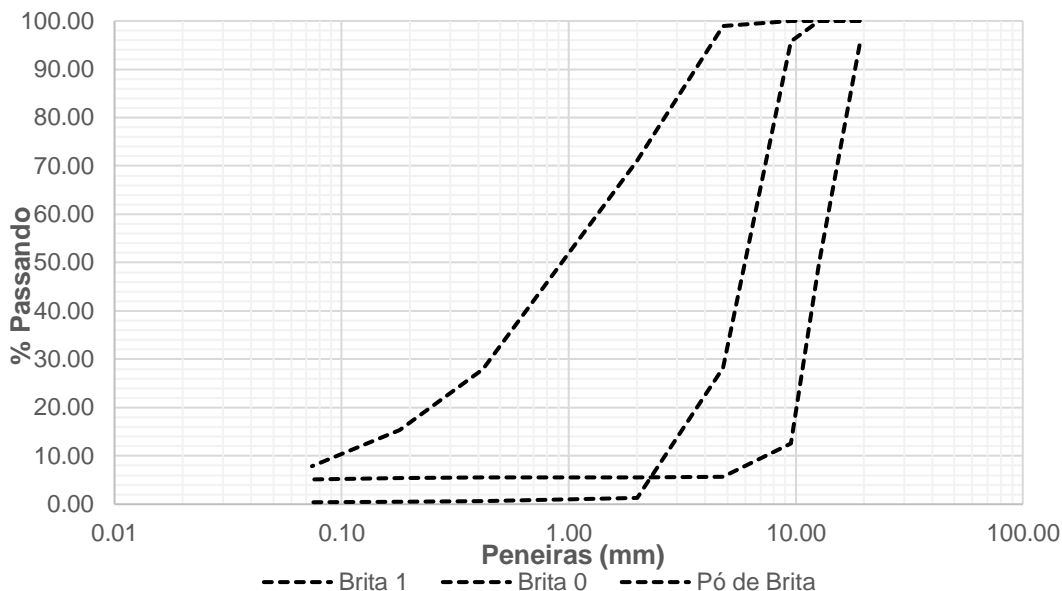
Figura 12 – Agregados



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 13 são apresentados os resultados da composição granulométrica dos agregados minerais, conforme o método de ensaio ME 083 (DNER, 1998).

Figura 13 – Curvas granulométricas dos materiais



Fonte: Autor (2023).

Além do ensaio de granulometria, os materiais pétreos também foram avaliados por meio dos ensaios de massa específica real, absorção e abrasão *Los Angeles*, equivalente de areia e índice de forma. Os ensaios de caracterização física dos agregados minerais são apresentados na Tabela 3, bem como os resultados e suas respectivas normas de regulamentação.

Tabela 3 – Caracterização física dos agregados virgens

Propriedades	Resultados	Especificação	Norma
Massa específica real, brita 1	2,690 g/cm ³	-	DNER-ME 081/98
Absorção, brita 1	1,98%	-	DNER-ME 081/98
Massa específica real, brita 0	2,682 g/cm ³	-	DNER-ME 081/98
Absorção, brita 0	1,80%	-	DNER-ME 081/98
Massa específica, pó de brita	2,699 g/cm ³	-	DNER-ME 084/95
Teor de argila (Equivalente de areia)	69%	>55%	DNER-ME 054/97
Índice de forma	0,73	>0,5	DNER-ME 086/94
Desgaste de Los Angeles	36,1	<50%	DNER-ME 035/98

Fonte: Autor (2023).

3.1.3 Ligante asfáltico convencional

O ligante asfáltico convencional utilizado nesta pesquisa corresponde a um CAP 50/70, proveniente da refinaria localizada no município de Manaus, capital do estado do Amazonas. Este ligante também foi empregado como matriz na produção dos ligantes modificados.

3.1.4 Grafite

Para modificação da matriz asfáltica foi empregado o grafite mineral. Este material trata-se de um pó natural predominantemente cristalino (Figura 14), amplamente utilizado em diversas aplicações do setor industrial (refratários de magnésia-carbono, refratários monolíticos, refratários de alumina-carbono, pastilhas e lonas de freios, peças sinterizadas, revestimentos de fricção, escovas elétricas, desmoldantes, tintas especiais e embreagens).

Figura 14 – Grafite comercial



Fonte: Autor (2023).

O grafite comercial foi cedido pela empresa Nacional de Grafite Ltda., localizado na região de Bela Vista, município do estado de São Paulo.

3.2 Etapa 2 – Processo de preparação do grafite

Como a cominuição de um material, acarreta, em regra, o aumento da superfície específica do material (aumento do número de átomos neste contorno) que, por conseguinte, potencializa as suas propriedades (JACKSON e SHERMAN, 1953;

SURYANARAYANA, 1995; DAS, 2015), buscou-se por meio do moinho de alta energia, modelo 8000M Mixer/Mill® da SPEX Sample, a diminuição do tamanho médio dos grãos desse mineral. Este método foi utilizado devido sua simplicidade e rápida pulverização das amostras, garantindo também maior homogeneidade para a composição do material.

Foi realizada a sua redução por meio dos seguintes tempos de moagem: 30 minutos, 1 hora e 4 horas. O processo de moagem teve início com a pesagem da amostra, e na sequência inseriu-se o material, 4 gramas (g) no recipiente cilíndrico ($d = 57,15\text{mm}$ e $h = 76,20\text{mm}$) com capacidade de carga de até 10g, juntamente com duas esferas de aço de 12,70mm para, então, dar início ao processo de cominuição mecânica.

A Figura 15 mostra o moinho de alta energia, modelo SPEX-8000, o jarro e as esferas de aço inoxidável e um sistema de ventilação.

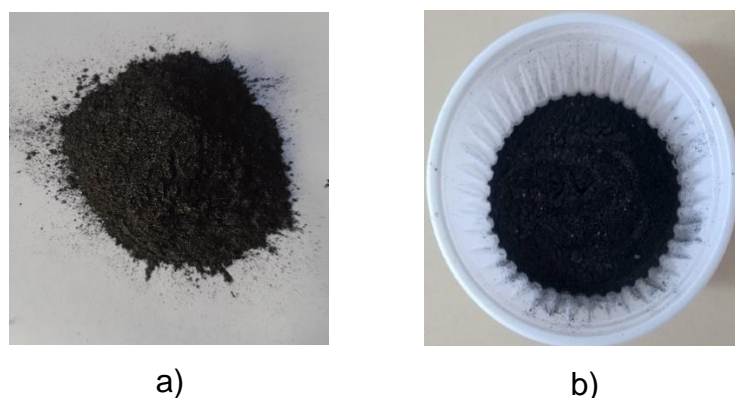
Figura 15 – Moinho de bolas e o cilindro com as esferas de aço



Fonte: Autor (2023).

A Figura 16 ilustra o aspecto físico das amostras antes e após o processo de cominuição por 4 horas, respectivamente.

Figura 16 – Imagens do grafite: a) antes da moagem; b) após o processo de moagem de 4 horas



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 16(a) é possível verificar a coloração brilhante e uma superfície lisa, aspectos característicos do grafite em sua forma natural. Já na Figura 16(b) nota-se uma perda do aspecto brilhoso, além de uma superfície mais rugosa e um perceptível aumento no volume do material.

3.3 Etapa 3 – Caracterização das amostras de grafite

Para avaliar o efeito da cominuição mecânica nas amostras, utilizou-se diferentes técnicas de caracterização. As amostras de grafite foram caracterizadas por MEV, área superficial, granulometria por difração a laser e DRX.

3.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a análise morfológica das amostras de grafite, utilizou-se a análise de MEV. O objetivo foi avaliar a morfologia das amostras de grafite, assim como suas possíveis modificações em resposta ao processo de moagem mecânica.

Para realização da análise morfológica, as amostras de grafite comercial e moídas em diferentes tempos, 30 minutos, 1 hora e 4 horas, foram pesadas em pequenas quantidades (cerca de 2mg). Foi utilizado para a caracterização da microestrutura das amostras, um microscópio de varredura, marca TESCAN, modelo ISSO 3 SBH, sob tensão de aceleração de 15kV, sendo realizado no Laboratório

Temático de Microscopia Eletrônica e Nanotecnologia (LTMN), do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

3.3.2 Análise de distribuição do tamanho de partículas por espalhamento de luz (Granulometria por Difração a Laser)

A técnica de análise de tamanho de partículas por difração a laser é um procedimento em que as partículas são dispersas em um fluido em movimento ocasionando descontinuidades no fluxo do fluido, que são identificados por uma luz incidente e associadas ao tamanho de partícula (CHRISTOFOLETTI e MORENO, 2017). Na atualidade, a técnica de granulometria por difração a laser é largamente usada para determinação do tamanho de partículas de diferentes tipos de materiais.

Em particular, o órgão de normalização *International Organization for Standardization* (ISO) em sua norma 13320 (ISO, 1999) estabelece faixa de amplitude de 0,01 a 3500 μm , dependendo do equipamento, sendo a faixa de utilização indicada de 0,1 a 3000 μm .

A análise granulométrica por difração a laser foi utilizada para determinação do tamanho das partículas das amostras do grafite comercial e cominuído nos tempos de 30 minutos, 1 hora e 4 horas e, posteriormente, calcular os tamanhos de cristalitos. As análises foram realizadas em um analisador de tamanho de partículas, Microtrac S3500, localizado no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LcvMat) da UNISINOS.

3.3.3 Área Superficial (Brunauer, Emmett e Teller - BET)

De acordo com Gomes (2011), o método BET é uma das metodologias mais antigas de caracterização de materiais. O método consiste na medida da fisissorção (adsorção física) de um gás inerte na superfície de um sólido em função da pressão. A partir da variação de pressão exercida, uma quantidade do gás é adsorvida e, por meio de Equação 2, a área superficial é obtida (COTTET, 2009).

$$\frac{P}{q(P_S - P)} = \frac{1}{bq_m} + \left(\frac{1}{bq_m}\right)(B - 1)\left(\frac{P}{P_S}\right) \quad 2$$

Onde:

P_s é a pressão de saturação do vapor na temperatura utilizada no teste (normalmente utilizado 1 atm);

q é a quantidade de nitrogênio adsorvido em uma pressão P aplicada; e

qm é a quantidade de nitrogênio correspondente à saturação de uma monocamada completa da superfície do adsorvente.

Para determinação da área superficial das amostras foi empregado equipamento TriStar II Plus da Micromeritics®. Os ensaios foram realizados no LcvMat da UNISINOS.

3.3.4 Difração de Raios-X (DRX)

A técnica de difratometria de raios-x foi usada para a caracterização da estrutura cristalina do precursor (material sem moagem) e moídos em diferentes tempos (30 minutos, 1 hora e 4 horas) e, posteriormente, calcular os tamanhos e a largura média dos cristalitos. O objetivo deste ensaio foi caracterizar estruturalmente o material, identificando suas características quanto à sua cristalinidade, antes e após o processo de cominuição mecânica.

As amostras foram analisadas por um difratômetro PANalytical, modelo Empyrean, com radiação de Cu-K α (1,541838 Å), operando com tensão de 40kV e intensidade da corrente de 40mA. Com faixa de varredura de $10^\circ < 2\theta < 80^\circ$ de 2θ , e com taxa de 0,02°/min. As preparações e medidas de DRX das amostras foram realizadas no Laboratório de Materiais (LabMat/ Universidade Federal do Amazonas - UFAM). Para a análise dos resultados obtidos dos ensaios de DRX foram utilizados o *software* computacional OriginPro 2016, para plotagem dos dados das amostras, bem como calcular os tamanhos de cristalitos.

3.4 Etapa 4 – Modificação do Ligante Asfáltico 50/70 e Caracterização dos Ligantes Modificados

Com base nos trabalhos de Jahromi, Andalibizade e Vossough (2010), Modarres (2013) e Neto (2019), a modificação do ligante foi realizada com teores de incorporação de 4% e 5% de grafite comercial e 4% e 5% de grafite cominuído, em

relação ao peso do ligante asfáltico 50/70. O processo de modificação do ligante asfáltico 50/70 foi executado em misturador de baixo cisalhamento e hélice cisalhante.

A temperatura de incorporação dos materiais no ligante asfáltico foi de $150^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, faixa de cisalhamento 544RPM e período de homogeneização de 2 horas. Os procedimentos experimentais de modificação do ligante asfáltico puro foram baseados nos trabalhos realizados por Ponte *et al.* (2014), Melo (2014), Marcon (2016), Melo e Trichês (2016), Melo e Trichês (2016), Carlesso (2017), Melo e Trichês (2017), Melo, Trichês e Rosso (2018) e Carlesso *et al.* (2019).

O processo de modificação envolveu as etapas apresentadas por Calersso (2017). São elas:

- a) pesagem do ligante asfáltico puro;
- b) pesagem dos materiais modificadores de acordo com o peso da matriz asfáltica 50-70 e com os teores definidos para a modificação;
- c) aquecimento, em estufa, do ligante asfáltico puro, até a temperatura de 160°C ;
- d) inserção da lata de CAP 50/70 na cuba térmica acoplada ao misturador de baixo cisalhamento e imersão das cabeças de trabalho cisalhantes no material;
- e) estabilização da temperatura do conjunto em 160°C ;
- f) aumento gradativo da velocidade do misturador até serem atingidas 544RPM e temperatura de $160^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$; e
- g) inserção do grafite no CAP 50/70, a partir de uma taxa média de incorporação de 5g/min.

Posteriormente, para verificar as propriedades das matrizes asfálticas, foi realizado um fatorial de ensaios laboratoriais. Foram realizados os ensaios de estabilidade à estocagem e determinadas as propriedades empíricas: penetração e ponto de amolecimento. Quanto às propriedades reológicas, determinou-se a viscosidade aparente nas temperaturas de 135, 150 e 175°C . A finalidade da caracterização dos ligantes modificados é analisar o quanto pode aumentar a consistência do asfalto, durante o procedimento de dosagem das misturas asfálticas segundo o procedimento Marshall. Estas características influenciam as propriedades mecânicas da mistura, e, portanto, é importante quantificar o aumento de rigidez que ocorre após o processo de modificação.

3.4.1 Propriedades CAP

3.4.1.1 Ensaio de penetração

O ensaio de penetração foi determinado de acordo com a norma ME 003 (DNER, 1999), empregado uma agulha-padrão sob uma carga pré-estabelecida de 100g, penetrando livremente por 5 segundos sobre o material asfáltico com 50g à temperatura de 25°C. O equipamento empregado no ensaio de penetração está retratado na Figura 17.

Figura 17 - Equipamento utilizado no ensaio de penetração



Fonte: Autor (2023).

O resultado do ensaio foi a média das três determinações, cujo valores não excederam o limite preconizado pela Tabela 4.

Tabela 4 - Critérios para indicação de resultados

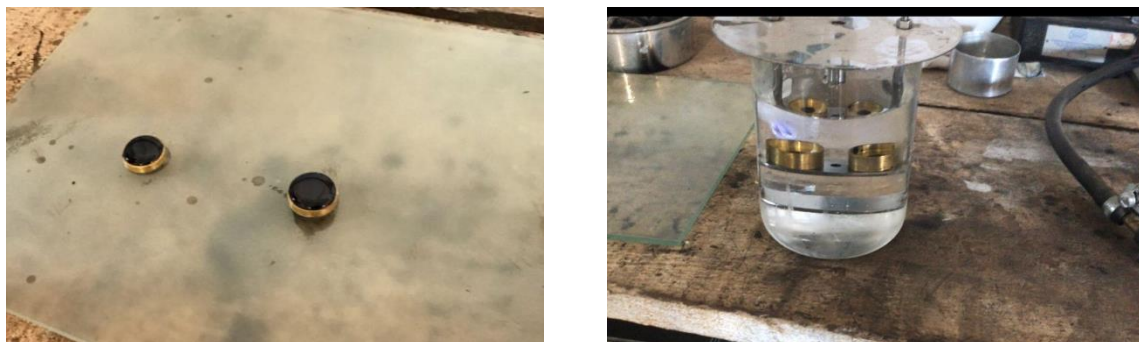
Penetração (0,1mm)	Diferença máxima entre o valor mais alto e o valor mais baixo das determinações (0,1mm)
0 até 49	2
50 até 149	4
150 até 249	12
250 até 500	20

Fonte: DNER ME 003 (1999).

3.4.1.2 Ponto de amolecimento

Com a finalidade de verificar a temperatura em que o asfalto amolece quando aquecido em condições padronizadas foi utilizado o método do anel e bola (Figura 18), conforme as recomendações da norma ME 247 (DNER, 1994).

Figura 18 - Ponto de Amolecimento



Fonte: Autor (2023).

3.4.2 Propriedades Reológicas

3.4.2.1 Viscosidade Aparente

As viscosidades aparentes dos ligantes asfálticos modificados e do ligante asfáltico 50/70, foram avaliadas utilizando o viscosímetro Saybolt Furol, nas temperaturas de 135, 150 e 175°C, conforme o preconizado pela norma ME 004 (DNER, 1994). Além de ser utilizado para verificar as propriedades reológicas das matrizes asfálticas, a viscosidade aparente, também foi utilizada para determinar as temperaturas para confecção das misturas betuminosas, as quais foram empregadas no decorrer de todo o processo de dosagem e moldagem das misturas asfálticas.

3.5 Etapa 5 – Projeto das Composições Asfálticas em Laboratório

Nesta fase da pesquisa foram definidas as formulações das misturas densas para as composições asfálticas. Assim, foram desenvolvidos cinco projetos de misturas asfálticas em laboratório com os materiais descritos no item 3.1.

A primeira classe de projetos de misturas asfálticas é constituída por duas dosagens asfálticas, CA-REF110 (agregados virgens, 10% de RAP e CAP 50/70) e CA-REF120 (agregados virgens, 20% de RAP e CAP 50/70).

A segunda classe de projetos de misturas asfálticas contempla as dosagens asfálticas modificadas com 4% de grafite comercial, CA-GRAF210 (agregados virgens, 10% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%) e CA-GRAF220 (agregados virgens, 20% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%).

A terceira classe de projetos de misturas asfálticas contempla as dosagens asfálticas modificadas com 5% de grafite comercial, CA-GRAF310 (agregados virgens, 10% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%) e CA-GRAF320 (agregados virgens, 20% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%).

A quarta classe de projetos de misturas asfálticas é formada pelas dosagens asfálticas modificadas com 4% de grafite cominuído, CA-GRAFC410 (agregados virgens, 10% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%) e CA-GRAFC420 (agregados virgens, 20% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%).

A quinta classe de projetos de misturas asfálticas é formada pelas dosagens asfálticas modificadas com 5% de grafite cominuído, CA-GRAFC510 (agregados virgens, 10% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%) e CA-GRAFC520 (agregados virgens, 20% de RAP e CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%).

As porcentagens de material reciclado foram calculadas em massa sobre o total de cada mistura asfáltica, enquanto os teores de 4 e 5% de grafite comercial e cominuído foram adicionados em relação à massa do ligante asfáltico de petróleo 50/70, conforme é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Dosagens dos concretos asfálticos

Mistura	Agregado Virgem (%)	RAP (%)	Matriz Asfáltica
CA-REF110	90	10	CAP 50/70
CA-REF120	80	20	CAP 50/70
CA-GRAF210	90	10	CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%
CA-GRAF220	80	20	CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%
CA-GRAF310	90	10	CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%
CA-GRAF320	80	20	CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%
CA-GRAFC410	90	10	CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%
CA-GRAFC420	80	20	CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%
CA-GRAFC510	90	10	CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%
CA-GRAFC520	80	20	CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%

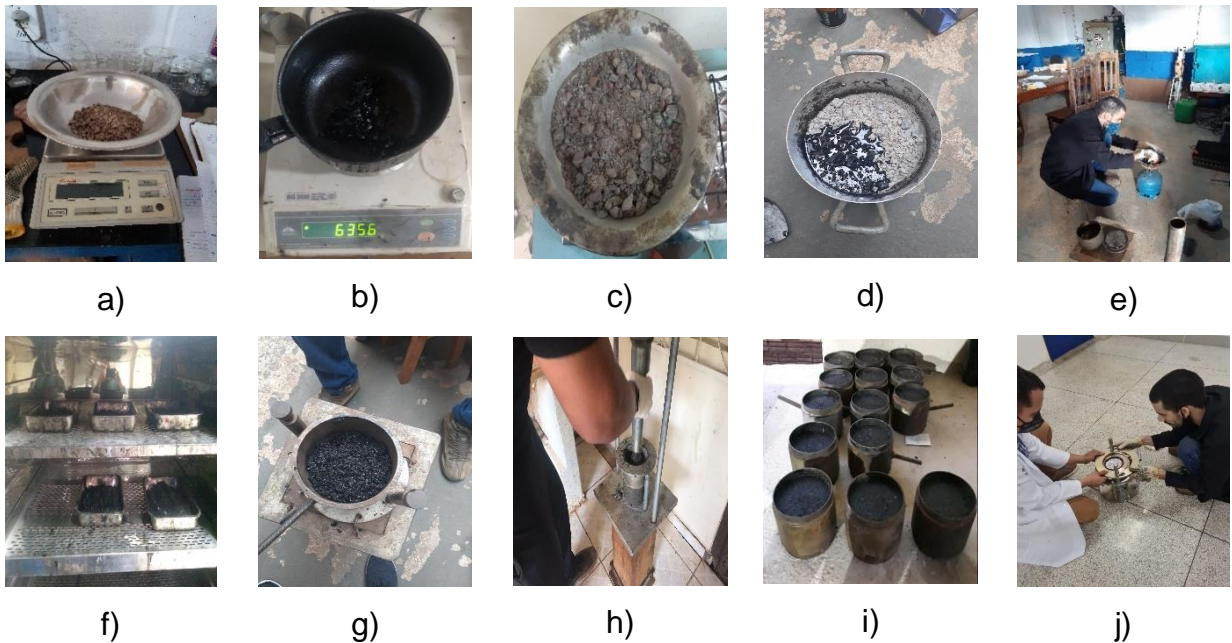
Fonte: Autor (2023).

As proporções foram definidas de 10% e 20% de material reciclado para essa pesquisa a partir dos fundamentos de Williams, Copeland e Ross (2018). Conforme os autores, a quantidade típica de RAP adicionada às novas misturas deve variar de menos de 10% a 30%. Copeland et al. (2010) mencionam que apesar de mais de 60% dos departamentos de transporte norte-americanos autorizem grandes quantidades de material fresados nas misturas asfálticas recicladas a quente (mais de 25% em relação peso de agregados), a maior parte dos projetos rodoviários não utilizam percentuais acima de 25%, especialmente se o emprego se destinar a camadas de rolamento e camadas intermediárias (COPELAND et al., 2010), visto que podem resultar em uma mistura asfáltica de baixa qualidade (BROWN et al., 2009).

Os corpos de provas foram moldados seguindo a metodologia Marshall, conforme os procedimentos estabelecidos na norma da D6926 (ASTM, 2016). Foram

confeccionadas para cada uma das misturas, cinco grupos de três corpos de prova com diferentes teores totais de asfalto (4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%), com 10cm de diâmetro $6,35 \pm 1,5$ cm de altura, mediante aplicação de 75 golpes por face, relativo a um tráfego pesado. A Figura 19 exemplifica esquematicamente o processo de preparação das composições asfálticas.

Figura 19 - Processo de preparação dos corpos de prova: a) pesagem do agregado; b) pesagem do ligante; c) aquecimento dos agregados minerais; d) adição do ligante asfáltico; e) homogeneização da mistura; f) processo de envelhecimento; g) introdução da mistura no molde; h) compactação dos corpos de prova; i) processo de cura dos corpos de prova; e j) extração dos corpos de prova



Fonte: Autor (2023).

A massa específica das misturas asfálticas é um parâmetro imprescindível para o cálculo do volume de vazios (V_v) das composições asfálticas. Para a avaliação da massa específica, existem diferentes métodos para sua determinação ou cálculo (VASCONCELOS, SOARES e LEITE, 2003). Entre os métodos de análise, destacam-se (i) a densidade máxima teórica (DMT), (ii) a densidade máxima medida (Gmm), determinada pelo método Rice, conforme a norma D2041 (ASTM, 2019) e (iii) o método do querosene (NETO, 1996).

Nesta pesquisa, a determinação dos parâmetros volumétricos foi feita por meio do método Rice ou método da bomba de vácuo (Equação 11).

$$Gmm = \frac{A}{A + D - E} \quad 11$$

Onde:

Gmm = densidade máxima medida

A = massa da amostra, seca em estufa, ao ar (g);

D = massa do recipiente cheio de água a 25°C (g); e

E = massa do recipiente com a amostra e água a 25°C (g).

Para o cálculo da massa específica aparente (Gmb) dos corpos de provas, moldaram-se nove corpos de prova no compactador Marshall automático. Após a produção dos corpos de prova, determinou-se o citado parâmetro acompanhando os critérios da norma da D2726 (ASTM, 2019), de acordo com a Equação 12.

$$Gmb = \frac{A}{B - C} \quad 12$$

Onde:

Gmb = massa específica aparente;

A = massa da amostra seca ao ar (g);

B = massa na condição saturada de superfície seca (g); e

C = massa da amostra imersa em água (g).

A partir dos resultados da massa específica aparente (Gmb) e Gmm , calculou-se o Va , volume de vazios com betume (RBV), volume de vazios do agregado mineral (VAM), volume de vazios preenchidos com ligante (VFA) e estabilidade (E), segundo as especificações ES 031 (DNIT, 2006) apresentadas na Tabela 6. Para isto, utilizou-se as Equações 13 a 16, respectivamente.

Tabela 6 - Especificações para misturas do tipo concreto asfáltico

Propriedade	Camada de Rolamento	Camada de ligação (Binder)
Va (%)	3 - 5	4 - 6
RBV (%)	75 - 82	65 - 72
VAM (%)	Igual ou maior que 15	Igual ou maior que 15
E (kgf)	Igual ou maior que 500	Igual ou maior que 500

Observação: * Função do Tamanho Nominal do Agregado (TMN)

Fonte: Autor (2023).

$$Va = \left(\frac{DMM - Gmb}{DMM} \right) \times 100 \quad 13$$

$$VCB = \frac{Gmb \times \%a}{Ga} \quad 14$$

$$VMA = Va + VCB \quad 15$$

$$RBV = \frac{\%V_b}{\%VAM} \quad 16$$

Onde:

Va = volume de vazios;

RBV = volume de vazios com betume;

VAM = volume de vazios do agregado mineral;

RBV = Relação Betume Vazios;

V_b = volume ocupado pelo betume na mistura;

Gmm = massa específica máxima medida;

Gmb = massa específica aparente;

$\%a$ = porcentagem do cimento asfáltico de petróleo; e

Ga = massa específica real do cimento asfáltico de petróleo.

3.6 Etapa 6 - Moldagem dos Corpos de Prova Asfálticos

Após o procedimento de mistura/homogeneização, as composições asfálticas foram condicionadas por um período de duas horas na estufa (envelhecimento a curto prazo), nas respectivas temperaturas de compactação para o processo de envelhecimento, conforme recomenda a norma D4867 (ASTM, 2014). O citado período teve como objetivo simular o processo de preparação, transporte e distribuição e compactação do concreto asfáltico no campo, assim como melhorar a interação ligante-agregado.

Posteriormente ao processo de envelhecimento a curto prazo, as misturas asfálticas destinadas aos ensaios de RTCD e módulo de resiliência foram compactadas pelo método Marshall, conforme preconiza a norma americana D6926 (ASTM, 2016). Finalizada a compactação, as amostras asfálticas foram submetidas ao processo de descanso à temperatura ambiente, em uma superfície plana, por 24 horas, para posterior extração dos corpos de provas compactadas.

3.7 Etapa 7 - Avaliação das Propriedades Mecânicas de Composições Asfálticas Usinadas a Quente Produzidas com Grafite Comercial e Cominuído

Nessa etapa os concretos asfálticos foram analisados em função da resistência mecânica, rigidez e durabilidade do material. O desempenho mecânico foi avaliado em função do ensaio de RTCD. A rigidez foi analisada por meio do ensaio de módulo de resiliência.

3.7.1 Resistência Mecânica

Segundo Santos (2005), os principais defeitos que um pavimento são: afundamento de trilhas de roda ocasionada pela deformação permanente vertical excessiva; trincamento por fadiga da camada asfáltica em virtude da repetição do carregamento; e trincamento térmico, consequência de variações de temperatura e, estes mecanismos de degradação dos pavimentos estão relacionados com o desempenho mecânico. Essas deformabilidades elásticas do pavimento podem ser determinadas por diversas formas que vão desde as correlações com as propriedades do ligante e da mistura asfáltica, por meio de ensaios de laboratório ou por meio de

retro análise e medições indiretas *in loco*. Em laboratório, os métodos mais empregados no Brasil são ensaio de RTCD e módulo de resiliência (JUNIOR, 2004).

