



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



GIZELLE AGUIAR DIAS

**ESTUDO PARA APLICAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE
ÁGUA EM MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE**

Ouro Preto

2023

GIZELLE AGUIAR DIAS

**ESTUDO PARA APLICAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE
ÁGUA EM MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil na Universidade Federal de Ouro Preto.

Área de concentração: Pavimentação e Transportes

Orientador: MSc. Hebert da Consolação Alves

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D541e Dias, Gizelle Aguiar.

Estudo para aplicação de lodo de estações de tratamento de água em misturas asfálticas a quente. [manuscrito] / Gizelle Aguiar Dias. - 2023. 86 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Me. Hebert da Consolação Alves.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Pavimentos. 2. Engenharia municipal - Lodo de ETA. 3. Misturas Asfálticas a Quente (MAQ). 4. Pavimentos - Análise laboratorial. 5. Pavimentos - Análise comparativa. I. Alves, Hebert da Consolação. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gizelle Aguiar Dias

Estudo para aplicação de lodo de estações de tratamento de água em misturas asfálticas à quente

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovada em 30 de agosto de 2023

Membros da banca

Engº M. Sc. Hebert da Consolação Alves-Orientador Universidade Federal de Ouro Preto
Profº M. Sc Marcelo Nascimento Santos-Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto
Engº M. Sc Whilson Marques Mendonça-Universidade Federal de Ouro Preto

Hebert da Consolação Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/09/2023



Documento assinado eletronicamente por **Hebert da Consolacao Alves, TECNICO DE LABORATORIO AREA**, em 11/09/2023, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0587424** e o código CRC **00E514F4**.

Dedico esse trabalho aos meus pais, Cláudia e José Lino, por me permitirem sonhar e por sonharem comigo.

AGRADECIMENTOS

Me graduar em Engenharia Civil é a concretização de um sonho que carrego comigo há mais de 10 anos. Agradeço a Deus por me permitir alcançá-lo e por ser meu abrigo diante dos desafios dessa jornada.

Agradeço a todos que tornaram esse trabalho possível, em especial, ao meu orientador Hebert da Consolação Alves, por acolher as minhas aflições e continuar me incentivando diante de todos os desafios de uma pesquisa científica. Aprendi muito desde que começamos a desenvolver esse trabalho.

Ao Laboratório de Ferrovias e Asfalto, seus colaboradores e todos que fazem parte da sua história, obrigada pelo enorme aprendizado em uma área que tanto desperta o meu interesse.

Agradeço ao Whilison, do Laboratório de Geotecnia de Pavimentos do NUGEO, por me fornecer o ligante asfáltico. Ao Flávio, do Laboratório de Microscopia Ótica e Difração de Raios-X do DEMIN, e à FAPEMIG, pelos ensaios de DRX. Ao Paulo, do Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Ótica, por preparar as minhas amostras do MEV e à Vânia, do NanoLab, por conduzir o ensaio.

Considerando a bagagem que carrego dessa graduação, agradeço ao PET Civil pelo aprendizado e o mundo de oportunidades que o programa revelou para mim. À Fundação Gorceix por investir tanto na minha capacitação e por confiar no meu trabalho. Ao ATIVE e ao NUGEO pela Iniciação Científica. À UFOP, à Escola de Minas, ao IFMG, ao CEMPA, seus professores e colaboradores, a minha eterna gratidão pelo ensino gratuito e de qualidade ao qual tive acesso. À Klohn Crippen Berger e à Andrade Gutierrez, por abrirem as portas do mercado de trabalho para mim e por contribuírem para a minha formação profissional e pessoal.

Às pessoas da minha vida, que também são parte de quem sou, a minha gratidão. Em especial, aos meus pais, Cláudia e José Lino, por incentivarem e investirem tanto na minha jornada, e aos meus irmãos, Daniele e Gleydson. Agradeço ao Samuel pela paciência, carinho e presença, mesmo nos dias difíceis.

Aos meus familiares e amigos que torceram por mim e compartilharam essa jornada comigo, o meu muito obrigada!

*“todas nós seguimos em frente quando
percebemos como são fortes
e admiráveis as mulheres
à nossa volta”*

(Rupi Kaur)

RESUMO

O lodo de estação de tratamento de água, comumente chamado de lodo de ETA, gerado durante o processo de tratamento da água é um resíduo cuja disposição é realizada de maneira inadequada na maioria dos municípios brasileiros. Um outro desafio a nível nacional é a situação atual da infraestrutura do transporte rodoviário do país, que apresenta muitas anomalias, apesar de sua relevância econômica e social. Nesse cenário, o objetivo desse trabalho é avaliar a aplicabilidade do lodo de estação de tratamento de água da ETA Bela Fama, em Nova Lima/MG, como fíler em misturas asfálticas a quente. Para isso, o lodo foi caracterizado e, em seguida, foi empregado para a obtenção de uma mistura asfáltica, cujo desempenho foi avaliado comparativamente com o de uma mistura convencional de referência. Os resultados encontrados atendem aos requisitos das normas vigentes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e às especificações do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP). No caso da resistência à Fadiga, a mistura com o lodo de ETA apresentou desempenho superior ao da mistura de referência. Dessa forma, o lodo tem potencial para aplicação em substituição parcial dos materiais convencionalmente utilizados como agregados em misturas asfálticas a quente.

Palavras-chaves: Pavimentação, Misturas asfálticas a quente, Lodo de ETA, Análise laboratorial, Análise comparativa.

ABSTRACT

The sludge of water treatment plants, often named WTP sludge, generated during the water treatment process is a waste that is improperly disposed of in most Brazilian cities. Another challenge at the national level is the current situation of the country's road transport infrastructure, which presents many anomalies despite its economic and social relevance. In this scenario, this paper aims to evaluate the applicability of sludge from the Bela Fama water treatment plant in Nova Lima/MG, as a filler in hot mix asphalt. For this, the sludge was characterized and then used to obtain an asphalt mix, whose performance was evaluated in comparison with that of a conventional reference mixture. The found results meet the requirements of National Department of Transportation Infrastructure (DNIT) and Department of Highways of São Paulo (DER/SP). In the case of resistance to fatigue, the mixture with WTP sludge presented a superior performance than the reference mixture. Thus, the sludge has potential for application as a partial replacement of materials conventionally used as aggregates in hot mix asphalt.

Keywords: Paving, Hot mix asphalt, WTP sludge, Laboratory analysis, Comparative analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de tratamento convencional da água	18
Figura 2 - Matriz do transporte de cargas no Brasil	24
Figura 3 - Estrutura do pavimento flexível.....	26
Figura 4 - Estrutura do pavimento rígido	26
Figura 5 - Dimensionamento de pavimentos	31
Figura 6 - Eixo padrão	34
Figura 7 - Camadas de revestimento	35
Figura 8 - Tratamento superficial betuminoso	36
Figura 9 - Determinação do teor ótimo de ligante	42
Figura 10 - Exemplo de gráfico para determinação do teor ótimo de ligante	43
Figura 11 - Fluxograma para a dosagem Superpave	43
Figura 12 - Composição granulométrica para a dosagem Superpave	44
Figura 13 - Metodologia	46
Figura 14 - Material preparado para análise	47
Figura 15 - Amostra para realização da MEV	48
Figura 16 - Equivalente de areia.....	49
Figura 17 - Frações de Gnaisse.....	50
Figura 18 - Peneiramento do lodo	50
Figura 19 - Lodo no fundo da peneira	51
Figura 20 - Frascos Le Chatelier	51
Figura 21 - Lodo sendo despejado no frasco de querosene	52
Figura 22 - Preparação dos agregados	52
Figura 23 - Mistura CP de referência	54
Figura 24 - Compactação do CP de referência	54
Figura 25 - Desmolde do corpo de prova	55

Figura 26 - Faixa granulométrica de projeto	56
Figura 27 - Teor ótimo por grupo de CP	56
Figura 28 - Separação da composição granulométrica para 7,0% de ligante asfáltico	56
Figura 29 - Homogeneização dos agregados	57
Figura 30 - Adição do ligante	57
Figura 31 - Incorporação do ligante	58
Figura 32 - Mistura homogênea.....	58
Figura 33 - Grupos de CPs com diferentes teores de ligante asfáltico	59
Figura 34 - Esquema para obtenção da massa submersa do CP	59
Figura 35 - CPs em banho-maria.....	60
Figura 36 - CP no molde de compressão.....	61
Figura 37 - Medidor de fluência (A) no início do ensaios (B) no final do ensaio.....	62
Figura 38 - CPs após realização do ensaio de Estabilidade e Fluência	62
Figura 39 - Ensaio de resistência à tração	63
Figura 40 - CP após ensaio de resistência à tração.....	64
Figura 41 - Preparação do CP para determinação do Módulo de Resiliência.....	65
Figura 42 - Amostra posicionada no SiCAEP.....	65
Figura 43 - Interface SiCAEP.....	66
Figura 44 - Tensões de tração induzidas no ensaio	67
Figura 45 - CPs rompidos no ensaio de Fadiga.....	67
Figura 46 - Difratoograma do lodo, no qual: Q é Quartzo, C é Calcita e A é Alumina.	68
Figura 47 - MEV SE (A) 1.00 kx; (B) 2.00 kx.....	69
Figura 48 - MEV BSE (A) 30 x; (B) 100 x	69
Figura 49 - MEV BSE (A) 1.00 kx; (B) 2.00 kx	70
Figura 50 - Teor ótimo de ligante asfáltico	72
Figura 51 - Estabilidade e Fluência a 60°C	72

Figura 52 - Resistência à Tração a 25°C	73
Figura 53 - Módulo de Resiliência	74
Figura 54 - Vida de Fadiga x Deformação Específica Resiliente.....	75
Figura 55 - Vida de Fadiga x Diferença de Tensões	76
Figura 56 - Classes de Fadiga.....	77
Figura 57 - Classe de Fadiga das amostras REF e GIZ.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Total de municípios com geração de lodo de ETA e com disposição de lodo em corpos d'água	20
Tabela 2 - Malha rodoviária brasileira	24
Tabela 3 - Classificação do pavimento.....	25
Tabela 4 - Condições de aderência pré-estabelecidas	32
Tabela 5 - Critérios por tipo de material.....	33
Tabela 6 - Tipos de via	34
Tabela 7 - Requisitos para o concreto betuminoso.....	38
Tabela 8 - Normas para determinação de massa específica real	39
Tabela 9 - Critérios da dosagem Superpave	44
Tabela 10 - Parâmetros RBV e V_v	71
Tabela 11 - Avaliação dos valores médios de Estabilidade e Fluência a 60°C.....	73
Tabela 12 - Avaliação dos valores médios de Resistência à Tração a 25°C.....	74
Tabela 13 - Avaliação do Módulo de Resiliência a 25°C	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Coeficiente de equivalência estrutural	30
Quadro 2 - Espessura mínima de revestimento betuminoso	31
Quadro 3 - Granulometria do concreto betuminoso	38
Quadro 4 - Vazios do Agregado Mineral (VAM)	39
Quadro 5 - Mistura de referência.....	53
Quadro 6 - Massa total da mistura de referência	53
Quadro 7 - Mistura com lodo de ETA	71

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials* (Associação Americana de Funcionários de Rodovias e Transportes Estaduais)

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas

CAUQ – Concreto Asfáltico Usinado a Quente

CBR – *California Bearing Ratio* (Índice de Suporte Califórnia)

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CNT – Confederação Nacional de Transportes

CP – Corpo de Prova

DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas

DER – Departamento de Estradas de Rodagem

DMT – Densidade Máxima Teórica

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DRX – Difração de Raios-X

EA – Equivalente de Areia

EPCs – Equipamentos de Proteção Coletiva

EPIs – Equipamentos de Proteção Individual

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

GIZ – Corpo de Prova com Lodo de Estação de Tratamento de Água

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IG – Índice de Grupo

IPR – Instituto de Pesquisas em Transportes

LFA – Laboratório de Ferrovias e Asfalto

MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos

RBV – Relação Betume/Vazios

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

REF – Corpo de Prova de Referência

SiCAEP – Sistema de Controle e Aquisição de dados para Ensaios de Pavimentos em laboratório

TSD – Tratamento Superficial Duplo

TSS – Tratamento Superficial Simples

TST – Tratamento Superficial Triplo

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

VAM – Vazios nos Agregados Minerais

SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO	14
2	OBJETIVO	17
2.1	Objetivos específicos.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Processo de tratamento de água	18
3.1.1	Padrões de potabilidade	18
3.1.2	Etapas.....	18
3.1.2.1	<i>Coagulação e floculação.....</i>	<i>19</i>
3.1.2.2	<i>Decantação e sedimentação.....</i>	<i>19</i>
3.1.2.3	<i>Filtração.....</i>	<i>19</i>
3.1.2.4	<i>Desinfecção</i>	<i>19</i>
3.1.2.5	<i>Correção do pH.....</i>	<i>20</i>
3.1.3	Resíduos gerados	20
3.2	Propostas para a gestão do lodo de ETA	21
3.3	Materiais alternativos aplicados à pavimentação.....	22
3.4	Contextualização do transporte brasileiro	23
3.5	Tipos de pavimento.....	25
3.5.1	Classificação	25
3.5.1.1	<i>Pavimentos flexíveis</i>	<i>25</i>
3.5.1.2	<i>Pavimentos semi-rígidos</i>	<i>26</i>
3.5.1.3	<i>Pavimentos rígidos.....</i>	<i>26</i>
3.5.2	Camadas de um pavimento	26
3.5.2.1	<i>Subleito.....</i>	<i>26</i>
3.5.2.2	<i>Reforço de subleito.....</i>	<i>27</i>
3.5.2.3	<i>Base e sub-base</i>	<i>27</i>
3.5.2.4	<i>Revestimento.....</i>	<i>27</i>
3.6	Metodologias de dimensionamento de pavimentos flexíveis.....	27
3.6.1	Método do DNER.....	27
3.6.1.1	<i>Capacidade de suporte.....</i>	<i>28</i>
3.6.1.2	<i>Classificação dos materiais empregados.....</i>	<i>28</i>
3.6.1.3	<i>Tráfego da via</i>	<i>28</i>
3.6.1.4	<i>Fator climático regional</i>	<i>30</i>

3.6.1.5	<i>Equivalência estrutural dos materiais constituintes</i>	30
3.6.1.6	<i>Espessura mínima de revestimento betuminoso</i>	30
3.6.1.7	<i>Dimensionamento do pavimento</i>	31
3.6.2	Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa	31
3.6.2.1	<i>Condição de aderência</i>	32
3.6.2.2	<i>Estrutura do projeto</i>	32
3.6.2.3	<i>Carregamento</i>	33
3.6.2.4	<i>Relatórios</i>	34
3.7	Camadas de revestimento	35
3.7.1	Revestimentos flexíveis betuminosos por penetração	35
3.7.1.1	<i>Tratamentos superficiais betuminosos</i>	35
3.7.1.2	<i>Macadames betuminosos</i>	36
3.7.2	Revestimentos flexíveis betuminosos por mistura	36
3.7.2.1	<i>Pré-misturado de graduação aberta</i>	36
3.7.2.2	<i>Pré-misturado de graduação densa</i>	37
3.7.2.3	<i>Areia betume</i>	37
3.7.2.4	<i>Concreto betuminoso</i>	37
3.8	Metodologias de dosagem de misturas asfálticas usinadas a quente	39
3.8.1	Dosagem Marshall	39
3.8.1.1	<i>Massa específica real dos materiais</i>	39
3.8.1.2	<i>Granulometria dos agregados</i>	40
3.8.1.3	<i>Temperatura de mistura e de compactação</i>	40
3.8.1.4	<i>Moldagem de corpos de prova</i>	40
3.8.1.5	<i>Determinação dos parâmetros de dosagem</i>	41
3.8.1.6	<i>Determinação do teor de projeto de ligante asfáltico</i>	42
3.8.2	Dosagem Superpave	43
3.8.2.1	<i>Propriedades volumétricas</i>	44
3.8.2.2	<i>Teor de ligante de projeto</i>	45
4	METODOLOGIA	46
4.1	Materiais	46
4.1.1	Composição Granulométrica	46
4.1.2	Ligante asfáltico	46
4.2	Caracterização	46
4.2.1	Caracterização química	46
4.2.1.1	<i>Difração de raios-x</i>	47

4.2.1.2	<i>Microscopia eletrônica de varredura</i>	48
4.2.2	Caracterização física.....	49
4.2.2.1	<i>Equivalente de areia</i>	49
4.2.2.2	<i>Densidade real</i>	50
4.3	Corpos de prova de referência	52
4.4	Corpos de prova com lodo de ETA	55
4.4.1	Composição granulométrica	55
4.4.2	Teor ótimo de ligante.....	56
4.4.3	Corpos de prova para avaliação	60
4.5	Avaliação de desempenho	60
4.5.1	Estabilidade e Fluência	60
4.5.2	Tração	63
4.5.3	Módulo de resiliência	64
4.5.4	Fadiga	66
5	RESULTADOS	68
5.1	Caracterização	68
5.1.1	Caracterização química.....	68
5.1.1.1	<i>Difração de raios-x</i>	68
5.1.1.2	<i>Microscopia eletrônica de varredura</i>	68
5.1.2	Caracterização física.....	70
5.1.2.1	<i>Equivalente de areia</i>	70
5.1.2.2	<i>Densidade real</i>	70
5.2	Corpos de prova com lodo de ETA	70
5.2.1.1	<i>Composição granulométrica</i>	70
5.2.1.2	<i>Teor ótimo de ligante</i>	71
5.3	Avaliação de desempenho	72
5.3.1.1	<i>Estabilidade e fluência</i>	72
5.3.1.2	<i>Tração</i>	73
5.3.1.3	<i>Módulo de resiliência</i>	74
5.3.1.4	<i>Fadiga</i>	75
5.3.1.5	<i>Classificação das misturas</i>	76
6	CONCLUSÃO	78
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DE ÁGUAS NATURAIS PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO	84
ANEXO B – FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE OPERAÇÃO.....	85
ANEXO C – DETERMINAÇÃO DE ESPESSURAS DO PAVIMENTO	86

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Art. 2o da Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, cuja redação foi alterada pelo Marco Legal do Saneamento (Lei 14.026 de 2020), estabelece que entre os princípios dos serviços públicos de saneamento básico no Brasil está a universalização do acesso e sua prestação efetiva de forma adequada à saúde pública, à conservação dos bens naturais e à proteção do meio ambiente. Dentre esses serviços estão inclusos o abastecimento de água, o esgotamento sanitário, a limpeza urbana, além do manejo dos resíduos sólidos e das águas pluviais (BRASIL, 2007).

No que tange o abastecimento de água, o Ministério da Saúde (2011) estabelece por meio da Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011, procedimentos que visam garantir o controle de qualidade e os padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano. Nesses padrões são determinados os parâmetros a serem atendidos e a quantidade de amostras a serem analisadas no processo de tratamento da água (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011).

Esse processo é realizado em Estações de Tratamento de Água (ETAs) que são projetadas conforme norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 12.216, que determina que as etapas de tratamento da água variam de acordo com sua classificação em seu estado natural, de forma que, ao final do tratamento, possam ser alcançados os padrões de potabilidade (ABNT, 1992). Segundo a ABNT (1992), a água pode ser classificada como tipo A, B, C ou D, sendo que o tipo A é o que requer menos etapas de tratamento e o tipo D o que requer mais etapas.

Richter (2009) aponta que as ETAs mais empregadas são as convencionais, que incluem as etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração. Esse tipo de sistema gera resíduos nos decantadores e nos filtros, sendo o dos decantadores o que possui mais sólidos (CORDEIRO, 2001). Segundo a NBR 10.004 o lodo proveniente dos sistemas de tratamento de água é classificado com um resíduo sólido (ABNT, 2004).

Dessa forma, o lodo deve atender às disposições da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que determina que a gestão de resíduos sólidos deve priorizar a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento do resíduo e, só após descartadas as possibilidades anteriores, a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

No entanto, a maior parte dos resíduos gerados são lançados *in natura* em cursos de água superficial, contrariando a legislação vigente e a tendência mundial de adoção de padrões mais sustentáveis para as atividades humanas (CORDEIRO, 2001). Neste cenário, muitos

pesquisadores vêm propondo estudos que analisam a viabilidade de aplicação desse material em outros setores, visando uma destinação alternativa, voltada para a sustentabilidade.

Mine, Piazza et al. (2018) identificaram através de uma revisão bibliográfica estudos de disposição em áreas de degradação, de aplicação em aterros sanitários e principalmente de aplicações no setor de construção civil para obtenção de argamassas, concretos, cerâmicas, blocos e pavimentação.

Silva, Barbosa e Silva (2020) fizeram uma revisão bibliográfica que apontou diversos estudos que analisaram a aplicabilidade do lodo em diversas camadas de pavimentos rodoviários. Estudos como o de Alves (2019) apontaram a aplicabilidade do material em camadas de subleito e sub-base de pavimentação. Enquanto Martinez (2014) avaliou a adição em misturas asfálticas empregadas na camada de revestimento.

Estudos como esses são relevantes por apresentarem propostas que sugerem a substituição de um recurso natural a ser explorado por um resíduo que comumente tem sido despejado de forma inadequada. A relevância da aplicação específica na pavimentação rodoviária se dá pela importância do setor no contexto do transporte no Brasil.

Segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT) (2023), no ano de 2021 o modal rodoviário foi responsável por cerca de 65% das movimentações de carga e de 95% das movimentações de passageiros no Brasil. Dessa forma o transporte pelo modal rodoviário pode ser apontado como item de extrema importância para o desenvolvimento socioeconômico do país e para a interligação de suas regiões.

No entanto, os levantamentos da confederação apontam que, em 2021, dos 1.720.909 km de rodovias do país apenas 213.500 km eram pavimentados, sendo 65.686 km de rodovias federais, apresentando um aumento de 5,3% na extensão pavimentada em relação aos dados de 2011 (CNT, 2022a). Ainda segundo a CNT (2022b), uma pesquisa realizada em 2021 analisou 110.333 km de rodovias e avaliou que 55,5% desses trechos possuíam algum tipo de problema específico na pavimentação.

Tendo em vista a gama de aplicação dos materiais naturais comumente utilizados no setor de pavimentação, o esgotamento desses recursos pode ocorrer, o que ameaçaria o equilíbrio do planeta uma vez ultrapassada a sua capacidade de recuperação (REDAÇÃO PENSAMENTO VERDE, 2013). Por outro lado, o grande volume de resíduos gerados pelas mais diversas atividades humanas são uma problemática muito recorrente na atualidade, dada a complexidade de sua disposição ambientalmente correta, a depender de suas especificidades.

Nesse cenário, muitos autores vêm propondo a aplicação desses resíduos como material alternativo para os pavimentos. Dentre eles, pode ser mencionado o trabalho de Alves (2019),

que avaliou a aplicabilidade do lodo de ETA em camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentação.

2 OBJETIVO

O presente trabalho propõe-se a analisar a viabilidade técnica da aplicação do lodo de ETA, recolhido na ETA Bela Fama, no Rio das Velhas, do município de Nova Lima – Minas Gerais, como fíler em misturas asfálticas a quente. Apresentando, portanto, uma destinação alternativa para o resíduo, visando reduzir os impactos ambientais causados por sua disposição inadequada.

2.1 Objetivos específicos

Para cumprir o objetivo geral, são traçados os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o lodo de ETA;
- Verificar a aplicabilidade do lodo de ETA como fíler em misturas asfálticas;
- Validar comparativamente o desempenho da mistura asfáltica proposta em relação às misturas asfálticas convencionais de referência.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo de tratamento de água

3.1.1 Padrões de potabilidade

A NBR 12.216, classifica as águas naturais para abastecimento público em quatro tipos, de “A” a “D”. O tipo A inclui as águas subterrâneas ou superficiais oriundas de bacias protegidas sanitariamente; o tipo B inclui águas subterrâneas ou superficiais oriundas de bacias não-protegidas, sendo necessário tratamento para se enquadrar nos padrões de potabilidade, dispensada a etapa de coagulação; o tipo C inclui águas superficiais de bacias não-protegidas, exigindo tratamento para atender aos padrões de potabilidade, inclusive coagulação; já o tipo D inclui águas superficiais de bacias não-protegidas e sujeitas a fontes de poluição o que exige, além do tratamento convencional, alguns processos de tratamento complementar (ABNT, 1992)

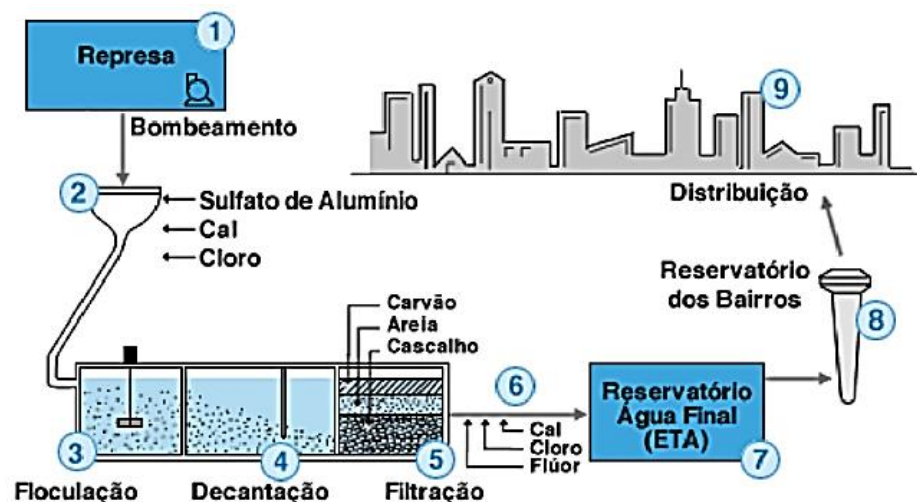
Além da origem, para a classificação também são empregados os parâmetros de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), coliformes, pH, cloretos e fluoretos conforme o ANEXO A – Classificação de águas naturais para abastecimento público (ABNT, 1992).

A partir dessa classificação é possível determinar qual o tratamento mínimo a ser empregado em cada ETA. A água do tipo D é a que requer mais etapas de tratamento, estando inclusas: coagulação; decantação, caso haja sólidos sedimentáveis; filtração em filtros rápidos; desinfecção; correção de pH; e um tratamento complementar que varia conforme a fonte de poluição do corpo d’água natural (ABNT, 1992).

3.1.2 Etapas

A Figura 1 apresenta um esquema com as etapas de tratamento presentes em uma ETA convencional.

Figura 1 - Etapas de tratamento convencional da água



Fonte: Instituto Água Sustentável (2020).

3.1.2.1 Coagulação e floculação

Segundo Richter (2009), o processo de coagulação é constituído por duas etapas: na primeira o coagulante, um produto químico que geralmente inclui sais de alumínio e ferro, é adicionado na água em uma mistura rápida com o objetivo de reduzir as forças que separam as partículas em suspensão; após isso, a água passa por uma agitação lenta, também chamada de floculação, que promove colisões entre as partículas ocasionando sua união e a consequente geração de partículas maiores.

Apenas as águas classificadas como tipo C e D passam por esse processo (ABNT, 1992).

3.1.2.2 Decantação e sedimentação

No processo de decantação as partículas sólidas em suspensão são separadas da água, depositando-se no fundo dos tanques decantadores (SOUZA, 2007). No geral é necessário o processo de coagulação para que os materiais em estado coloidal, que é a dispersão de pequenas partículas, ou de solução sedimentem mais facilmente (RICHTER, 2009).

Esse processo é aplicado em águas do tipo B, quando possui sólidos sedimentáveis, tipo C e tipo D (ABNT, 1992).

3.1.2.3 Filtração

A filtração tem por objetivo reter as partículas e microrganismos que não foram removidos pela decantação (SOUZA, 2007). Esse processo físico-químico, e em alguns casos biológico, se dá pela passagem da água por um meio poroso, sendo a areia o mais comum deles (RICHTER, 2009). Além do meio poroso, os filtros também são constituídos por um tanque, onde a água é armazenada, por uma camada de suporte e uma camada drenante (SOUZA, 2007).

Esses filtros podem ser classificados conforme a taxa de filtração em lentos, com baixa taxa de filtração, ou rápidos, com alta taxa de filtração; quanto ao sentido do fluxo em filtros de fluxo ascendente, nos quais a água segue o fluxo de baixo para cima, ou descendente, nos quais o fluxo é de cima para baixo; quanto ao número de camadas filtrantes como camada simples, com apenas uma, ou de múltiplas camadas, com mais de uma; quanto à pressão de operação em filtros de pressão, operando com pressão acima da atmosférica, ou filtros de gravidade, em que a água está em contato direto com a atmosfera (SOUZA, 2007).

Estão sujeitas a essa etapa as águas classificadas como tipos B, C e D (ABNT, 1992).

3.1.2.4 Desinfecção

A desinfecção consiste da eliminação de microrganismos patogênicos (SOUZA, 2007). Dentre os agentes disponíveis para esse fim, o mais empregado é o cloro e sua aplicação é realizada através dos cloradores (RICHTER, 2009).

Todos os tipos de água destinada ao consumo humano passa por essa etapa (ABNT, 1992).

3.1.2.5 Correção do pH

Para corrigir o pH, quando o objetivo é aumentá-lo deve-se utilizar cal hidratada, carbonato de cálcio, carbonato de sódio ou o hidróxido de sódio; para reduzi-lo pode-se utilizar gás carbônico, ácido clorídrico ou ácido sulfúrico (SOUZA, 2007).

3.1.3 Resíduos gerados

Ao longo desse processo de tratamento, nos decantadores e filtros, é gerado um resíduo conhecido como lodo de ETA (CORDEIRO, 2001). Sendo que, dadas as condições operacionais das ETAs, o resíduo gerado nos decantadores é o que possui maior concentração de sólidos (CORDEIRO, 2001). Esse material é classificado como um resíduo sólido segundo a NBR 10.004, devendo portanto atender às especificações da lei nº 12.305 que institui a política nacional de resíduos sólidos (ABNT, 2004).

Dessa forma, a ordem de prioridade a ser seguida no tratamento do material é: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). Apesar disso, Cordeiro (2001) aponta que a maioria dos sistemas de tratamento de água despejam o material *in natura* em corpos d'água.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2020), a maior parte dos municípios brasileiros que registram geração de lodo de ETA destinam o material a corpos d'água. A Tabela 1 apresenta uma compilação desses dados por região brasileira, nota-se que a região nordeste é a que apresenta mais municípios com geração de lodo, mas a região sudeste é a que possui mais municípios que despejam esse material em corpos d'água.

Tabela 1 - Total de municípios com geração de lodo de ETA e com disposição de lodo em corpos d'água

Região	Municípios com geração de lodo	Municípios com disposição de lodo em corpos d'água
Centro-oeste	148	98
Nordeste	537	237
Norte	124	91
Sudeste	528	334
Sul	488	270
Brasil	1 825	1 030

Fonte: Adaptado de IBGE (2020).

Dentro dos dados apresentados para a região sudeste, tem-se que Minas Gerais apresenta 129 municípios com geração de lodo em ETAs, sendo que, 97 deles despejam esse material em corpos d'água (IBGE, 2020).

3.2 Propostas para a gestão do lodo de ETA

Diante dos problemas relacionados à gestão dos resíduos oriundos do processo de tratamento de água, muitos estudos são desenvolvidos visando encontrar soluções sustentáveis para a destinação do lodo de ETA.

Um estudo de Hasan *et al.* (2022) analisa a aplicabilidade do lodo de ETA como fíler em concreto asfáltico, encontrando resultados que demonstram potencial para essa aplicação. Assim como o estudo de Campelo, Silva e Andrade (2020), que demonstra ser possível que o lodo substitua mais de 5% do cimento Portland sem que o concreto asfáltico perca suas propriedades.

Uma revisão bibliográfica desenvolvida por Silva, Barbosa e Silva (2020) evidencia diversos estudos que analisaram a aplicabilidade do lodo especificamente na pavimentação.

Exemplo disso é o estudo de Alves (2019), que avaliou a aplicabilidade do lodo de ETA coletado nas cidades de Brumadinho e Nova Lima, em Minas Gerais, como reforço de subleito e sub-base de pavimentação. De modo geral, o estudo apresentou potencial para essa aplicação, visto que o índice de suporte apresentado pelo lodo foi satisfatório (ALVES, 2019).

Uma revisão bibliográfica de Mine, Piazza *et al.* (2018) identificou estudos que propõem a disposição do lodo de ETA em áreas degradadas, além de aplicações em aterros sanitários e no setor de construção civil para obtenção de argamassas, concretos, cerâmicas, blocos e pavimentação.

Em sua pesquisa, Santos, Filho e Manzato (2018) propuseram a aplicação do lodo da ETA do Programa Águas para Manaus (PROAMA) para obtenção de cerâmicas estruturais, ao submeter o material a um processo de calcinação por meio da geopolimerização. Os resultados encontrados confirmaram essa como uma boa destinação para o lodo, sendo técnica e economicamente viável, tendo seus custos de processo sendo compensados pelo uso de um resíduo de baixo valor agregado (SANTOS, FILHO e MANZATO, 2018).

Delgado (2016) também avaliou a aplicabilidade em sub-base de pavimentação, utilizando lodo da ETA Guandu, em Nova Iguaçu – Rio de Janeiro. Nesse estudo, foi avaliada a combinação do lodo com pó de pedra, solo arenoso e solo argiloso, sendo que, dos três cenários, o mais satisfatório foi a combinação com pó de pedra e cimento para estabilização, que apresentou melhora em seu comportamento mecânico, sendo recomendado para ruas e rodovias com baixo volume de tráfego (DELGADO, 2016).

Martínez (2014) por outro lado, avaliou a incorporação dos lodos da ETA Brasília e da ETE Norte, ambas localizadas em Brasília – Distrito Federal, ao concreto asfáltico. Nesse estudo a incorporação foi realizada tanto por via úmida, diretamente no ligante asfáltico, quanto por via seca, diretamente na fração fíler da mistura asfáltica (MARTÍNEZ, 2014). A conclusão apresentada é de que a aplicação é viável, sendo mais satisfatório o cenário que propõe lodos calcinados a 500°C, incorporados por via úmida quando de ETA e por via seca quando de ETE (MARTÍNEZ, 2014).

Lucena (2012) analisou a viabilidade da aplicação do lodo da ETA Botafogo, localizada em Igarassu – Pernambuco, e do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Cabanga, em Recife – Pernambuco, para compor camadas de base e sub-base de pavimentação rodoviária. Apesar de ainda se fazerem necessárias algumas análises e de a variabilidade do material conforme a localidade das estações de tratamento se apresentar como um obstáculo, essa também se provou uma alternativa válida de destinação para o resíduo (LUCENA, 2012).

Já Santos (2011) propõe a aplicação do lodo da ETA Vieira de Mello, em Salvador – Bahia, na confecção de blocos a serem utilizados no setor de construção civil como uma alternativa à disposição inadequada no material no Rio das Pedras. A pesquisa obteve resultados satisfatórios e apontou a possibilidade de produção de aproximadamente 15.764 blocos por dia, sendo que esses produtos potencialmente podem desempenhar função de blocos estruturais ou serem aplicados em alvenaria abaixo ou acima do nível do solo (SANTOS, 2011).

Visando amenizar os impactos da disposição do lodo da ETA da Ponta do Ismael, em Manaus – Amazonas, Silva (2008) sugere seu uso como fíler em cimentos asfálticos, a partir da substituição parcial ou total do cimento Portland. Os resultados comprovaram a viabilidade técnica da proposta, sendo observado um aumento de resistência mecânica do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) em relação às misturas convencionais (SILVA, 2008).

3.3 Materiais alternativos aplicados à pavimentação

Além de trabalhos como o de Alves (2019), Martínez (2014), Lucena (2012) e Silva (2008) que propõem a aplicação do lodo de ETA em diferentes camadas de pavimentação, outros autores desenvolveram estudos semelhantes com resíduos oriundos de outras atividades humanas.

Exemplo disso é o trabalho de Silva, G. M. S. (2022) que utilizou rejeitos de quartzito foliado como agregado mineral e asfalto borracha em misturas asfáltica de pavimento flexível, encontrando resultados satisfatórios para o módulo de resiliência, estabilidade e fluência da mistura em análise.

Já Silva, M. G. B. (2022) utilizou rejeito de minério de ferro estabilizado com resíduos de mineração de quartzito em seu estudo que encontrou resultados satisfatórios para a aplicabilidade desse material em reforço de subleito e/ou sub-base de pavimentação.

Lima, Amorim, *et al.* (2021) por outro lado sugeriram a aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) em substituição das frações de brita 1 e areia na composição granulométrica de uma mistura de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), apresentando resultados satisfatórios que levaram à aplicação da mistura em um trecho experimental para estudos futuros.

Sá (2018) também trabalhou com misturas asfálticas não convencionais, uma delas contendo resíduo de minério de ferro e outra contendo resíduo de minério serpentinito (pedra-sabão), em ambas encontrou resultados satisfatórios para os ensaios mecânicos realizados, dando indícios de uma potencial aplicação para esses resíduos.

Utilizando resíduos de borracha de recauchutagem de pneus, Silva, Nascimento, *et al.* (2018) propuseram uma mistura asfáltica que satisfaz às especificações requeridas para o CBUQ, sinalizando um potencial de aplicação desses resíduos para a camada de rolamento de pavimentos.

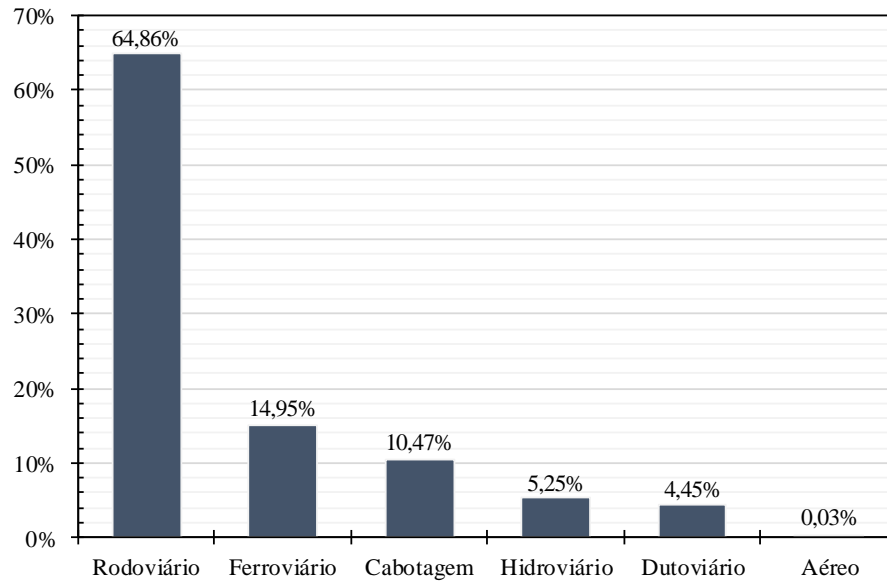
Silva (2017) por outro lado, elaborou um catálogo com doze estruturas de pavimento, cujo revestimento era constituído por quatro misturas distintas de CAUQ, cada uma delas propondo a substituição parcial dos agregados por rejeito de minério de ferro recolhido em uma barragem distinta. Seu trabalho encontrou resultados satisfatórios, apresentando potencial para o resíduo nessa aplicação (SILVA, 2017).