3.7.1.1 RTCD

Para avaliação da resistência mecânica das composições asfálticas, foi utilizado o ensaio de RTCD. O ensaio de compressão diametral ou ensaio brasileiro (*Brazilian Test*) foi criado na década de 50, pelo professor Fernando Luís Lobo Barbosa Carneiro, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (BALBO, 2010).

O ensaio de resistência à tração indireta se caracteriza por submeter um corpo de prova cilíndrico a duas forças verticais concentradas e diametralmente opostas de compressão até a ruptura do corpo de prova (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os procedimentos adotados seguiram as recomendações da norma ME136 (DNIT, 2018), sendo moldadas 20 amostras para cada mistura avaliada, sendo diferenciadas pelo teor de material fresado e o tipo de ligante asfáltico utilizado, totalizando 200 corpos de prova. As amostras betuminosas foram submetidas a uma carga estática com velocidade de 0,8mm/s no sentido diametral e na velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até atingirem a ruptura, segundo a temperatura de 25°C.

Após a ruptura dos corpos de prova, a resistência foi obtida pela Equação 17.

$$RTCD = \frac{2F}{\pi DH} \quad 17$$

Onde:

RTCD = resistência à tração, à temperatura do ensaio (MPa);

F = carga de ruptura (N);

D = diâmetro de corpo de prova (mm); e

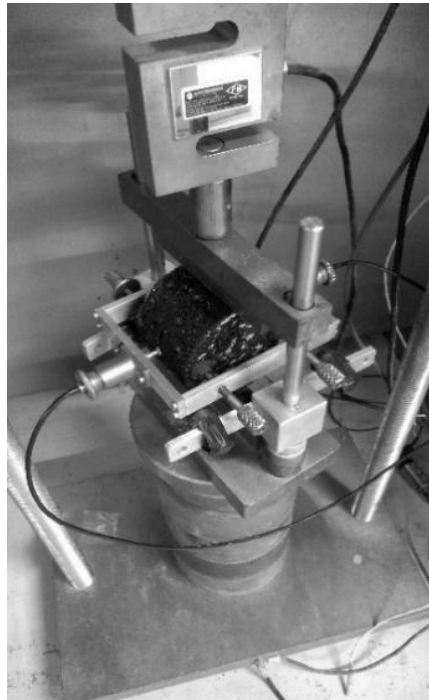
H = altura do corpo de prova (espessura) (mm).

3.7.2 Rigidez

3.7.2.1 Módulo de resiliência

O DNIT em sua norma ME 135/10 define o módulo de resiliência como sendo a relação entre a tensão de tração aplicada constantemente no plano diametral de um corpo de prova cilíndrico e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada, conforme pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Ensaio de módulo de resiliência



Fonte: Autor (2023).

De acordo com Brito e Graeff (2008), o módulo de resiliência pode ser obtido por meio do modelo desenvolvido por Lobo Carneiro (1943), conforme a Equação 18.

$$MR = \frac{P}{\Delta h} (\nu + 0,2734) \quad 18$$

O módulo de resiliência também pode ser calculado pela Equação 19 do modelo de Hondros (1959) (BRITO e GRAEFF, 2008).

$$MR = \frac{P}{\Delta h} (\nu + 0,2699) \quad 19$$

Onde:

MR = módulo de resiliência (MPa);

P = % da força axial da resistência à tração (N);

Δ = deslocamento medido (mm);

h = média da altura do corpo de prova (mm); e

ν = coeficiente de Poisson.

De forma analítica, Gonzáles *et al.* (1975) propuseram uma adequação da fórmula de Hondros, no qual o módulo de resiliência pode ser obtido pela Equação 20.

$$MR = \frac{P(0,976\nu + 0,2692)}{\Delta h} \quad 20$$

Onde:

MR = módulo de resiliência (MPa);

P = % da força axial da resistência à tração (N);

ν = coeficiente de Poisson.

Δ = deslocamento medido (mm); e

h = média da altura do corpo de prova (mm).

No presente trabalho, o ensaio de módulo de resiliência, representativo da condição mais real de tráfego no pavimento frente a tradicional metodologia Marshall, seguiu os protocolos da norma ME135 (DNIT, 2018). Neste experimento os corpos de prova foram submetidos a frequência de 1Hz, período de carregamento de 0,1s de carga, repouso de 0,9 e temperatura de ensaio de 25°C, sendo o monitoramento das leituras dos deslocamentos ocorreu por meio de sensores do tipo *Linear Variable Differential Transducers* (LVDT).

Neste estudo, o módulo de resiliência foi calculado por meio do modelo proposto por Van Der Poel (1955), que corresponde a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral vertical da amostra, e a deformação resiliente (ϵ_t), a uma determinada temperatura (T) (PINTO, 1991) (Equação 21).

$$MR = \left(\frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \right)_{t,T} \quad 21$$

Onde:

MR = módulo de resiliência (MPa);

σ_t = tensão de tração aplicada em um tempo t ; e
 ε_t = deformação específica verificada a uma temperatura T .

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais e ensaios mecânicos.

4.1 Propriedades dos materiais

Nesta etapa serão apresentados resultados de caracterização dos materiais usados.

4.1.1 Grafite

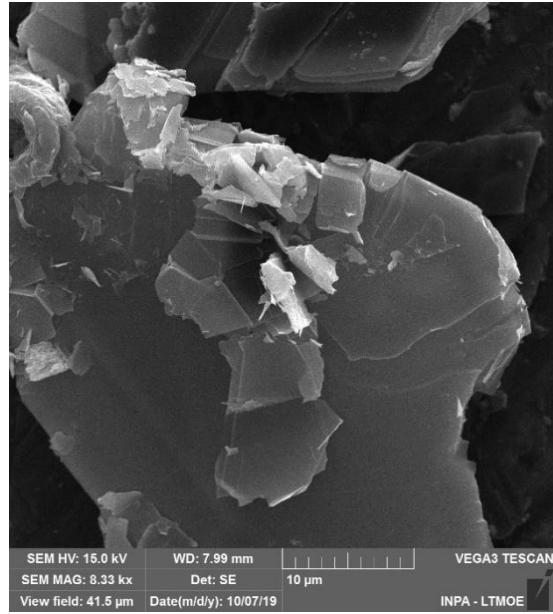
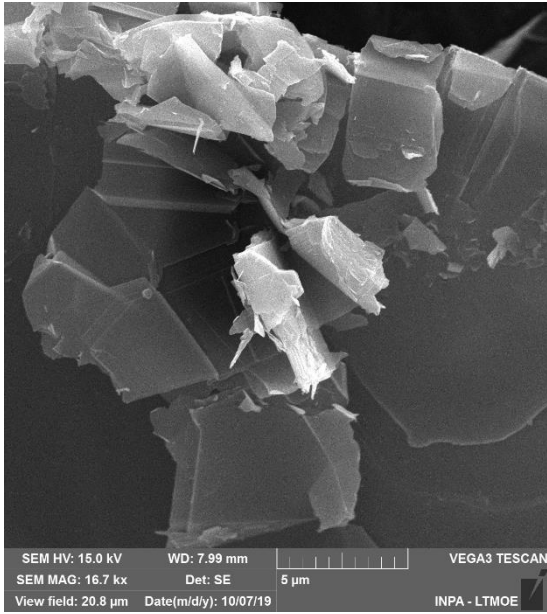
As amostras de grafite sem moagem e moído em diferentes tempos (30 minutos, 1 hora e 4 horas) foram analisadas estruturalmente utilizando as técnicas de microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raios-X.

4.1.1.1 MEV

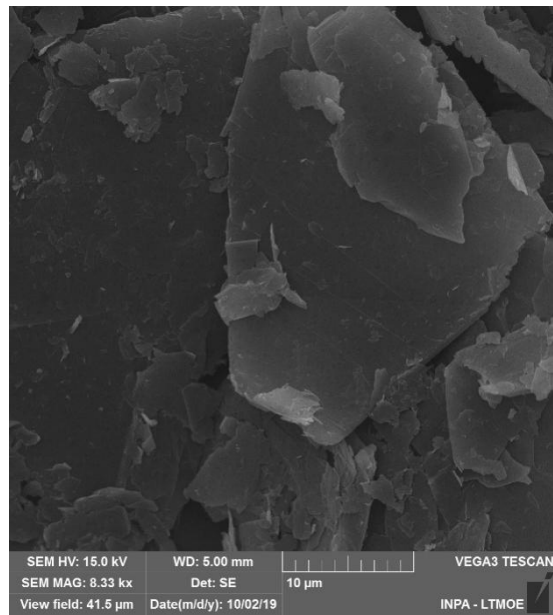
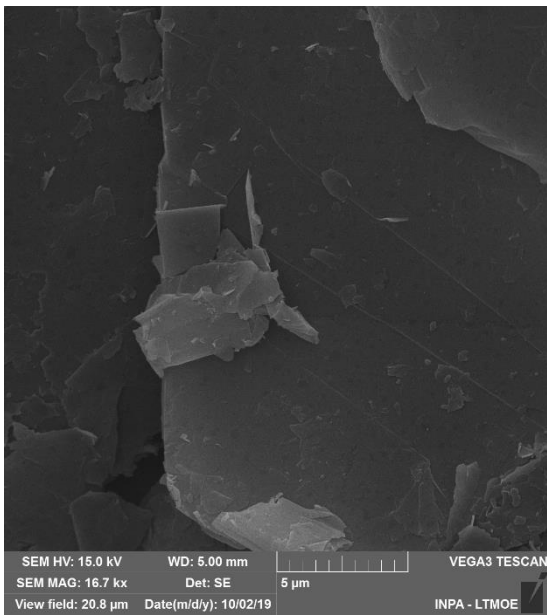
As amostras do grafite foram caracterizadas por meio da análise via MEV, o qual foi possível acompanhar a modificação morfológica do grafite comercial em função da moagem mecânica.

A Figura 21 mostra as imagens de microscopia eletrônica de varredura do grafite antes e após o processo de cominuição mecânica no moinho de bola de alta energia. A utilização do MEV para análise da estrutura do grafite é utilizada para visualização dos níveis de cominuição do material em escala de $5\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$.

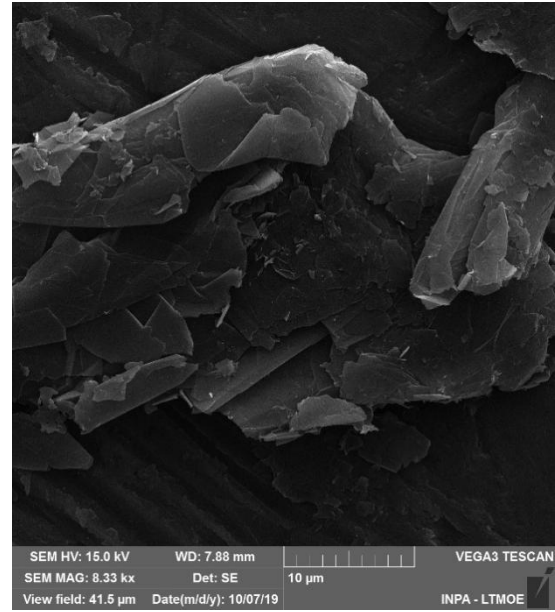
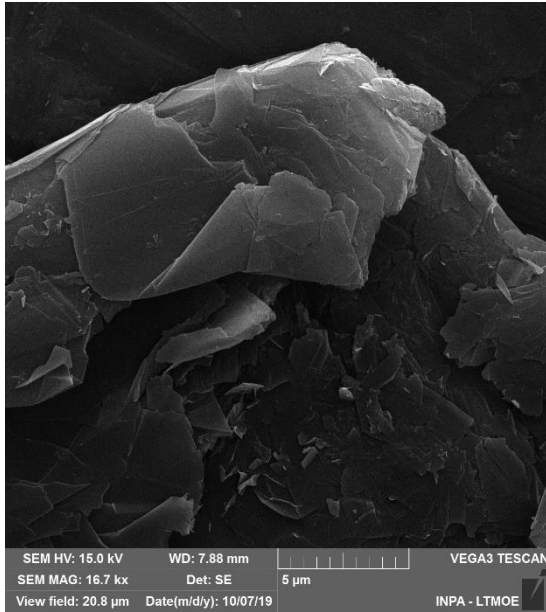
Figura 21 - Micrografias comparativas do precursor (grafite comercial e moído): a) grafite comercial; b) grafite moído por 30 minutos; c) grafite moído por 1 hora; d) grafite moído por 4 horas



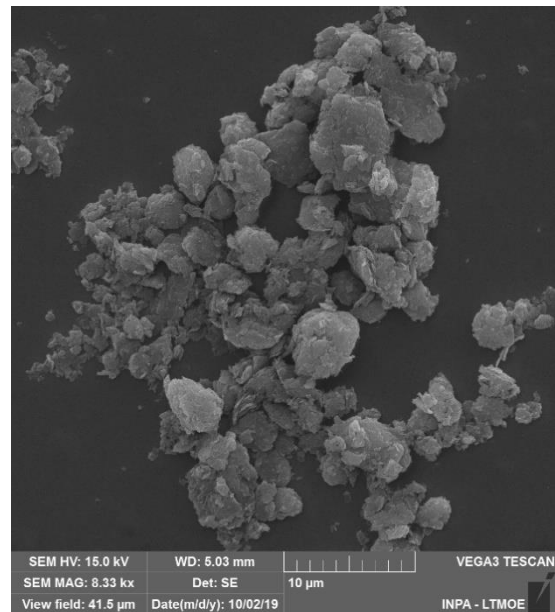
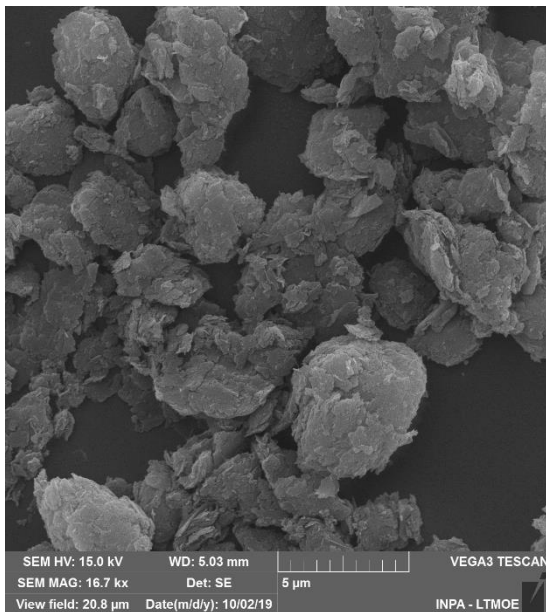
a)



b)



c)



d)

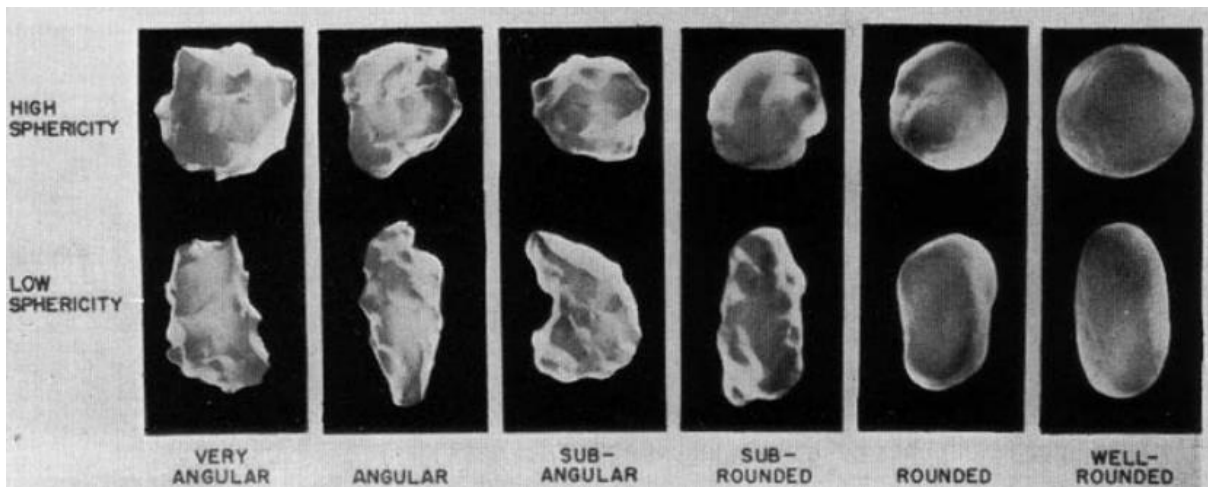
Fonte: Autor (2023).

Analisando as imagens da Figura 21, percebe-se na Figura 21(a) a morfologia característica da matriz do grafite, ou seja, mostra a estrutura do grafite em placas bem definidas no seu estado cristalino, e com uma superfície lisa e uniforme. A Figura 21(b) mostra as imagens do grafite cominuído por 30 minutos, em que observa-se pequenas modificações em sua estrutura cristalina, em que essas modificações são mais significativas na amostra de grafite moído por 1 hora (Figura 21(c)). Na Figura

21(d) verifica-se uma morfologia que pode ser considerada como muito angular, conforme pode ser observado de forma comparativa na Figura 22 (Powers, 1953), após o processo de moagem mecânica por 4 horas.

Também observam-se grãos de diversos tamanhos que podem ser atribuídos ao processo de cominuição mecânica de 4 horas em relação ao grafite original. Este processo faz com que os grãos entrem em atrito, possibilitando assim a quebra e formação de grumos de diferentes tamanhos.

Figura 22: Classificação morfológica do grafite

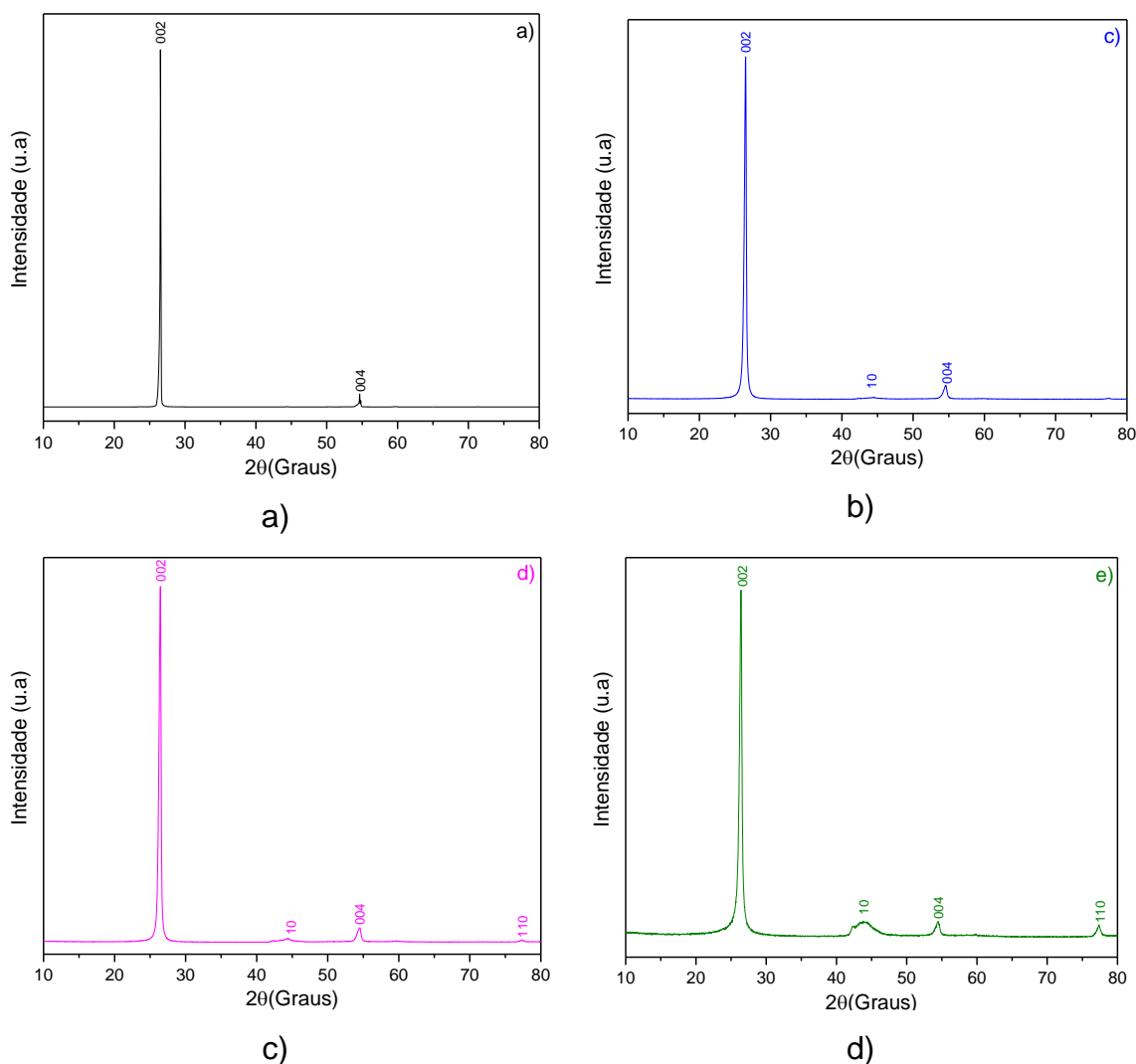


Fonte: Powers (1953).

4.1.1.2 DRX

A análise por DRX permite avaliar a diferença estrutural entre o precursor e as amostras moídas obtidas pelo processo de cominuição mecânica, em complementação ao MEV. Assim, para um melhor entendimento dos resultados, e ao mesmo tempo obter uma descrição completa do comportamento das partículas em função do esforço mecânico, os difratogramas das amostras de grafite comercial e moídas para os tempos de 30 minutos, 1 hora e 4 horas foram analisados separadamente, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23 - Difratomogramas de raios-x, analisados individualmente a) grafite comercial; b) 30 minutos de moagem; c) 1 hora de moagem; e d) 4 horas de moagem



Fonte: Autor (2023).

De modo geral, verifica-se que em todas as amostras são observados o plano cristalino (002), característico do grafite, localizado na região $26,6^\circ$ (IWASHITA *et al.*, 2004; RODRÍGUEZ, 2015; LIU *et al.*, 2017; GUO *et al.*, 2017; VIEIRA *et al.*, 2017) e (004) em $54,7^\circ$ (RODRÍGUEZ, 2015), assinalando ser um material cristalino.

Na Figura 23(a), é possível verificar os planos (002), localizado em $2\theta = 26,6^\circ$ e (004) em $54,7^\circ$, que são característicos da rede hexagonal do carbono, sendo ambos bem definidos e sem ruído aparente, o qual reflete uma maior organização das camadas de grafite (RODRÍGUEZ, 2015; BANDI *et al.*, 2019). De acordo com a Figura 23(b), nota-se uma estrutura com grau menor de organização. Destaca-se, também,

um tímido princípio de esfoliação do material, em que se tem o aparecimento do pico (10) em $44,45^\circ$, indicando uma mudança estrutural em função do tempo de moagem mecânica (STOBINSKI *et al.*, 2014) consolidando o aparecimento de estruturas bidimensionais, possivelmente com hibridação (sp^2).

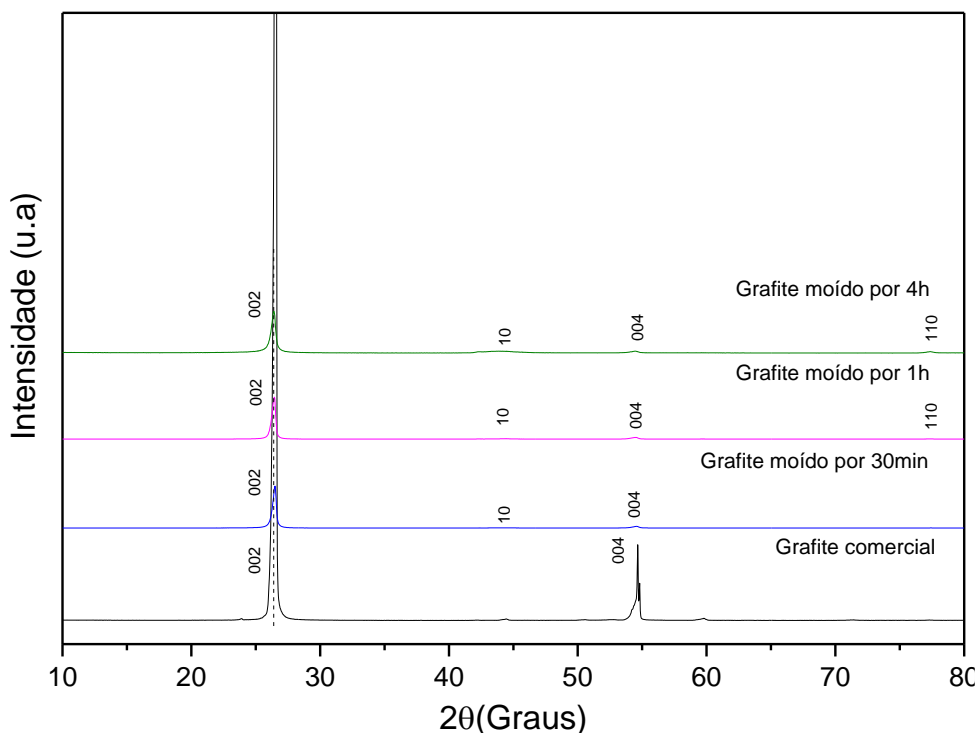
O espectro de DRX do grafite moído por 1 hora (Figura 23(c)) mostra uma pequena diminuição de intensidade, alargamento do pico (002) e o aparecimento do plano cristalino (110), o que é um indicativo de mudanças no ordenamento em relação ao material original.

Na Figura 23(d), verifica-se a consolidação dos planos cristalinos (10) e (110) e um alargamento diferenciado de todos os planos cristalinos em relação às outras amostras, apontando uma possível desordem em sua estrutura, assim como a formação de uma estrutura não-cristalina das partículas e, conseqüentemente, o aumento do grau de amorfização (camada não-cristalina) em função do aumento do tempo de moagem mecânica.

Esse comportamento assemelha-se ao exposto no estudo de Carreño *et al.* (2008), que atribui esses resultados a ação do efeito de cisalhamento e de impacto das esferas sobre as partículas cristalinas. Constata-se, no entanto, que a estrutura característica do grafite não foi destruída, ou seja, não houve uma completa oxidação do grafite, fato justificado pela presença do plano (002), mostrado à esfoliação incompleta do material, o que pode ser confirmado pelo resultado da análise de MEV que apresentou grãos de diferentes tamanhos.

Para melhor visualizar os resultados referentes aos difratogramas de raios-x das amostras de grafite, condensou-se os dados em um único difratograma (Figura 24) de maneira a perceber mais claramente o efeito de moagem mecânica no respectivo material.

Figura 24 - Difratomogramas de raios-x do grafite comercial e moídos por diferentes tempos: 30 minutos, 1 hora e 4 horas



Fonte: Autor (2023).

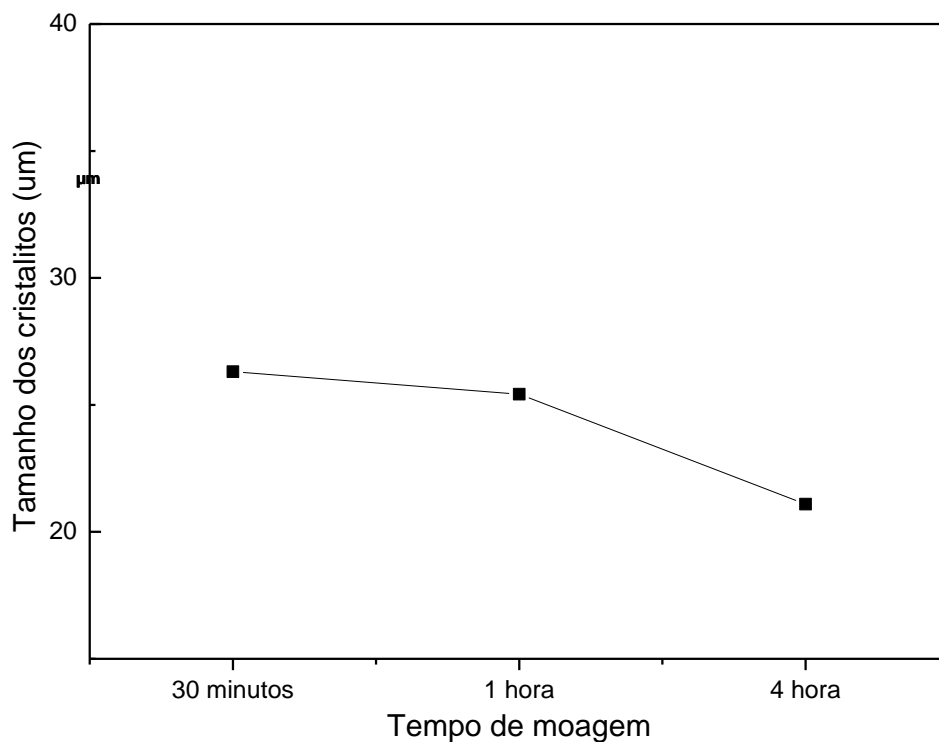
Nota-se na Figura 24 uma considerável redução na intensidade do plano cristalino (002) para as amostras cominuídas, quando comparada ao precursor, expressando uma estrutura com menor grau de organização e evidenciando a esfoliação do grafite, conforme o aumento do tempo de moagem.