3.4 Contextualização do transporte brasileiro

Segundo a CNT (2023), o modal rodoviário é o mais utilizado para transporte de cargas e passageiros no Brasil, sendo, portanto, essencial para o desenvolvimento socioeconômico do país e para a integração de suas regiões, dada sua vasta extensão territorial. A Figura 2 apresenta a participação de cada modal na matriz do transporte de carga no Brasil, sendo possível verificar que, para o ano de 2022, o modal rodoviário representa 64,86% seguido pelo modal ferroviário, já bem abaixo, com 14,95%.

Quanto ao transporte de passageiros, a CNT (2022b) estima que o modal rodoviário seja responsável por mais de 95% das movimentações anuais. Esse dado corrobora a perspectiva de que o modal rodoviário não apenas afeta a competitividade econômica do país, mas também apresenta benefícios sociais, uma vez que a qualidade das rodovias interfere diretamente a vida de seus usuários, pela qualidade de trabalho para os motoristas profissionais e pelo menor risco de acidentes a todos os usuários (CNT, 2022b).

Figura 2 - Matriz do transporte de cargas no Brasil



Fonte: Adaptado dos Boletins CNT (2023).

Apesar da relevância da qualidade das rodovias no contexto do transporte no Brasil, anuários, boletins e pesquisas apontam que ainda há muitos desafios a serem enfrentados pelo setor. Na Tabela 2 tem-se que, segundo dados de 2021, apenas 12,4% das rodovias brasileiras são pavimentadas, contra 78,5% não pavimentadas.

Tabela 2 - Malha rodoviária brasileira

Situação	2021	
	km	(%)
Pavimentadas	213.500,0	12,4
Planejadas	157.309,0	9,1
Não pavimentadas	1.350.100,0	78,5
Total	1.720.909,00	100

Fonte: Anuário CNT (2022a).

As análises do CNT (2022a) ainda apontam que 66,0% dos 110.333 km de rodovias avaliados no ano de 2022 apresentavam algum tipo de problema no estado geral, sendo que 55,5% dos trechos avaliados apresentavam problemas no pavimento. Esses trechos são classificados como “regular”, “ruim” ou “péssimo”, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação do pavimento

Classificação	Extensão Total	
	km	(%)
Ótimo	32.857	29,8
Bom	16.165	14,7
Regular	34.358	31,1
Ruim	20.569	18,6
Péssimo	6.384	5,8
Total	110.333	100

Fonte: Pesquisa CNT de rodovias (2022b).

3.5 Tipos de pavimento

Segundo o DNIT (2006a), o pavimento de uma rodovia é composto por um sistema de camadas e, a depender do tipo de pavimento, é possível que ele seja constituído por até quatro camadas sobre o subleito. Bernucci, Motta, *et al.* (2022) descrevem que a finalidade do pavimento é resistir aos esforços gerados pelo tráfego de veículos e pela ação climática, conferindo aos usuários melhores condições de rolamento, de forma econômica e segura.

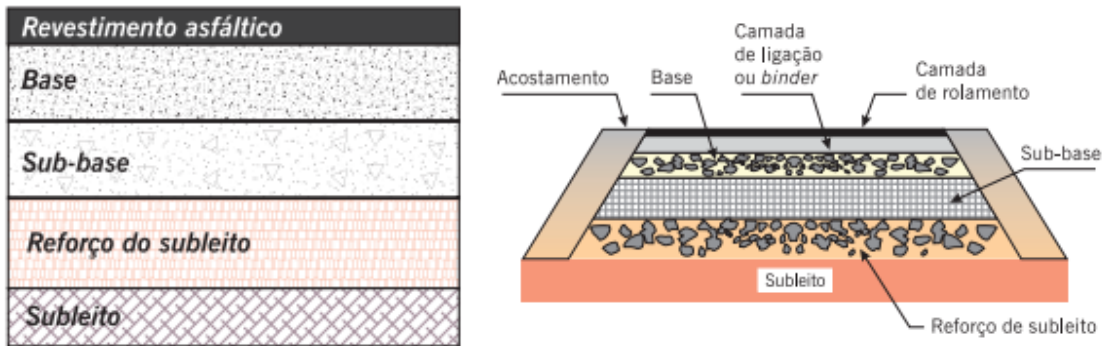
3.5.1 Classificação

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006a), os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, semi-rígidos e rígidos.

3.5.1.1 Pavimentos flexíveis

Nos pavimentos flexíveis há uma distribuição das cargas praticamente equivalente ao longo de suas camadas, uma vez que todas elas sofrem uma deformação elástica significativa com o carregamento (DNIT, 2006a). Geralmente são associados aos pavimentos asfálticos, compostos por uma camada superficial de revestimento asfáltico geralmente aplicado sobre as camadas de sub-base, reforço do subleito e subleito (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022). A Figura 3 apresenta um esquema comum a esse tipo de pavimento.

Figura 3 - Estrutura do pavimento flexível



Fonte: Bernucci, Motta, *et al.* (2022).

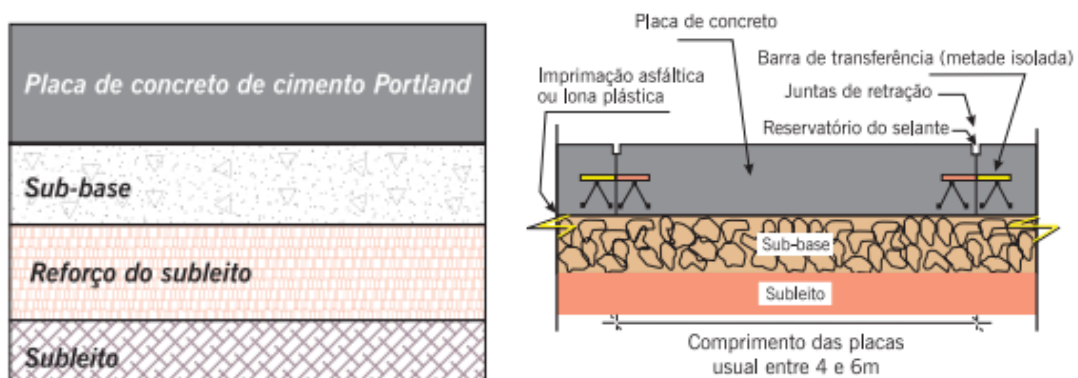
3.5.1.2 Pavimentos semi-rígidos

Os pavimentos semi-rígidos são aqueles que também apresentam revestimento asfáltico em sua camada superficial, mas que possui algum material cimentado em uma de suas camadas de base (DNIT, 2006a).

3.5.1.3 Pavimentos rígidos

Nos pavimentos rígidos, a camada superficial de revestimento apresenta rigidez elevada comparada às demais camadas, absorvendo, portanto, praticamente todas as tensões devidas aos carregamentos aplicados (DNIT, 2006a). Geralmente estão associados aos pavimentos de placas de cimento Portland, armadas ou não, em geral apoiada sobre as camadas de sub-base, reforço de subleito e subleito (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022). A Figura 4 ilustra as camadas típicas desse tipo de pavimento.

Figura 4 - Estrutura do pavimento rígido



Fonte: Bernucci, Motta, *et al.* (2022).

3.5.2 Camadas de um pavimento

3.5.2.1 Subleito

O subleito é a superfície resultante das atividades de terraplanagem e atua como fundação da estrutura de pavimentação (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022). De acordo com o

DNIT (2006a), essa camada deve apresentar um Índice de Suporte Califórnia (CBR) superior ou igual a 2% e a expansão apresentada durante o ensaio de CBR deve ser igual ou inferior a 2%.

3.5.2.2 Reforço de subleito

Segundo o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) (1997), o reforço de subleito em geral possui 20cm de espessura e pode ser executado caso seja necessário aumentar a capacidade de suporte do subleito ou caso deseje-se reduzir a camada de sub-base, por questões técnicas ou econômicas.

Quando executados, podem ser constituídos por agregados, solos e, em alguns casos, aditivos (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022). Conforme especificado pelo DNIT (2006a), deve apresentar CBR maior que o do subleito e a expansão deve ser igual ou inferior a 1%.

3.5.2.3 Base e sub-base

A camada de base pode ser constituída por materiais como brita fina, cascalho, pedra amarrada ou material estabilizado e deve resistir aos carregamentos oriundos do tráfego de veículos e distribuí-los ao subleito ou reforço de subleito, quando houver (DNER, 1997). Segundo o DNER (1997), a sub-base é uma camada complementar, que pode ser executada caso pretenda-se reduzir a espessura da base.

Por ser uma camada subjacente ao revestimento, pode ser conveniente estabilizá-la quimicamente para melhorar as características de resistência à tração (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

3.5.2.4 Revestimento

A camada de revestimento é a que está em contato direto com os veículos, sendo submetida à compressão e à tração devido à flexão, tendo como objetivo resistir a essas tensões sem deformar-se excessivamente, além de transmiti-las às camadas inferiores (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

3.6 Metodologias de dimensionamento de pavimentos flexíveis

3.6.1 Método do DNER

Esse método foi desenvolvido pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza, baseado no trabalho de W.J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, intitulado "*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*", e de observações realizadas na pista experimental da Associação Americana de Funcionários de Rodovias e Transportes Estaduais (AASHTO) (DNIT, 2006a).

Para esse dimensionamento são utilizados fatores relacionados à capacidade de suporte do subleito, classificação dos materiais granulares empregados, tráfego da via, fator climático regional, equivalência estrutural dos materiais constituintes e espessura mínima de revestimento betuminoso (DNER, 1981).

3.6.1.1 Capacidade de suporte

A capacidade de suporte pode ser determinada a partir do resultado CBR e, caso seja necessária a adoção de maiores medidas em favor da segurança, pode ser adotado o valor do índice de suporte (IS), que leva em consideração o CBR corrigido em função do IG, conforme a Equação 1 (DNER, 1981).

$$IS = \frac{CBR + CBR_{IG}}{2} \quad \text{Equação 1}$$

Segundo o DNIT (2006a), as camadas que compõem o pavimento devem ser compactadas conforme as especificações gerais fornecidas pelo próprio departamento e, para a camada de subleito, os materiais empregados devem apresentar expansão limite de 2% e $CBR \geq 2\%$.

3.6.1.2 Classificação dos materiais empregados

A partir dos valores obtidos para o estudo de capacidade de suporte dos materiais, é possível classificá-los quanto à empregabilidade nas camadas que compõem o pavimento (DNIT, 2006a). Sendo que os materiais de reforço de subleito devem apresentar CBR superior ao do subleito e expansão limite de 1%; os materiais de sub-base devem apresentar CBR maior ou igual a 20%, índice de grupo nulo e expansão máxima de 1%; já os materiais de base devem apresentar CBR maior ou igual a 80%, expansão limite de 0,5%, limite de liquidez máximo de 25% e índice de plasticidade menor ou igual a 6% (DNER, 1981).

O DNER apresenta algumas considerações para o caso de o material a ser empregado na camada de base não atender aos requisitos. Para que sejam aceitáveis materiais com limite de liquidez superior a 25% ou índice de plasticidade superior a 6%, eles devem apresentar equivalente de areia superior a 30; em alguns casos, a depender do tráfego da via, os materiais podem apresentar CBR mínimo de 60% (DNIT, 2006a).

3.6.1.3 Tráfego da via

O parâmetro referente ao tráfego da via empregado no dimensionamento é chamado de N, que corresponde ao número equivalente de operações de um eixo adotado como padrão

durante o período de projeto escolhido (DNIT, 2006a). O eixo adotado pode ser simples ou em tandem, com unidades alinhadas atrás das outras (DNER, 1997).

Para definir esse parâmetro, é necessário calcular o volume médio diário de tráfego em um sentido (V_m), dado pela Equação 2.

$$V_m = \frac{V_I \left[2 + (P - 1) \frac{t}{100} \right]}{2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V_I : é o volume médio diário de tráfego em um sentido no ano de abertura da via;

P : período considerado no cálculo [anos];

t : taxa de crescimento anual considerada para o tráfego durante o período P [%].

A partir disso, é possível calcular também o volume total de tráfego em um sentido (V_t), definido conforme a Equação 3.

$$V_t = 365 \times P \times V_m \quad \text{Equação 3}$$

Ao considerar a taxa de crescimento anual, tem-se então a Equação 4 para determinação de V_t durante o período.

$$V_t = \frac{365 V_I \left[\left(1 + \frac{t}{100} \right)^P - 1 \right]}{\frac{t}{100}} \quad \text{Equação 4}$$

Com isso é possível definir o fator N conforme a Equação 5.

$$N = V_t \times FE \times FC \quad \text{Equação 5}$$

Sendo o fator de eixos (FE) um número que, multiplicado pela quantidade de veículos, retorna o número de eixos correspondentes, enquanto o fator de carga (FC), ao ser multiplicado pela quantidade de eixos que operam, retorna o número de eixos equivalentes ao eixo padrão adotado no projeto (DNER, 1981). A multiplicação entre FE e FC é denominada de fator de veículo que multiplicado pelo número de veículos que operam na via, retorna o número de eixos equivalente ao eixo padrão (DNER, 1981). Com isso, N pode ser definido conforme a Equação 6.

$$N = V_t \times FV \quad \text{Equação 6}$$

Para conhecer cada um desses fatores é necessário realizar um estudo de tráfego da via, analisando o volume total do período, realizando a contagem dos eixos e a pesagem de cada um deles (DNER, 1981). A partir disso o FE pode ser definido pela divisão do número de eixos pelo volume total, já FC é dado pela divisão por cem do somatório do fator de equivalência,

obtido no ANEXO B – Fatores de equivalência de operação, multiplicado pela porcentagem de tráfego correspondente aos eixos simples e aos eixos tandem (DNER, 1981).

3.6.1.4 Fator climático regional

O fator climático regional (FR) deve ser multiplicado pelo fator N para que sejam consideradas as variações de umidade, decorrentes das estações do ano, que atuam sobre os materiais constituintes das camadas de pavimento (DNER, 1981). Na pista experimental da AASHTO, esse fator variou de 0,2 nos menores teores de umidade, chegando a 5,0 em situações em que os materiais se encontravam praticamente saturados (DNER, 1981).

Para o coeficiente final, deve-se levar em conta diferentes coeficientes sazonais ponderados conforme a extensão do tempo em que ocorrem (DNER, 1981). No Brasil, tem-se adotado o FR igual a 1,0 baseado em estudos desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisas em Transportes (IPR)/DNER (DNIT, 2006a).

3.6.1.5 Equivalência estrutural dos materiais constituintes

O coeficiente de equivalência estrutural (K) é adotado para cada camada do pavimento de acordo com o material empregado (DNER, 1981). Dessa forma, tem-se K_R para a camada de revestimento, K_B para a camada de base, K_S para a camada de sub-base e K_{Ref} para a camada de reforço, sendo adotados conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Coeficiente de equivalência estrutural

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: Manual de pavimentação (DNIT, 2006a).

3.6.1.6 Espessura mínima de revestimento betuminoso

Segundo o DNER (1981), a espessura mínima de revestimento a ser adotada ainda é um ponto em aberto na engenharia rodoviária, uma vez que essa camada deve proteger a camada de base e requer atenção para que sua ruptura devida à tração, dados os esforços de flexão, seja evitada. As espessuras são recomendadas pelo departamento conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Espessura mínima de revestimento betuminoso

N	Espessura mínima
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos.
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura.
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura.
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura.
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura.

Fonte: Manual de pavimentação (DNIT, 2006a).

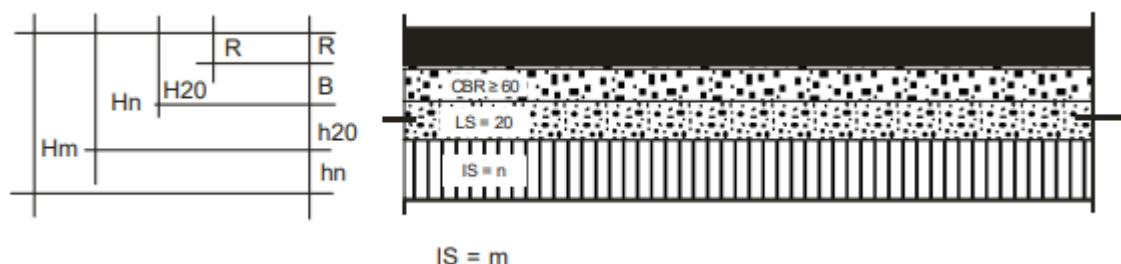
3.6.1.7 Dimensionamento do pavimento

Conhecendo-se N e o IS ou CBR é possível determinar a espessura do pavimento utilizando o ábaco do ANEXO C – Determinação de espessuras do pavimento (DNER, 1981). Nesse ábaco é considerado um material com K igual a 1,0 e parte-se do pressuposto que a drenagem superficial é adequada e que o lençol freático se encontra a pelo menos 1,5m abaixo do greide de regularização (DNER, 1981).

Nos casos em que o IS ou o CBR é inferior a 2%, o DNER (1981) ainda recomenda a substituição de pelo menos 1m de camada por um material com IS ou CBR superior a 2%. Para as camadas granulares, a espessura mínima construtiva é de 15cm e a espessura de compactação deve estar compreendida entre 10 e 20cm (DNER, 1981).

Na Figura 5 tem-se um esquema do dimensionamento final, no qual H_m é definido como a espessura necessária para proteger um pavimento com IS ou CBR igual a m, enquanto h_n é a espessura da camada do pavimento com IS ou CBR igual a n (DNIT, 2006a). Nos casos em que m e n é superior a 20, na determinação de H_m e h_n através do ábaco do ANEXO C – Determinação de espessuras do pavimento, limita-se ambos em 20 (DNIT, 2006a).

Figura 5 - Dimensionamento de pavimentos



Fonte: Manual de pavimentação (DNIT, 2006a).

3.6.2 Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa

Segundo Franco e Motta (2020), MeDiNa é um programa de computador desenvolvido a partir do Termo de Execução Descentralizada celebrado pelo IPR e pelo Instituto Alberto

Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE. O programa também contou com a colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás - CENPES e de diversas Universidades do Brasil (FRANCO e MOTTA, 2020).

Utilizando o MeDiNa é possível dimensionar e verificar estruturas de pavimento a partir do programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) que calcula as tensões e as deformações dessas estruturas (FRANCO e MOTTA, 2020).

Franco e Motta (2020) também ressaltam que, para que os resultados fornecidos pelos MeDiNa sejam confiáveis e satisfatórios, é necessário que o projetista forneça corretamente os dados de entrada para o programa.

3.6.2.1 Condição de aderência

Para as camadas adotadas no pavimento, é necessário que o projetista informe se há ou não aderência (FRANCO e MOTTA, 2020). As condições pré-estabelecidas pelo MeDiNa estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Condições de aderência pré-estabelecidas

Camada	Condição
Camada asfáltica sobre outra camada asfáltica	Aderido
Camada asfáltica sobre camada cimentada	Não aderido
Camada asfáltica sobre camada antirreflexão de trincas	Aderido
Camada asfáltica sobre camadas de solos ou granulares	Não aderido
Tratamento superficial sobre camadas asfálticas	Aderido
Tratamento superficial sobre camadas de solos ou granulares	Não aderido
Camada estabilizada sobre outra camada estabilizada	Não aderido
Camada estabilizada sobre camadas de solos ou granulares	Não aderido
Camada antirreflexão de trincas sobre camadas estabilizadas	Não aderido
Camada de solos ou granulares sobre camadas asfálticas, cimentadas, de solos ou granulares	Não aderido

Fonte: Franco e Motta (2020).