Verifica-se, também, que nenhum tempo de moagem estudado foi capaz de esfoliar e separar as camadas de grafite completamente, contudo foram detectadas diferenças na intensidade dos picos, assim como o surgimento dos picos (10) e (110) para as amostras de grafite moída por 1 hora e 4 horas. Sendo que a maior intensidade do pico característico (002) foi obtida na amostra de grafite comercial.

4.1.1.2.1 Característica dos grafites cominuídos

A Figura 25 que mostra comparativamente o tamanho dos cristalitos (ordenadas) em função do tempo de moagem (abcissas).

Figura 25 - Tamanho dos cristalitos (Lc002)

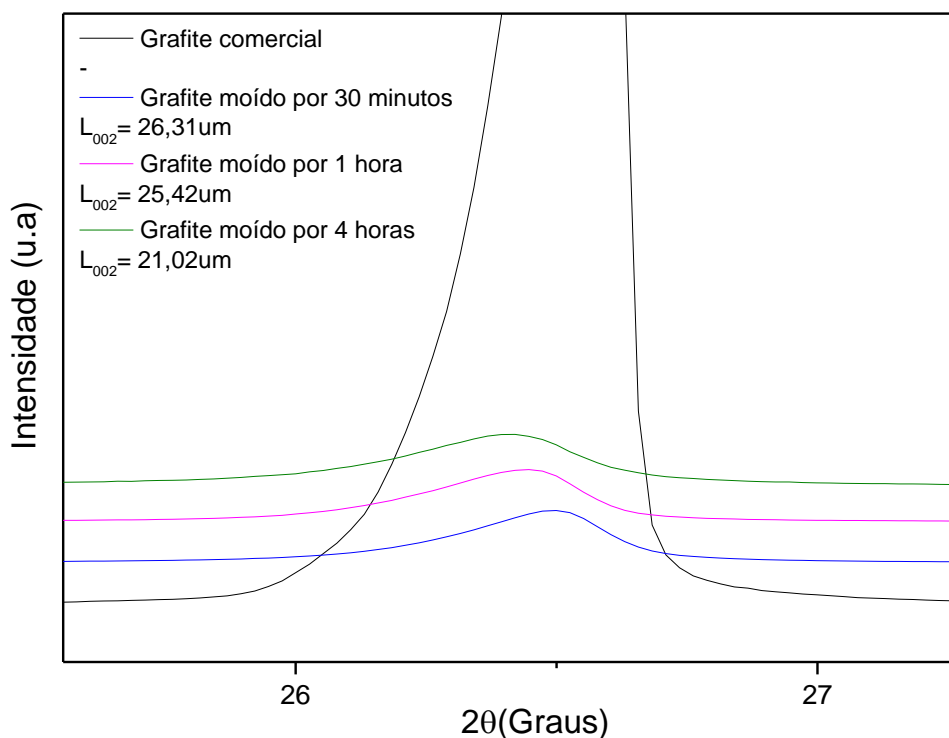


Fonte: Autor (2023).

De acordo com os resultados da Figura 25, as amostras de grafite comercial, grafite moído por 30 minutos, 1 hora e 4 horas apresentaram um tamanho de 26,31 μm, 25,42 μm e 21,02 μm, respectivamente, ou seja, quanto maior o valor L_{C002} mais organizado é o material. Deste modo, na presente pesquisa o grafite comercial é a amostra que apresenta maior organização cristalina.

Na Figura 26 são comparados os perfis dos planos cristalinos (002) das amostras de grafite. Também são apresentados os respectivos valores de L_{C002} .

Figura 26 - Comparação da intensidade dos picos característicos (002) das amostras de grafite



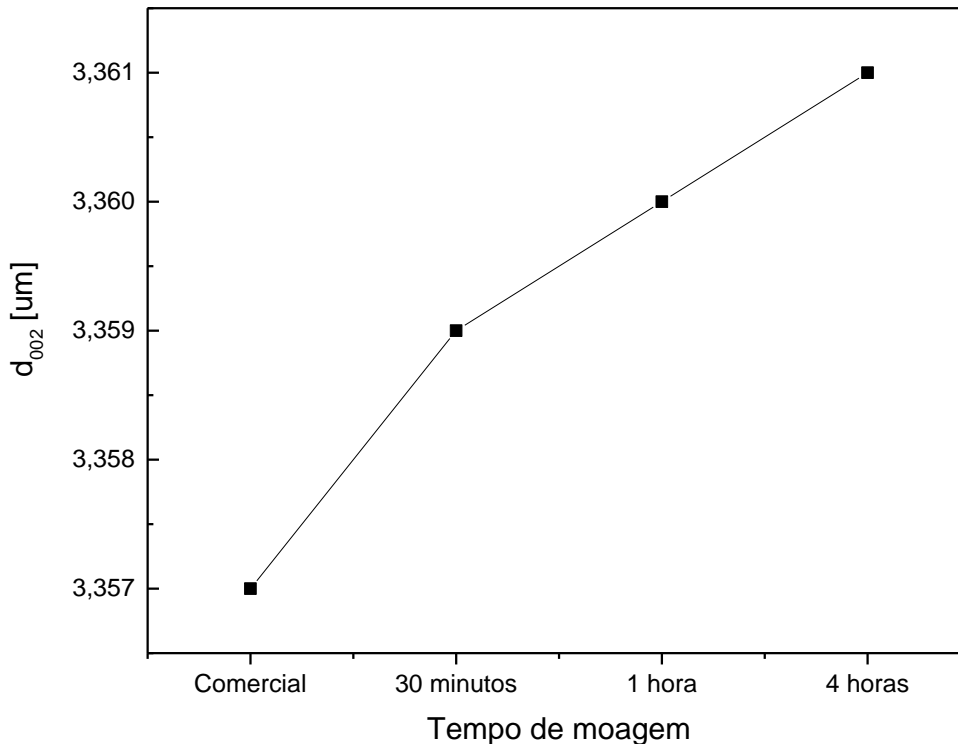
Fonte: Autor (2023).

Ao analisar os perfis do pico (002) do grafite da Figura 26, percebe-se que as amostras apresentam diferentes dimensões para a banda (002) do grafite, principalmente na intensidade e deslocamento, expondo diferentes graus de grafitização.

O processo de moagem mecânica de alta energia, além de favorecer as alterações nas propriedades dos materiais, também é responsável por um progressivo processo de cominuição mecânica das partículas do material. Desta maneira, tempos maiores de moagem mecânica exerce papel fundamental no aumento da fração não-cristalina, pois a ação de cisalhamento e de impacto das esferas sobre as partículas cristalinas, a partir das superfícies, provoca a redução no tamanho médio das partículas cristalinas (CARREÑO *et al.*, 2008). Cabe ressaltar também, que quanto maior o tempo de moagem, menor o tamanho do cristalito.

Na Figura 27 são apresentados os resultados das distâncias entre os planos (d_{002}) das amostras de grafite em função do tempo de moagem.

Figura 27 - Distância interplanar das amostras em função do tempo de moagem



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 27, é possível observar um deslocamento vertical conforme aumenta o tempo de moagem. A partir disso, é possível inferir que o aumento do tempo de moagem implica no deslocamento dos planos de difração para ângulos maiores. Este comportamento corrobora com o relatado por Rodríguez (2015), o espaçamento interplanar d_{002} do grafite é referida pelo valor de $3,35\mu\text{m}$ (Tuinstra e Koenig, 1970), explicitando uma característica de alta cristalinidade do material, ou seja, o aumento do tempo de moagem, em linhas gerais, provoca a expansão das lâminas presentes na estrutura do grafite.

Contudo, esses aumentos foram discretos em relação ao precursor, o que indica que não houve um processo de esfoliação completa de sua estrutura para obtenção do óxido de grafite.

Desta maneira, pode-se concluir que existe uma inter-relação dos resultados de DRX com os resultados de MEV, em que se verifica uma mudança de forma do grafite em função do aumento do tempo de moagem mecânica. Esse resultado corrobora com Carreño et al. (2008), Junior (2019) e Nogueira (2019), mostrando que quanto maior o tempo de moagem mecânica, maior será a mudança estrutural do

material. Conclui-se, portanto, que a mudança estrutural é diretamente proporcional ao aumento do tempo de moagem mecânica.

É importante mencionar que, a princípio, a proposta metodológica consistia em submeter amostra de grafite comercial ao processo de moagem de alta energia até o processo completo de oxidação do grafite, bem como o alcance da escala nanométrica e, após a oxidação e a escala nanométrica, em seguida, incluir o material nanométrico nas misturas asfálticas e matriz asfáltica (CAP 50/70). Entretanto, evidenciou-se que as condições de moagem adotadas não foram suficientes para a completa mudança estrutural do material, apesar disso, pode-se notar uma diminuição do tamanho das partículas. Assim, optou-se por utilizar amostras moídas por 4 horas por apresentar a menor dimensão das partículas de grafite.

4.1.1.3 BET

Os resultados de área superficial específica dos grafites são ilustrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados de área superficial específica obtidos nos diferentes tempos de moagens

Material	Área Superfície Específica BET (m²/g)
Grafite comercial	0,8005
Grafite moído por 30 minutos	19,7359
Grafite moído por 1 hora	55,7832
Grafite moído por 4 horas	257,6297

Fonte: Autor (2023).

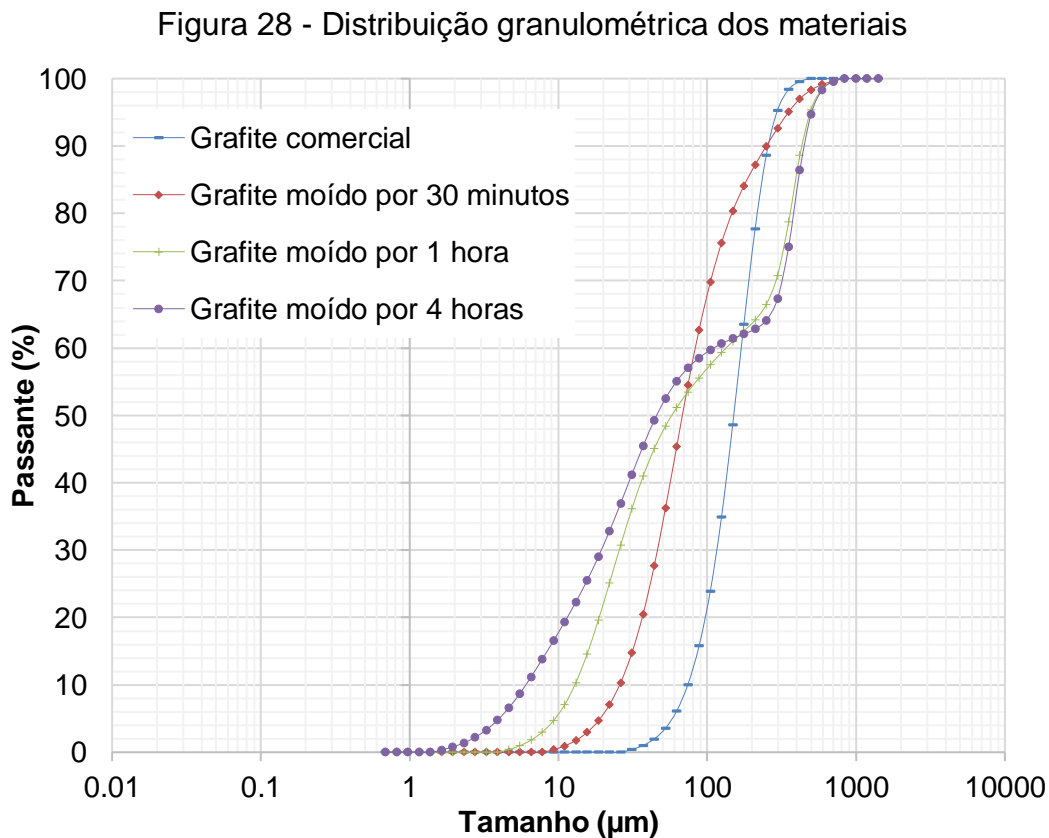
De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7, é possível verificar que a área superficial das partículas de grafite após o processo de moagem mecânica aumentou significativamente em relação às partículas da amostra não moída. Assim, ao comparar com a amostra de grafite original o aumento foi de: 2365,45%, 6868,54% e 32083,60%, para os tempos de 30 minutos, 1 hora e 4 horas, respectivamente. Isso deve-se ao fato de que com o andamento do processo de moagem, as partículas de grafite antes de tamanhos maiores e formas irregulares, foram sendo reduzidas ao mesmo tempo em que se tornaram mais esféricas em função do desgaste sofrido com o atrito durante o processo de moagem.

Essas mudanças também foram verificadas por Carreño et al. (2008). Segundo os autores, estas mudanças nos valores da área superficial específica são conferidas a bruscas mudanças que ocorrem nas superfícies do material durante o processo de moagem mecânica. Deste modo, conclui-se que o processo de moagem possibilita o aumento da área superficial específica, o que leva a um menor tamanho das partículas, conforme será discutido na análise granulométrica por difração a laser.

Segundo Fabro et al. (2011), partículas angulosas têm maior área superficial. A forma angular e uma superfície rugosa, como a maioria das partículas britadas, possibilitam concretos com maiores resistências quando comparado com as partículas arredondadas e lisas, fato justificado pela maior aderência mecânica desenvolvida entre a matriz asfáltica e as partículas angulares e rugosas.

4.1.1.4 Granulometria por difração a laser

A Figura 28 apresenta os resultados da distribuição granulométrica das amostras de grafite antes e após a moagem mecânica pelo método de difração a laser.



Fonte: Autor (2023).

É possível visualizar que os resultados obtidos por meio da granulometria por difração a laser estão em concordância com a técnica da área superficial específica, em que os dados mostram que as amostras cominuídas apresentam diminuição do tamanho das partículas em relação a amostra não moída, o que provoca o aumento da área superficial do grafite, fato este ocasionado pela diminuição do tamanho das partículas.

Pode-se ainda destacar que o tempo de moagem das amostras de grafite tem influência direta na distribuição das partículas, ou seja, o aumento do tempo de moagem motivou a diminuição do diâmetro médio das partículas. Essa redução do diâmetro médio foi crescente em relação ao tempo de moagem, o qual reduziu a dimensão média das partículas em cerca de 58,57%, 37,90% e 46,52% para os tempos de moagem em 30 minutos, 1 hora e 4 horas, respectivamente.

Carreño *et al.* (2008) e Zarzar (2020) também observaram em seus estudos a diminuição de diâmetro da partícula dos pós após a moagem de alta energia, o qual decresce a cada aumento do tempo de moagem. Segundo os autores, esse alargamento dos picos de difração ocorre devido ao efeito de diminuição do tamanho mediano das partículas, ou seja, o aumento da camada não-cristalina contribuiu para a diminuição no tamanho médio das partículas, indicando que estas ficam cada vez mais finas, demonstrando que o tempo de moagem influencia no processo de cominuição.

Assim, conforme há um aumento na quantidade de finos, menor será o número de contatos entre os grãos grosseiros, e ao alcançar uma determinada porcentagem de finos, há uma mudança nos contatos primários entre grãos, que deixam de ser entre os grãos grossos e passam a ser entre os grãos finos, reduzindo assim a tensão superficial da matriz asfáltica, melhorando a molhabilidade e facilitando o envolvimento das partículas durante o processo de usinagem e compactação das composições asfálticas (MELO, 2014). Este entendimento, corrobora com a melhor trabalhabilidade verificada nas dosagens asfálticas, que ajudou a conduzir a menores teores de ligante asfáltico para misturas modificadas.

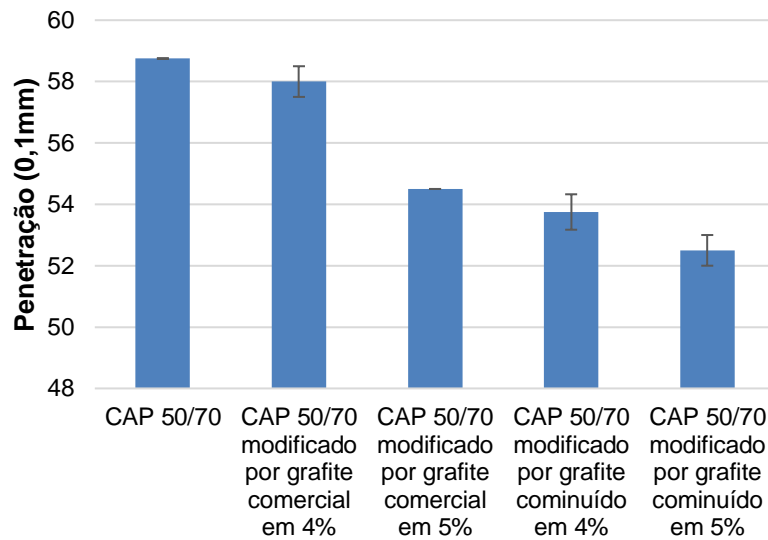
4.1.2 Ligantes Asfálticos

A seguir são apresentados os resultados de caracterização das matrizes asfálticas estudadas.

4.1.2.1 Avaliação das propriedades empíricas

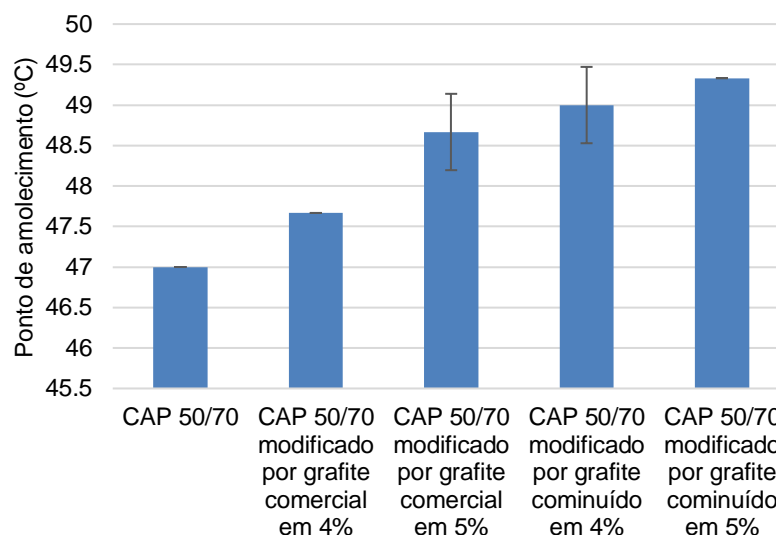
As Figuras 29 e 30 apresentam, respectivamente, a média de quatro determinações de penetração e a média de três valores de ponto de amolecimento das amostras de ligantes asfálticos.

Figura 29 - Resultados de penetração dos CAP 50/70, CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%, CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%, CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%, CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%



Fonte: Autor (2023).

Figura 30 - Resultados de ponto de amolecimento dos CAP 50/70, CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%, CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%, CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%, CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%



Fonte: Autor (2023).

Analisando os resultados obtidos nas Figuras 29 e 30 é possível observar a redução da penetração e o aumento do ponto de amolecimento com a adição das amostras de grafite, ocasionando em menor sensibilidade a variação da temperatura, apontado pelo índice de suscetibilidade térmica. Acerca dos resultados obtidos na literatura, no que se refere às incorporações de diferentes materiais na matriz asfáltica, diversos autores (JUNIOR, 2004; GALOYAK et al., 2010; GOLESTANI, NEJAD e GALOYAK, 2012; PAMPLONA et al., 2012; MERUSI et al., 2014; MELO, 2014; GOLESTANI et al., 2015; CARLESSO, 2017, GE et al., 2018, entre outros) relataram que a incorporação de materiais na matriz asfáltica, de modo geral, resulta na redução da penetração e o aumento do ponto de amolecimento em comparação ao ligante asfáltico original.

Como esperado, o efeito é maior nas incorporações de grafite cominuído que aquelas do grafite comercial. Tais alterações nas propriedades empíricas do asfalto são interessantes, visto que os ligantes asfálticos utilizados no Brasil apresentam susceptibilidade perto do limite máximo das normas regulamentadoras (MELO, 2014).

Além disso, Rohde (2007) salienta que a diminuição na penetração associada ao aumento do ponto de amolecimento em função do envelhecimento de curto prazo pode representar diminuição na vida de fadiga do concreto asfáltico, visto que as

modificações na composição do ligante asfáltico pioram as propriedades elásticas do material asfáltico.

O ponto de amolecimento é constantemente associado com a ocorrência de deformações plásticas em composições asfálticas, quanto maior este valor, menor o afundamento nas trilhas de roda (MELO, 2014). Neste quesito, verifica-se na Figura 27 um ganho sucessivo desse parâmetro, conforme ocorre o acréscimo dos teores de grafites no ligante puro, o que sinaliza a influência do grafite sobre o ponto de amolecimento. Em síntese, a adição do grafite melhora a rigidez do ligante asfáltico 50/70. Melo (2014), por exemplo, observou que incorporação de NA e NTC à matriz asfáltica ocasionou a diminuição da penetração e o aumento do ponto de amolecimento dos ligantes, dando origem a materiais menos suscetíveis às variações de temperatura.

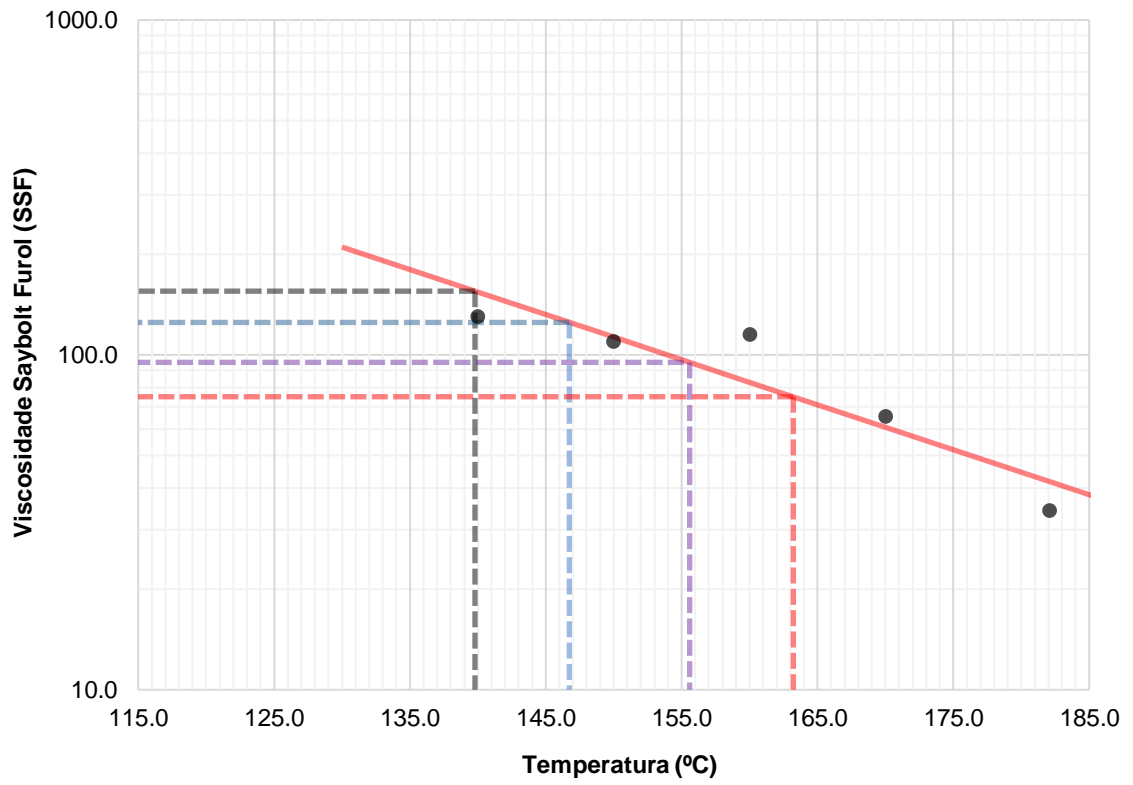
Referente ao desempenho, principalmente sob altas temperaturas, ligantes que apresentam menores valores de penetração e maiores valores de ponto de amolecimento inclinam-se a apresentar maior resistência à deformação permanente, dado que são mais rígidos e menos sensíveis à ação da temperatura (CARLESSO, 2017). Martinez (2017) também corrobora com as afirmações de Carlesso (2017), o qual afirma que a redução do valor da penetração e o aumento do ponto de amolecimento em asfaltos possibilita o aumento da consistência na mistura asfáltica que, associada a temperaturas elevadas de serviço, colabora para a prevenção de trincas por fadiga e minimiza a ocorrência de trilha de roda.

Junior (2004) também ressalta a importância do aumento do ponto de amolecimento no desempenho de um ligante asfáltico, sob a ótica da Mecânica de Pavimentos. A exposição do ligante a temperaturas mais altas apresenta, proporcionalmente, um ganho de consistência ou endurecimento do material que obrigatoriamente endurecerá também a mistura asfáltica.

4.1.2.2 Avaliação das propriedades reológicas

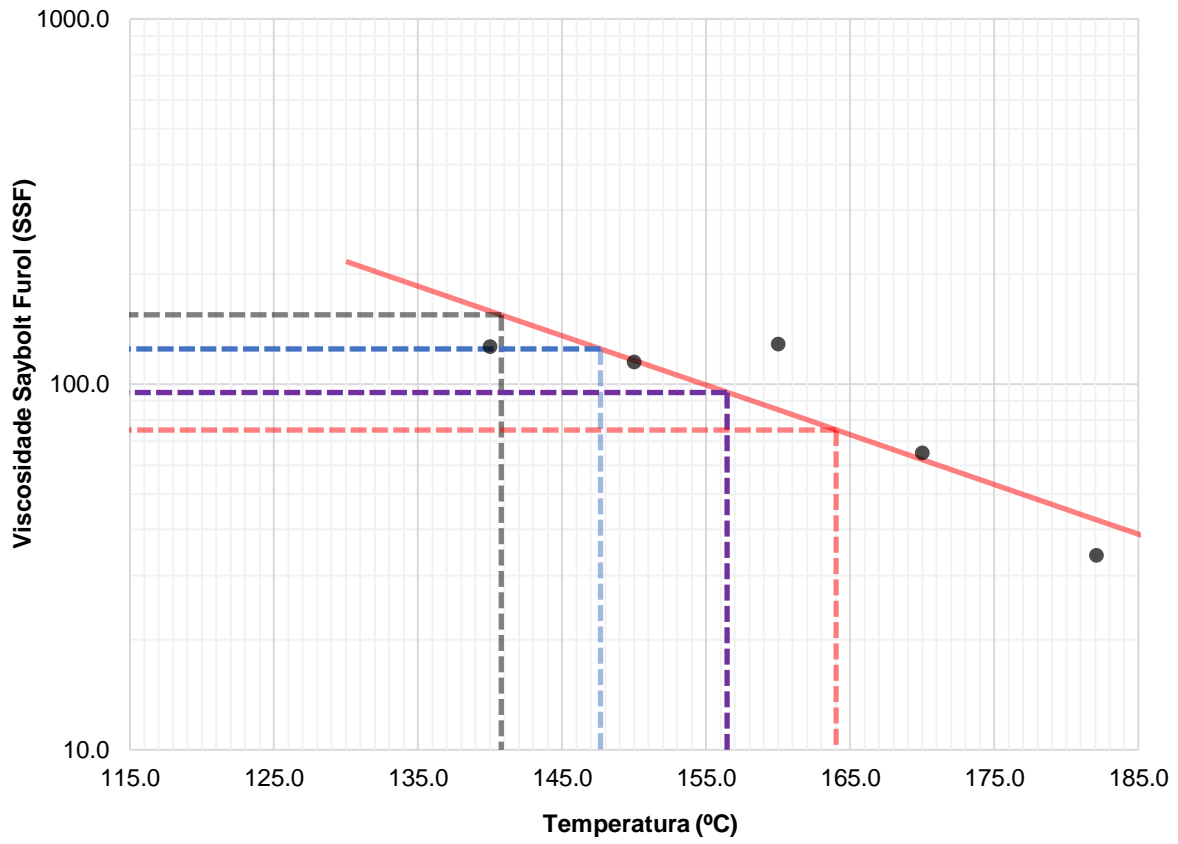
A viscosidade aparente dos ligantes asfálticos é mostrada nas Figuras 31 a 35.