3.6.2.2 Estrutura do projeto

O MeDiNa já possui uma base de dados de materiais fundamentada em publicações técnicas, mas o projetista pode importar seus próprios materiais, devidamente testados em laboratório para definição de suas propriedades (FRANCO e MOTTA, 2020).

Conforme descrito por Franco e Motta (2020), além dos materiais, também é necessário que o projetista forneça a espessura, o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson referente a cada camada definida para o pavimento, que no total pode variar entre três e oito. Um resumo dos critérios adotados pelo programa é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Critérios por tipo de material

Material	Espessura	Avaliação
Materiais asfálticos	5 – 15 cm	Módulo de resiliência é elástico linear e a área trincada é calculada de acordo com a fadiga média.
Tratamentos superficiais	1,5 – 3,0 cm	Considera-se a deformação permanente apenas das camadas inferiores.
Camadas Antirreflexão de Trincas	1,5 – 3,0 cm	Não é avaliada para fadiga nem deformação permanente.
Materiais estabilizados	15 – 25 cm	O Módulo de resiliência decai com o tempo conforme aumenta o dano por fadiga. A deformação permanente não é considerada.
Materiais granulares; solos finos, siltosos e argilosos	10 – 40 cm	O dano por fadiga não é avaliado. O módulo de resiliência pode ser elástico linear ou elástico não linear.
Subleitos	–	O dano por fadiga não é avaliado. A deformação permanente não deve ultrapassar 5 mm.
Camadas Existentes	5 – 75 cm	Já atingiu o limite de fadiga e a deformação permanente.
Camada Asfáltica Superficial Existente	0 – 50 cm	Já atingiu o limite de fadiga e a deformação permanente. Apenas a nova camada asfáltica é avaliada.

Fonte: Adaptado de Franco e Motta (2020).

3.6.2.3 Carregamento

Outra informação relevante para o dimensionamento do MeDiNa está relacionada ao tráfego da via, que deve ser definido a partir do fator N anual, baseado no eixo padrão ilustrado

na Figura 6, que possui 8,2 tf de carga de eixo, 0,56 Mpa de pressão de pneus, 10,29 cm de raio de área de contato e 32,4 cm de distância entre rodas (FRANCO e MOTTA, 2020).

Figura 6 - Eixo padrão



Fonte: Franco e Motta (2020).

O fator N pode ser calculado pelo MeDiNa a partir do Volume Médio Diário (VMD) e Fator de Veículo (FV) fornecidos, ou pode ser inserido no programa que irá atualizar o valor de VMD enquanto o valor de FV segue fixo no padrão DNIT definido pelo projetista (FRANCO e MOTTA, 2020).

3.6.2.4 Relatórios

O MeDiNa pode operar na função “Analisar estrutura”, a partir da qual é possível obter um relatório que auxilia o projetista na escolha dos materiais e no entendimento do projeto, já a função “Dimensionamento” pode ser utilizada no modo “Reforço”, que dimensiona a nova camada de pavimento considerando apenas o critério de área trincada, enquanto no modo “Projeto novo” ele pode dimensionar todas as camadas, considerando também o critério da deformação permanente total (FRANCO e MOTTA, 2020). Esses critérios variam conforme o tipo de via, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Tipos de via

Tipo de Via	Confiabilidade	Área trincada	Def. Permanente
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10 mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Local	65%	30%	20 mm

Fonte: Franco e Motta (2020).

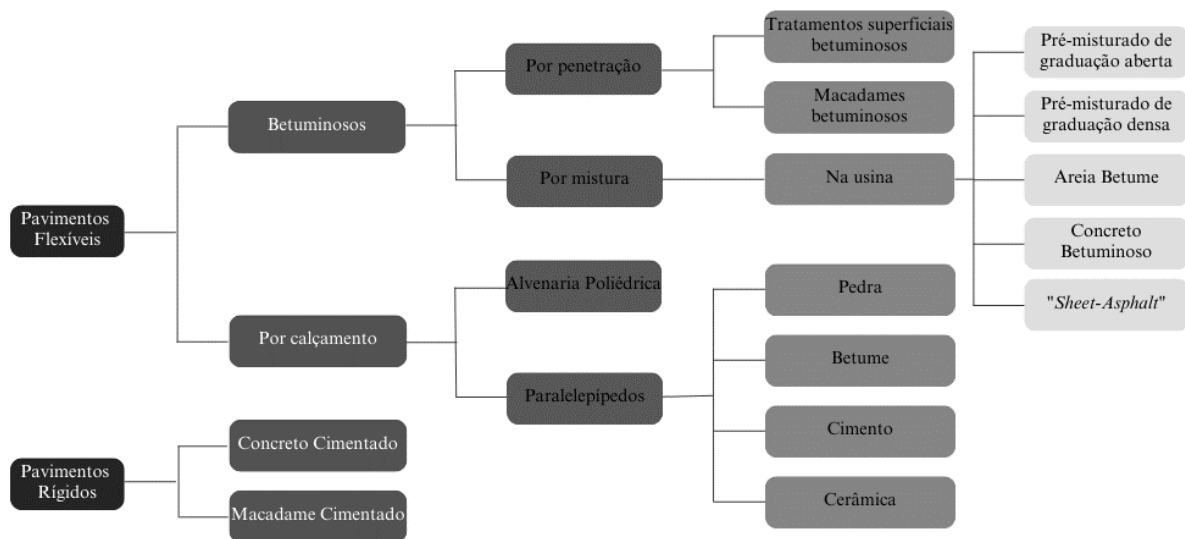
Os resultados obtidos pelo programa podem ser visualizados a partir dos relatórios disponibilizados ao fim na análise ou dimensionamento. A evolução mensal dos danos apresenta o comportamento da área trincada, da deformação permanente total e do módulo sigmoidal; através do resumo de deformação permanente na estrutura é possível visualizar a

contribuição de cada camada para a deformação permanente total do projeto; no relatório de bacias de reflexão são apresentadas as bacias calculadas para cada camada e para o subleito; já o relatório completo da análise é um compilado de todas as informações do projeto utilizadas pelo MeDiNa (FRANCO e MOTTA, 2020).

3.7 Camadas de revestimento

As camadas de revestimento do pavimento podem ser agrupadas conforme a Figura 7.

Figura 7 - Camadas de revestimento



Fonte: A autora, baseada em DNIT (2006a).

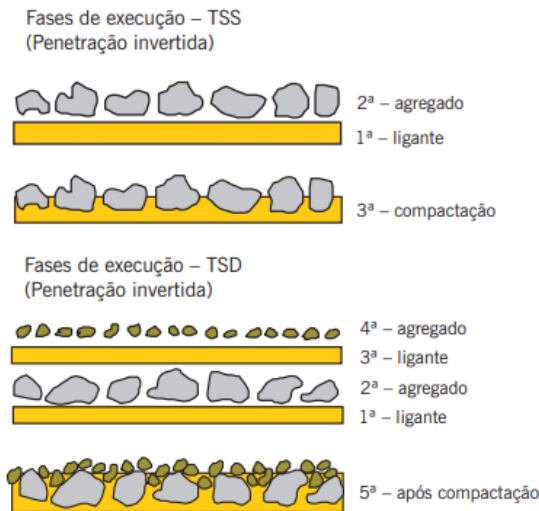
3.7.1 Revestimentos flexíveis betuminosos por penetração

3.7.1.1 *Tratamentos superficiais betuminosos*

Segundo Bernucci, Motta, et al. (2022), para os tratamentos superficiais betuminosos os agregados e o ligante são aplicados na superfície sem mistura prévia, sendo sua adesão promovida pelo processo de compactação realizado após a disposição dos materiais. A espessura da superfície acabada pode variar entre 5 e 20 mm (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

A depender da quantidade de camadas executadas, pode ser classificado como Tratamento Superficial Simples (TSS), também denominado de capa selante, para fins de impermeabilização ou modificação da textura do pavimento já existente; Tratamento Superficial Duplo (TSD); ou Tratamento Superficial Triplo (TST) (DNIT, 2006a). A Figura 8 apresenta o processo de execução desse tipo de revestimento.

Figura 8 - Tratamento superficial betuminoso



Fonte: Bernucci, Motta, *et al.* (2022).

3.7.1.2 Macadames betuminosos

Os macadames betuminosos consistem da aplicação de agregados e ligante por espalhamento, geralmente em duas camadas, a começar pelos agregados mais graúdos (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022). Segundo o DNIT (2006a) o processo executivo é semelhante ao do TSD e geralmente ele é utilizado como base ou *binder*, uma vez que sua espessura pode ultrapassar 50 mm (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

3.7.2 Revestimentos flexíveis betuminosos por mistura

Nesse caso, o ligante e os agregados são misturados em uma usina estacionária e transportados até o local de aplicação, quando pré-misturados propriamente ditos, ou misturados na própria pista em que será realizada a aplicação, para os pré-misturados na pista (*road mixes*) (DNIT, 2006a). Ainda segundo o DNIT (2006a), para os pré-misturados a frio o espalhamento do material pode ser feito à temperatura ambiente, enquanto os pré-misturados a quente exigem altas temperaturas para mistura e espalhamento do material.

3.7.2.1 Pré-misturado de graduação aberta

Segundo Bernucci, Motta, *et al.* (2022), o pavimento pré-misturado de graduação aberta apresenta uma curva granulométrica uniforme. Dessa forma, ele deve ser aplicado quando se deseja aumentar a permeabilidade do revestimento, o que facilita a condução da água até as sarjetas e reduz a lâmina d'água sobre o asfalto em dias chuvosos (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

3.7.2.2 Pré-misturado de graduação densa

Por outro lado, o pavimento pré-misturado de graduação densa apresenta uma curva granulométrica contínua e bem-graduada, proporcionando que a mistura asfáltica apresente menos volume de vazios (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

3.7.2.3 Areia betume

São denominados de areia betume os revestimentos cuja granulometria dos agregados são predominantemente de areia, isto é, passante da peneira nº10 de 2,0 mm (DNIT, 2006a).

3.7.2.4 Concreto betuminoso

O termo CAUQ, concreto asfáltico ou concreto betuminoso, refere-se ao revestimento pré-misturado a quente de graduação densa que atende a alguns critérios e exigências (DNIT, 2006a). Segundo Bernucci, Motta, *et al.* (2022), essa é a mistura asfáltica usinada a quente mais utilizada como revestimento nos pavimentos brasileiros, apresentando muita resistência em todos os aspectos.

Outra qualidade citada pela especificação técnica do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER-SP) (2005), que justifica sua ampla utilização, é a sua vasta aplicabilidade como revestimento, camada de ligação, *binder*, regularização ou reforço estrutural do pavimento.

A depender da finalidade do revestimento, a granulometria dos agregados deve atender a limites específicos, conforme descrito no Quadro 3.

A mistura também deve atender a alguns requisitos, conforme os limites identificados na e no Quadro 4.

O teor de ligante é expresso em porcentagem, em relação à mistura final com os agregados (DNIT, 2006b). Esse teor afeta diretamente as propriedades do concreto betuminoso, sendo que, quando em excesso, pode gerar problemas relacionados à deformação permanente e, quando em falta, enfraquece a mistura e reduz sua resistência, levando ao aparecimento de trincas (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

Quadro 3 - Granulometria do concreto betuminoso

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 – 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 – 100	95 – 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 – 90	80 – 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 – 100	± 7%
3/8"	9,5	35 – 65	45 – 80	70 – 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 – 50	28 – 60	44 – 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 – 40	20 – 45	22 – 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 – 30	10 – 32	8 – 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 – 20	8 – 20	4 – 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 – 8	3 – 8	2 – 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 – 7,0 Camada de ligação (<i>Binder</i>)	4,5 – 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 – 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: DNIT (2006b).

Tabela 7 - Requisitos para o concreto betuminoso

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (<i>Binder</i>)
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade, mínima, (kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática à 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65	0,65

Fonte: DNIT (2006b).

Quadro 4 - Vazios do Agregado Mineral (VAM)

Tamanho Nominal Máximo do agregado		VAM Mínimo %
#	mm	
1 ½"	38,1	2,00
1"	25,4	1,70
¾"	19,1	1,40
½"	12,7	1,20
3/8"	9,5	1,00

Fonte: DNIT (2006b).

3.8 Metodologias de dosagem de misturas asfálticas usinadas a quente

3.8.1 Dosagem Marshall

Segundo Bernucci, Motta, *et al.* (2022), esse é o método de dosagem mais utilizado no Brasil.

3.8.1.1 Massa específica real dos materiais

Para realizar a Dosagem Marshall é necessário conhecer a massa específica real dos agregados e do ligante asfáltico empregados na mistura (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022). Para tal, podem ser utilizadas normas específicas para este fim, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Normas para determinação de massa específica real

Material	Norma Técnica
Agregado graúdo	DNER ME 081/98
Agregado miúdo	DNER ME 084/95
Fíler	DNER ME 085/94
Ligante asfáltico	DNER ME 193/96

Fonte: Ministério da Infraestrutura (DNIT, 2023).

É a partir dessas densidades que pode-se determinar a densidade máxima teórica de uma mistura asfáltica conforme a Equação 7.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f}}$$

Equação 7

Onde:

DMT: densidade máxima teórica [g/cm³];

%a: porcentagem de asfalto [%];

$\%Ag$, $\%Am$ e $\%f$: porcentagem de agregado graúdo, miúdo e fíler, respectivamente [%];

G_a , G_{Ag} , G_{Am} e G_f : massa específica real do ligante, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do fíler, respectivamente [g/cm³].

Em substituição ao parâmetro DMT, tem-se a densidade relativa máxima medida (G_{mm}) que é obtida a partir do método de ensaio descrito na norma de determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas, Norma DNIT 427/2020 – ME.

Após realizar o procedimento descrito na norma supracitada, a G_{mm} pode ser calculada conforme a Equação 8.

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

G_{mm} : densidade relativa máxima medida [adimensional];

A : massa da amostra seca ao ar [g];

B : massa do recipiente com volume completo com água [g];

C : massa do recipiente contendo a amostra submersa em água [g].

3.8.1.2 Granulometria dos agregados

De acordo com a finalidade do revestimento asfáltico, deve-se escolher a faixa granulométrica do projeto, conforme ilustrado pelo Quadro 3. Baseando-se na referida faixa, o projetista deve determinar a porcentagem de cada agregado de forma que a composição deles atenda aos requisitos de granulometria (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

3.8.1.3 Temperatura de mistura e de compactação

As temperaturas são determinadas pela curva de viscosidade do ligante asfáltico, sendo que a viscosidade ideal para mistura está entre 75 e 95SSF (segundos Saybolt-Furol), enquanto a viscosidade de compactação deve estar entre 125 e 155SSF (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

A faixa de temperatura ideal para cada uma das etapas é aquela que proporcione a faixa desejada de viscosidade.

3.8.1.4 Moldagem de corpos de prova

Segundo Bernucci, Motta, *et al.* (2022), para determinação do teor de ligante, deve-se moldar, em média, quinze corpos de prova.

Baseando-se em sua experiência, o projetista deve adotar um teor de ligante inicial (T), expresso em porcentagem, para a mistura granulométrica do projeto (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022). Como o objetivo é encontrar o teor ótimo, também devem ser moldados corpos de prova com os teores $T \pm 0,5\%$ e $T \pm 1,0\%$ (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

Após definidos esses teores, o projetista deve moldar um mínimo de três corpos de prova para cada um deles (DNER, 1995). Esse procedimento deve seguir a norma DNIT 178/2018 PRO para mistura e compactação do material nas temperaturas e proporções projetadas obtendo os corpos de prova com as dimensões especificadas na norma DNER-ME 043/95, com cerca de 1.200 g e $(63,5 \pm 1,3)$ mm de altura (DNER, 1995).

3.8.1.5 Determinação dos parâmetros de dosagem

Com os corpos de prova resfriados e desmoldados, é necessário verificar suas dimensões de altura e largura (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022). O primeiro parâmetro a ser determinado é a densidade relativa aparente do corpo de prova (G_{mb}), seguindo o procedimento descrito pela norma DNIT 428/2022 – ME (DNIT, 2022).

Deve-se adotar um valor médio de G_{mb} para cada teor de ligante e utilizá-los para obter os demais parâmetros como o volume de vazios (V_v), descrito pela Equação 9.

$$V_v = \frac{DMT + G_{mb}}{DMT} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

V_v : volume de vazios;

DMT : densidade máxima teórica [g/cm^3];

G_{mb} : densidade relativa aparente do corpo de prova [g/cm^3].

Com a porcentagem em massa dos agregados, definida conforme a Equação 10, é possível obter os vazios nos agregados minerais (VAM), de acordo com a Equação 11.

$$\sum \%n = 100 - \%a \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$\sum \%n$: porcentagem em massa dos agregados [%];

$\%a$: porcentagem de ligante asfáltico [%].

$$VAM = 100 - \left(\frac{G_{mb} \times \sum \%n}{G_{sb}} \right) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

VAM : vazios nos agregados minerais [%];

G_{mb} : densidade relativa aparente do corpo de prova [g/cm^3];

$\Sigma \%n$: porcentagem em massa dos agregados [%];

G_{sb} : massa específica aparente do agregado, obtida a partir da divisão da massa seca dos agregados pelo volume aparente [g/cm³].

A partir disso é possível definir a relação betume/vazios (RBV) do corpo de prova, conforme a Equação 12.

$$RBV = 100 \times \left(\frac{VAM \times V_V}{VAM} \right) \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

RBV : relação betume/vazios [%];

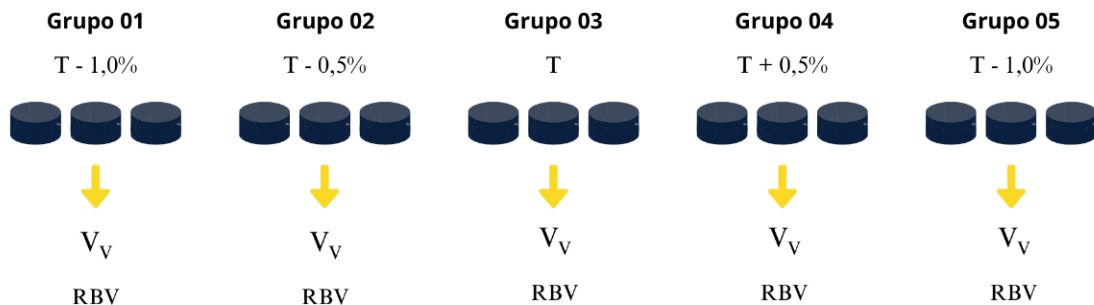
VAM : vazios nos agregados minerais [%];

V_V : volume de vazios.

3.8.1.6 Determinação do teor de projeto de ligante asfáltico

Para se obter o teor ótimo, ou teor de projeto, de ligante asfáltico a partir dos parâmetros de V_V e RBV seguindo o procedimento descrito nesse tópico, tem-se a situação descrita pela Figura 9.

Figura 9 - Determinação do teor ótimo de ligante

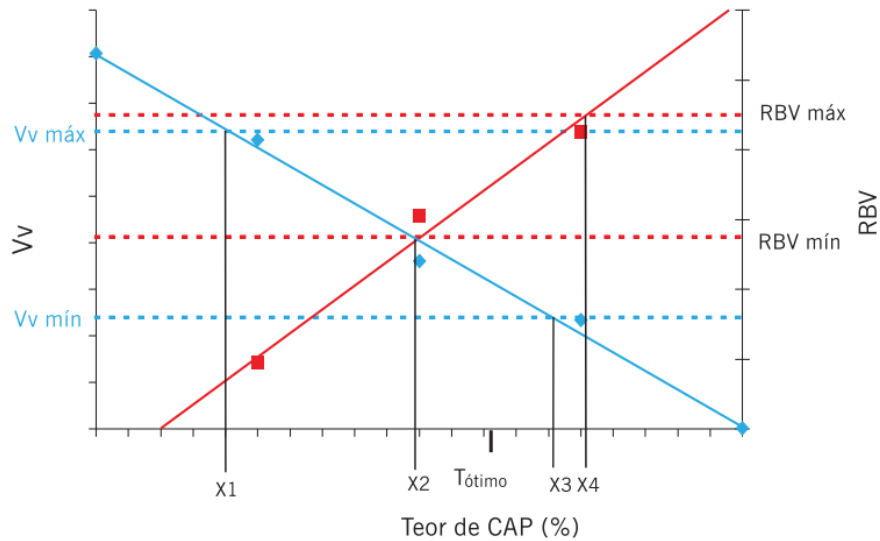


Fonte: Elaborado pela autora.

Deve-se traçar um gráfico com os valores de V_V e RBV , utilizando um eixo vertical secundário, em função do teor de ligante, identificando os limites mínimos e máximos para cada um desses parâmetros (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022). Esses limites podem variar conforme a aplicação do revestimento e podem ser consultados na

Após identificar os pontos em que as séries de dados do ensaio cruzam os limites estabelecidos, é possível obter o teor ótimo de ligante a partir da média dos pontos centrais, X_2 e X_3 , conforme a Figura 10 (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

Figura 10 - Exemplo de gráfico para determinação do teor ótimo de ligante

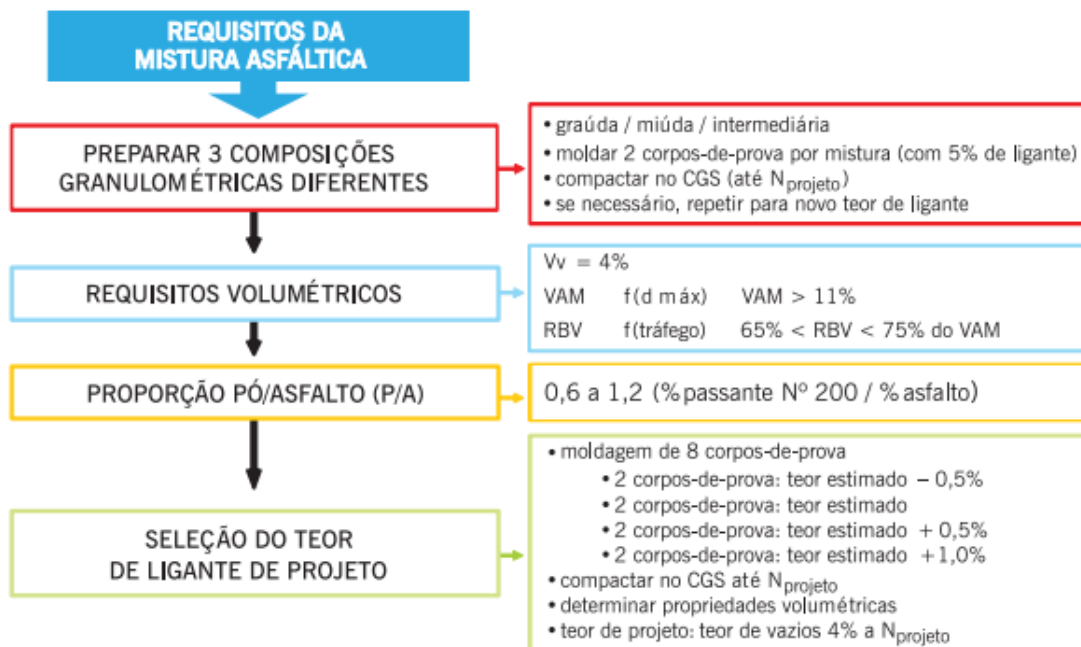


Fonte: Bernucci, Motta, *et al.* (2022).

3.8.2 Dosagem Superpave

A Figura 11 apresenta um fluxograma para o processo de dosagem da mistura asfáltica pela metodologia Superpave.

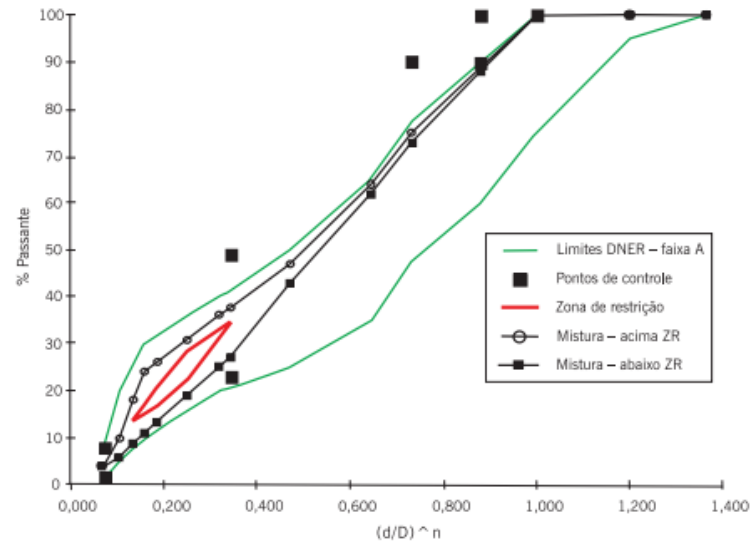
Figura 11 - Fluxograma para a dosagem Superpave



Fonte: Bernucci, Motta, *et al.* (2022).

Nessa metodologia, a faixa granulométrica pode ser definida dentro dos limites impostos pelos pontos de controle e pela zona de restrição ilustrados na Figura 12, também é possível comparar os dois exemplos de composição granulométrica com a Faixa A do DNIT.

Figura 12 - Composição granulométrica para a dosagem Superpave



Fonte: Bernucci, Motta, *et al.* (2022).

A depender do valor de tráfego previsto no projeto, a dosagem Superpave pode adotar critérios diferentes dentro de três níveis distintos, conforme ilustrado pela Tabela 9 (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

Tabela 9 - Critérios da dosagem Superpave

Nível	1	2	3
		Volumétrico	Volumétrico
Critério	Volumétrico	Ensaio de previsão de desempenho a uma temperatura	Ensaio de previsão de desempenho a três temperaturas
N (AASHTO)	$<10^6$	10^6 a 10^7	$\geq 10^7$

Fonte: Bernucci, Motta, *et al.* (2022).

3.8.2.1 Propriedades volumétricas

Segundo Bernucci, Motta, *et al.* (2022), para a metodologia Superpave o projetista deve selecionar três composições granulométricas distintas, para os quais ele deve adotar um teor de ligante estimado para confecção de corpos de prova a partir dos quais será possível obter o Volume de Vazios, VAM e RBV. Nesse processo, uma grande diferença entre esse tipo de dosagem e a dosagem Marshall é a etapa de compactação dos corpos de prova, que nesse caso é realizada em um compactador giratório (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

Outra propriedade que precisa ser verificada é a razão entre a quantidade de fíler (material passante na peneira nº200) e o teor de ligante asfáltico, ou proporção pó/asfalto, cujos limites são 0,6 e 1,2 (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

Após a compactação por giros, conforme o número previsto no projeto, o corpo de prova deve chegar a 4% de vazios para atender aos requisitos de dimensionamento, portanto o projetista deve escolher a composição granulométrica que mais se aproxime desse valor como teor de ligante estimado do projeto (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

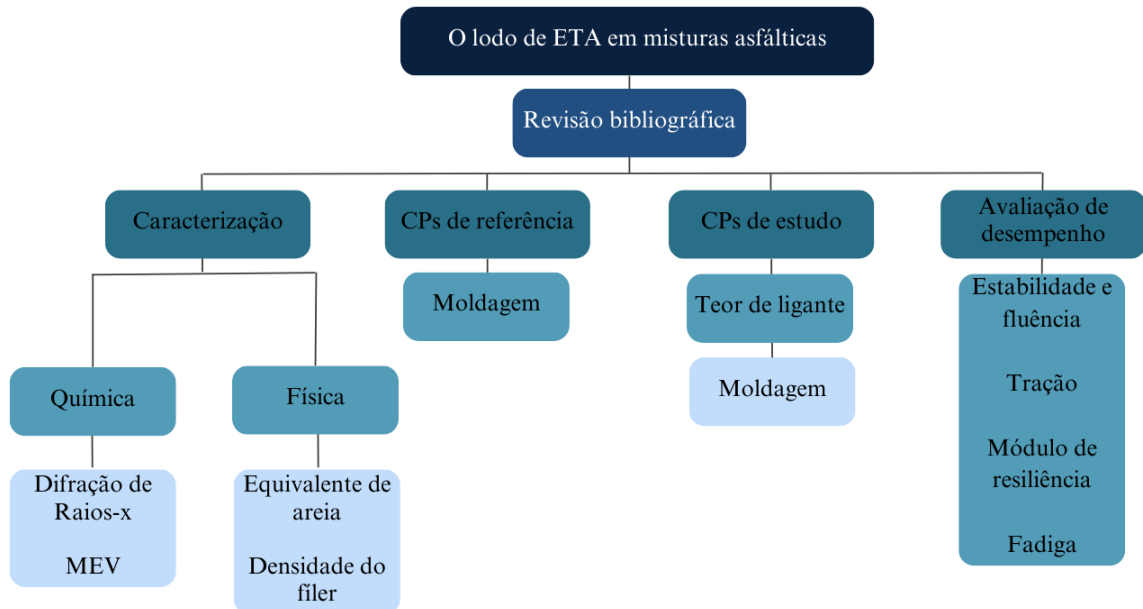
3.8.2.2 Teor de ligante de projeto

Após definido o teor de ligante estimado do projeto (T), o projetista deve moldar corpos de prova com teor de ligante $T \pm 0,5\%$ e $T + 1,0\%$, que também serão compactados conforme o projeto e dos quais também serão obtidas os parâmetros volumétricos (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022). O teor de ligante do projeto é aquele que atingir volume de vazios igual a 4,0% após ser devidamente compactado (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

4 METODOLOGIA

A Figura 13 apresenta um panorama geral da metodologia adotada neste trabalho.

Figura 13 - Metodologia



Fonte: Elaborado pela autora.

Os procedimentos descritos nos itens 4.2.2, 4.3, 4.4 e 4.5 foram desenvolvidos nas instalações do Laboratório de Ferrovias e Asfalto (LFA) da UFOP, pela graduanda e seu orientador. Todas as atividades foram desempenhadas utilizando os Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs) necessários.

4.1 Materiais

4.1.1 Composição Granulométrica

O lodo utilizado é oriundo da ETA Bela Fama, no Rio das Velhas, do município de Nova Lima – Minas Gerais.

Já o material de referência adotado é a brita de gnaise.

4.1.2 Ligante asfáltico

O ligante asfalto empregado em ambas as misturas asfálticas é o cimento asfáltico de petróleo 50/70.

4.2 Caracterização

4.2.1 Caracterização química

Com o objetivo de analisar a composição química do lodo de ETA, realizou-se os procedimentos descritos nesse tópico.

4.2.1.1 Difração de raios-x

A difração de raios-x (DRX) é amplamente utilizada para caracterização de materiais finos com estrutura cristalina, sendo capaz de identificar suas fases cristalinas (SCRIVENER, SNELLINGS e LOTHENBACH, 2016).

A lei de Bragg, da Equação 13, descreve a relação entre a intensidade dos picos das fases cristalinas com a natureza e disposição dos átomos do material (SCRIVENER, SNELLINGS e LOTHENBACH, 2016). Dessa forma, cada estrutura cristalina apresenta picos com posições e intensidades relativas características e, uma vez que o DRX é capaz de fornecer essas informações, torna-se possível identificá-las nas amostras com o auxílio de um banco de dados (SCRIVENER, SNELLINGS e LOTHENBACH, 2016).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

n : um número inteiro;

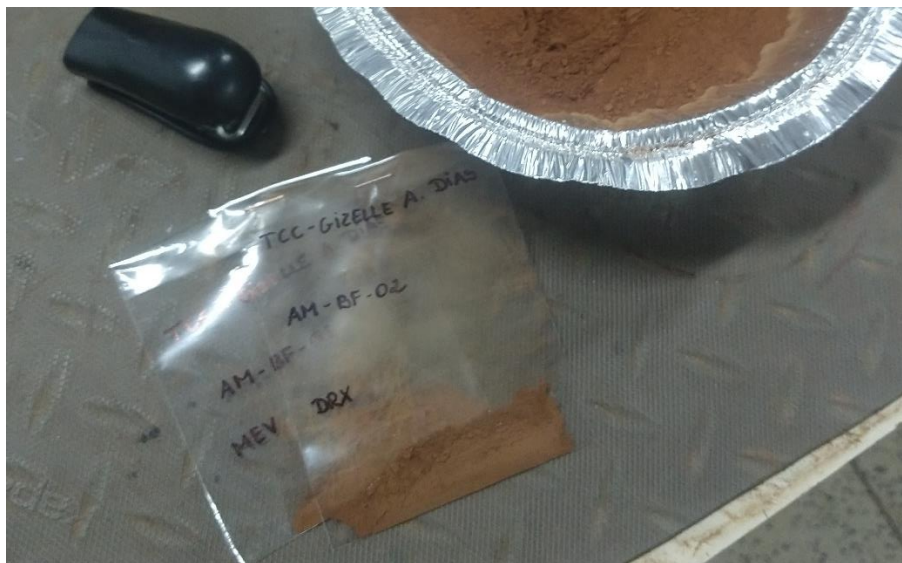
λ : comprimento de onda do feixe de raios-x incidente;

d : distância entre as camadas atômicas do cristal;

θ : Ângulo de difração.

A Figura 14 apresenta o lodo passante na peneira #200 (0,075 mm) separado, acondicionado e identificado para ser enviado para a análise, que foi realizada através de um difratômetro no modelo PowderExpert da marca Malvern Panalytical no Laboratório de Microscopia Ótica e Difração de Raios-X do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (DEMIN/UFOP).

Figura 14 - Material preparado para análise



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

4.2.1.2 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) emite um feixe de elétrons que colide com os átomos da amostra, a partir dessas colisões são emitidos sinais com diferentes intensidades para os receptores do microscópio, gerando imagens que detêm informações que variam de acordo com o tipo de análise realizada (SCRIVENER, SNELLINGS e LOTHENBACH, 2016).

A análise do tipo elétrons secundários (SE) está relacionada às colisões inelásticas e é a que gera imagens com melhor resolução, com uma visão clara da topografia da amostra para uma interpretação qualitativa (SCRIVENER, SNELLINGS e LOTHENBACH, 2016). Já a análise do tipo elétrons retroespalhados (BSE) relaciona-se às colisões elásticas e a intensidade dos sinais emitidos varia conforme o tamanho dos átomos, gerando imagens com contraste entre diferentes compostos, sendo possível diferenciá-los e identificá-los (SCRIVENER, SNELLINGS e LOTHENBACH, 2016).

Por fim, a análise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) é a que gera imagens com menor resolução, mas que permitem uma avaliação quantitativa da caracterização química do material, uma vez que as intensidades transmitidas aos receptores correspondem à liberação de energia devido à transição de camada atômica realizada pelos elétrons da amostra (SCRIVENER, SNELLINGS e LOTHENBACH, 2016).

Para a realização bem-sucedida dessas análises, foi necessário que o material passasse por um processo de embutimento, polimento e metalização. Dessa forma, uma porção do material, conforme a Figura 14, foi direcionado ao Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica (LTM) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFOP, que preparou adequadamente as amostras conforme a Figura 15.

Figura 15 - Amostra para realização da MEV



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Só então o material foi submetido à análise por meio de um microscópio do modelo VEGA3 da marca TESCAN, nas instalações do Laboratório Nanolab, no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFOP.

O planejamento desse trabalho previa a execução das três análises supracitadas, no entanto, por problemas no equipamento utilizado, não foi possível realizar a análise do tipo EDS.

4.2.2 Caracterização física

4.2.2.1 Equivalente de areia

A determinação do Equivalente de Areia (EA) seguiu o método de ensaio descrito na DNER-ME 054/97. O EA corresponde à razão entre a altura do nível superior de areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa do material em análise, conforme a Equação 14 (DNER, 1997).

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura do topo da argila}} \times 100 \quad \text{Equação 14}$$

O DNER (1997) determina que o EA deve ser obtido a partir da média aritmética de três ensaios. Na Figura 16 são apresentadas as três provetas utilizadas, em etapas diferentes do processo.

Figura 16 - Equivalente de areia



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

4.2.2.2 Densidade real

A Gnaisse, separada por fração dos grãos na Figura 17, foi o material de referência utilizado no projeto, sendo empregada como fíler e agregado na mistura de referência e como agregado na mistura com lodo. Sua densidade real, como fíler e como agregado, foi adotada conforme Silva (2017).

Figura 17 - Frações de Gnaisse



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

O lodo foi utilizado apenas na fração fíler para a segunda mistura então, conforme a Figura 18, ele passou por peneiramento para obtenção da fração de interesse, ilustrada na Figura 19. Nesse cenário, para determinação da densidade real do lodo de ETA foi aplicada a metodologia apresentada na DNER-ME 085/94.

Figura 18 - Peneiramento do lodo



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

Figura 19 - Lodo no fundo da peneira



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

O DNER (1994) determina que esse ensaio deve ser determinado em duplicata e com uma diferença inferior a $0,009 \text{ g/cm}^3$ entre eles. Nesse trabalho foram realizados três ensaios, a Figura 20 apresenta os frascos Le Chatelier preenchidos com querosene. Já a Figura 21 mostra o lodo sendo despejado dentro de um desses frascos com o auxílio de um funil.

Figura 20 - Frascos Le Chatelier



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Figura 21 - Lodo sendo despejado no frasco de querosene



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

4.3 Corpos de prova de referência

O corpo de prova de referência, com material gnáissico, foi adotado conforme os estudos de Silva (2017) e apresenta o teor de 5,0% de ligante asfáltico, com a composição granulométrica descrita no Quadro 5, determinados a partir do método de dosagem Marshall. A Figura 22 ilustra a preparação dos agregados conforme a granulometria definida.

Dessa forma, a massa de ligante é de 60,5 que corresponde a 5% da massa total do corpo de mistura, conforme detalhado no Quadro 6.

Figura 22 - Preparação dos agregados



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Quadro 5 - Mistura de referência

Peneira de malha quadrada		Passante (%)	Retido (%)	Massa (g)
Série ASTM	Abertura (mm)			
2"	50,8	100,0	0,0	0,0
1 ½"	38,1	100,0	0,0	0,0
1"	25,4	100,0	0,0	0,0
¾"	19,1	100,0	0,0	0,0
½"	12,7	90,0	10,0	115,0
3/8"	9,5	80,0	10,0	115,0
Nº 4	4,8	58,0	22,0	252,9
Nº 10	2,0	36,0	22,0	252,9
Nº 40	0,42	17,0	19,0	218,4
Nº 80	0,18	10,0	7,0	80,5
Nº 200	0,075	6,0	4,0	46,0
Fundo	#	#	6,0	69,0
		Total	100,0	1149,5

Fonte: A autora, baseado em Silva (2017).

Quadro 6 - Massa total da mistura de referência

Massa de agregados	1149,5 g
Massa de ligante (5% do total)	60,5 g
Total	1210,0 g

Fonte: A autora, baseado em Silva (2017).

O ligante utilizado determinou que a temperatura de mistura deveria estar entre 148 e 153°C, já a temperatura de compactação deveria estar compreendida na faixa de 137 a 141°C. Esses procedimentos são apresentados na Figura 23 e na Figura 24, respectivamente. Entre uma etapa e outra a mistura permaneceu na estufa por 2 horas, simulando o envelhecimento do ligante asfáltico.