Figura 31 - Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura, CAP 50/70



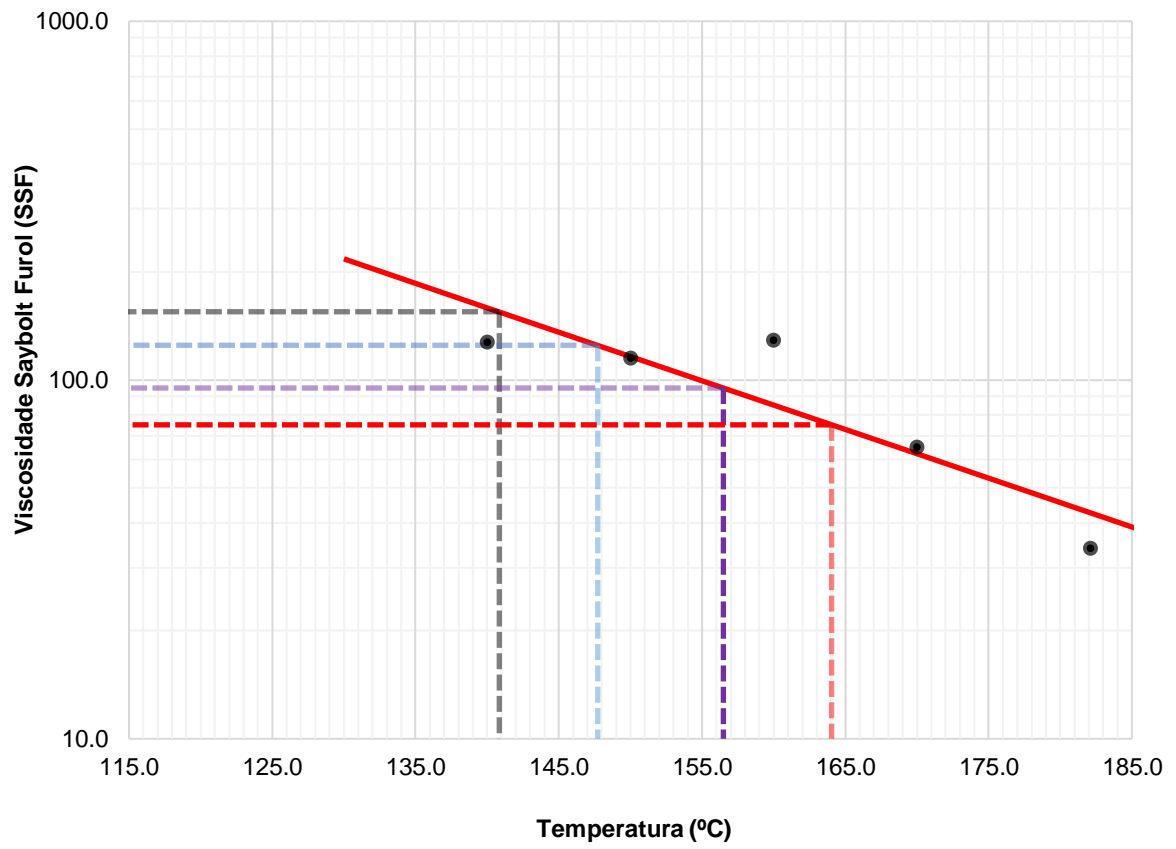
Fonte: Autor (2023).

Figura 32 - Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura, CAP 50/70 + 4% grafite comercial



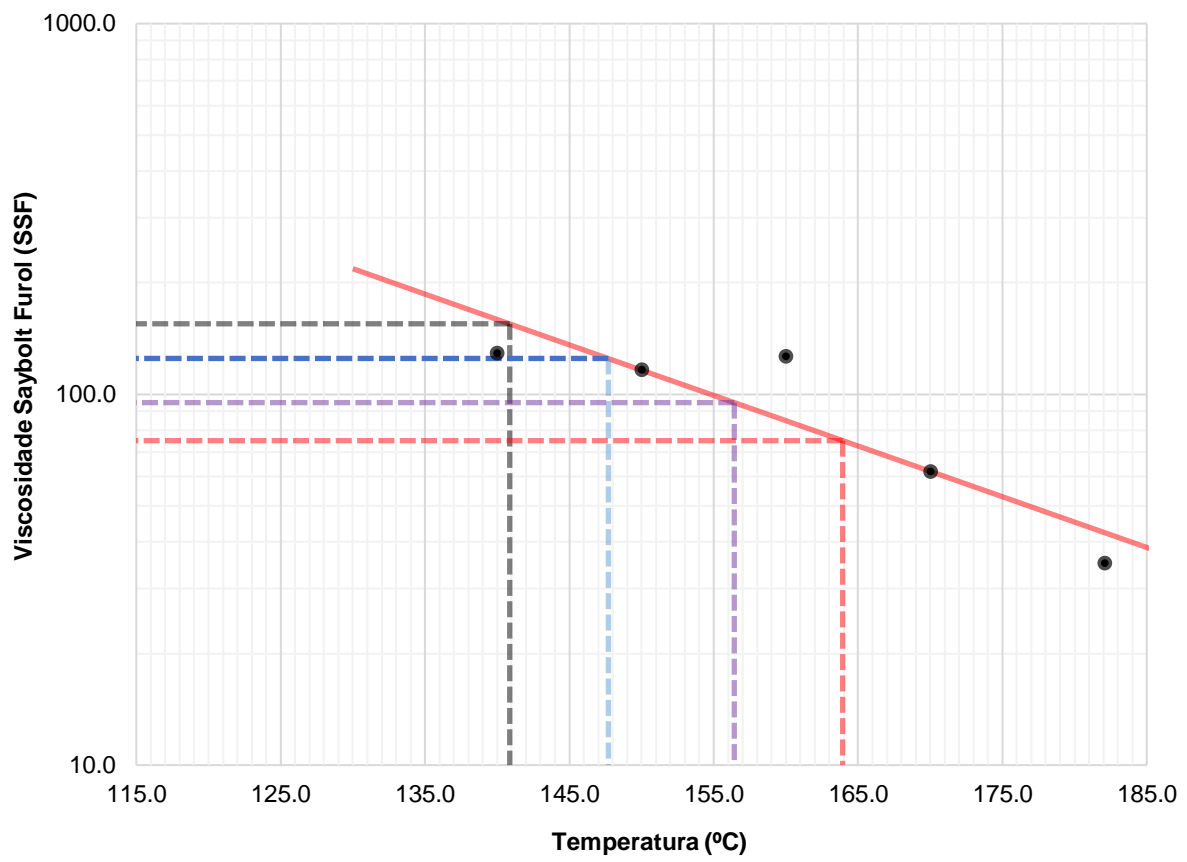
Fonte: Autor (2023).

Figura 33 - Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura, CAP 50/70 + 4% grafite cominuído



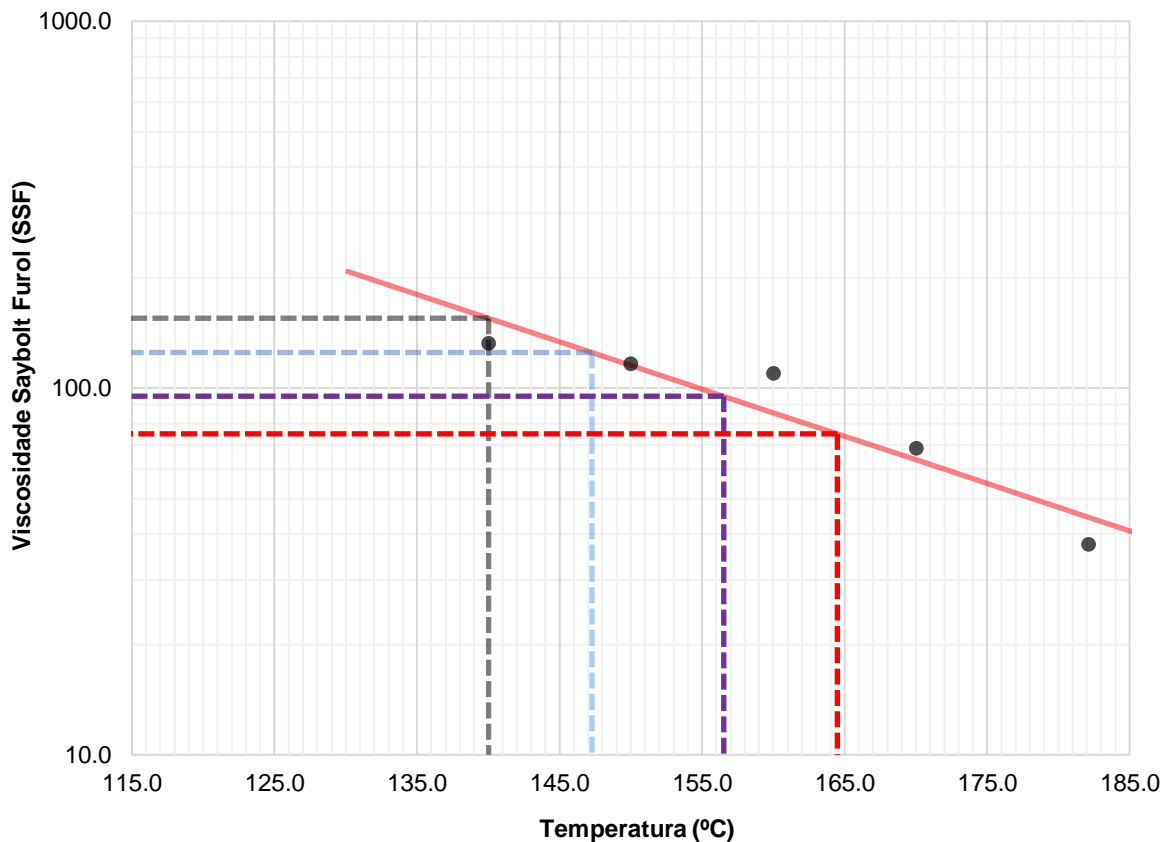
Fonte: Autor (2023).

Figura 34 - Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura, CAP 50/70 + 5% grafite comercial



Fonte: Autor (2023).

Figura 35 - Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura, CAP 50/70 + 5% grafite cominuído



Fonte: Autor (2023).

No teste realizado para a determinação da viscosidade aparente, foi possível verificar que há modificação reológica no ligante convencional quando incorporados os grafites, em que a modificação proporcionou um aumento na viscosidade dos ligantes, fato este também observado nos trabalhos de Farias *et al.* (2016), Galooyak *et al.* (2010), Golestani, Nejad e Galooyak (2012) e Pamplona *et al.* (2012). A resistência ao fluxo dos grafites, quando sujeitos a tensões, são maiores que a do ligante asfáltico 50/70, ou seja, à medida que se aumenta o teor de incorporação, há um acréscimo na resistência ao escoamento.

O efeito na resistência ao fluxo, proporcionado pelo grafite cominuído, é maior quando confrontado ao grafite comercial, havendo a mesma tendência dos valores obtidos de ponto de amolecimento. Os acréscimos de viscosidade estão relacionados ao aumento da espessura da película do ligante asfáltico devido a adição de grafites. Desta forma, foi possível obter-se uma mensuração geral dos resultados e análise

gráfica confiável das temperaturas de compactação e mistura das matrizes asfálticas, conforme mostram os dados da Tabela 8.

Tabela 8 - Temperaturas de confecção das misturas betuminosas

Matriz Asfáltica	Temperatura (°C)		
	Ligante	Agregados	Compactação
CAP 50/70	157	167	141
CAP 50/70 + 4% grafite comercial	159	169	143
CAP 50/70 + 4% grafite cominuído	160	170	144
CAP 50/70 + 5% grafite comercial	161	171	147
CAP 50/70 + 5% grafite cominuído	164	174	146

Fonte: Autor (2023).

As temperaturas apresentadas correspondem a viscosidade aparente média na faixa de aquecimento do ligante e na faixa de compactação dos corpos de prova das misturas asfálticas. Referente a temperatura de aquecimento agregados foi obtida pelo acréscimo de 10°C na temperatura do ligante asfáltico, conforme a especificação da ES 031 (DNIT, 2006).

No que se refere às temperaturas de usinagem e compactação das composições asfálticas, o aumento da viscosidade incide diretamente nas temperaturas de usinagem e compactação (MELO, 2014). Fato este observado nas temperaturas deste trabalho, em que se percebe claramente a influência da adição dos materiais nas temperaturas de usinagem e compactação. Em todos ligantes modificados, constata-se um acréscimo na temperatura de usinagem e compactação.

Esses aumentos exibidos pela incorporação de grafite comercial e cominuído, concordam com estudos por Melo (2014). O autor verificou que a incorporação de 3% de nanoargila ou NTC, ocasiona um acréscimo na temperatura de usinagem de 8°C e 10°C, respectivamente.

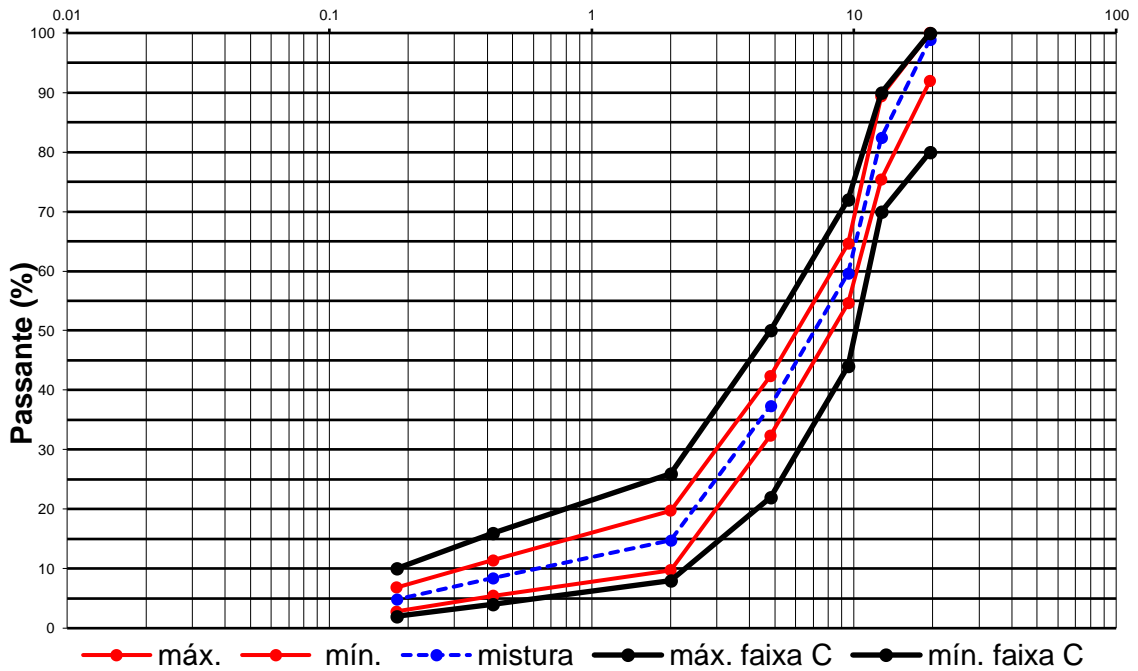
4.2 Dosagem das Misturas Asfálticas

4.2.1 Composições Granulométricas de Projeto

As curvas granulométricas dos agregados (brita 1", brita 0, pó de brita e RAP) empregados para a produção das composições asfálticas, correspondente às faixas

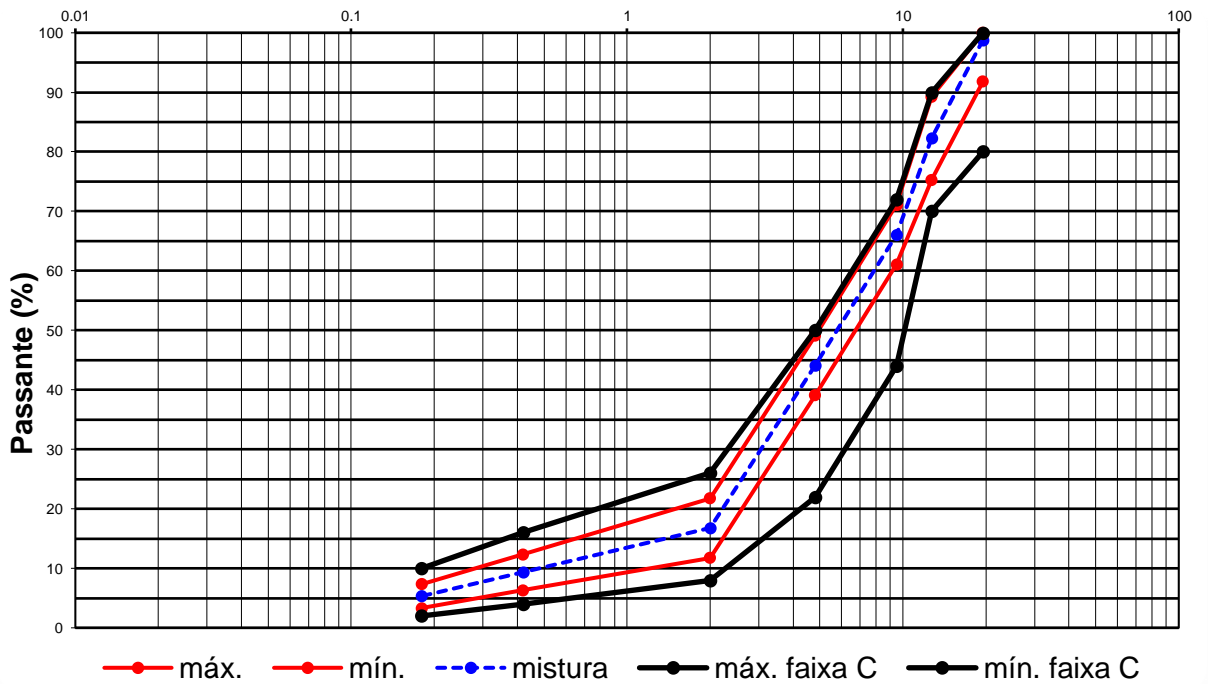
granulométricas B e C da norma técnica ES 031 (DNIT, 2006), são mostradas nas Figuras 36 e 37.

Figura 36 - Composição granulométrica da mistura de agregados com 10% de RAP



Fonte: Autor (2023).

Figura 37 - Composição granulométrica da mistura de agregados com 20% de RAP



Fonte: Autor (2023).

O projeto de mistura com 10% de material fresado é formado de 18,0% de brita 1, 29,0% de brita 0, 43,0% de pó de brita e 10,0% de RAP. Sob outra perspectiva, o projeto de mistura é constituído de 47,0% de agregado graúdo e 53,0% de agregado miúdo. Já o projeto de mistura com 20% de material fresado é composto de 18,0% de brita 1, 17,0% de brita 0, 45,0% de pó de brita e 20,0% de RAP. Sendo formado por 35,0% de agregado graúdo e 65,0% de agregado miúdo.

4.2.2 Parâmetros volumétricos

Com base nos parâmetros volumétricos e por meio das curvas vazios x ligante, foi possível determinar o teor ótimo de ligante (Tabela 9) correspondente ao critério de 4% de Va, conforme as recomendações da norma ES 031 (DNIT, 2006).

Tabela 9 – Parâmetros volumétricos correspondente as misturas

Mistura	Teor de projeto (%)	Va (%)	RBV (%)	VAM (%)	E (kgf)
CA-REF110	5,16	4,9	71,5	17,1	1651
CA-REF120	4,63	4,4	72,1	15,4	1730
CA-GRAF210	5,15	4,8	71,6	17,0	1744
CA-GRAF220	5,11	4,9	71,4	17,0	1764
CA-GRAF310	4,87	4,7	71,2	16,3	1775
CA-GRAF320	4,83	4,6	71,3	16,1	1783
CA-GRAFC410	5,02	4,8	71,4	16,7	1821
CA-GRAFC420	4,99	4,8	71,3	16,6	1838
CA-GRAFC510	4,83	4,8	71,1	16,2	1921
CA-GRAFC520	4,81	4,7	71,0	16,2	2186

Fonte: Autor (2023).

Além disso, nota-se que um acréscimo no teor de RAP resulta em uma menor adição de ligante virgem, dado que quanto maior for a porcentagem de material fresado na mistura asfáltica, maior será taxa de ligante envelhecido, por consequência, menor a porcentagem de ligante novo necessário, fato também observado por Centofante *et al.* (2018) e Correa (2020). Conforme os autores, isso pode ser justificado pela ativação do ligante envelhecido existente no material reciclado.

Além disso, cabe ressaltar que uma das principais causas do surgimento da deformação permanente no revestimento asfáltico está relacionada à dosagem inadequada da mistura asfáltica. Assim, a utilização de quantidades demasiadas de ligante asfáltico é um dos grandes responsáveis pelo afundamento de trilha de roda (ROBERTS *et al.*, 1996; BERNUCCI *et al.*, 2008). Justificado pelo fato de que o maior volume de ligante irá funcionar como lubrificante e reduzir o atrito interno e o intertravamento do esqueleto mineral da composição asfáltica (ROBERTS *et al.*, 1996). Nesta perspectiva, os resultados obtidos garantem propriedades que contribuam para minimizar os afundamentos de trilha de roda.

Outro aspecto que contribui para a redução do teor ótimo de ligante, é o fato dos grafites melhorarem a molhabilidade e o efeito lubrificante entre as partículas, alcançando mais facilmente o grau de empacotamento desejado na mistura asfáltica. Observa-se ainda que o V_a de todas as misturas recicladas, ficaram dentro dos limites preconizados pela norma de regulamentação ES 031 (DNIT, 2006), em que especifica um V_a para a camada de ligação (*binder*) de 4 a 6%, fato este que se demonstra bastante benéfico para as misturas asfálticas, visto que quanto maior o V_a da mistura no campo, mais rápida será a velocidade de envelhecimento do ligante asfáltico que, conseqüentemente, aumentará a consistência da mistura. Esse aumento de consistência influencia o comportamento físico e reológico do ligante asfáltico, deixando-o mais duro e, portanto, mais quebradiço, menos dúctil e menos elástico (JUNIOR, 2004).

Além disso, os valores de V_a abaixo de 5% encontrados na presente pesquisa encontram-se em concordância com os levantamentos realizados por Whiteoak (1990), que relata para alcançar o envelhecimento do ligante asfáltico que pode ser considerado aceitável, as misturas asfálticas no campo de diferentes idades deverão conter porcentagem de vazios menores do que 5%.

Capitão (2003) expõe que misturas asfálticas de módulo elevado precisam apresentar V_a entre 2 e 6%, VAM superior a 13% e estabilidade Marshall mínima de 16kN. Considerando essas especificações de projeto, percebe-se que as misturas estudadas estão de acordo com todos os critérios considerados. Igualmente é possível observar o atendimento do parâmetro RBV, onde o valor especificado pelo DNIT é 65% a 72%, com exceção da configuração CA-REF120, cujo valor não se enquadrava dentro dos limites. Para o tamanho nominal máximo do agregado de 19,10mm, caso das misturas em estudo, a norma ES 031 (DNIT, 2006) especifica que

o valor mínimo do parâmetro VAM deve ser de 15%. Analisando este parâmetro, percebe-se o enquadramento de todas as misturas recicladas.

No que concerne ao ensaio de Estabilidade Marshall, considerando que a perda de estabilidade acontece no instante do deslocamento ou quebra da composição asfáltica (PEREIRA, 2019), percebe-se que um dos efeitos da inserção da utilização de ligantes modificados consiste em propiciar na mistura uma menor tendência à quebra. Esse aumento na Estabilidade Marshall, que pode ser observado na Tabela 9, é reflexo da maior rigidez da mistura asfáltica, promovido pelos ligantes asfálticos modificados por grafite comercial e cominuído. Isso é consistente com a observação de GE *et al.* (2018). Os autores também observaram melhorias, em termos de estabilidade Marshall, dos ligantes modificados, sendo verificado um acréscimo linear da estabilidade Marshall conforme o aumento do teor de material alternativo no ligante asfáltico. Além disso, todos os valores de estabilidade Marshall neste estudo foram superiores ao requisito mínimo de estabilidade (≥ 500 kgf) designado pela norma ES 031 (DNIT, 2006).

Ainda que a metodologia de dosagem asfáltica empregada no presente trabalho seja fundamentada no atendimento total dos critérios volumétricos, constata-se que a mistura CA-REF120 não atendeu totalmente tais critérios, mas, apesar disso, a mistura foi aceita, visto que os parâmetros volumétricos não garantem que o teor ótimo de projeto representa o melhor teor para todos os aspectos do comportamento de uma composição asfáltica (NASCIMENTO *et al.*, 2013).

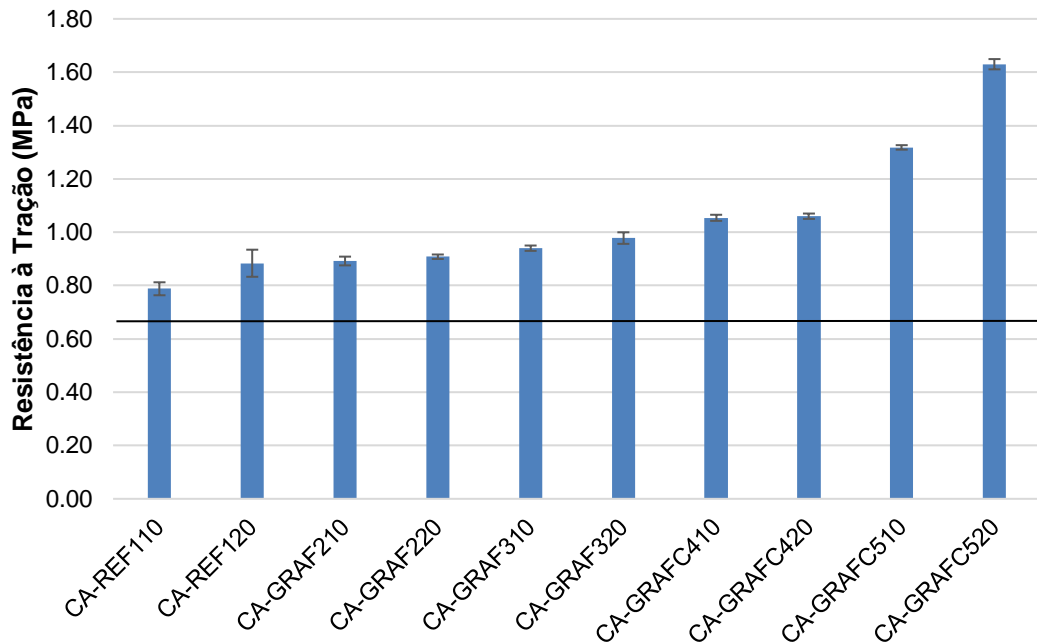
4.3 Ensaio Mecânicos

4.3.1 RTCD

Na Figura 38 é confrontada, graficamente, a média aritmética dos resultados dos ensaios de RTCD das composições asfálticas produzidas, em temperatura de

25°C. Os valores expressam a média de vinte corpos de prova para cada composição asfáltica.

Figura 38 - Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autor (2023).

Segundo Centofante (2016), à medida em que se aumenta o teor de fresado nas misturas asfálticas, os resultados de resistência à tração também aumentam, fundamentalmente devido ao aumento da quantidade de ligante envelhecido na mistura, sendo que o ligante, quando envelhecido, isto resulta em um aumento da rigidez, o que implica no enrijecimento da composição. Este efeito tende a aumentar a resistência à formação das trilhas de roda da mistura e pode ser considerado como um efeito benéfico do envelhecimento (JUNIOR, 2004). Aliado a isso, os valores de RTCD das misturas modificadas apresentou uma tendência de aumento. Segundo Taira, Furlan e Fabbri (2003), Ameri, Kouchaki e Roshani (2013), Melo (2014) e Golestani *et al.* (2015) misturas asfálticas modificadas exibem um aprimoramento das propriedades mecânicas, fato constatado pelos resultados desta pesquisa.

Taira, Furlan e Fabbri (2003) também verificaram que com aumento do teor de ligante modificado até 6%, a resistência à tração tende a aumentar e a resistência decresce com teores de ligante acima de 6%. Esta afirmação de Taira, Furlan e Fabbri

(2003) foi parcialmente notada neste trabalho, visto que foram empregados teores de ligante menores que 6%.

De acordo com a Figura 38, os maiores valores para a RTCD foram encontrados nas composições constituídas por ligantes modificados, sendo os resultados de RTCD com ligantes asfálticos modificados por grafite cominuído são mais elevados que os valores de RTCD dos ligantes asfálticos modificados por grafite comercial que, por sua vez, são superiores aos valores de RTCD dos ligantes asfálticos tradicionais. Este desempenho mecânico observado está diretamente relacionado à maior rigidez ocasionada pela incorporação dos materiais na matriz asfáltica, ou seja, a adição de grafite nas misturas asfálticas é favorável ao ensaio de tração indireta por compressão diametral, conforme observado nos trabalhos de Taira, Furlan e Fabbri (2003), Ameri, Kouchaki e Roshani (2013), Melo (2014), Golestani *et al.* (2015) e Takaikaew *et al.* (2021).

Também, é possível comprovar as afirmações de Jackson e Sherman (1953), Suryanarayana (1995) e Das (2015), que o aumento da área superficial específica do material, melhora as suas propriedades. Este fato pode ser verificado por meio da superioridade das misturas asfálticas produzidas com grafite cominuído.