Figura 23 - Mistura CP de referência



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Figura 24 - Compactação do CP de referência



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

A compactação foi realizada com 75 golpes em cada face do corpo de prova e, após finalizada, o CP com o cilindro utilizado na compactação permaneceu sobre a bancada por pelo menos 12h, para seu resfriamento antes de ser de desmoldado conforme a Figura 25.

Figura 25 - Desmolde do corpo de prova



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Esse processo, que é melhor detalhado na DNIT 178/2018 PRO, foi repetido até a obtenção de 20 corpos de prova que atendessem às especificações da norma DNER-ME 043/95.

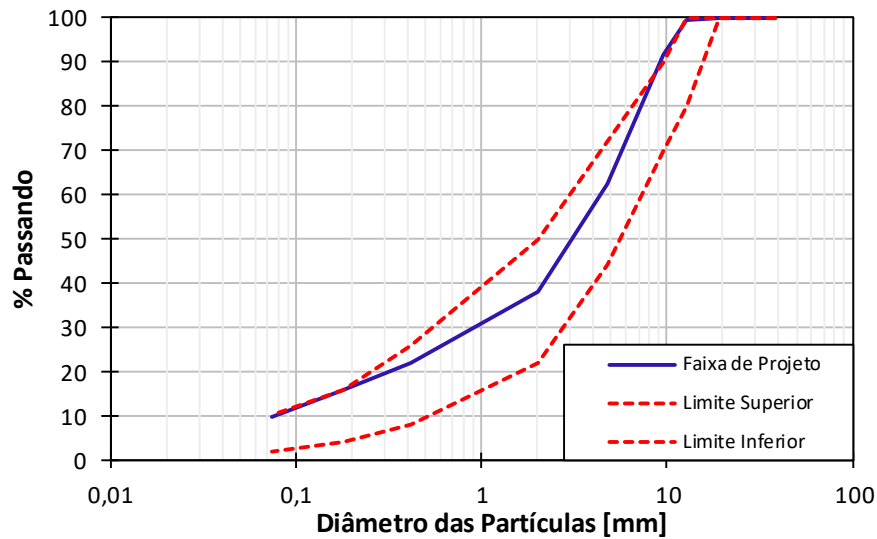
4.4 Corpos de prova com lodo de ETA

Para os CPs com lodo de ETA também aplicou-se a metodologia de dosagem Marshall, com os detalhes e especificações descritos nesse tópico.

4.4.1 Composição granulométrica

Optou-se por utilizar uma composição granulométrica com alto teor de fíler, visando empregar uma grande quantidade do lodo de ETA, ainda dentro da faixa C do DNIT, que é destinada a camadas de rolamento. A Figura 26 apresenta um gráfico com a localização da faixa do projeto dentro dos limites da Faixa C.

Figura 26 - Faixa granulométrica de projeto



Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.2 Teor ótimo de ligante

Para determinação do teor ótimo de ligante, a composição granulométrica descrita anteriormente foi submetida aos procedimentos descritos do item 3.8.1. Os teores de ligante para os cinco grupos de CPs foram adotados conforme a Figura 27.

Figura 27 - Teor ótimo por grupo de CP



Fonte: Elaborado pela autora.

Todos os corpos de prova do esquema da Figura 27 tiveram sua composição granulométrica adaptada para o teor de ligante correspondente e devidamente preparada, conforme a Figura 28.

Figura 28 - Separação da composição granulométrica para 7,0% de ligante asfáltico



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Seguindo os requisitos do ligante asfáltico utilizado, conforme descrito no item 4.3, aqueceu-se os agregados na estufa de forma que as temperaturas de mistura fossem atendidas. A Figura 29 ilustra os agregados já aquecidos passando uma homogeneização antes da incorporação do ligante. Na sequência, adicionou-se a massa de ligante correspondente ao teor especificado, conforme a Figura 30.

Figura 29 - Homogeneização dos agregados



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Figura 30 - Adição do ligante



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Após adicionado, incorporou-se o ligante nos agregados misturando-os por cerca de 3 minutos, conforme a Figura 31, resultando em uma mistura homogênea, conforme exemplificado na Figura 32.

Figura 31 - Incorporação do ligante



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Figura 32 - Mistura homogênea



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

As misturas homogêneas permaneceram na estufa por duas horas simulando o envelhecimento do ligante asfáltico antes de serem compactadas com 75 golpes em cada face

do CP. Após cerca de 12h em repouso para resfriamento, eles foram desmoldados. A Figura 38 apresenta os corpos de prova moldados nessa etapa.

Figura 33 - Grupos de CPs com diferentes teores de ligante asfáltico



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Na sequência, tomou-se as médias de altura e diâmetro dos CPs, verificando se atendiam aos limites estabelecidos pela DNER-ME 043/95, para obtenção dos parâmetros volumétricos.

Primeiramente determinou-se densidade relativa aparente do corpo de prova, conforme a DNIT 428/2022 – ME, admitindo-se que o volume de vazios do CP era inferior a 10% e que a absorção de água era menor ou igual a 10%. A Figura 34 demonstra o sistema montado para uma das etapas desse processo, no qual é possível obter a massa submersa do CP.

Figura 34 - Esquema para obtenção da massa submersa do CP



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Com isso, calculou-se os parâmetros de RBV e V_v e, com o auxílio de um gráfico como exemplificado na Figura 10, determinou-se o teor ótimo de ligante asfáltico.

4.4.3 Corpos de prova para avaliação

Com o teor de ligante determinado, ajustou-se as massas de cada fração granulométrica, obtendo-se a mistura de projeto objeto desse trabalho. Seguindo essa mistura, confeccionou-se outros 20 corpos de prova seguindo os processos já descritos para preparação da composição granulométrica, aquecimento, mistura, envelhecimento, compactação e desmolde.

4.5 Avaliação de desempenho

Para avaliar a aplicabilidade do lodo em misturas asfálticas a quente, foram realizados os ensaios descritos nesse item tanto para a mistura de referência quanto para a mistura com o lodo, para fins comparativos.

4.5.1 Estabilidade e Fluência

De acordo com o DNER (1995), a Estabilidade Marshall pode ser definida como a resistência máxima apresentada pelo corpo de prova quando submetido à compressão radial, expressa em N, enquanto a Fluência é a deformação total apresentada durante a aplicação desse carregamento, expressa em décímetros de milímetros.

Para realização desses ensaios, preparou-se os três corpos de prova de cada mistura, anotando suas dimensões de altura e deixando-os em banho-maria a 60°C por cerca de 35 minutos, conforme a Figura 35. Na sequência, colocou-se um corpo de prova por vez no molde de compressão, como pode ser visto na Figura 36.

Figura 35 - CPs em banho-maria



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Figura 36 - CP no molde de compressão



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Após a obtenção da estabilidade medida pelo equipamento, aplicou-se um fator de correção cujo cálculo é descrito pela Equação 15.

$$f = 927,23h^{-1,64} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

f : fator de correção;

h : altura do corpo de prova [cm].

Por fim, para obtenção do parâmetro de Fluência, utilizou-se de um medidor de fluência no início e no fim do processo, conforme a Figura 37A e a Figura 37B.

Figura 37 - Medidor de fluência (A) no início do ensaio (B) no final do ensaio



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

A Figura 38 apresenta dos CPs após a realização do ensaio. Obteve-se os parâmetros a partir da média aritmética de três ensaios. Mais detalhes da metodologia empregada nesse item podem ser consultados na norma DNER-ME 043/95.

Figura 38 - CPs após realização do ensaio de Estabilidade e Fluência



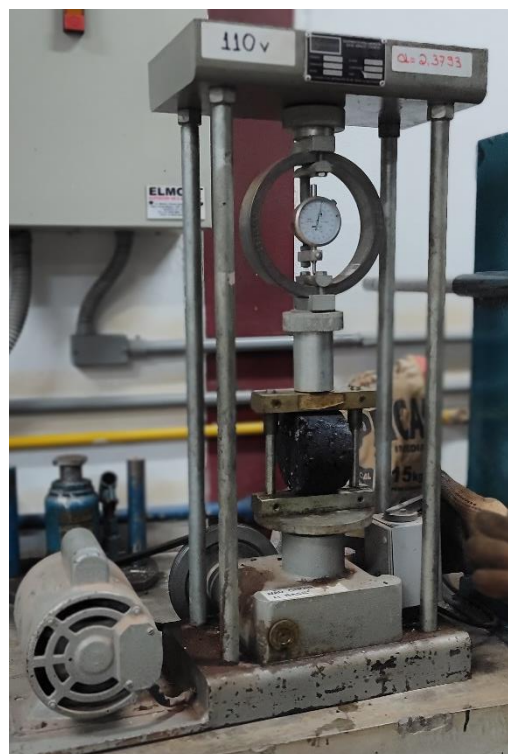
Fonte: Arquivo pessoal (2023).

4.5.2 Tração

Para determinar a resistência à tração das misturas, preparou-se três corpos de prova de cada uma delas, medindo suas dimensões de altura e diâmetro, deixando-os em temperatura controlada de 25°C, através do Sistema de Controle e Aquisição de dados para Ensaio de Pavimentos em laboratório (SiCAEP), por cerca de 4 horas.

Na sequência, colocou-se um corpo de prova por vez em um dispositivo centralizador, conforme ilustrado pela Figura 39. Aplicou-se, então, uma carga de compressão progressiva até a ruptura do corpo de prova, anotando-se a carga correspondente.

Figura 39 - Ensaio de resistência à tração



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Com isso, calculou-se a resistência à tração conforme descrito pela Equação 16.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi \times D \times H} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

σ_R : resistência à tração [MPa];

F : carga de ruptura [N];

D : diâmetro do corpo de prova [mm];

H : altura do corpo de prova [mm].

Determinou-se o resultado correspondente a cada mistura a partir da média aritmética de três ensaios. A Figura 40 ilustra um CP após um desses ensaios e mais detalhes do procedimento podem ser obtidos na norma DNIT 136/2018 ME.

Figura 40 - CP após ensaio de resistência à tração



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

4.5.3 Módulo de resiliência

De acordo com o DNIT (2018a), Módulo de Resiliência é a relação entre a tensão de tração e a deformação de tração geradas durante a aplicação de uma compressão diametral no corpo de prova sob carga repetida.

Determinou-se o Módulo de Resiliência da mistura asfáltica de referência e da mistura com o lodo de forma automatizada através do sistema SiCAEP. Dessa forma, preparou-se três corpos de prova de cada mistura, deixando-os por 4h sob temperatura controlada de 25°C, por meio do sistema.

Na sequência, posicionou-se um corpo de prova por vez no suporte dos sensores LVDT, conforme a Figura 41.

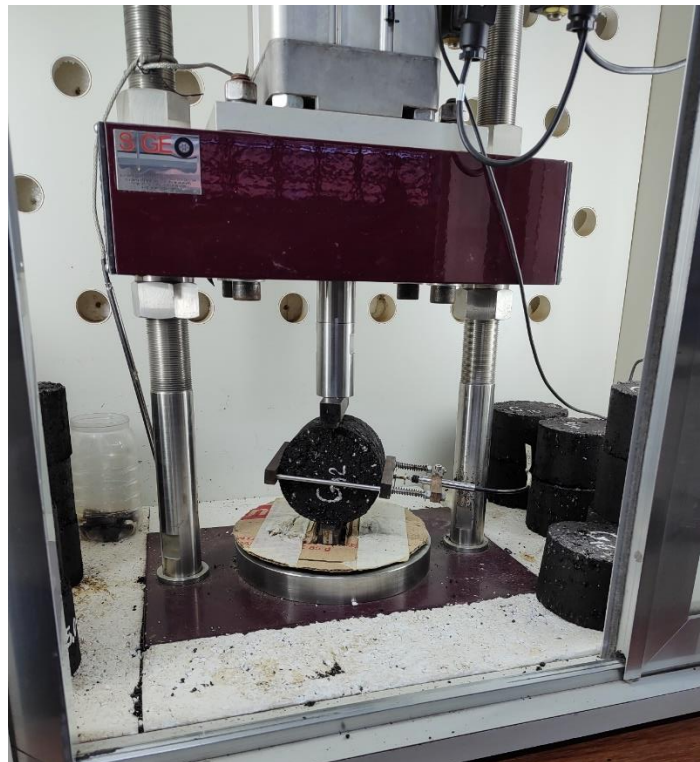
Figura 41 - Preparação do CP para determinação do Módulo de Resiliência



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Com o CP devidamente posicionado, preparou-se o SiCAEP para o início do ensaio, posicionando o CP na suporte do SiCAEP, ajustando os sensores e o software que opera equipamento, conforme a Figura 42.

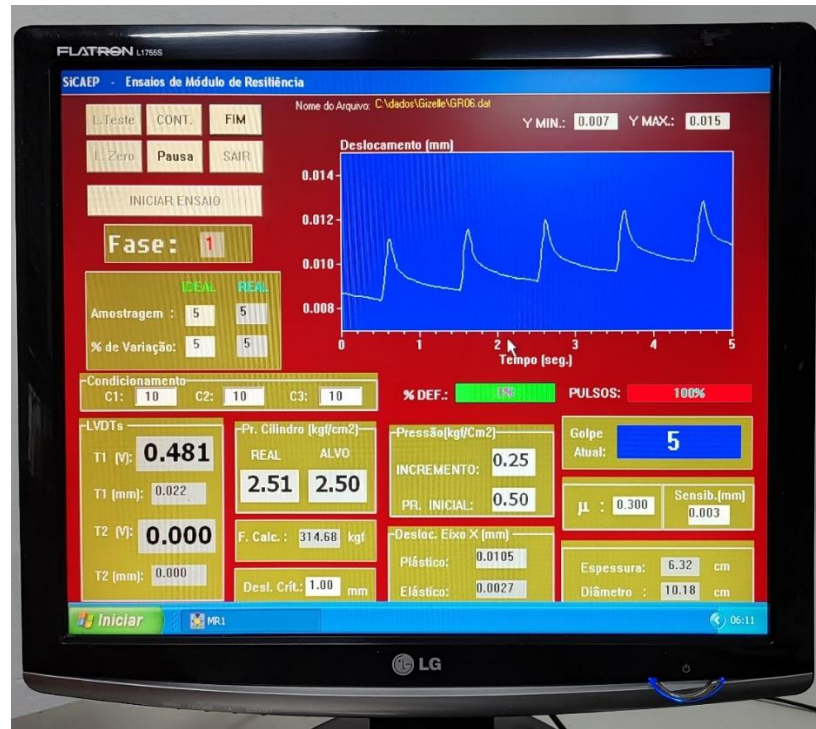
Figura 42 - Amostra posicionada no SiCAEP



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Já a Figura 43 ilustra a interface do software durante a realização do ensaio. Ao término, extraiu-se os relatórios com os dados registrados. Para mais detalhes do procedimento a norma DNIT 135/2018 ME pode ser consultada.

Figura 43 - Interface SiCAEP



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

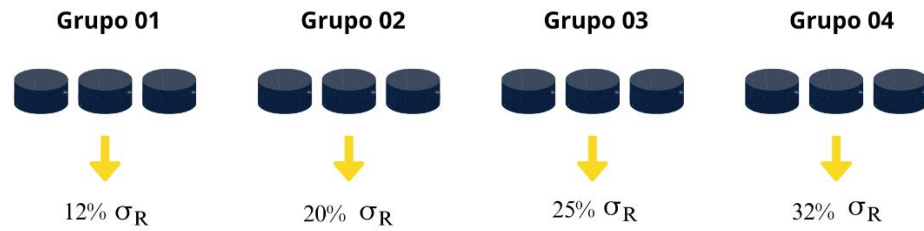
4.5.4 Fadiga

A resistência à Fadiga está relacionada a um carregamento cíclico. Conforme o DNIT (2018b), esse parâmetro é definido em um ensaio que submete o corpo de prova a um carregamento repetido, à tensão constante, com compressão diametral de tração indireta.

Determinou-se a resistência à Fadiga da mistura asfáltica de referência e da mistura com o lodo de forma automatizada através do sistema SiCAEP. Dessa forma, preparou-se doze corpos de prova de cada mistura, deixando-os por 4h sob temperatura controlada de 25°C, por meio do sistema supracitado.

Definiu-se os níveis de tensão de tração induzida do ensaio em função da resistência à tração (σ_R) encontrada para cada mistura. O esquema da Figura 44 ilustra as proporções adotadas em cada trio de CPs.

Figura 44 - Tensões de tração induzidas no ensaio



Fonte: Elaborado pela autora.

Adotou-se o valor de 160.000 golpes como critério de interrupção do ensaio, caso o CP não rompesse. A Figura 45 apresenta dois CPs rompidos após a conclusão do ensaio.

Figura 45 - CPs rompidos no ensaio de Fadiga



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Ao final da campanha, recolheu-se todos os dados armazenados pelo SiCAEP para confecção dos gráficos e análise dos resultados. Mais detalhes do procedimento adotado podem ser consultados na norma DNIT 183/2018 ME.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização

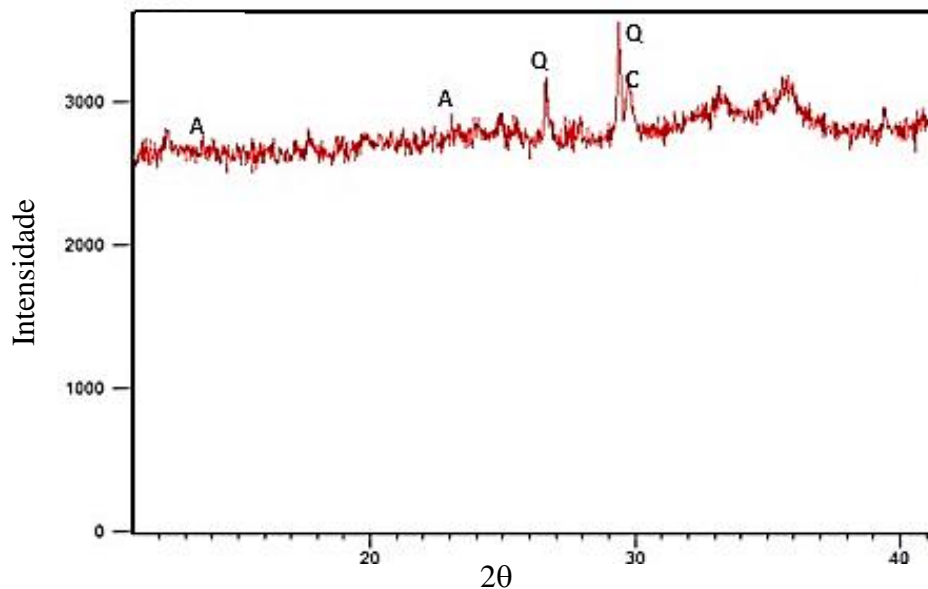
5.1.1 Caracterização química

5.1.1.1 Difração de raios-x

A Figura 46 apresenta o resultado encontrado no ensaio de DRX realizado na amostra de lodo de ETA. O difratograma da referida figura apresenta muito ruídos, provavelmente devido ao fato de o equipamento utilizado não ser o mais indicado para amostras com alto teor de ferro, como pode ser o caso da amostra recolhida dentro da região do quadrilátero ferrífero.

Apesar disso, é possível identificar que há a predominância de quartzo, calcita e Alumina.

Figura 46 - Difratograma do lodo, no qual: Q é Quartzo, C é Calcita e A é Alumina.