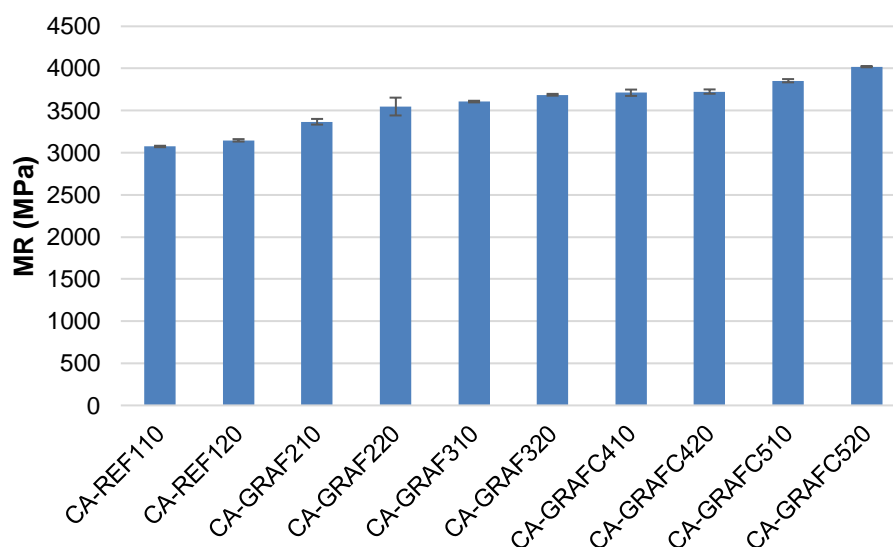
Para as misturas produzidas com 10% e 20% de material reciclado e ligante modificado com 4% de grafite cominuído, CA-GRAFC410 e CA-GRAFC420, o aumento foi de 31,86% e 19,81%, respectivamente, em comparação às misturas confeccionadas com ligante virgem, CA-REF110 e CA-REF120, e acréscimo de 17,43% e 16,56% quando confrontado com as misturas confeccionadas com 10% e 20% de material fresado e ligante modificado com 4% de grafite comercial, CA-GRAF210 e CA-GRAF220. Enquanto para as composições produzidas com 10% e 20% de material reciclado e ligante modificado com 5% de grafite cominuído, CA-GRAFC510 e CA-GRAFC520, os acréscimos foram de 66,56% e 84,69%, respectivamente, quando comparado a misturas de referência, e acréscimo de 40,57% e 67,26% quando confrontado com as misturas confeccionadas com 10% e 20% de material fresado e ligante modificado com 5% de grafite comercial (CA-GRAF310 e CA-GRAF320), assinalando os ganhos mais acentuados. Verifica-se, portanto, que o aumento da área superficial do grafite após o processo de moagem mecânica de fato resultou em uma alta melhora das propriedades mecânicas das misturas, conforme relatado na literatura especializada.

Bernucci *et al.* (2008) descrevem como valores usuais de RTCD entre 0,5 e 2,0 MPa, respectivamente. Enquanto a norma ES 031 (DNIT, 2006), especifica como valor mínimo em 0,65 MPa. Verifica-se que os resultados de resistência à tração indireta estática na temperatura de 25°C, os valores de toda as misturas asfálticas produzidas se mostraram acima deste valor, atendendo, assim, o limite imposto pela referida norma de regulamentação, além de se adequarem ao faixa instruída na bibliografia nacional.

4.3.2 Módulo de resiliência

Com o intuito de consolidar os aumentos de rigidez motivados pela incorporação dos ligantes modificados nas amostras asfálticas, assim como obter uma descrição mais detalhada do desempenho mecânico das formulações estudadas, têm-se os gráficos de módulo de resiliência dispostos na Figura 39. Os dados apresentados compreendem a média de vinte corpos de prova para cada composição.

Figura 39 - Módulo de resiliência



Fonte: Autor (2023).

Analisando a Figura 39, o comportamento do módulo de resiliência das composições se equiparam às obtidas no ensaio de RTCD, o qual se observou o acréscimo de valores pelo maior percentual de RAP incorporado à mistura. Da mesma forma, percebe-se claramente a influência positiva dos asfaltos modificados no

comportamento dos concretos asfálticos, sendo os resultados mais expressivos para as composições asfálticas modificadas com grafite cominuído, frente as referências, as quais apresentaram valores de módulo de resiliência iguais a 3074MPa e 3147MPa. Nas misturas produzidas com 10% e 20% de material fresado e ligante modificado com 4% e 5% de grafite comercial, as misturas CA-GRAF210, CA-GRAF220, CA-GRAF310 e CA-GRAF320 apresentaram módulo de resiliência média iguais a 3367MPa, 3548MPa, 3607MPa e 3687MPa, respectivamente, o que representa um aumento de 9,55%, 12,76%, 17,36% e 17,18%.

Já para composições produzidas 10% e 20% de material fresado e ligante modificado com 4% e 5% de grafite cominuído, as misturas CA-GRAFC410, CA-GRAFC420, CA-GRAFC510 e CA-GRAFC520 apresentaram módulo de resiliência média iguais a 20,77%, 18,39%, 25,39% e 26,74%, ficando nítido que o ligante modificado aumenta a rigidez das misturas. A explicação para o incremento da rigidez destas misturas está relacionada com o fato de que o uso dos ligantes modificados, provocou a redução da quantidade de asfalto disponível para recobrimento dos agregados, o que provocou um maior contato entre grãos, conseqüentemente tornando a mistura mais rígida. Vale evidenciar, a superioridade dos resultados das amostras modificadas com grafite cominuído que foram proporcionadas em função de que quanto mais fino for o material, maior será a incorporação deste material no ligante asfáltico, que por sua vez aumenta a consistência em virtude dos finos na matriz asfáltica agirem como uma barreira na propagação das microfissuras.

Junior (2004) explica que o aumento de consistência dos concretos modificados é obtido pelo endurecimento do ligante asfáltico de modo que a resposta elástica do asfalto é reduzida, com a correspondente redução na deformação permanente, ou pelo acréscimo da parcela elástica da matriz asfáltica e, por conseqüência, reduzindo a componente viscosa. Como resultado, o aumento da rigidez do ligante asfáltico também eleva a rigidez dinâmica da composição asfáltica e, por meio disso, melhora-se a capacidade de distribuição de cargas do material e reduz-se as deformações críticas, o que na prática sugere um maior coeficiente angular na curva tensão-deformação (JUNIOR, 2004; MELO, 2014). Em outras palavras, isso indica que a rigidez da mistura modificada, em campo, sob um mesmo estado de tensões, seria menos sensível às deformações de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico.

Comparando os resultados com a literatura, é possível verificar que os módulos de resiliência das misturas avaliadas nesta pesquisa estão em conformidade com os limites estabelecido por Bernucci *et al.* (2008), os quais relatam que usualmente, para ensaio de módulo de resiliência realizados na temperatura de 25°C e 1Hz de frequência, os valores de módulo de resiliência se enquadram na faixa de 2000 a 8000 MPa. Deste modo, todas as composições estudadas neste trabalho se encontram dentro dos limites encontrados nas misturas asfálticas nacionais.

Além disso, nota-se que os valores dos módulos de resiliência desta pesquisa foram superiores ao apresentado por Vasconcelos e Soares (2003) que obtiveram como módulo de resiliência 2822 MPa e 3031MPa para misturas com adição de 10% de material reciclado, e 3163 MPa e 3796 MPa para misturas com adição de 50% de material fresado.

Ao comparar os resultados com os trabalhos de Oliveira (2013), Bohn (2017), Centofante *et al.* (2018), observa-se aumento dos módulos de resiliência das misturas estudadas pelos autores. Oliveira (2013) estudou a adição de material reciclado nas seguintes porcentagens: 0%, 15%, 35% e 50%, para esses teores, o autor observou módulos de resiliência de 3809MPa, 6056MPa, 7144MPa e 8435MPa, respectivamente.

Bohn (2018) verificou que a maior adição de fresado nas composições acarretou em maiores valores de módulo de resiliência. Na avaliação dessas misturas com ligante virgem, os valores obtidos encontram-se na faixa de 9500MPa a 13000MPa, enquanto que os valores para as misturas desenvolvidas com ligante modificado por polímero (AMP 60/85) se aproximaram do intervalo de 9900MPa a 14200MPa.

Já Centofante *et al.* (2018) também observaram um aumento no valor de módulo de resiliência conforme o aumento de teor de adição de material reciclado na mistura. Nessa pesquisa, os autores estudaram os teores de 10%, 20% e 30% de inserção de reciclado, que continha ligante convencional 50/70, que também foi o mesmo inserido como ligante virgem nas misturas. Embora os resultados obtidos neste estudo sejam relativamente inferiores que os encontrados nas pesquisas de Oliveira (2013), Bohn (2017), Centofante *et al.* (2018), nota-se uma tendência de crescimento do módulo de resiliência com a adição de fresado e do ligante modificado, assim como os valores mostrados e descritos anteriormente o que salienta e comprova, por meio da literatura especializada, que a presença de RAP e ligante

modificado aumenta a rigidez das composições asfálticas. Todavia, o tipo de ligante asfáltico mostra-se mais influente que o teor de material.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo têm-se as conclusões do presente trabalho, bem como as recomendações para futuras pesquisas.

5.1 Conclusões

O presente trabalho investigou o comportamento mecânico de composições asfálticas produzidas simultaneamente por material fresado e por ligante modificado. A adição conjunta destes materiais na mistura asfáltica objetivou à associação da influência benéfica dos materiais, ao efeito também positivo do ganho de rigidez (recuperação elástica) conferida pelo grafite comercial e cominuído.

Para isto, foram desenvolvidos, dez concretos asfálticos, diferenciados pelo teor de adição de RAP (10% ou 20%), tipo (grafite comercial ou grafite cominuído) e teor (4% e 5%) de incorporação em peso na matriz asfáltica (CAP 50/70). A pesquisa partiu desde o desenvolvimento do grafite em escala reduzida, passando pela caracterização dos materiais constituintes das misturas asfálticas, avaliação empírica e reológica dos ligantes asfálticos convencionais e modificados e estendendo-se ao estudo do comportamento mecânico (RTCD e módulo de resiliência) das composições asfálticas modificadas.

No estudo de caracterização das matérias-primas (agregados e ligantes asfálticos), observou-se que todos os materiais se apresentaram dentro dos limites estabelecidos pelas respectivas normas. Ainda, na etapa de caracterização, a realização de ensaios MEV, área superficial, granulometria por difração a laser e DRX nas amostras de grafite possibilitaram a visualização das modificações após o processo de moagem mecânica, em especial a amostra de grafite moída por 4 horas, o qual demonstrou a diminuição de suas partículas e, conseqüentemente o aumento de sua área superficial em 32083,60% quando comparado a amostra original. Muito embora não se tenha parâmetros para comparar estes resultados, foi possível concluir a relevância da análise desses materiais separadamente, já que devido ao seu tamanho, o material apresentou grandes diferenças em seus resultados.

Quanto à dosagem, em geral, amostras asfálticas apresentaram enquadramento de todos os critérios. Ainda, observou que os que o RAP e os ligantes modificados afetam diretamente a trabalhabilidade da mistura asfáltica, dado que

proporcionam menor teor de ligante efetivo na mistura, além de melhorar a molhabilidade e efeito lubrificante entre as partículas, alcançando mais facilmente o grau de empacotamento desejado (% de V_a) com menores porcentagens de ligante asfáltico na composição asfáltica.

Por meio dos ensaios mecânicos, RTCD e módulo de resiliência, demonstraram-se resultados bastante promissores com a inserção de material fresado e também com a incorporação simultaneamente do material fresado e ligante modificado, quando comparados às referências normativas e literatura. Estes resultados eram esperados já que todos os materiais utilizados foram devidamente caracterizados e apresentaram resultados de acordo com o estabelecido pelas respectivas normas e literatura especializada, demonstrando que estes concretos asfálticos podem ser empregados em obras de pavimentação asfáltica no Brasil.

Em geral, concluiu-se que o uso de material fresado e ligante modificado com grafite, possibilita melhoria tanto no quesito de desempenho mecânico de concretos asfálticos, quanto para o meio ambiente, visto que proporciona uma destinação adequada para os resíduos, bem como a implementação de políticas de manutenção, recuperação e projetos de pavimentos mais econômicos pela sua maior adequabilidade técnica a longo prazo, e, em especial, minimiza a exploração dos materiais não renováveis convencionalmente utilizados em obras rodoviárias.

5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Com a finalidade de melhor avaliar o comportamento reológico e o desempenho mecânico destas mesmas composições asfálticas, sugerem-se para futuros trabalhos:

- a) Analisar o desempenho das composições asfálticas a partir dos ensaios de módulo complexo, fadiga e Deformação Permanente (*Creep* Dinâmico);
- b) Avaliar a incorporação de teores maiores de RAP na mistura asfáltica;
- c) Investigar a incorporação do grafite comercial e cominuído em outras classes de ligantes asfálticos, bem como outros teores de incorporação; e
- d) Executar e monitorar trechos experimentais com misturas asfálticas tendo a participação simultânea de material fresado e ligante modificado com grafite comercial e cominuído, visando aferir a relação laboratório-campo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ADVANCED ASPHALT TECHNOLOGIES (AAT). **A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary**. NCHRP Report 673. Transportation Research Board, Washington D. C., 2011.

ALAM, T. B.; ABDELRAHMAN, M.; SCHRAM, S. A. Laboratory characterisation of recycled asphalt pavement as a base layer. **International Journal of Pavement Engineering**, v.11, n. 2, p. 123-131, 2010.

AL-BAYATI, H. K. A.; TIGHE, S. L.; ACHEBE, J. Influence of recycled concrete aggregate on volumetric properties of hot mix asphalt. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 130, p. 200-214, 2018.

AL-QADI, I. L.; AURANGZEB, Q.; CARPENTER, S.H.; PINE, W. J.; TREPANIER, J. Impact of High RAP Contents on Structural and Performance Properties of Asphalt mixtures. **Illinois Department of Transportation**, 2012.

AL-OMARI, A. A.; KHEDAYWI, T. S.; KHASAWNEH, M. A. Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 11, p. 68-76, 2018.

AMERI, M.; KOUCHAKI, S.; ROSHANI, H. Laboratory evaluation of the effect of nano-organosilane anti-stripping additive on the moisture susceptibility of HMA mixtures under freeze–thaw cycles. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 1009-1016, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM D2041: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures**. USA, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM D2726: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures**. USA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM D4867: Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures**. USA, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM D6926: Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus**. USA, 2016.

ANDRADE, J. R. M.; SOARES, S. A.; OLIVEIRA, S. N.; SOARES, J. B. The effect of cardanol-formaldehyde resin in the rheological properties of the asphalt binder. **International Journal of Civil & Environmental Engineering**, v. 17, n. 2, p. 1-10, 2017.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. Manual Series No. 4 (MS-4). 7th edit. Asphalt Institute, 2007.

ASPHALT INTITUTE. **The asphalt binder hanbook**. Manual Series No. 26 (MS-26), First Edition, 2011.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION (ARRA). **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Goverpments Participant's Reference Book**. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-98-042, Washington, D.C. Dezembro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo: ABRELPE, 2019.

AZAHAR, W. N. A. W.; JAYA, R. P.; HAININ, M. R.; BUJANG, M.; NGADI, N. Mechanical performance of asphaltic concrete incorporating untreated and treated waste cooking oil. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 653-663, 2017.

AZEVEDO, M. C., CARDOSO, M. **Reciclagem a Quente em Central Betuminosa**. Actas das II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2003.

BANDI, S.; RAVURI, S.; PESHWE, D. R.; SRIVASTAV, A. K. Graphene from discharged dry cell battery electrodes, journal of hazardous materials. **Journal of Hazardous Materials**, v. 366, p. 358-369, 2019.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2007.

- BARDINI, V. S. S. **Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de Pinus em obras de pavimentação asfáltica**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2008.
- BARTH, E. J. **Asphalt science and technology**. Gordon and Breach Science Publishers, New York. 1962.
- BELÉM, J. **Caracterização mineralógica, física e termobarométrica de minérios de grafita da província grafítica bahia-minas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1 ed. Rio de Janeiro, PETROBRAS/ABEDA, 2008.
- BILITEWSKI, B.; HÄRDITTE, G.; MAREK, K.; WEISSBACH, A.; BOEDDICKER, H. **Waste Management**. Springer, Heidelberg, 1994.
- BINDU, C. S.; JOSEPH, M. S.; SIBINESH, P. S.; GEORGE, S.; SIVAN, S. Performance evaluation of warm mix asphalt using natural rubber modified bitumen and cashew nut shell liquid. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 13, p. 442-453, 2020.
- BOCK, A. L.; HARTMANN, D.; BUDNY, J.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 14, p. 59-69, 2009.
- BOHN, K. A. **Avaliação das misturas asfálticas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- BONFIM, V.; DOMINGUES, F. A. A. Utilização de Fresagem e Reciclagem "In Situ" a Frio. Alternativas na Recuperação de Pavimentos Asfálticos. **29ª Reunião Anual de Pavimentação**, v. 3, p. 602-62, 1995.
- BOWMAN, J. C. Proceedings of the 1st and 2nd Conference on Carbon. In: **Conference on carbon**. New York: Buffalo University, 1956.
- BRANCO, F.; SANTOS, L. P.; PEREIRA, P. **Pavimentos Rodoviários**. Almedina, Coimbra, 2008.
- BRITO, L. A. T.; GRAEFF, Â. G. **Avaliação da metodologia de cálculo para determinação do módulo de resiliência por compressão diametral para fins de projeto de pavimento e controle de qualidade de obras**. Relatório Final de Pesquisa - Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre – CONCEPA, 2008.

- BROWN, E. R., KANDHAL, P. S., ROBERTS, F. L., KIM, Y.R., LEE, D.-Y., KENNEDY, T. W. **Hot mix asphalt: Materials, mixture design, and construction**. Lanham: NCAT at Auburn University, 3rd ed., 2009.
- CAO, W.; WANG, A.; YU, D.; LIU, S.; HOU, W. Establishment and implementation of an asphalt pavement recycling decision system based on the analytic hierarchy process. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 149, p. 738-749, 2019.
- CAPITÃO, S. **Caracterização mecânica de misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade**. Tese (Doutorado - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2003.
- CARLESSO, G. C. **Estudo do comportamento de mistura asfáltica modificada por nanoargila e polímero SBS**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- CARLESSO, G. C.; TRICHÊS, G.; MELO, J. V.S.; MARCON, M. F.; THIVES, L. P.; DA LUZ, L. C. Evaluation of Rheological Behavior, Resistance to Permanent Deformation, and Resistance to Fatigue of Asphalt Mixtures Modified with Nanoclay and SBS Polymer. **Applied Sciences-Basel**, v. 9, p. 2697-2713, 2019.
- CARREÑO, N. L. V.; GARCIA, I. T. S.; LEITE, E. R.; SANTOS, L. P. S.; KEYSON, D.; LONGO, E.; FAJARDO, H. V.; PROBST, L. F. D.; FABBRO, M. T. Nanocompósitos cerâmicos a partir do processo de moagem mecânica de alta energia. **Química Nova**, v. 31, p. 962-968, 2008.
- CARVALHO, M. A. R. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cap 50/70 modificado por polímero reativo/ não-reativo e ácido polifosfórico**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- CASTRO, C. E. N.; SILVA, R. R. F.; SANTOS, L. F.; MENDES, A. S.; LIMA, C. A. P.; FROTA, C. A. Comportamento mecânico de solo argiloso estabilizado com resíduo de vidro pulverizado em moinho de alta energia e de bolas. **Matéria**, v. 24, n. 2, p. e12356, 2019.
- CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- CENTOFANTE, R.; SPECHT, L. P.; JUNIOR, P. O. B. A.; PINHEIRO, R. J. B.; PEREIRA, D. S. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria**, v. 23, n. 3, p. e12178, 2018.

- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Materiais avançados no Brasil 2010-2022**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.
- CERQUEIRA, V. R. **Síntese e sinterização de pós-compósitos de alumina-boretos de alta dureza por moagem de alta energia**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2014.
- CHEN, C.; PODOLSKY, J. H.; WILLIAMS, R. C.; COCHRAN, E. W. Laboratory investigation of using acrylated epoxidized soybean oil (AESO) for asphalt modification. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 267-279, 2018.
- CHEN, X.; WANG, H. Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p.148-157, 2018.
- CHEN, M.; XIAO, F.; PUTMAN, B.; LENG, B.; WU, S. High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 10-16, 2014.
- CHRISTOFOLETTI, S. R.; MORENO, M. M. T. Granulometria por difração a laser e sua relação com a faciologia das rochas argilosas da Formação Corumbataí-SP. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, n. 367, p. 303-310, 2017.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002**. Diário Oficial da União. Brasília, DF.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2018: relatório gerencial**. Brasília: CNT, 2018.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2019: relatório gerencial**. Brasília: CNT, 2019.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias 2021**. CNT: SEST SENAT, 2021.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (CNT). **Plano CNT de Transporte e Logística 2018**. Brasília: CNT, 2018.
- COPELAND, A.; D'ANGELO, J.; DONGRE, R.; BELAGUTTI, S.; SHOLAR, G. **Field evaluation of a high reclaimed asphalt pavement/warm mix asphalt project in Florida: A case study**. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 89., 2010, Washington. Anais... Washington: TRB, 2010.
- CORBETT, L. W.; PETROVSKI, U. Differences in distillation and solvent separated asphalt residua. **Research & Development**, v. 17, p. 342, 1978.

- CORREA, B. M. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de rap**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.
- COSTA, R. F.; ARAUJO, A. S.; SWINKA, A. R.; SILVA, L. C. S.; TEIXEIRA, R. O.; SILVA, R. L.; BRAGA, M. V. O.; PEREIRA, A. G. Análise das propriedades mecânicas de mistura asfáltica produzida com hidróxido de cálcio. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, p. 52977-52992, 2021.
- COTTET, L. **Modificação da argila montmorilonita e do carvão de coco de babaçu ativado com óxido de ferro**: Caracterização e aplicação na adsorção de azul de metileno. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuana, 2009.
- CUNHA, C. B.; BUDNY, J.; KLAMT, R. A.; CENTOFANTE, R.; BARONI, M. Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado. **Matéria**, v. 23, n. 3, p. e12186, 2018.
- CUNHA, C. M. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.
- CUNHA, M. J. A.; SILVA, C. L.; LIMA, C. A. P.; FROTA, C. A. Efeito da temperatura no comportamento mecânico de misturas asfálticas com agregados sinterizados de argila calcinada (ASAC). **Matéria**, v.23, p. e11970, 2018.
- CURADO, L. A. **Estudo sobre Reabilitação de Pavimentos Flexíveis por meio de Técnicas de Reciclagem**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2019.
- DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Cengage Learning, 2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **ES 031/2006: Pavimentos flexíveis: concreto asfáltico: especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **ES 033/2021: Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação do Serviço**. Rio de Janeiro, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **ES 034/2005: Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **ME 003/99. Material betuminoso: determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **ME 004/94. Material betuminoso - determinação da viscosidade. Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada.** Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **ME 053/94: Misturas betuminosas - percentagem de betume.** Rio de Janeiro, 1994.

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 081/98: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 1998.

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 084/95: Agregado miúdo - determinação da densidade real.** Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **ME 247/94: Material termoplástico para demarcação viária – determinação do ponto de amolecimento (método do anel e bola).** Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **ME 035/1998: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”.** Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **ME 086/1994: Determinação do índice de forma – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1994.

DING, X.; CHEN, L.; MA, T.; MA, H.; GU, L.; CHEN, T.; MA, Y. Laboratory investigation of the recycled asphalt concrete with stable crumb rubber asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 552-557, 2019.

DRESSELHAUS, M. S.; DRESSELHAUS, G.; EKLUND, P. C. **Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes.** Academic Press: San Diego, 1995.

- FABRO F.; GAVA G. P.; GRIGOLI H. B.; MENEGHETTI L.C. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **Revista Ibracon Estruturas e Materiais**, v. 4, p. 191-212, 2011.
- FARIAS, L. G. A. T.; LEITINHO, J. L.; AMONI, B. C.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A.; SANT'ANA, H. B. Effects of nanoclay and nanocomposites on bitumen rheological properties. **Construction and building materials**, v. 125, p. 873-883, 2016.
- FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor de ligantes asfalto-borracha**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2006.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Pavement Recycling Executive Summary and Report**. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-95-060, Washington, D.C. Março, 1996.
- FERNANDES, P. R. N. **Caracterização de ligante asfáltico brasileiro e avaliação da presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs)**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.
- GALOOYAK, S. S.; DABIR, B.; NAZARBEYGI A. E. MOEINI, A. Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. **Construction and building materials**, v. 24, n. 3, p. 300-307, 2010.
- GE, D.; YAN, K.; YE, F.; ZHAO, X. The laboratory performance of asphalt mixture with Amorphous poly alpha olefins (APAO) modified asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 188, n. 10, p. 676-684, 2018.
- GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K.S. The rise of graphene. **Nature Materials**, v. 6, p. 183-191, 2007.
- GOLESTANI, B.; NAM, B. H.; NEJAD, F. M.; FALLAH, S. Nanoclay application to asphalt concrete: characterization of polymer and linear nanocomposite-modified asphalt binder and mixture. **Construction and building materials**, v. 91, p. 32-38, 2015.
- GOLESTANI, B.; NEJAD, F. M.; GALOOYAK, S. S. Performance evaluation of linear and nonlinear nanocomposite modified asphalts. **Construction and building materials**, v. 35, p. 197-203, 2012.
- GOMES, K. K. P. **Síntese e caracterização de aluminofosfato impregnado com molibdênio/zinco visando a dessulfurização por adsorção**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2011.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GUARIN, A.; KHAN, A.; BUTT, A. A.; BIRGISSON, B.; KRINGOS, N. An extensive laboratory investigation of the use of bio-oil modified bitumen in road construction. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 133-139, 2016.

GUO, S.; YUAN, N.; ZHANG, G.; YU, J. C. Graphene Modified Iron Sludge Derived from Homogeneous Fenton Process as an Efficient Heterogeneous Fenton Catalyst for Degradation of Organic Pollutants. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 238, p. 62-68, 2017.

HAFEEZ, I.; KAMAL, M. A.; AHADI, M. R.; SHAHZAD, Q.; BASHIR, N. Performance Prediction of Hot Mix Asphalt from Asphalt Binders, **Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 11, n. 2, p. 104-113, 2012.

HARBEN, P.; BATES R.L. **Industrial minerals geology and world deposit**. Industrial Minerals Division, Metal Bulletin, Londres, 1990.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO13320: Particle Size Analysis - Laser Diffraction Methods Part 1: General Principles**, ISO Standards Authority, 1999.

ISLAM, R. M.; MANNAN, U. A.; RAHMAN, A. A.; TAREFDER, A. R. Effects of recycled asphalt pavement on mix and binder properties and performance in the laboratory. **93th TRB Annual Meeting 4748, Transportation Research Board**, 2014.

IWASHITA, N.; PARK, C.R.; FUJIMOTO, H.; SHIRAISHI, M.; INAGAKI, M. Specification for a standard procedure of X- ray diffraction measurements on carbon materials. **Carbon**, v. 42, p. 701-714, 2004.

JACKSON, M. L.; SHERMAN, G. D. Chemical weathering of minerals in soil. **Adv. Agron**, p. 211-318, 1953.

JAHANBAKHS, H.; KARIMI, M. M.; NASERI, H.; NEJAD, F. M. Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118837, 2020.

JAHROMI, S. G.; ANDALIBIZADE, B.; VOSSOUGH, S. Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures. **The arabian journal for Science and engineering**, v. 35, n. 1B, 2010.

JUNIOR, A. J. C. P. **Síntese de grafeno por moagem de alta energia para aplicação em supercapacitores**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

JUNIOR, A. M. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

KATO, R. B. Aplicação do resíduo da mineração do cobre para melhoria do desempenho de misturas asfálticas. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, p. 16-24, 2018.

KATO, R. B.; SOUZA, J. A. Estudo do desempenho a abrasão de pavimentos asfálticos com adição de resíduo proveniente da mineração de cobre. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 9, p. 137-145, 2017.

KAZMIEROWSKI, T. Sustainable pavements: environmental, economic, and social benefits of in situ pavement recycling. **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board**, v. 2084, p. 100-103, 2008.

KIM, Y. R. **Modeling of asphalt concrete**. United State of America: ASCE Press, 2008.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N.; SONG, I. Effect of mineral fillers on fatigue resistances and fundamental material characteristics: mechanistic evaluation. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1832, p. 1-8, 2003.

KUMAR, K.; SINGH, A.; MAITY, S. K.; SRIVASTAVA, M.; SAHAI, M.; SINGH, R. K.; GARG, M. O. Rheological studies of performance grade bitumens prepared by blending elastomeric SBS (styrene butadiene styrene) co-polymer in base bitumens. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 44, p. 112-117, 2016.