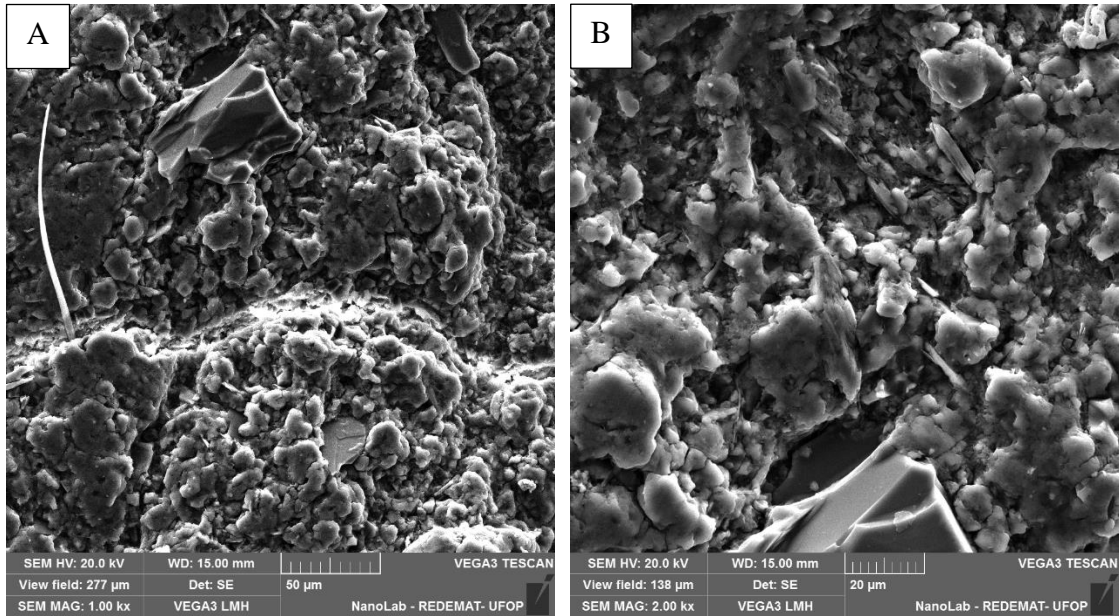


Fonte: Laboratório de Microscopia Ótica e Difração de Raios-X – DEMIN/UFOP (2023).

5.1.1.2 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 47A e a Figura 47B apresentam a análise do tipo elétrons secundários, destacando a topografia microestrutural do lodo, sendo possível aferir que o material é composto por partículas menores concrecionadas.

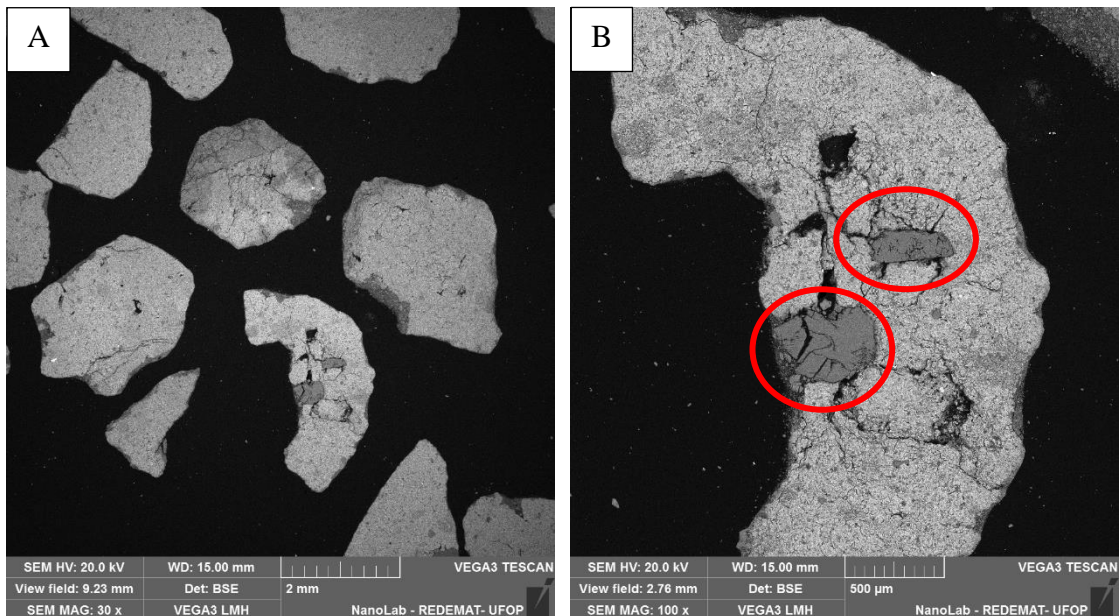
Figura 47 - MEV SE (A) 1.00 kx; (B) 2.00 kx



Fonte: NanoLab – UFOP (2023).

Já a Figura 48A e a Figura 48B apresentam a análise do tipo elétrons retroespalhados. O material destacado na Figura 48B apresenta características compatíveis com o óxido de cálcio, uma vez que sua expansão pode ter sido a causa das fissuras observadas no material que se encontra ao seu redor.

Figura 48 - MEV BSE (A) 30 x; (B) 100 x

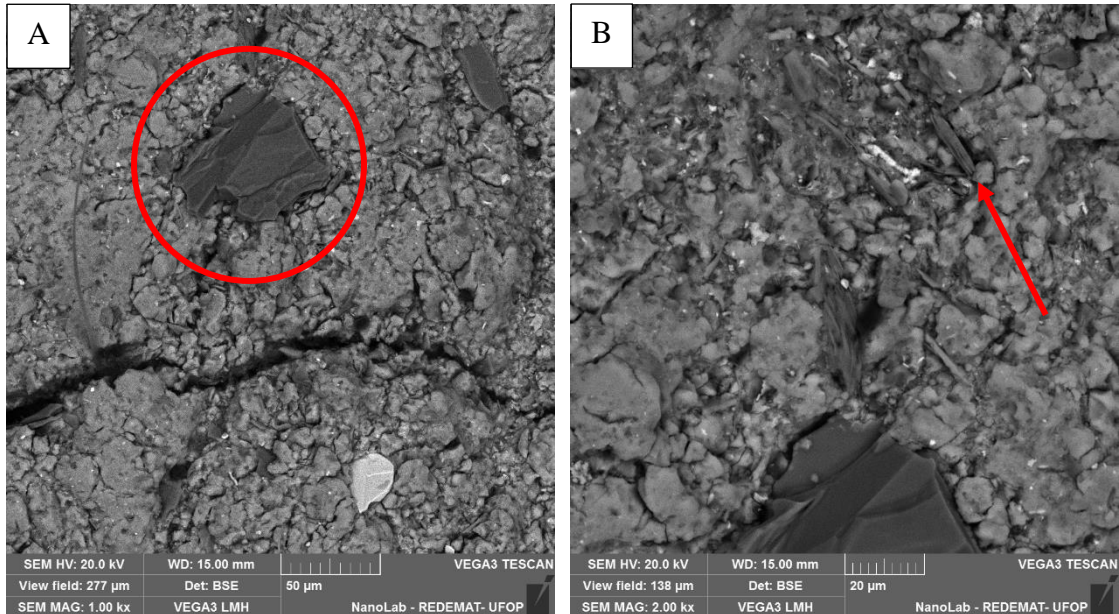


Fonte: NanoLab – UFOP (2023).

A Figura 49A e a Figura 49B também apresentam a análise do tipo elétrons retroespalhados. Neste caso, o material em destaque na Figura 49A apresenta características

compatíveis com o Quartzo, enquanto o formato do material destacado na Figura 49B é um indicativo de que se trate de Calcita.

Figura 49 - MEV BSE (A) 1.00 kx; (B) 2.00 kx



Fonte: NanoLab – UFOP (2023).

5.1.2 Caracterização física

5.1.2.1 Equivalente de areia

O equivalente de areia encontrado para o lodo de ETA foi de 59%. O parâmetro atende aos requisitos descritos na norma de especificação de serviço de Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico, Norma DNIT 031/2006 - ES, uma vez que para aplicação como agregado miúdo, o material deve apresentar EA igual ou superior a 55%.

5.1.2.2 Densidade real

O lodo apresentou uma densidade real de 2,783g/cm³. Esse valor foi empregado no cálculo da DMT das misturas asfálticas utilizadas para a determinação do teor ótimo de ligante asfáltico.

5.2 Corpos de prova com lodo de ETA

5.2.1.1 Composição granulométrica

A composição granulométrica da mistura com lodo de ETA foi adaptada conforme o teor de ligante ótimo determinado, que é detalhadamente apresentado no item 5.2.1.2. O Quadro 7 apresenta as massas adotadas na composição final.

Quadro 7 - Mistura com lodo de ETA

Peneira de malha quadrada		Passante (%)	Retido (%)	Massa (g)
Série ASTM	Abertura (mm)			
2"	50,8	100,0	0,0	0,0
1 ½"	38,1	100,0	0,0	0,0
1"	25,4	100,0	0,0	0,0
¾"	19,1	100,0	0,0	0,0
½"	12,7	99,5	0,5	5,6
3/8"	9,5	91,8	7,7	89,6
Nº 4	4,8	62,3	29,5	343,0
Nº 10	2,0	38,1	24,2	280,5
Nº 40	0,42	22,1	16,0	185,4
Nº 80	0,18	15,7	6,5	75,0
Nº 200	0,075	9,7	6,0	69,2
Fundo	#	#	9,7	112,9
		Total	100,0	1161,3

Fonte: A autora.

5.2.1.2 Teor ótimo de ligante

Os parâmetros de RBV e V_v médios, calculados a partir dos corpos de prova com diferentes teores de ligante, são apresentados na Tabela 10.

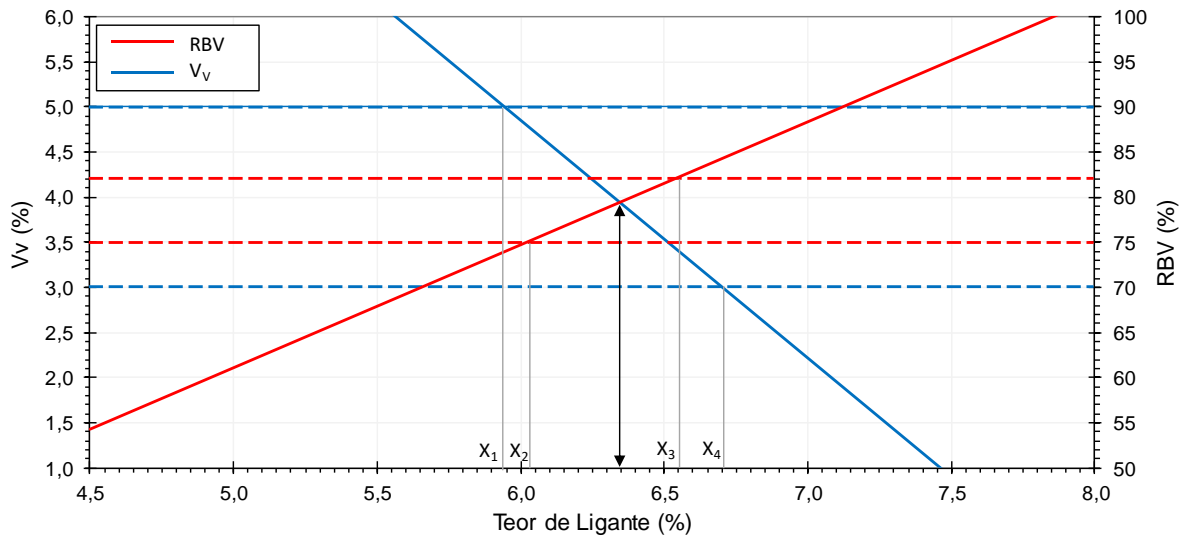
Tabela 10 - Parâmetros RBV e V_v

Teor de ligante (%)	RBV	V_v
5,5	65,72	6,68
6,0	74,90	4,73
6,5	82,06	3,37
7,0	91,89	1,48
7,5	95,92	0,77

Fonte: A autora.

A partir dos valores definidos, obteve-se o gráfico da Figura 50, a partir do qual foi possível obter os valores de X_1 , X_2 , X_3 e X_4 . Com isso, o teor ótimo de ligante foi determinado como 6,35% que corresponde à média aritmética entre X_2 e X_3 .

Figura 50 - Teor ótimo de ligante asfáltico



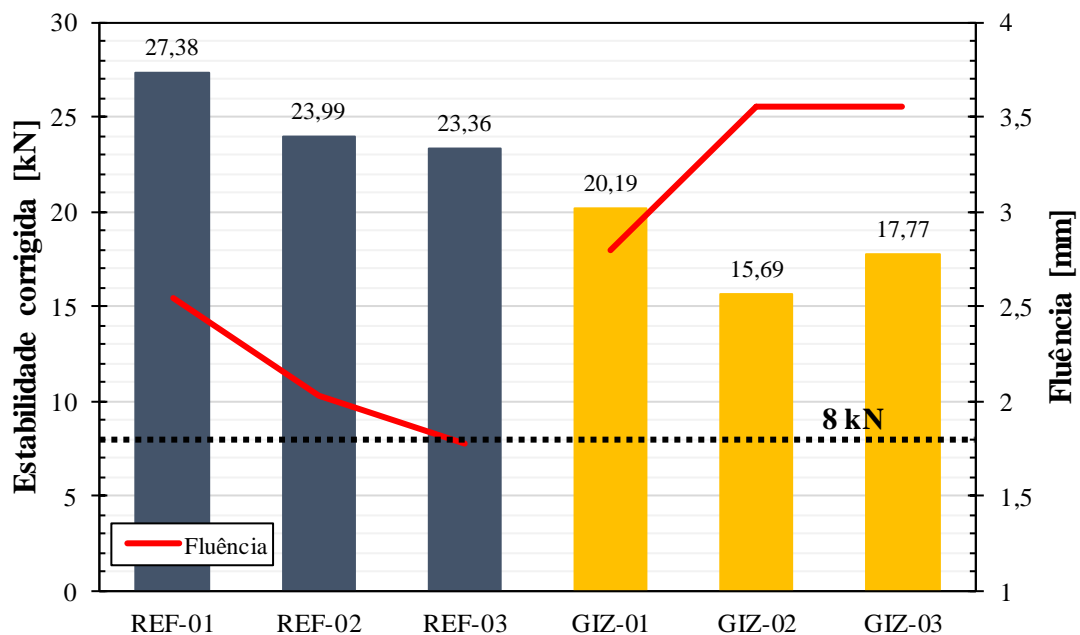
Fonte: A autora.

5.3 Avaliação de desempenho

5.3.1.1 Estabilidade e fluência

Na Figura 51 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de Estabilidade e Fluência a 60°C para os corpos de prova das duas misturas analisadas. Os CPs “REF” são os da mistura de referência, enquanto os CPs “GIZ” correspondem à mistura com lodo de ETA.

Figura 51 - Estabilidade e Fluência a 60°C



Fonte: A autora.

Dessa forma, é possível realizar uma comparação entre os valores médios obtidos, os requisitos apresentados na Norma DNIT 031/2006 – ES e os requisitos da especificação técnica

de Concreto Asfáltico – Pavimento Asfáltico do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP), a ET-DE-P00/027. Essa comparação é apresentada na Tabela 11, a partir da qual é possível verificar que ambas as misturas atendem aos limites estabelecidos.

Tabela 11 - Avaliação dos valores médios de Estabilidade e Fluência a 60°C

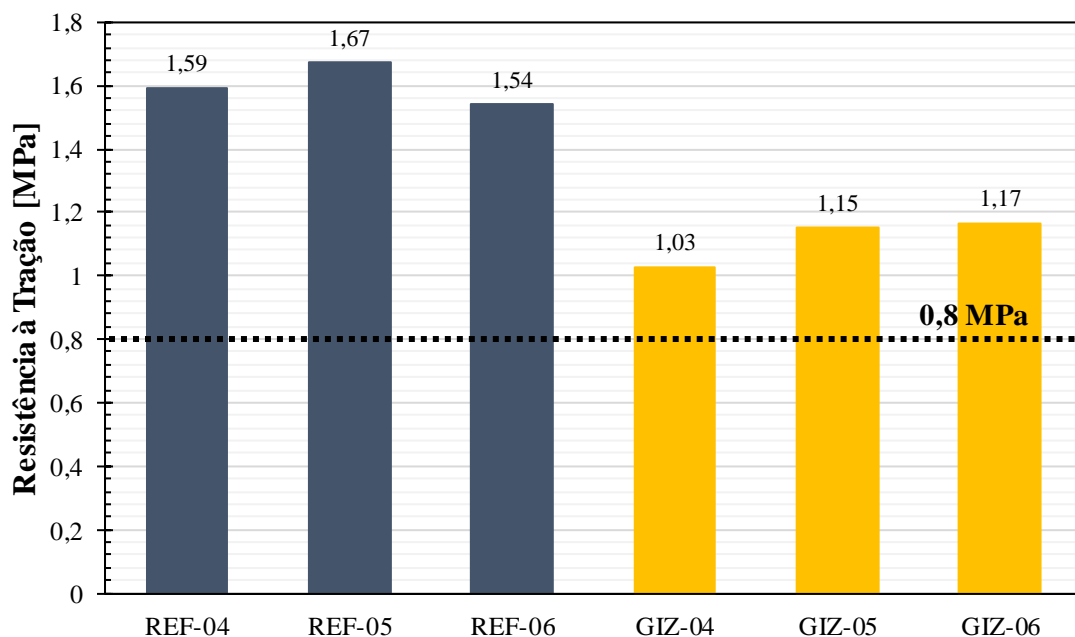
Identificação	Estabilidade (kN)	Desvio padrão	Fluência (mm)	Desvio padrão
REF	24,91	2,16	2,12	0,39
GIZ	17,88	2,25	3,30	0,44
DNIT 031/2006 - ES	≥ 5,00	-	-	-
ET-DE-P00/027	≥ 8,00	-	2,00 a 4,00	-

Fonte: A autora.

5.3.1.2 Tração

Para o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral Estática a 25°C foram encontrados os resultados apresentados na Figura 52.

Figura 52 - Resistência à Tração a 25°C



Fonte: A autora.

A partir da comparação dos valores médios obtidos com a resistência mínima requerida, conforme apresentado da Norma DNIT 031/2006 – ES e na ET-DE-P00/027, na Tabela 12, é possível constatar que, quanto à resistência à tração, ambas as misturas também atendem aos requisitos para aplicação em camadas de rolamento.

Tabela 12 - Avaliação dos valores médios de Resistência à Tração a 25°C

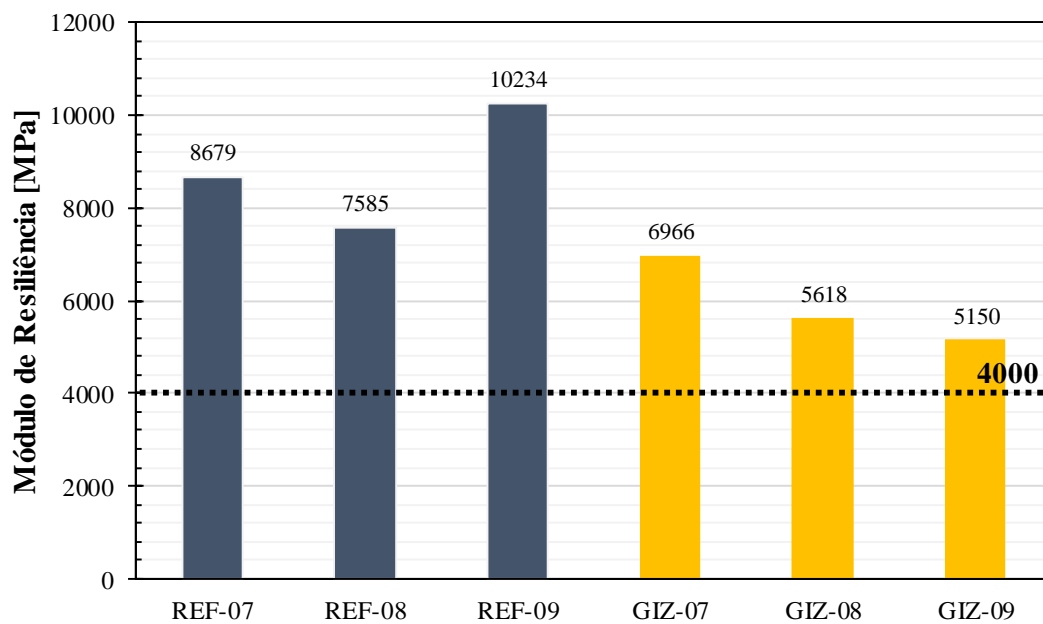
Identificação	Resistência à Tração (MPa)	Desvio Padrão
REF	1,60	0,07
GIZ	1,12	0,08
DNIT 031/2006 - ES	$\geq 0,65$	-
ET-DE-P00/027	$\geq 0,80$	-

Fonte: A autora.