LEE, J. C.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H.; TINJUM, J. M. Building environmentally and economically sustainable transportation infrastructure: green highway rating system. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 139, n. 12, 2013.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LIU, M. H. Research and application prospect on cold recycling technology of asphalt pavement. **Applied Mechanics and Materials**, v. 204-208, p. 1909-1913, 2012.

LIU, Y., JIN, W., ZHAO, Y., ZHANG, G. Enhanced catalytic degradation of methylene blue by ϵ -Fe₂O₃/graphene oxide via heterogeneous photo-fenton reactions. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 206, p. 642–52, 2017.

LUCENA, L. C. F. L. **Estudo de aplicação de misturas solo lodo em base e subbase de pavimentos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

LUZ, P. M. S. G.; MARTINS, S. F.; COSTA, D. B.; LUCENA, L. C. F. L. Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição de óleos vegetais. **Transportes**, v. 27, p. 141-155, 2019.

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

MALLICK, R. B.; TAO, M.; DANIEL, J.S.; JACOBS, J.; VEERARAGAVAN, A. Development of a methodology and a tool for the assessment of vulnerability of roadways to flood-induced damage. **Journal Flood Risk Management**, v. 10, 3, p. 301-313, 2017.

MISSOURI ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (MAPA). **Green Asphalt**, 2019. Disponível em: <<https://moasphalt.org/education-center/green-asphalt/>>, Acessado em: 01 de setembro de 2021.

MANTEL, C. L. Carbon and Graphite Handbook. **Interscience**, v. 1, 1968.

MARCON, M. F. **Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MARSH, H. Introduction to Carbon Science. **Butterworth & Co**, v. 1, 1989.

MARSH, H.; HEINTZ, E.; REINOSO, F. R. **Introduction to Carbon Technologies**. University of Alicante, Alicante/Spain, v. 1, 1997.

MASSON, J. F.; PELLETIER, L.; COLLINS, P. Rapid FTIR method for quantification of styrene-butadiene type copolymers in bitumen. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 79, p.1034-1041, 2001.

MARTINEZ, J. G. B. **Asfaltos e misturas modificadas com materiais alternativos**. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MCDANIEL, R. S.; SOLEYMANI, H.; ANDERSON, R. M.; TURNER, P.; PETERSON, R. Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mixture Design Method. **Transportation Research Board**, 2000.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MELO, J. V. S.; TRICHÊS, G. Effects of organophilic nanoclay on the rheological behavior and performance leading to permanent deformation of asphalt mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 11, p. 04016142, 2016.

MELO, J. V. S.; TRICHÊS, G. Caracterização da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas Reforçadas Com Camadas Nanométricas de Silicatos. **Revista Pavimentação**, v. 42, p. 43-58, 2016.

MELO, J. V. S.; TRICHÊS, G. Evaluation of properties and fatigue life estimation of asphalt mixture modified by organophilic nanoclay. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 364-373, 2017.

MELO, J. V. S.; TRICHÊS, G.; ROSSO, L. T. Experimental evaluation of the influence of reinforcement with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the properties and fatigue life of hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 369-382, 2018.

MERUSI, F.; GIULIANI, F.; FILIPPI, S.; POLACCO, G. A model combining structure and properties of 160/220 bituminous binder modified with polymer/clay nanocomposites. A rheological and morphological study. **Materials and structures**, v. 47, n. 5, p. 819-838, 2014.

MILIUTENKO, S.; BJÖRKLUND, A.; CARLSSON, A. Opportunities for environmentally improved asphalt recycling: the example of Sweden. **Journal of Cleaner Production**, v. 43, p. 156-165, 2013.

MO, S.; WANG, Y.; XIONG, F.; AI, C.; WANG, D.; TAN, G. Y. A. Changes of asphalt fumes in hot-mix asphalt pavement recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120586, 2020.

MODARRES, A. Investigating the toughness and fatigue behavior of conventional and SBS modified asphalt mixes. **Construction and building materials**, v. 47, p. 218-222, 2013.

- MOMM, L.; DOMINGUES, F. A. A. Reciclagem de pavimentos à frio in situ superficial e profunda. In: **REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, 29, Cuiabá, 1995.
- MORENO-NAVARRO, F.; IGLESIAS, G. R.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. Mechanical performance of mechanomutable asphalt binders under cyclic creep and recovery loads. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 506-512, 2016.
- MORALES, M. G.; PARTAL, P.; NAVARRO, F. J.; BOZA, F. M.; GALLEGOS, C. GONZÁLEZ, N.; GONZÁLEZ, O.; MUÑOZ, M. E. Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen. **Fuel**, v. 83, p. 31-38, 2004.
- MORENO-NAVARRO, F.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. A review of fatigue damage in bituminous mixtures: Understanding the phenomenon from a new perspective. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 927-938, 2016.
- MOURA, L. S. **Utilização de lodo de tratamento têxtil em revestimentos asfálticos**: uma análise mecânica, microscópica e Ambiental. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.
- MURTY, B. S.; RANGANATHAN, S. Novel materials synthesis by mechanical alloying/milling. **Journal International Materials Reviews**, v. 43, n. 3, p. 101-141, 1998.
- NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA) e EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (EAPA). **The Asphalt Paving Industry A Global Perspective**, 2011.
- NOFERINI, L.; SIMONE, A. SANGIORGI, C. MAZZOTTA, F. Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of interaction between virgin and RAP bitumen. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 10, n. 4, p. 322-332, 2017.
- Nogueira, I. M. S. **Evolução estrutural e estabilidade térmica do sistema ni-ti-si submetido a moagem de alta energia**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.
- OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; SILVA JÚNIOR, F.; PANDOLFELLI, V. C. Artigo revisão: Estabilização de suspensões aquosas contendo grafite. **Cerâmica**, v. 46, n. 300, p. 186-195, 2000.
- OLIVEIRA, J. A. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

- POWERS, M. C. A new roundness scale for sedimentary particles. **Journal of Sedimentary Research**. v. 23. p. 117-119, 1953.
- SABAHFAR, N.; HOSSAIN. M.; HOBSON, C. Low-temperature performance of Superpave mixtures with recycled asphalt pavement. **95th TRB Annual Meeting, Transportation Research Board**, 2016.
- SABOURI, M.; BENNERT, T.; DANIEL, J. S.; KIM, R. Y. Fatigue and rutting evaluation of laboratory-produced asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement. **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board**, n. 2506, p. 32-44, 2015.
- NASCIMENTO, M. V.; SILVA, J. A. A. E.; LUCENA, A. E. F. L.; LUCENA, L. C. F. L.; F. E, S. S. C. Comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas com uso de compactação por impacto e por amassamento. **Ciência & Engenharia**, v. 22, n. 2, p. 115-120, 2013.
- NETO, A. M. C. Determinação da Densidade Máxima Teórica de Misturas Betuminosas. **30ª Reunião Anual de Pavimentação**, ABPv, Salvador, v. 1, p. 35-60, 1996.
- NETO, V. F. S. **Avaliação Reológica do Ligante Asfáltico Modificado com Nanopartículas de Óxido de Zinco**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2019.
- NETTO, A. D. P.; MOREIRA J. C.; DIAS A. E. X. O.; BAREK. J.; ARBILLA. G.; OLIVEIRA. A. S.; FERREIRA. L. F. V. Avaliação da contaminação humana por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e seus derivados nitrados (NHPAs): uma revisão metodológica. **Química Nova**, v. 23, n. 6, p.765–773, 2000.
- PAMPLONA, T. F.; AMONI. B. C.; ALENCAR, A. E. V.; LIMA, A. P. D.; Ricardo, N. M. P. S.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A. Asphalt binders modified by SBS and SBS/nanoclays: effect on rheological properties. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n. 4, p. 639-647, 2012.
- PAN, Y.; HAN, D.; YANG, T.; TANG, D.; HUANG, Y.; TANG, N.; ZHAO, Y. Field observations and laboratory evaluations of asphalt pavement maintenance using hot in-place recycling. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121864, 2021.
- PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASSAD, E. A. **Pavement Design and Materials**. John Wiley & Sons, Hoboken, p. 542, 2008.

PAVIANI, T. M. **Efeitos da adição de cal hidratada no comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos com agregado granítico**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

PEREIRA, A. G.; LACERDA, B. M.; MODOLO, R. C. E. Avaliação laboratorial de mistura asfáltica a quente produzida com grafite comercial. **Mix Sustentável**, v. 7, p. 89-98, 2021.

PEREIRA, G. S. **Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente reforçadas com geogrelha**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PONTE, R. S.; BRANCO, V. T. F. C.; HOLANDA, Á. S.; SOARES, J. B. Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do módulo de resiliência de misturas asfálticas. **Transportes**, v. 22, n. 2, p. 85–94, 2014.

PORTUGAL, A. C. X.; LUCENA, L. C. F. L.; LUCENA, A. E. F. L.; COSTA, D. B.; LIMA, K. A. Rheological properties of asphalt binders prepared with maize oil. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 1015-1026, 2017.

READ, J.; WHITEOAK, C. D. **The shell bitumen handbook**. Fifth edition, Shell Bitumen UK, Thomas Telford Publishing, London. 2003.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E.; RAY, D.; KENNEDY, T. W. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction**. NAPA Research and Education Foundation, NCAT, 2a ed. Lanham, Maryland, USA. 1996.

ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

RODRÍGUEZ, B. A. G. **Síntese e caracterização de grafeno oxidado e nanofitas de carbono e estudos de suas possíveis aplicações**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SANTAGATA, E.; BAGLIERI, O.; TSANTILIS, L.; DALMAZZO, D. Rheological Characterization of Bituminous Binders Modified with Carbon Nanotubes. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 53, p. 546-555, 2012.

- SANTOS, C. R. G. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- SANTOS, K. P.; LUCENA, A. E. F. L.; LUCENA, L. C. F. L.; SILVA, J. A. A.; COSTA, S. C. F. E. Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas em cimentos asfálticos de petróleo. **Matéria**, v. 20, n. 2, p. 501-513, 2015.
- SANTOS, N. S.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDONÇA, A. M. G. D. Efeito da adição de lignina kraft proveniente da madeira de eucalipto na reologia do CAP 50/70. **Matéria**, v.23, n.3, p. e12158, 2018.
- SAVAGE, G. Carbon-carbon composites. **Chapman & Hall**, 1993.
- SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2 ed. São Paulo: Pini, 2007.
- SHAO, H.; SUN, L.; LIU, L.; YOU, Z.; YANG, X. A novel double-drum mixing technique for plant hot mix asphalt recycling with high reclaimed asphalt pavement content and rejuvenator. **Construction and Building Materials**, v.134, p. 236-2441, 2017.
- SILVA, H. M. R.D.; OLIVEIRA, J.; JESUS, C. M. G. Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? **Resources, Conservation & Recycling**, v. 60, p. 38-48, 2012.
- SILVA, J. P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- SILVA, J. P. S.; FARIAS, M. M. Estudo dos efeitos de produtos rejuvenescedores no comportamento físico, químico e reológico de ligante asfáltico envelhecido. **Transportes**, v. 28, p. 91-102, 2020.
- SILVA, V. A.; FERNANDES, A. L. T. Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG. **Sociedade & Natureza (UFU. Online)**, v. 24, p. 333-344, 2012.
- SOL-SÁNCHEZ, M.; MORENO-NAVARRO, F.; GARCÍA-TRAVÉ, G.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. Laboratory study of the long-term climatic deterioration of asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 88, p. 32-40, 2015.
- SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com a incorporação de borracha de pneus**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. Estudo laboratorial do comportamento termomecânico de misturas asfálticas preparadas com ligante asfalto-borracha. **Revista Estradas**, v. 10, p. 6-12, 2006.

- SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P.; BRITO, L. A.; BERNUCCI, L. B. Avaliação das propriedades plásticas de misturas asfálticas com incorporação de borracha de pneus através dos processos úmido e seco. **Revista Pavimentação**, v. 2, p. 34-43, 2007.
- SPECHT, L. P.; GRANICH, A.; PASCHE, E.; BOEIRA, F. Estudo laboratorial de misturas asfálticas com adição de diferentes teores e tipos de cal. **Revista Estradas**, v. 17, p. 66-72, 2012.
- STANJEK, H.; HÄUSLER, W. Basics of X-ray diffraction. **Hyperfine Interactions**, v. 154, p. 107-119, 2004.
- STOBINSKI, L.; LESIAK, B.; MALOLEPSZY, A.; MAZURKIEWICZ, M.; B. MIERZWA, B.; ZEMEK, J.; JIRICEK, P.; BIELOSHAPKA, I. Graphene oxide and reduced graphene oxide studied by the XRD, TEM and electron spectroscopy methods. **Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena**, v. 195, p. 145–154, 2014.
- SUN, Y.; HUANG, B.; CHEN, J.; JIA, X.; DING, Y. Characterizing rheological behavior of asphalt binder over a complete range of pavement service loading frequency and temperature. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 661-672, 2016.
- SUN, Z.; YI, J.; HUANG, Y.; FENG, D.; GUO, C. Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil. **Construction and Building Materials**, v.102, p. 496-504, 2016.
- SURYANARAYANA, C. Structure and properties of nanocrystalline materials. **Bulletin of Materials Science**, v. 17, n. 4, p. 307-346, 1994.
- SURYANARAYANA, C. Nanocrystalline materials. **Int. Materials Reviews**, v. 40, n. 2, p. 41-64, 1995.
- SURYANARAYANA, C. Mechanical alloying and milling. **Progress in Materials Science**, v. 46, n. 1-2, p. 1-184, 2001.
- SURYANARAYANA, C. Mechanical Alloying and Milling Mechanical Engineering. **Progress in Materials Science**, v. 46, n. 1-2, p. 488, 2004.
- TAIRA, C.; FURLAN, A. P.; FABRI, G. T. P. **Efeito do asfalto modificado com polímero nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas**. In: XVII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Anais, vol 1. Rio de Janeiro. pp. 178-187, 2003.
- TAKAIKAEW, T.; HOY, M.; HORPIBULSUK, S.; ARULRAJAH, A.; MOHAMMADINIA, A.; HORPIBULSUK, J. Performance improvement of asphalt concretes using fiber reinforcement. **Heliyon**, v. 7, n. 5, p. e07015, 2021.

- TUINSTRA, F.; KOENIG, J. RAMAN SPECTRUM OF GRAPHITE. **Journal of Chemical Physics**, v. 53, n. 3, p. 1126-8, 1970.
- TURK, J.; MAUKO PRANJIĆ, A.; MLADENOVIĆ, A.; COTIČ, Z.; JURJAVČIČ, P. Environmental comparison of two alternative road pavement rehabilitation techniques: cold-in-place-recycling versus traditional reconstruction. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 45-55, 2016.
- TURNER, D. A.; WILLIAMS, I. D.; KEMP, S. Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 186-197, 2015.
- TORRES, A. P.; PEREIRA, I. N. A.; SPINOLA, J. R.; PEREIRA, A. G.; FROTA, C. A. Four-point bending mechanical behavior of aged asphalt mixtures containing charcoal. **International Journal for Innovation Education and Research**, v. 7, p. 460-472, 2019.
- VALDÉS, G.; PÉREZ-JIMÉNEZ, F.; MIRÓ, R.; MARTÍNEZ, A.; BOTELLA, R. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1289-1297, 2011.
- VAMEGH, M.; AMERI, M.; NAENI, S. F. C. Experimental investigation of effect of PP/SBR polymer blends on the moisture resistance and rutting performance of asphalt mixtures. **Construction and building materials**, v. 253, p. 119197, 2020.
- VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. Projeto de Misturas de Concreto Betuminoso Reciclado à quente com Diferentes Teores de Material Fresado. In: **Anais do XII Congresso Ibero Latinoamericano Del Asfalto – CILA**. Anais. 2003.
- VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B.; LEITE, L. M. Efeito da densidade máxima teórica na dosagem e no comportamento mecânico de mistura asfáltica tipo CBUQ. **Transportes**, v. 11, n. 2, 2003.
- VIDAL, R.; MOLINER, E.; MARTÍNEZ, G.; RUBIO, M. C. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 74, p. 101-114, 2013.
- VIEIRA, M. A.; FRASSON, C. M. R.; COSTA, T. L. G.; CIPRIANO, D. F.; SCHETTINO JR., M. A.; CUNHA, A. G.; FREITAS, J. C. C. Estudo através de rmn de ¹³C no estado sólido sobre a síntese de óxido de grafite utilizando diferentes precursores gráfiticos. **Química Nova**, v. 40, n. 10, p. 1164-1171, 2017.

- WANG, Y. H. The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 335-348, 2016.
- WEN, H.; BHUSAL, S.; WEN, B. Laboratory Evaluation of Waste Cooking Oil-Based Bioasphalt as an Alternative Binder for Hot Mix Asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 10, p. 1432-1437, 2013.
- WEST, R.C.; WILLIS, J. R.; MARASTEANU, M. O. Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content. **Transp. Res. Board**, v. 752, 2013.
- WHITEOAK, D. **SHELL Bitumen Handbook**. SHELL, Inglaterra, 1990.
- WILLIAMS, B. A.; COPELAND, A.; ROSS, T. C. **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2017**. 2018.
- XIAO, F.; SU, N.; YAO, S.; AMIRKHANIAN, S.; WAN, J. Performance grades, environmental and economic investigations of reclaimed asphalt pavement materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 1299-1312, 2019.
- XIAO, M; ZHANG, X.; XIAO, W.; DU, J.; SONG H.; MA, Z. The influence of chemical constitution on the structure and properties of polyimide fibre and their graphite fibre. **Polymer**, v. 165, p. 142-151, 2019.
- XIN, X.; LIANG, M.; YAO, Z.; SU, L.; ZHANG, J.; LI, P.; SUN, C.; JIANG, H. Self-sensing behavior and mechanical properties of carbon nanotubes/epoxy resin composite for asphalt pavement strain monitoring. **Construction and Building Materials**, v. 257, n. 10, p. 119404, 2020.
- YAN, K.; XU, H.; YOU, L. Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 143-149, 2015.
- YANG, S. H; LEE, L. C. Characterizing the chemical and rheological properties of severely aged reclaimed asphalt pavement materials with high recycling rate. **Construction and Building Materials**. v. 111, p. 139-146, 2016.
- YAO, C.; GUO, Y.; SHEN, A.; CUI, W.; HE, Z. Recycling of fine-asphalt-pavement solid waste for low-shrinkage rapid hardening Portland cement concrete pavement. **Construction and Building Materials**, v, 289, p. 123132, 2021.
- YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. 2 ed., New York, John Wiley & Sons Inc., 1975.

- ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): quo vadis?. **Química Nova**, v. 36, n. 10, p. 1533-1539, 2013.
- ZARGAR, M.; AHMADINIA, E.; ASLI, H.; KARIM, M. R. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. **Journal of Hazardous Materials**, v. 233-234, p. 254-258, 2012.
- ZARZAR, S. T. **Fabricação e caracterização de ligas de alumínio AA8011 e AA8079 através das técnicas de metalurgia do pó e extrusão a quente**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.
- ZHANG, D. L. Processing of advanced materials using high-energy mechanical milling. **Progress in Materials Science**, v. 49, p. 537-540, 2004.
- ZHANG, K.; AHMED, M.; WEN, H.; BAYOMY, F.; SANTI, M. Performance-related Design Method for Asphalt Mixes that Contain Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board**, p. 16-4726, 2016.
- ZHANG, W.; YANG, J.; FAN, X.; YANG, R.; YU, B. Life-Cycle Cost Analysis of Base Course Using Cold In-Place Recycling: Case Study. **Geotechnical Special Publication**, v. 211, p. 4428-4437, 2011.
- ZHU, J.; MA, T.; DONG, Z. Evaluation of optimum mixing conditions for rubberized asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117426, 2020.

ANEXO 1

Tabela 10 - Resultado da granulometria do material fresado

Peneiras		Peso Retido	% Simples Parcial	% que Passa Amostra Total	Diâmetro Máximo			4,80
Pol.	mm	Amostra 01		2.001,7	Amostra 02		2.005,3	Média
¾"	19,10	31,8	1,59	98,4%	30,2	1,50	98,5%	98,45
½"	12,70	78,9	3,94	96,1%	77,3	3,85	96,1%	96,10
3/8"	9,50	63,8	3,18	92,9%	35,2	1,75	94,4%	93,63
Nº 4	4,80	300,5	15,01	77,9%	299,5	14,93	79,5%	78,66
Nº 10	2,00	496,2	24,79	53,1%	485,3	24,20	55,3%	54,17
Nº 40	0,42	771,6	38,55	14,5%	784,2	39,10	16,2%	15,34
Nº 80	0,18	171,2	8,55	6,0%	173,3	8,64	7,5%	6,74
Nº 200	0,074	56,1	2,80	3,2%	54,3	2,71	4,8%	3,99

Fonte: Autor (2023).

Tabela 11 – Granulometria brita 1

Peneiras		Peso Retido	% Simples Parcial	% que Passa Amostra Total	Diâmetro Máximo			19,10
Pol.	mm	Amostra 01		1.501,5	Amostra 02		1.502,3	Média
¾"	19,10	76,3	5,08	94,9%	75,2	5,01	95,0%	94,95
½"	12,70	756,9	50,41	49,6%	748,0	49,81	50,2%	49,89
3/8"	9,50	559,5	37,26	12,3%	560,1	37,30	12,9%	12,60
Nº 4	4,80	103,9	6,92	5,4%	105,2	7,01	5,9%	5,64
Nº 10	2,00	0,7	0,05	5,4%	0,5	0,03	5,8%	5,60
Nº 40	0,42	0,5	0,04	5,3%	0,7	0,05	5,8%	5,56
Nº 80	0,18	1,2	0,08	5,2%	1,4	0,09	5,7%	5,47
Nº 200	0,074	4,7	0,32	4,9%	5,5	0,37	5,3%	5,13

Fonte: Autor (2023).

Tabela 12 – Granulometria brita 0

Peneiras		Peso Retido	% Simples Parcial	% que Passa Amostra Total	Diâmetro Máximo		4,80	
Pol.	mm	Amostra 01		1.022,5	Amostra 02	1.030,6	Média	
¾"	19,10	0,0	0,00	100,0%	0,0	0,00	100,0%	100,00
½"	12,70	0,0	0,00	100,0%	0,0	0,00	100,0%	100,00
3/8"	9,50	42,8	4,19	95,8%	43,3	4,20	95,8%	95,81
Nº 4	4,80	697,4	68,20	27,6%	690,5	67,00	28,8%	28,21
Nº 10	2,00	270,1	26,41	1,2%	282,5	27,41	1,4%	1,30
Nº 40	0,42	5,8	0,57	0,6%	6,6	0,64	0,8%	0,69
Nº 80	0,18	1,8	0,18	0,5%	1,4	0,13	0,6%	0,54
Nº 200	0,074	1,2	0,12	0,3%	1,5	0,15	0,5%	0,40

Fonte: Autor (2023).

Tabela 13 – Granulometria pó de brita

Peneiras		Peso Retido	% Simples Parcial	% que Passa Amostra Total	Diâmetro Máximo		2,00	
Pol.	mm	Amostra 01		610,1	Amostra 02	625,2	Média	
¾"	19,10	0,00	0,00	100,0%	0,00	0,00	100,0%	100,00
½"	12,70	0,00	0,00	100,0%	0,00	0,00	100,0%	100,00
3/8"	9,50	0,00	0,00	100,0%	0,00	0,00	100,0%	100,00
Nº 4	4,80	5,6	0,91	99,1%	7,5	1,20	98,8%	98,95
Nº 10	2,00	171,1	28,05	71,0%	172,5	27,60	71,2%	71,12
Nº 40	0,42	267,6	43,87	27,2%	265,9	42,53	28,7%	27,93
Nº 80	0,18	76,8	12,60	14,6%	78,5	12,55	16,1%	15,35
Nº 200	0,074	45,3	7,43	7,2%	47,3	7,56	8,6%	7,86

Fonte: Autor (2023).

Tabela 14 - Resultados de penetração do CAP

Ligantes asfálticos	Penetração (0,1mm)				
	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio	Valor médio
CAP 50/70	59	59	59	58	59
CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%	58	58	58	58	58
CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%	55	54	55	54	55
CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%	54	53	54	54	54
CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%	54	52	52	52	53

Fonte: Autor (2023).

Tabela 15 - Resultados de ponto de amolecimento do CAP

Ligantes asfálticos	Ponto de amolecimento (°C)			
	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	Valor médio
CAP 50/70	47	47	47	47,00
CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 4%	47	48	48	47,67
CAP 50/70 modificado por grafite comercial em 5%	48	49	49	48,67
CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 4%	49	49	49	49,00
CAP 50/70 modificado por grafite cominuído em 5%	49	49	50	49,33

Fonte: Autor (2023).

Figura 40 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-REF110

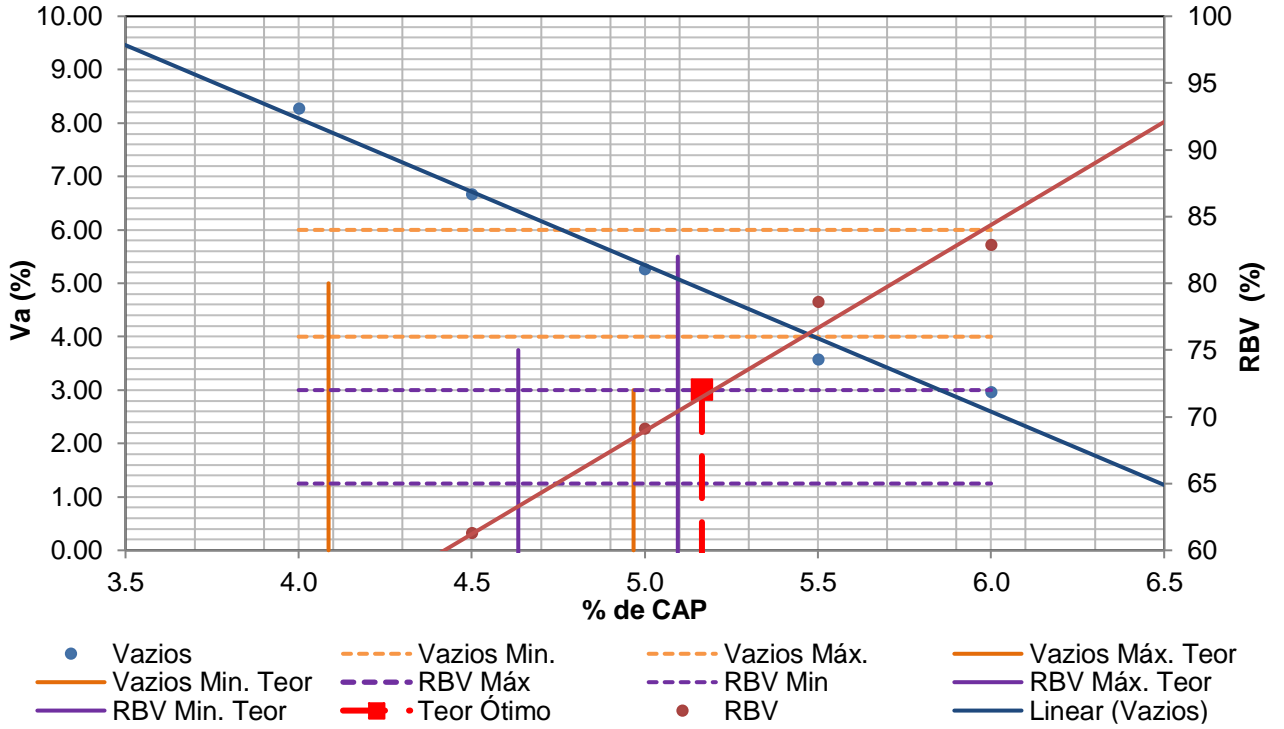


Figura 41 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-REF120

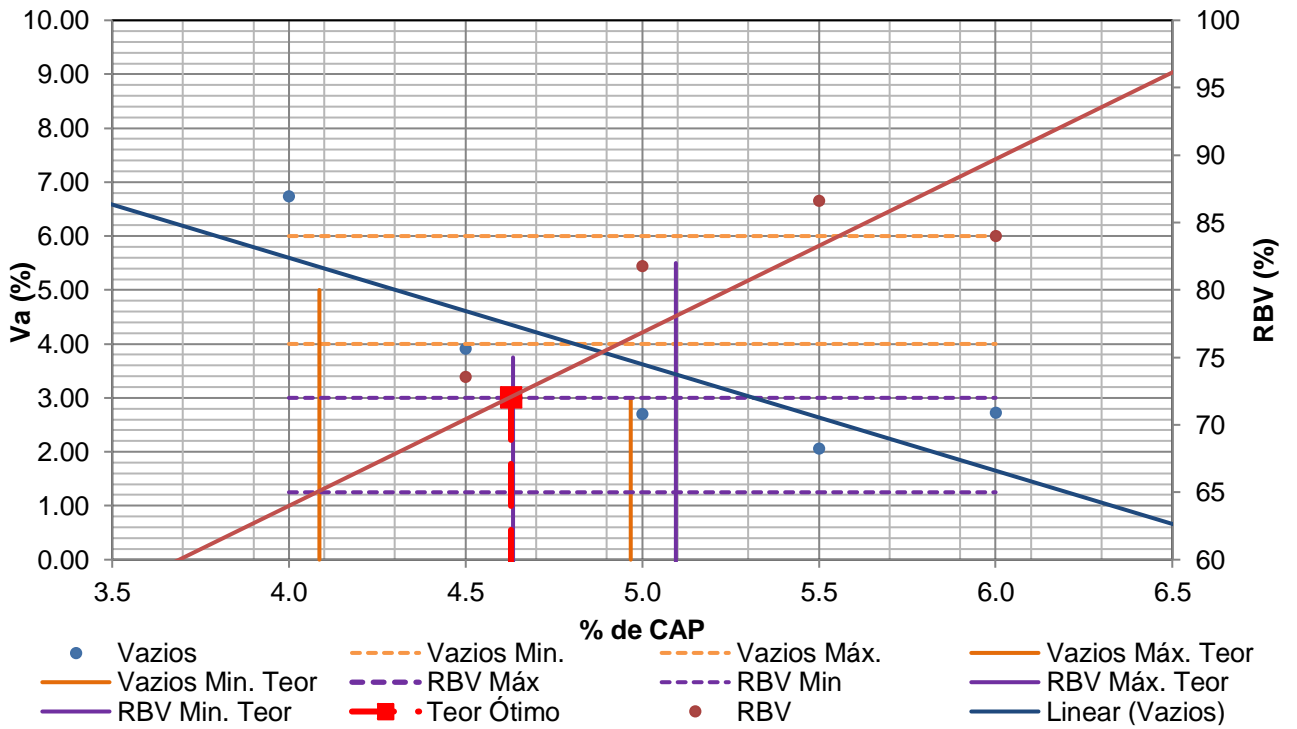
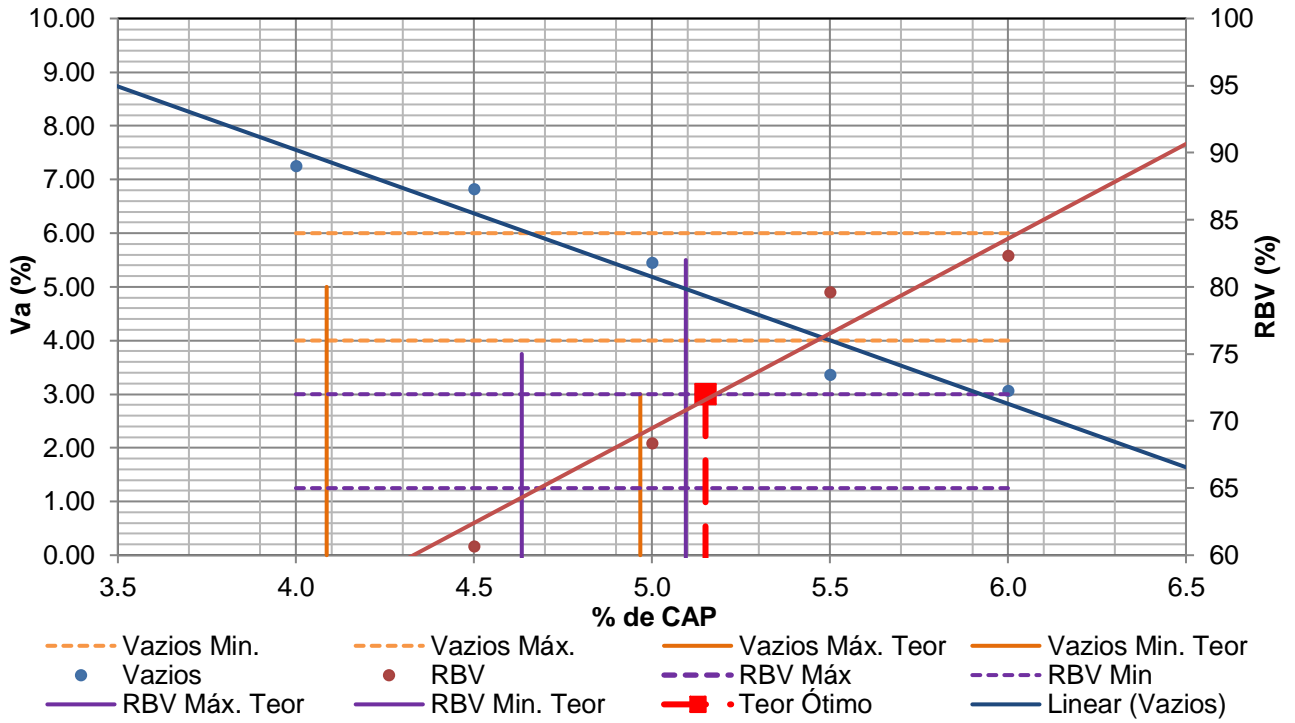
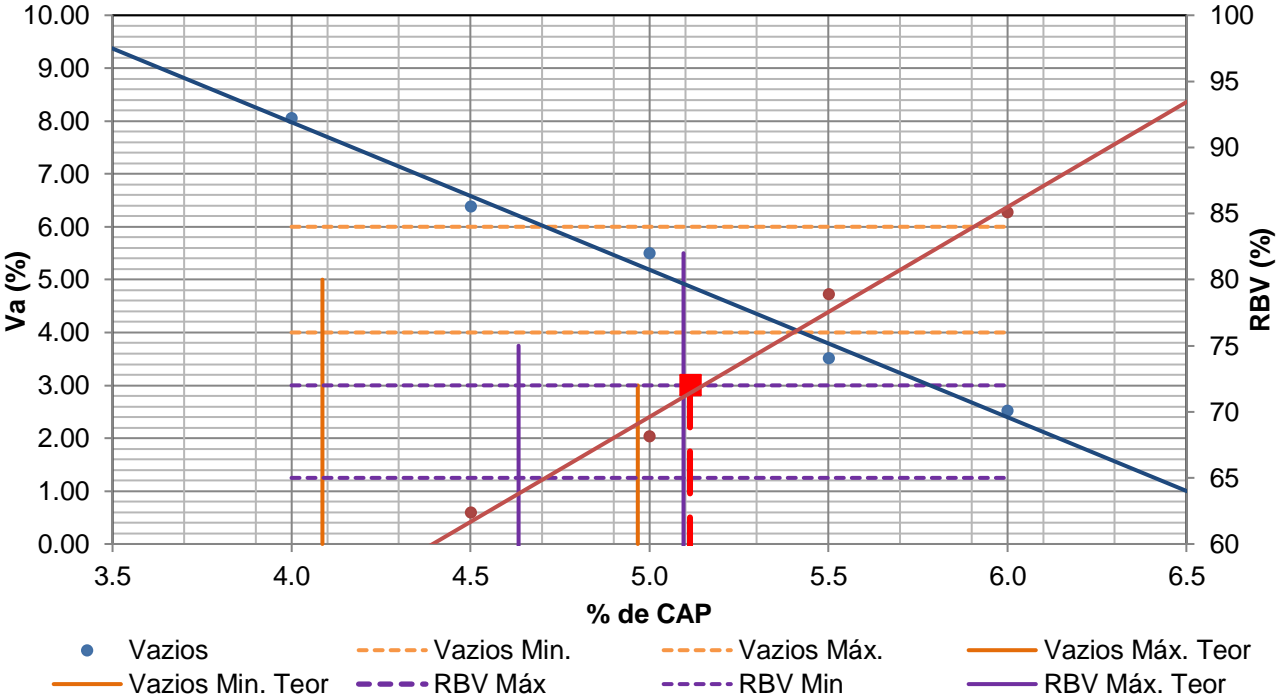


Figura 42 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAF210



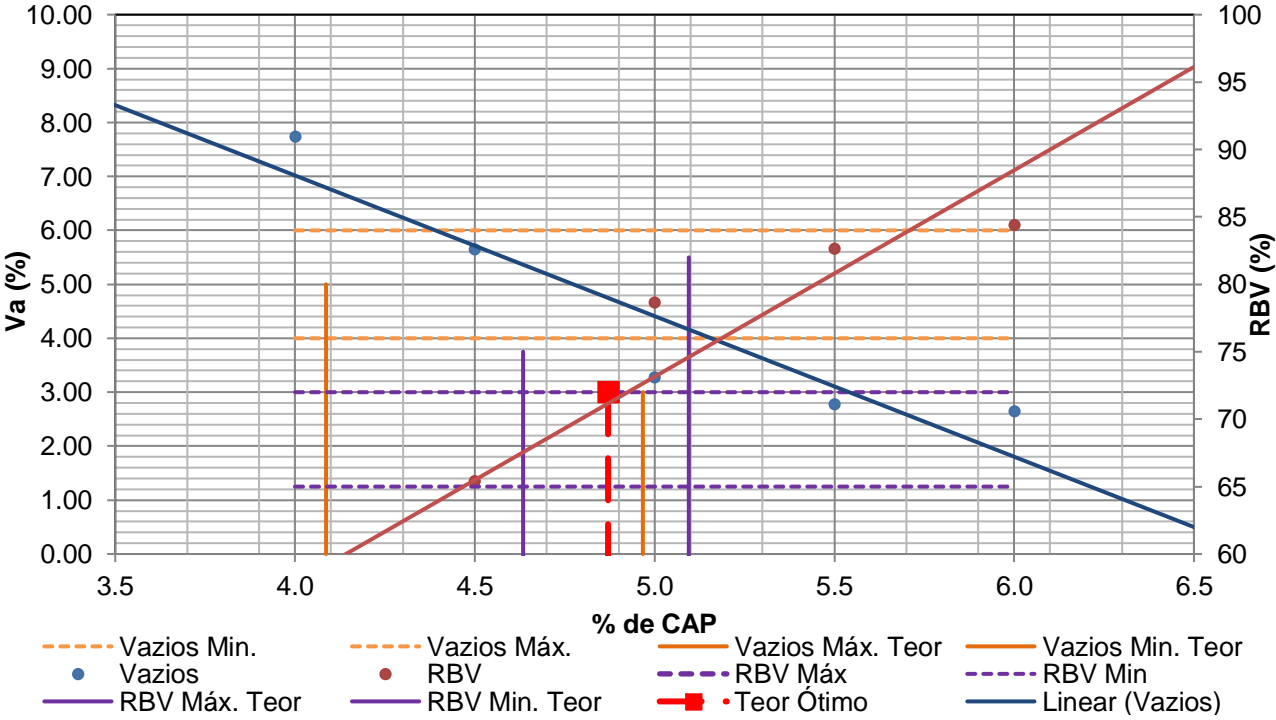
Fonte: Autor (2023).

Figura 43 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAF220



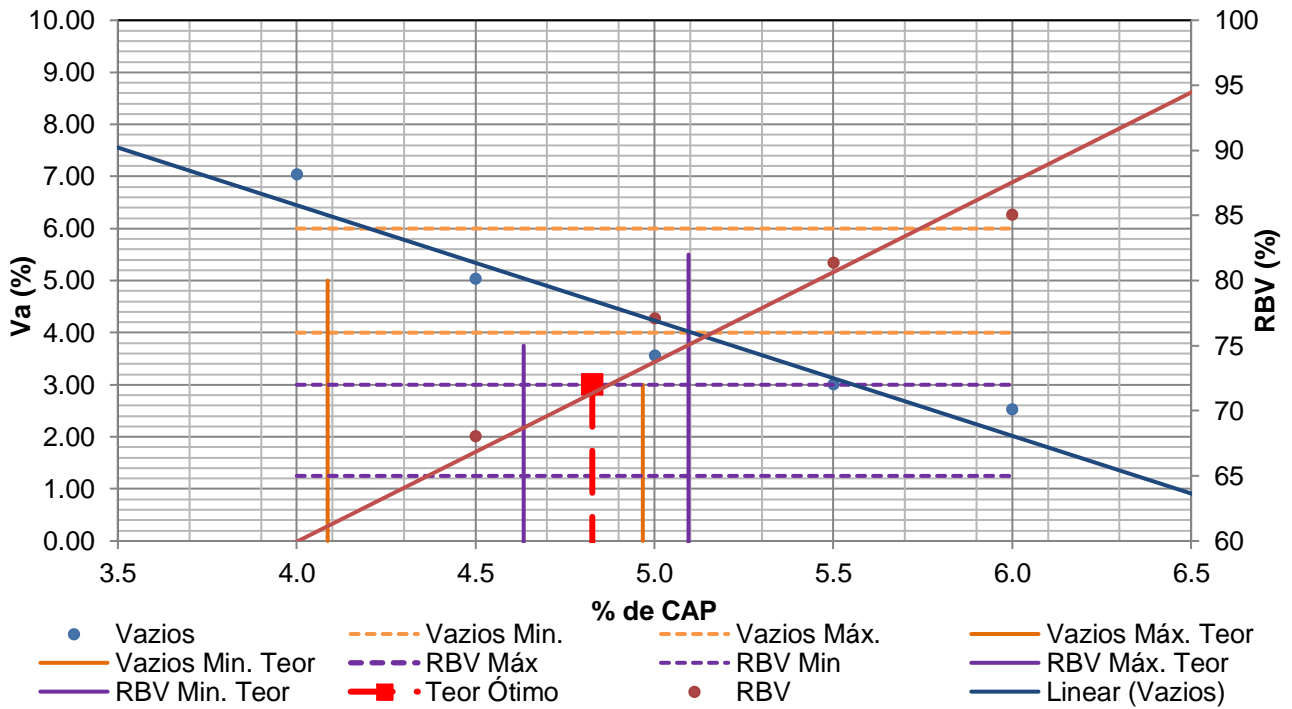
Fonte: Autor (2023).

Figura 44 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAF310



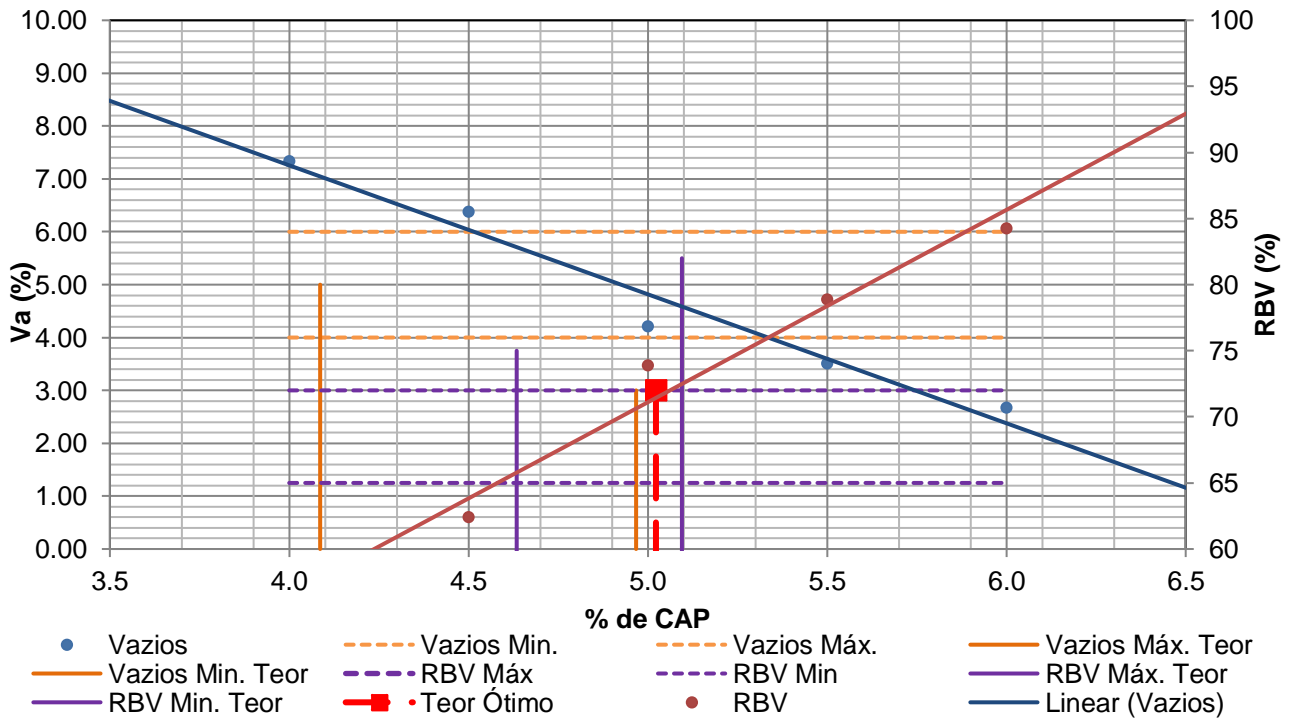
Fonte: Autor (2023).

Figura 45 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAF320



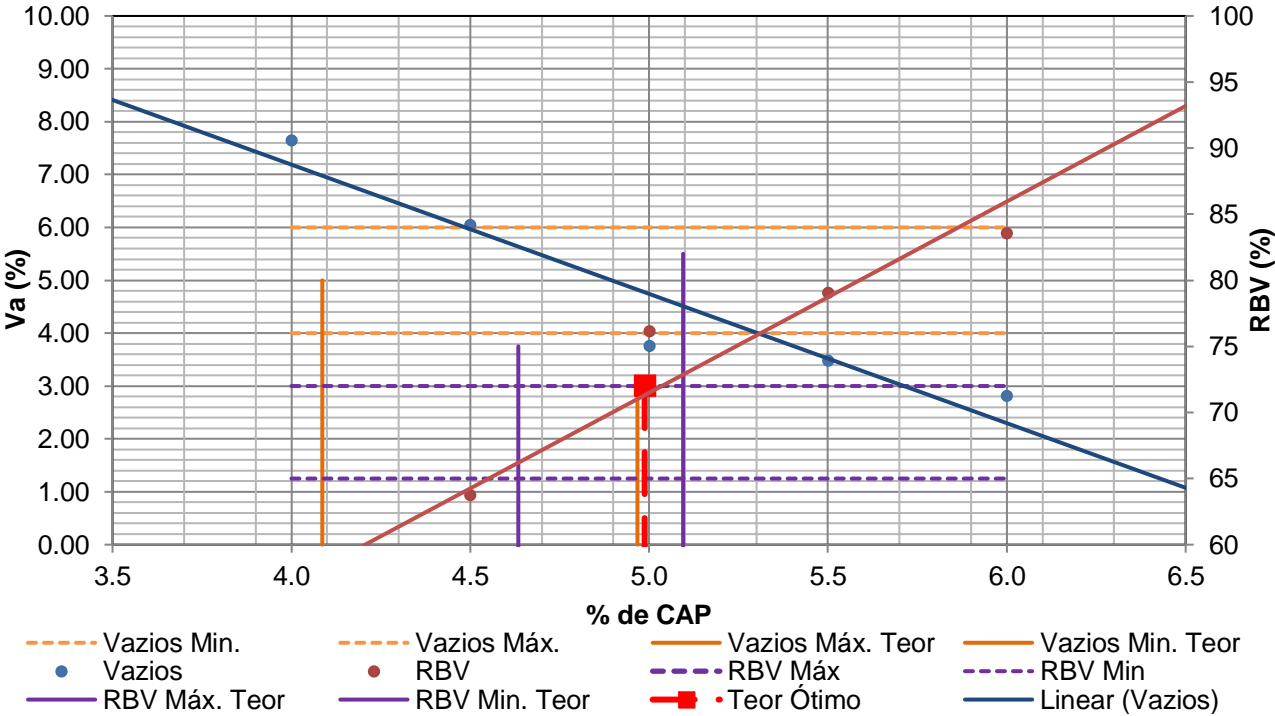
Fonte: Autor (2023).

Figura 46 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAFC410



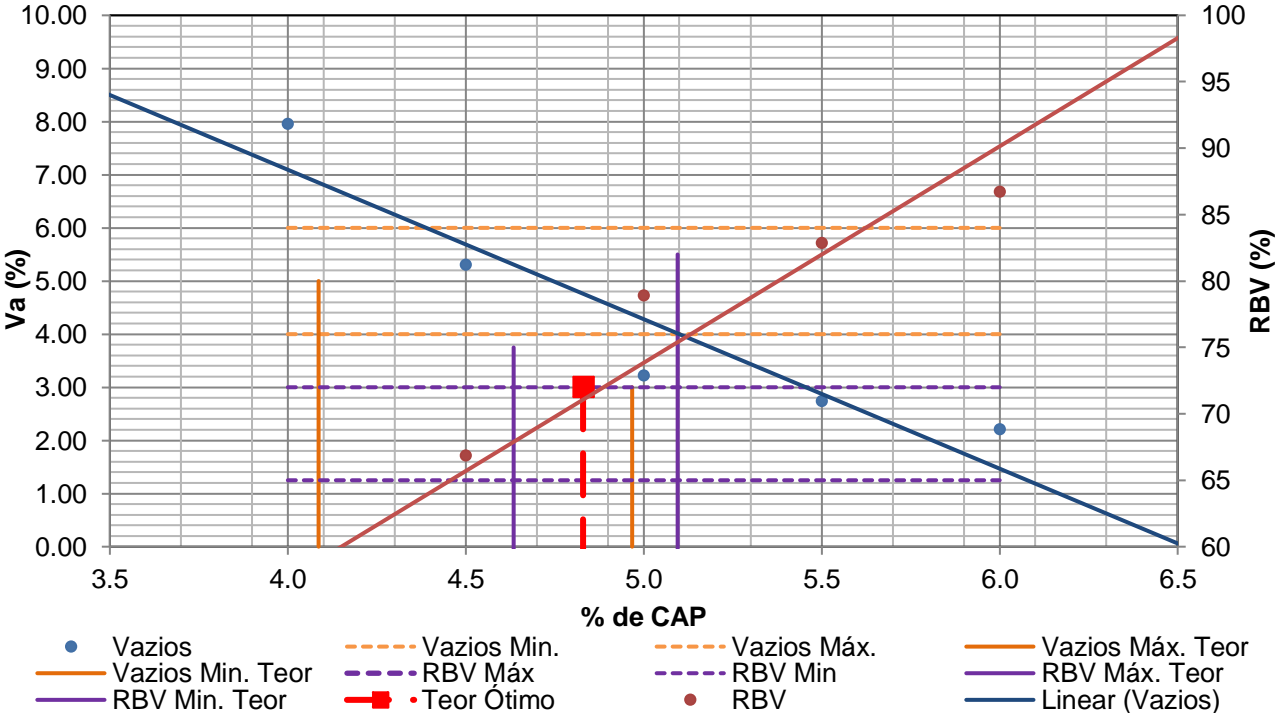
Fonte: Autor (2023).

Figura 47 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAFC420



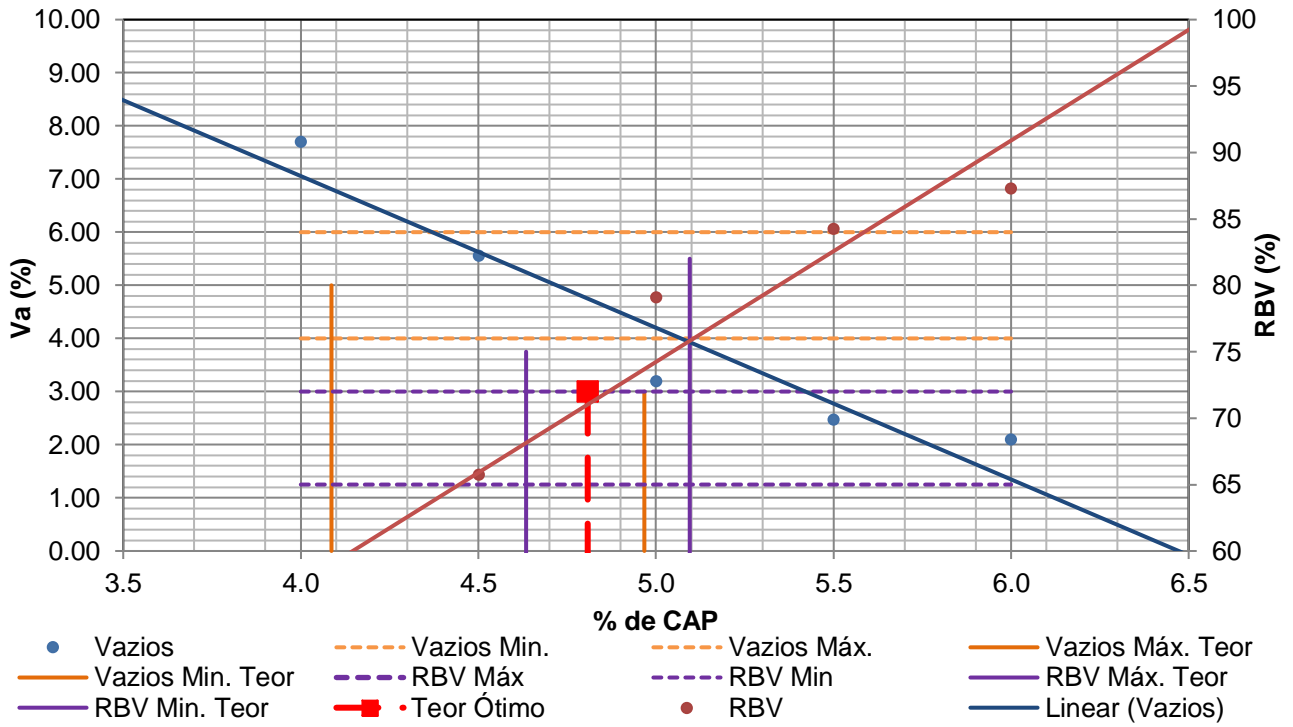
Fonte: Autor (2023).

Figura 48 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAFC510



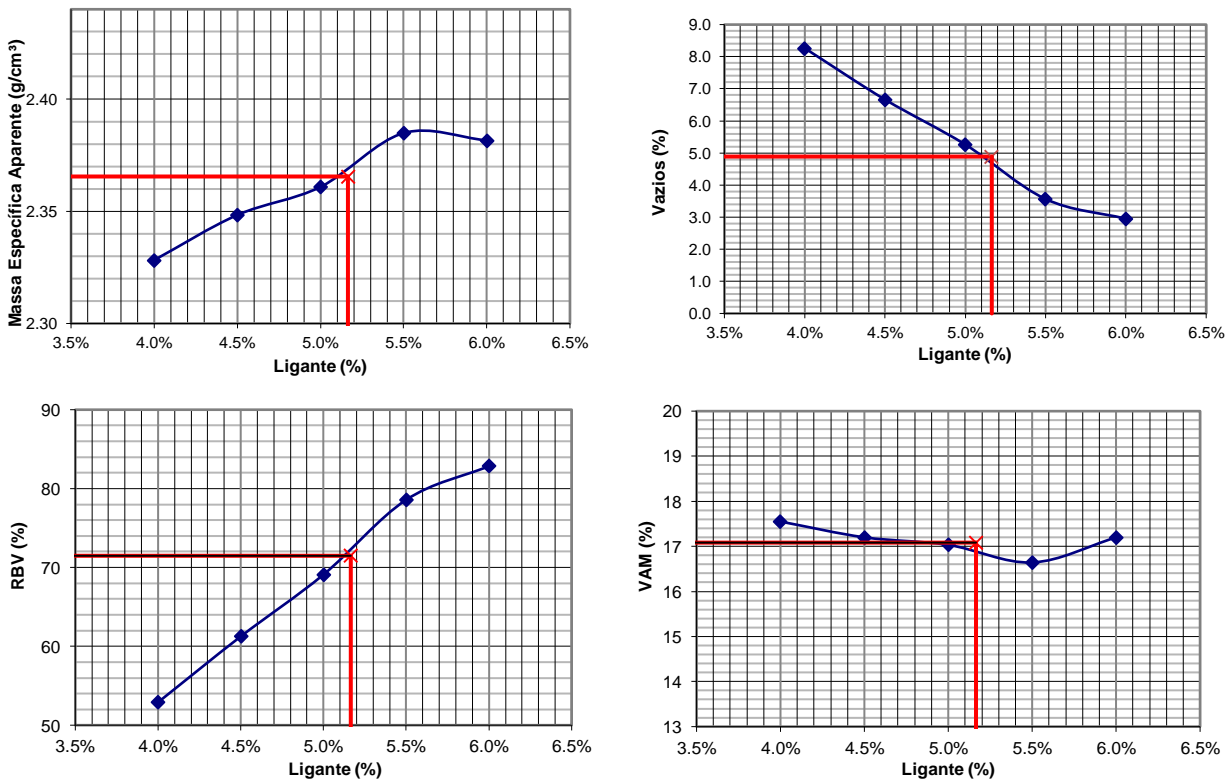
Fonte: Autor (2023).

Figura 49 - Teor de CAP versus Va e RBV, CA-GRAFC520



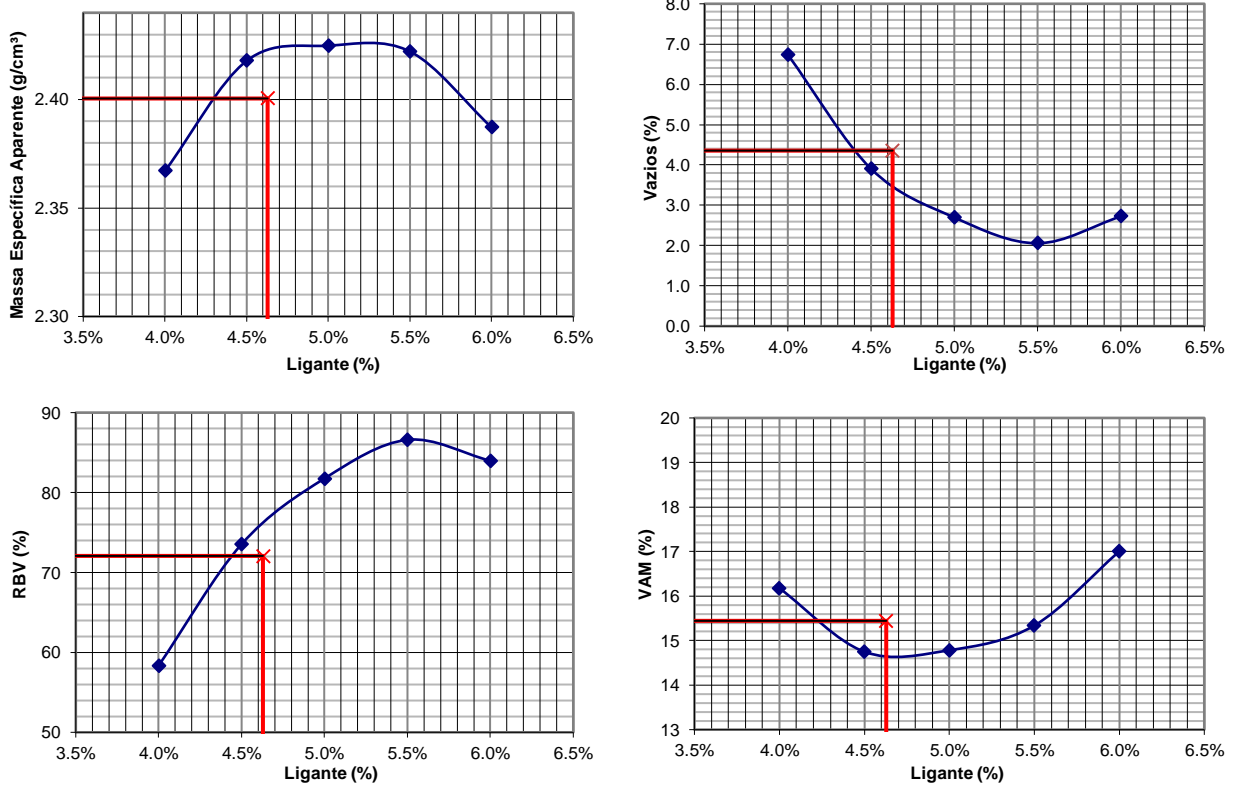
Fonte: Autor (2023).

Figura 50 - Características de projeto, CA-REF110



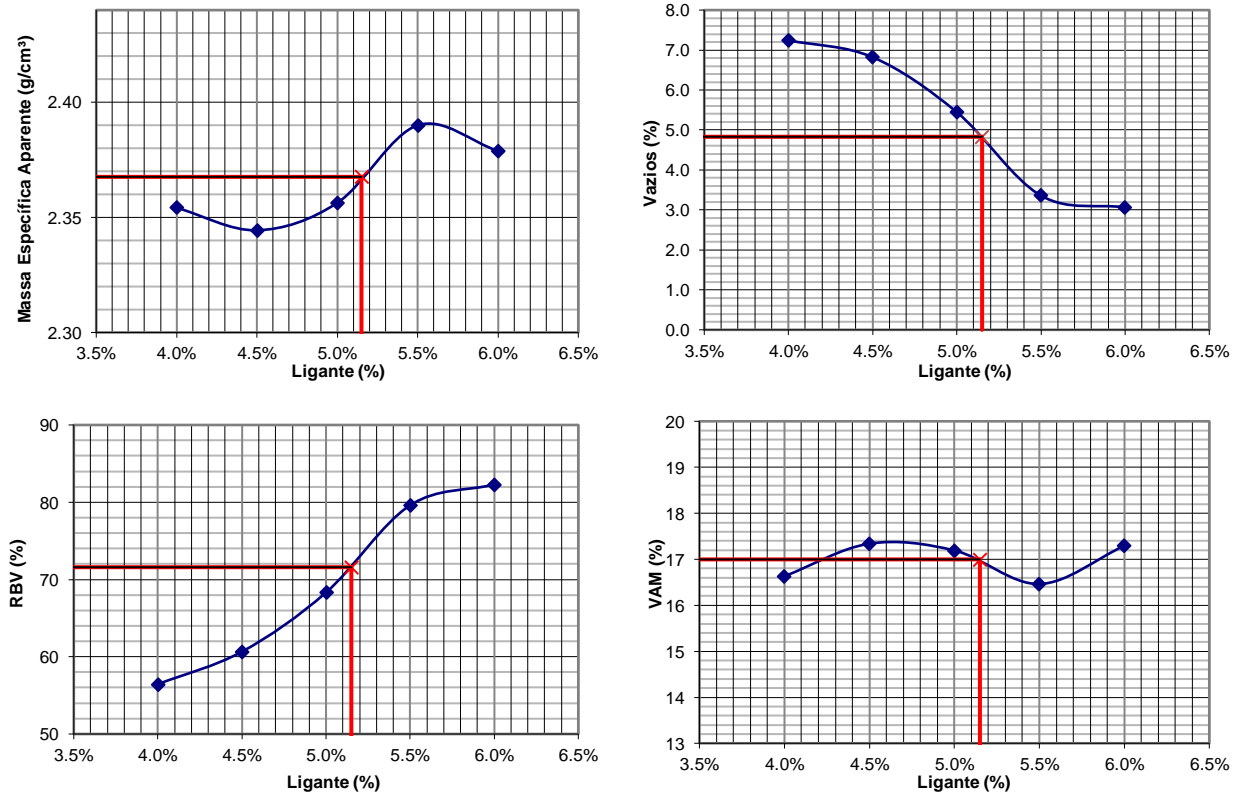
Fonte: Autor (2023).

Figura 51 - Características de projeto, CA-REF120



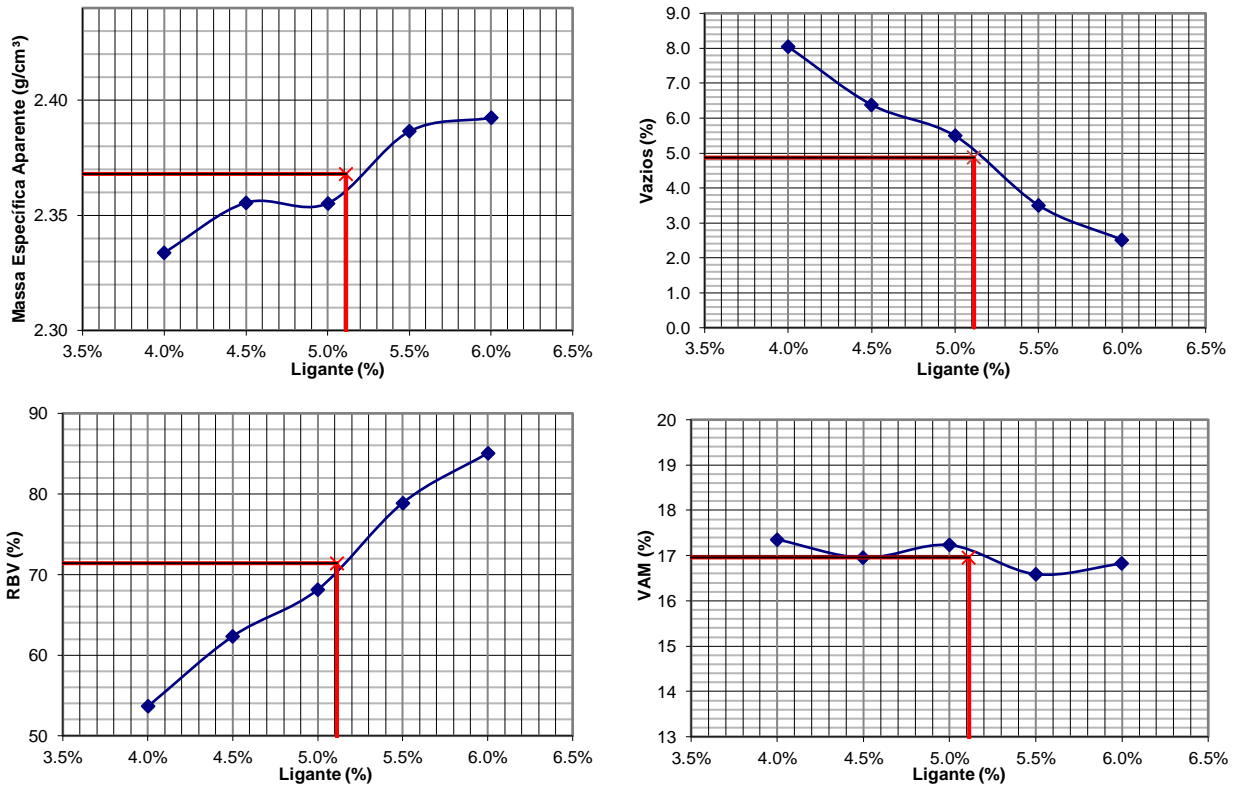
Fonte: Autor (2023).

Figura 52 - Características de projeto, CA-GRAF210



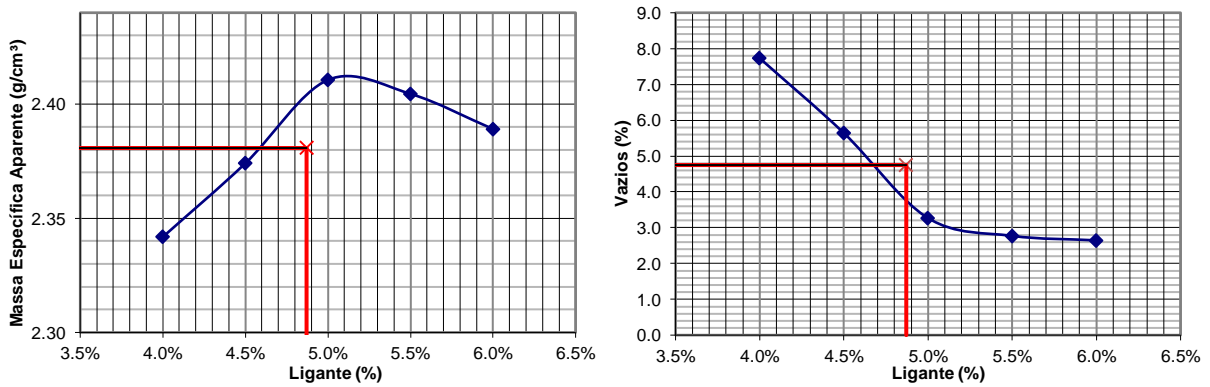
Fonte: Autor (2023).

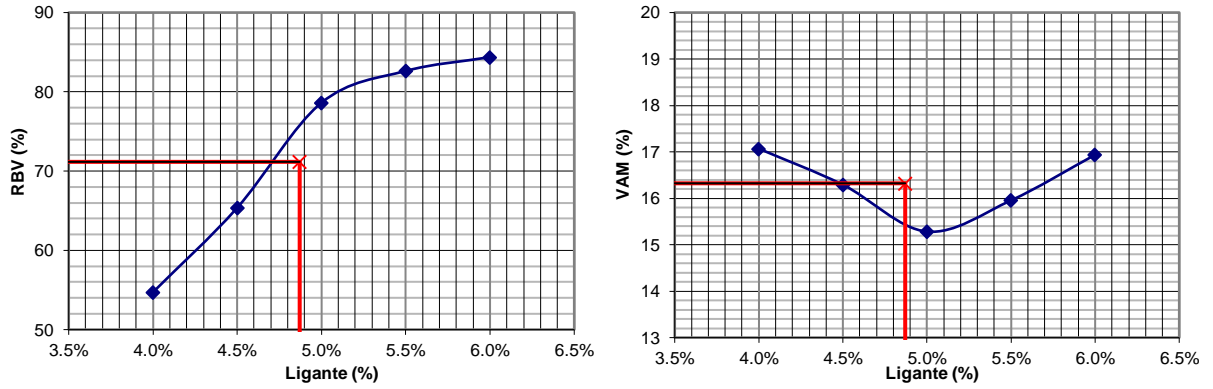
Figura 53 - Características de projeto, CA-GRAF220



Fonte: Autor (2023).

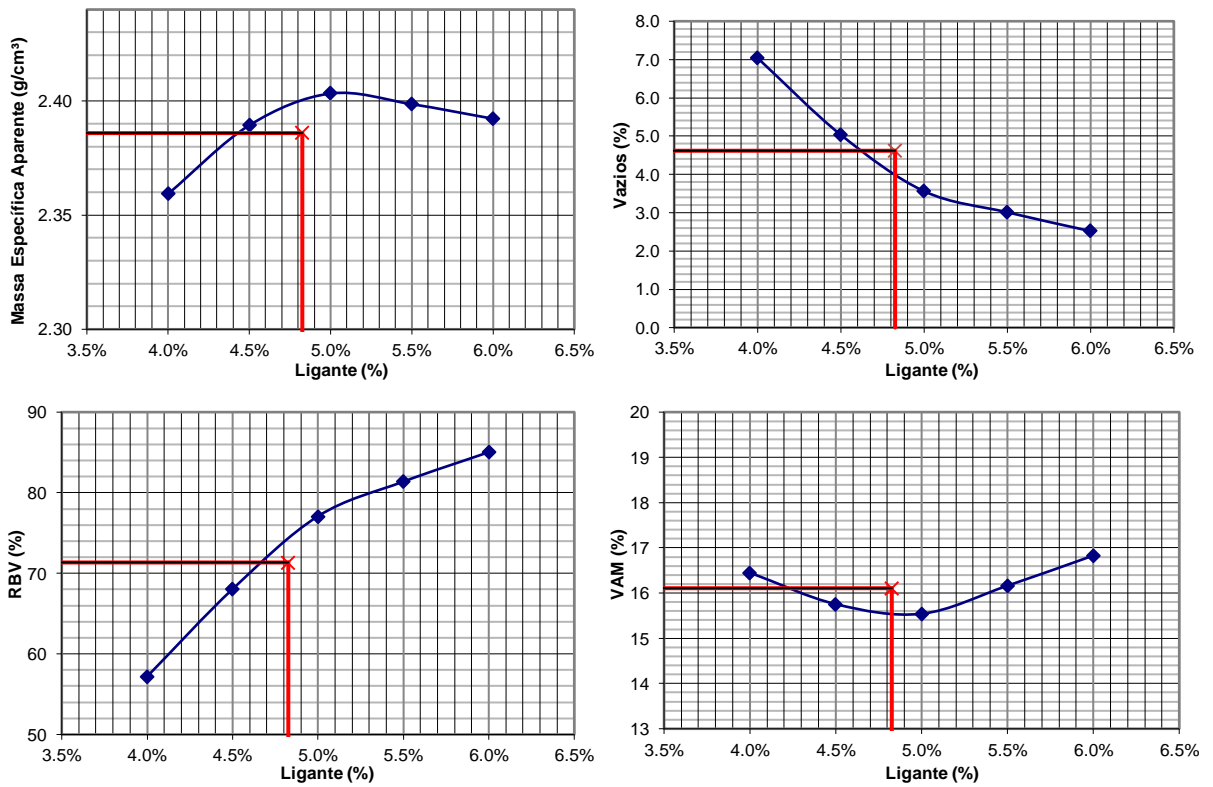
Figura 54 - Características de projeto, CA-GRAF310





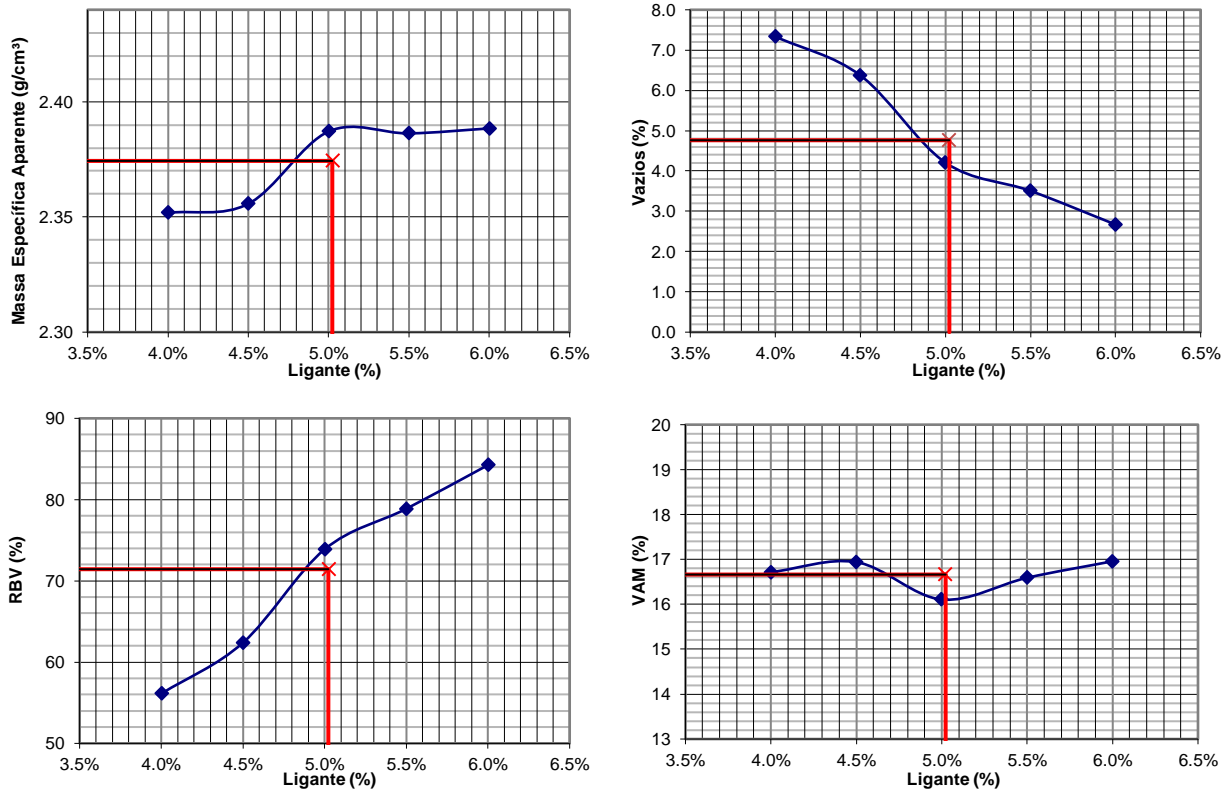
Fonte: Autor (2023).

Figura 55 - Características de projeto, CA-GRAF320



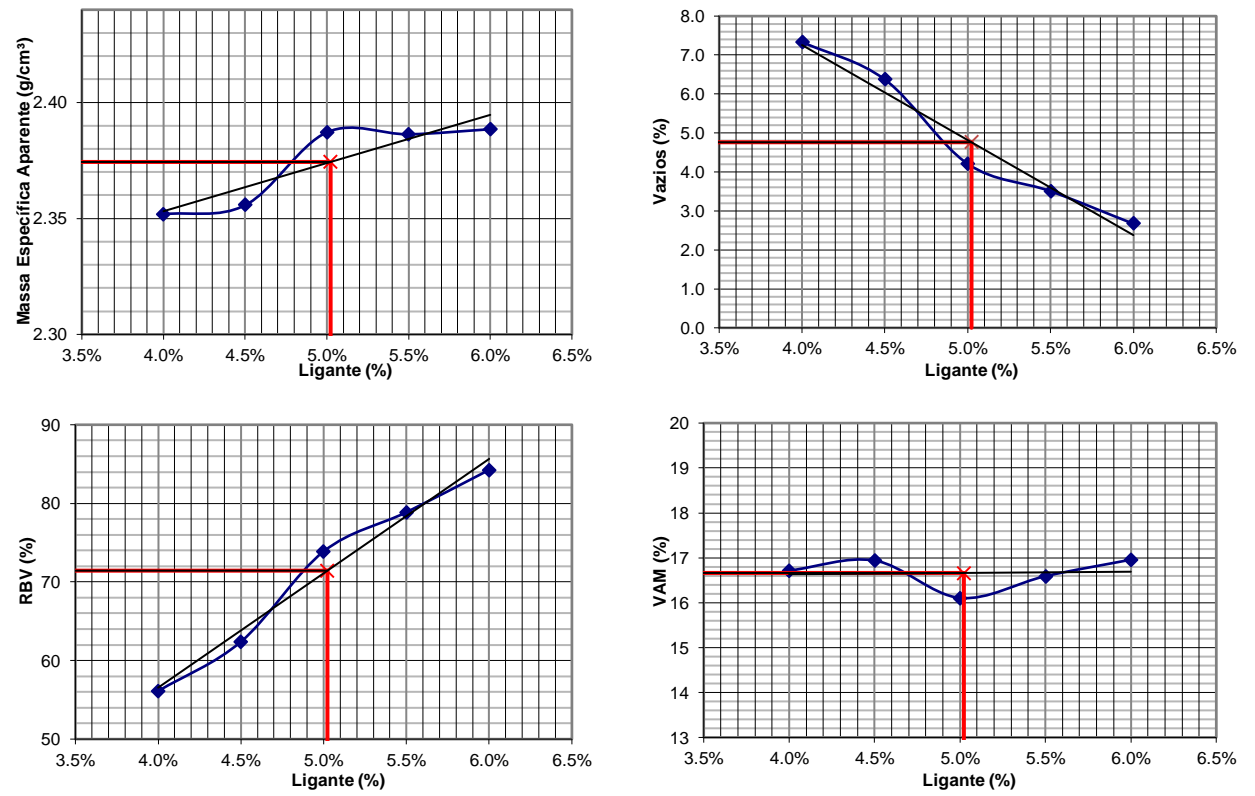
Fonte: Autor (2023).

Figura 56 - Características de projeto, CA-GRAFC410



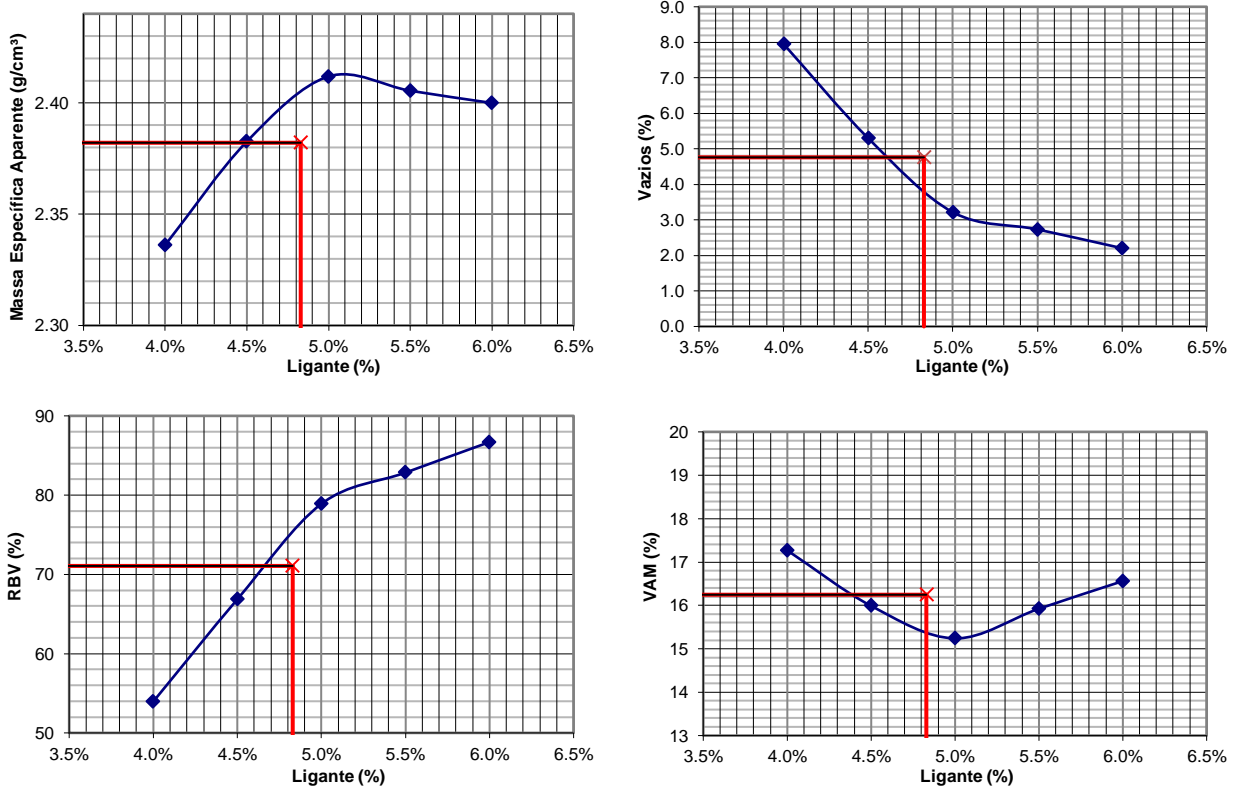
Fonte: Autor (2023).

Figura 57 - Características de projeto, CA-GRAFC420



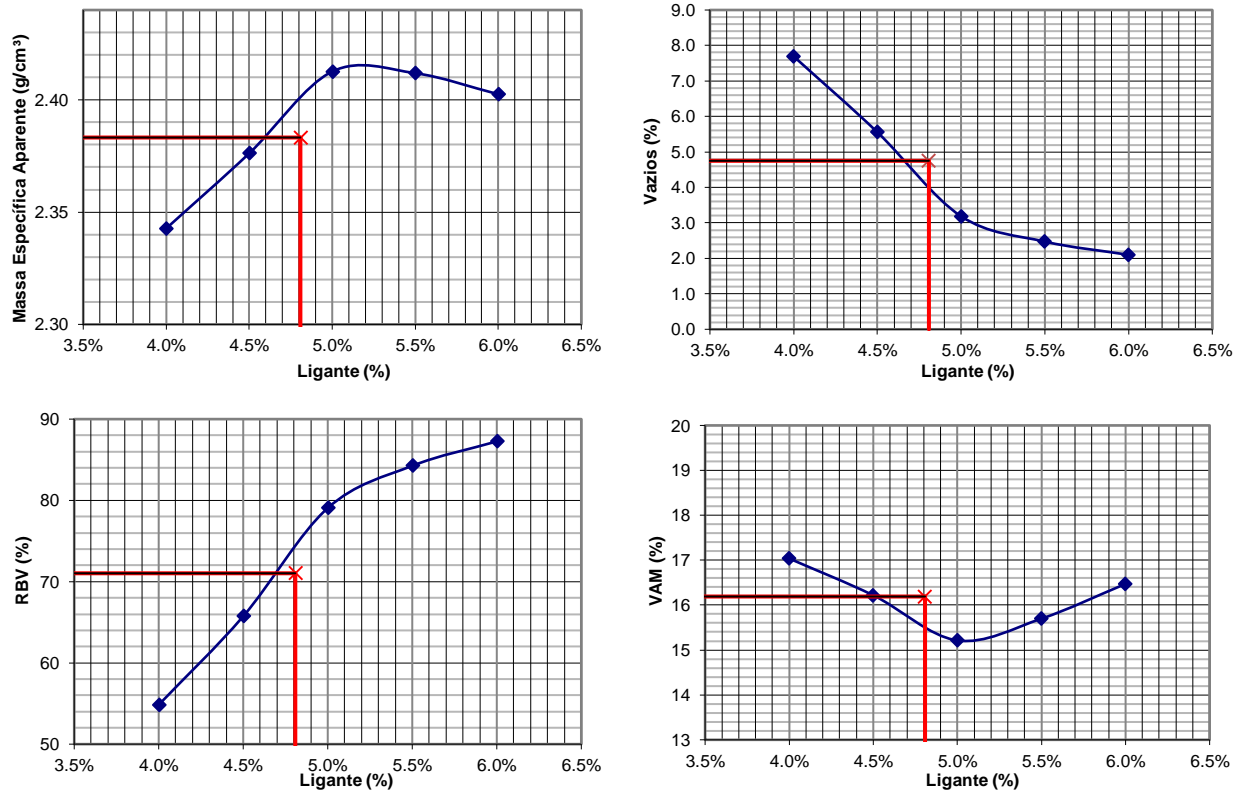
Fonte: Autor (2023).

Figura 58 - Características de projeto, CA-GRAFC510



Fonte: Autor (2023).

Figura 59 - Características de projeto, CA-GRAFC520



Fonte: Autor (2023).