5.3.1.3 Módulo de resiliência

A Figura 53 apresenta os resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência para as duas misturas. Comparativamente, os resultados para a mistura do lodo apresentam valores inferiores aos da mistura de referência.

Figura 53 - Módulo de Resiliência



Fonte: A autora.

Definindo o MR médio de cada mistura, bem como o desvio padrão, estão apresentados na Tabela 13, comparado ao valor de referência apresentado por Medina e Motta (2015) para o CAUQ 50-60.

Tabela 13 - Avaliação do Módulo de Resiliência a 25°C

Identificação	MR (MPa)	Desvio Padrão
REF	8833	1331
GIZ	5911	942
Medina e Motta (2015)	4000	-

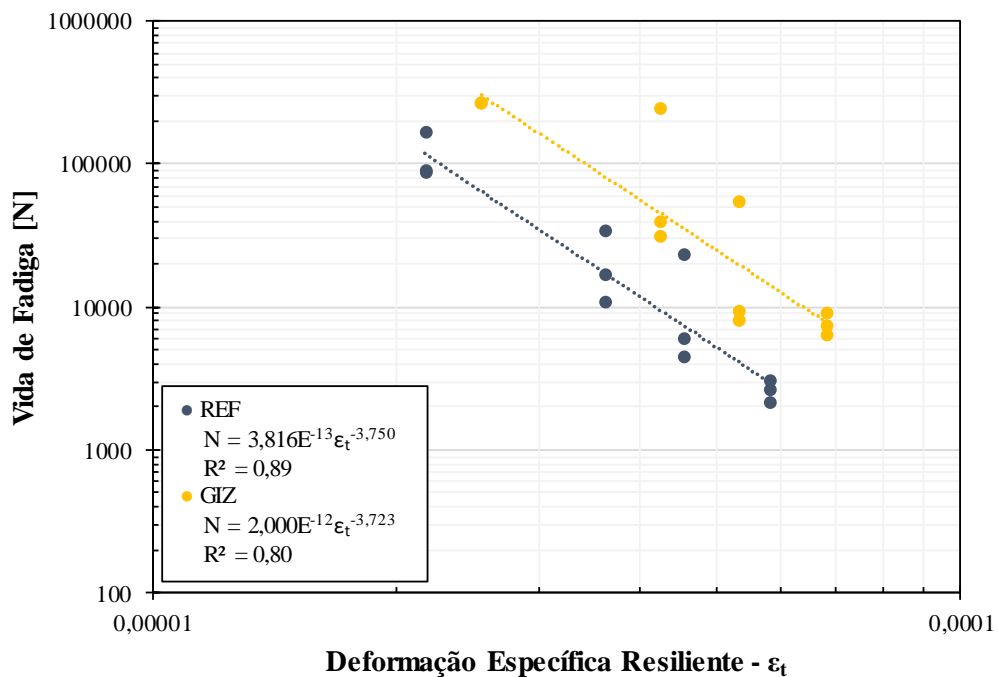
Fonte: A autora.

5.3.1.4 Fadiga

O gráfico da Figura 54 apresenta a Número de Fadiga em função da Deformação Específica Resiliente para as duas misturas analisadas. Em ambos os casos o coeficiente de determinação R^2 atingiu o mínimo de 0,80 estabelecido pela norma.

Comparativamente, é possível observar que a mistura com o lodo de ETA apresentou uma tendência de maior vida de fadiga e maiores deformações em relação à mistura de referência.

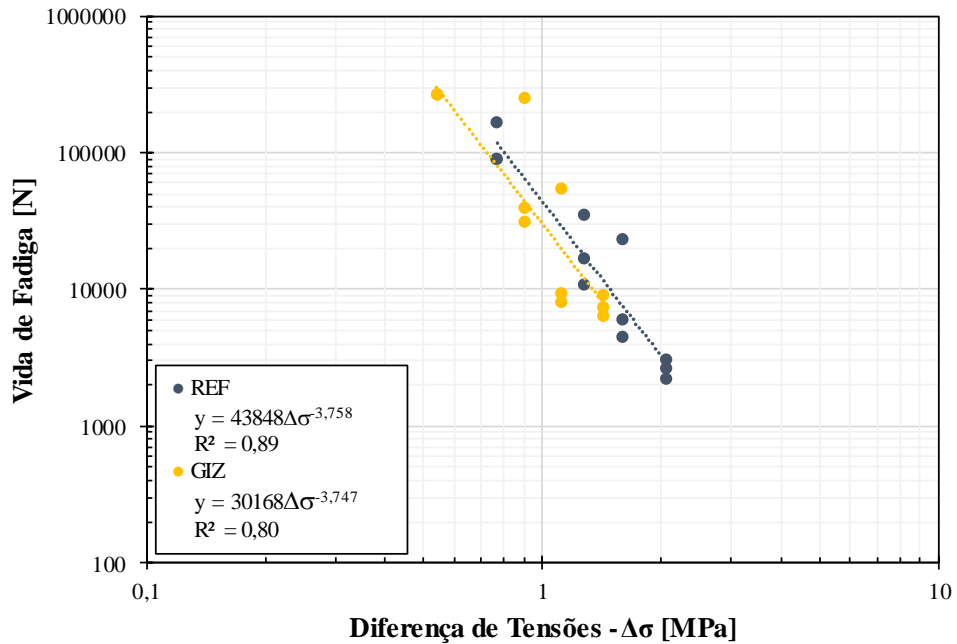
Figura 54 - Vida de Fadiga x Deformação Específica Resiliente



Fonte: A autora.

Já a Figura 55 apresenta a Número de Fadiga em função da Diferença de Tensões para as duas misturas analisadas. É possível verificar que, nesse caso, a mistura de referência apresenta as maiores diferenças entre as tensões verticais e horizontais nos corpos de prova.

Figura 55 - Vida de Fadiga x Diferença de Tensões



Fonte: A autora.

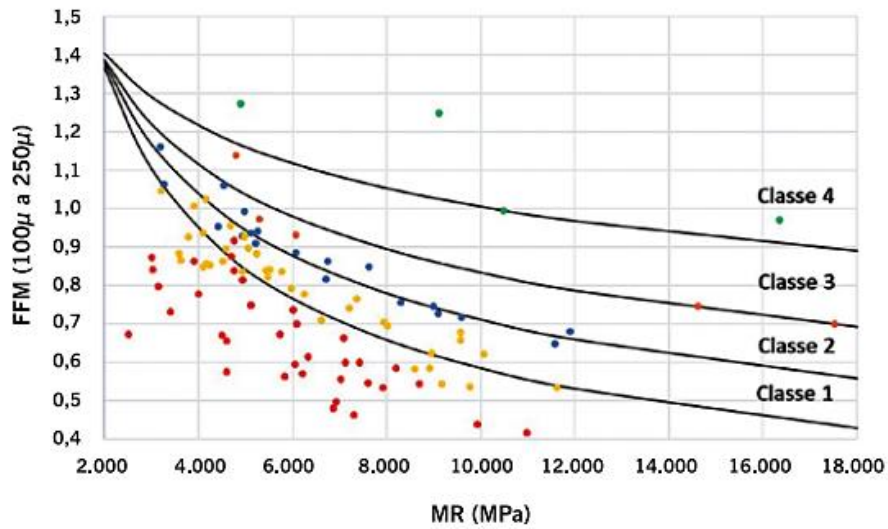
5.3.1.5 Classificação das misturas

Aplicando as misturas, com seus respectivos MR e parâmetros de fadiga, no MeDiNa foi possível realizar a classificação dos revestimentos analisados quanto à fadiga.

Numa escala de 1 a 4, em que 1 é a menos resistente e 4 a mais resistente, a mistura de referência enquadra-se na Classe 1, enquanto a mistura com lodo de ETA enquadra-se na Classe 3. Nesse cenário, a mistura com lodo de ETA apresenta resultados muito promissores para a performance do pavimento quanto aos esforços de tração.

Em uma análise que considerou 105 misturas asfálticas densas, com diferentes tipos e tamanhos de agregados, utilizando diferentes ligantes asfálticos, observa-se que poucas misturas se enquadraram em uma classe superior a 2, conforme a Figura 56 (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2022).

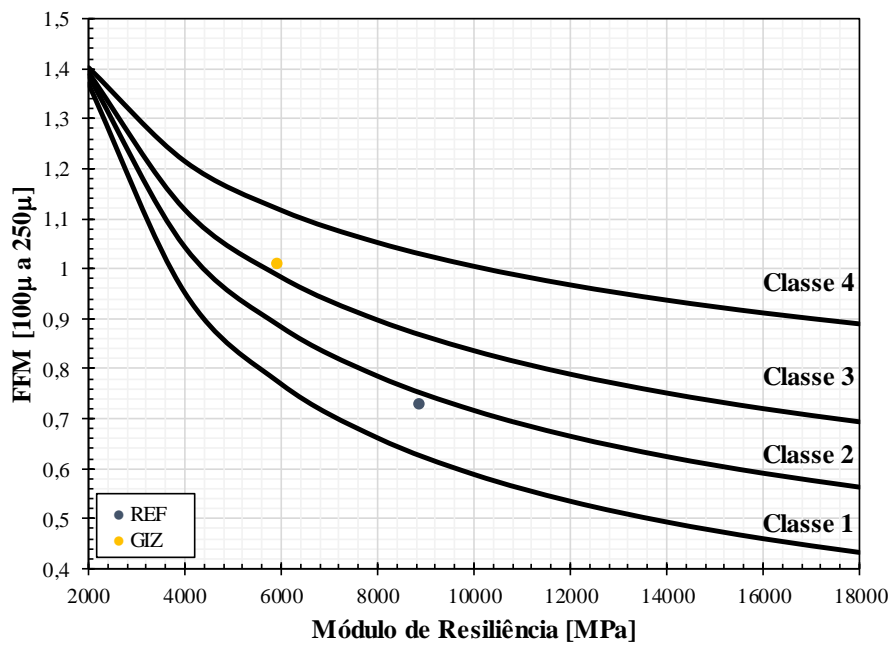
Figura 56 - Classes de Fadiga



Fonte: Fritzen *et al.* (2019) *apud* Bernucci, Motta, *et al.* (2022).

A Figura 57 ilustra graficamente a classificação das misturas analisadas no presente estudo.

Figura 57 - Classe de Fadiga das amostras REF e GIZ



Fonte: A autora baseada em Bernucci, Motta, *et al.* (2022).

6 CONCLUSÃO

Tendo em vista o objetivo de avaliar a aplicabilidade do lodo de ETA como fíler em misturas asfálticas, foram realizados ensaios de caracterização e a avaliação de desempenho da mistura proposta com lodo de ETA em relação a uma mistura convencional de referência.

A partir dos resultados desses ensaios foi possível obter algumas conclusões.

- O lodo é composto principalmente por quartzo, alumina e calcita. Sua microestrutura é obtida a partir de partículas menores concrecionadas;
- O equivalente de areia encontrado permite sua aplicação como agregado miúdo em misturas asfálticas a quente;
- O teor ótimo de ligante para a mistura asfáltica com lodo é relativamente alto, no cenário de estudo no qual se aplicou o máximo possível de fração fina para uma granulometria na Faixa C do DNIT;
- Os ensaios mecânicos realizados apresentaram resultados bastante promissores, quando comparados aos da mistura de referência e com os requisitos mínimos estabelecidos pelo DNIT. Com destaque para a Classe de Fadiga, na qual a mistura com lodo apresentou desempenho bem superior à de referência;
- De modo geral, os resultados se mostraram bastante promissores para a aplicação do lodo de ETA em misturas asfálticas a quente.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para que se obtenha uma análise mais precisa acerca da viabilidade de aplicação do lodo de ETA em misturas asfálticas a quente, pontua-se alguns aspectos que podem guiar trabalhos futuros na área:

- Realizar a análise química do lodo, por meio de ensaios como Fluorescência de Raios-X e MEV EDS, para validar a presença dos compostos previstos pelo DRX e pelo MEV BSE e investigar, a nível químico, as características apresentadas pela mistura com lodo de ETA;
- Realizar a análise ambiental e bioquímica do lodo, para avaliar os possíveis impactos da sua aplicação em camadas de revestimento de pavimentação;
- Verificar alternativas que reduzam o teor ótimo de ligante asfáltico, como a redução de finos na mistura ou a adição parcial do lodo como fíler, uma vez que esse trabalho se propôs a utilizar a maior quantidade possível do lodo, para tornar a proposta mais atraente economicamente;

- Avaliar o desempenho da mistura proposta através de um trecho experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR 12216**. Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT. 1992.
- ABNT. **NBR 10004**. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT. 2004.
- ALVES, H. C. **Análise laboratorial de lodos desidratados de estações de tratamento de água da região metropolitana de Belo Horizonte – MG para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 112. 2019.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Gráfica Imprinta, 2022. p. 504.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2ª. ed.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, p. 139. 1988.
- BRASIL. LEI Nº 11.445, DE 5 DE JANEIRO DE 2007. **Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico, 2007**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em: 15 out. 2022.
- BRASIL. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**, Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 08 out. 2022.
- CAMPELO, N. D. S.; SILVA, J. F. A. D.; ANDADE, J. B. L. D. Use of Wastewater Treatment Sludge (WTS) as Filler in Hot-Mixed Asphalt Concrete. **International Journal of Waste Resources**, v. 10, n. 379, Junho 2020. ISSN 2252-5211.
- CNT. **Anuário CNT do transporte: estatísticas consolidadas**. Brasília, p. 23. 2022a.
- CNT. **Pesquisa CNT de rodovias**. Brasília, p. 229. 2022b.
- CNT. **Boletins Técnicos CNT**. Brasília, p. 33. 2023.
- COELHO, J. G. M.; SOUSA, J. G. M.; DIAS, C. G. B. T. Estrada ecoeficiente: aplicação de asfalto com adição de composto madeira/borracha na região Norte do Brasil. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 24, n. 3, p. 121-142, 11 out. 2021. ISSN 1516-6481 / 2179-7536.
- CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: RiMa, 2001. p. 282.
- DELGADO, J. V. C. **Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 132. 2016.
- DER-SP. **ET-DE-P00/027**. Especificação técnica: concreto asfáltico. São Paulo: DER. 2005. p. 45.

- DNER. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro, p. 34. 1981.
- DNER. **DNER-ME 085/94**. Norma técnica: material finamente pulverizado - determinação da massa específica real. Rio de Janeiro: IPR. 1994. p. 4.
- DNER. **DNER-ME 043/95**. Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Rio de Janeiro: IPR. 1995. p. 11.
- DNER. **DNER-ME 054/97**. Norma rodoviária: Equivalente de areia. Rio de Janeiro: IPR. 1997. p. 10.
- DNER. **Glossário de termos técnicos rodoviários**. Rio de Janeiro, p. 296. 1997.
- DNIT. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, p. 274. 2006a.
- DNIT. **DNIT 031/2006**. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR. 2006b. p. 14.
- DNIT. **DNIT 136/2018-ME**. Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR. 2018. p. 9.
- DNIT. **DNIT 135/2018 - ME**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Brasília: IPR. 2018a. p. 13.
- DNIT. **DNIT 183/2018 - ME**. Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Brasília: IPR. 2018b. p. 15.
- DNIT. **DNIT 427/2020 - ME**. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio. Brasília: IPR. 2020. p. 9.
- DNIT. **DNIT 428/2022 – ME**. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio. Brasília: IPR. 2022. p. 14.
- DNIT. Coletânea de Normas. **Ministério da Infraestrutura**, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas>>. Acesso em: 19 jul. 2023.
- FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional**. Convênio UFRJ/DNIT. Rio de Janeiro, p. 78. 2020. (TED n° 682/2014).
- HASAN, M. et al. Utilization of sludge from water treatment plant as a filler material. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 24, Setembro 2022. ISSN 1611-8227.
- IAS. Como a água é tratada? **Instituto Água Sustentável**, 2020. Disponível em: <www.aguasustentavel.org.br>. Acesso em: 8 Julho 2023.
- IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico - 2017**. Rio de Janeiro, p. 124. 2020.
- LIMA, C. E. D. et al. Concreto asfáltico a quente dosado com resíduos de construção e demolição (RCD) aplicado em pavimento flexível. **Holos**, v. 1, n. 37, p. 1-18, 2021.

- LUCENA, L. C. F. L. **Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e subbase de pavimentos**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 263. 2012.
- MARTÍNEZ, J. G. B. **Avaliação de desempenho de Misturas Betuminosas com adição de lodos de ETA e de ETE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília. Brasília, p. 97. 2014.
- MEDINA, J. D.; MOTTA, L. M. G. D. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.
- MINE, J. H. et al. **Reaproveitamento de lodos de saneamento de ETA, fossa e tanque séptico como matéria-prima na construção civil: uma revisão**. São Paulo, p. 1-8. 2018.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. PORTARIA Nº 2.914, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.**, 2011. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em: 15 out. 2022.
- REDAÇÃO PENSAMENTO VERDE. Meio Ambiente. **Pensamento Verde**, 2013. Disponível em: <<https://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/perigo-esgotamento-recursos-naturais-planeta/>>. Acesso em: 01 ago. 2023.
- RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher. 2009. p. 340.
- SÁ, E. A. **Mistura Asfáltica com Utilização de Agregados Alternativos**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 71. 2018.
- SANTOS, G. Z. B.; FILHO, J. A. M.; MANZATO, L. Proposta de uma cerâmica obtida por meio de geopolimerização de lodo de ETA calcinado. **Cerâmica**, São Paulo, n. 64, p. 276-283, 2018.
- SANTOS, S. S. A. **Caracterização e utilização de resíduo sólido: lodo de ETA, como matéria prima para confecção de elementos da construção civil**. Dissertação (Mestrado em Química Analítica). Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 86. 2011.
- SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. 1ª. ed.
- SILVA, A. M. S.; BARBOZA, E. N.; SILVA, M. F. C. Uso alternativo de lodo de estação de tratamento de água em pavimentação: uma revisão. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 7, p. 1-18, 2020.
- SILVA, G. M. S. **Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Constituídas de Rejeito de Quartzito Foliado e Asfalto Borracha para uso em Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 71. 2022.
- SILVA, J. F. A. **Comportamento de concreto asfáltico tendo lodo da ETA da cidade de Manaus como filer**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Amazonas. Manaus, p. 161. 2008.

SILVA, L. S. et al. Utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus na composição de asfalto. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**, Boa Vista, v. 4, n. 7, p. 1-13, 2018. ISSN 2447-7028.

SILVA, M. G. B. **Utilização de Rejeito de Barragem de Minério de Ferro e de Resíduo de Quartzito Foliado como Matérias Primas para Construção de Superestrutura Rodoviária**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 52. 2022.

SILVA, R. G. O. **Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 205. 2017.

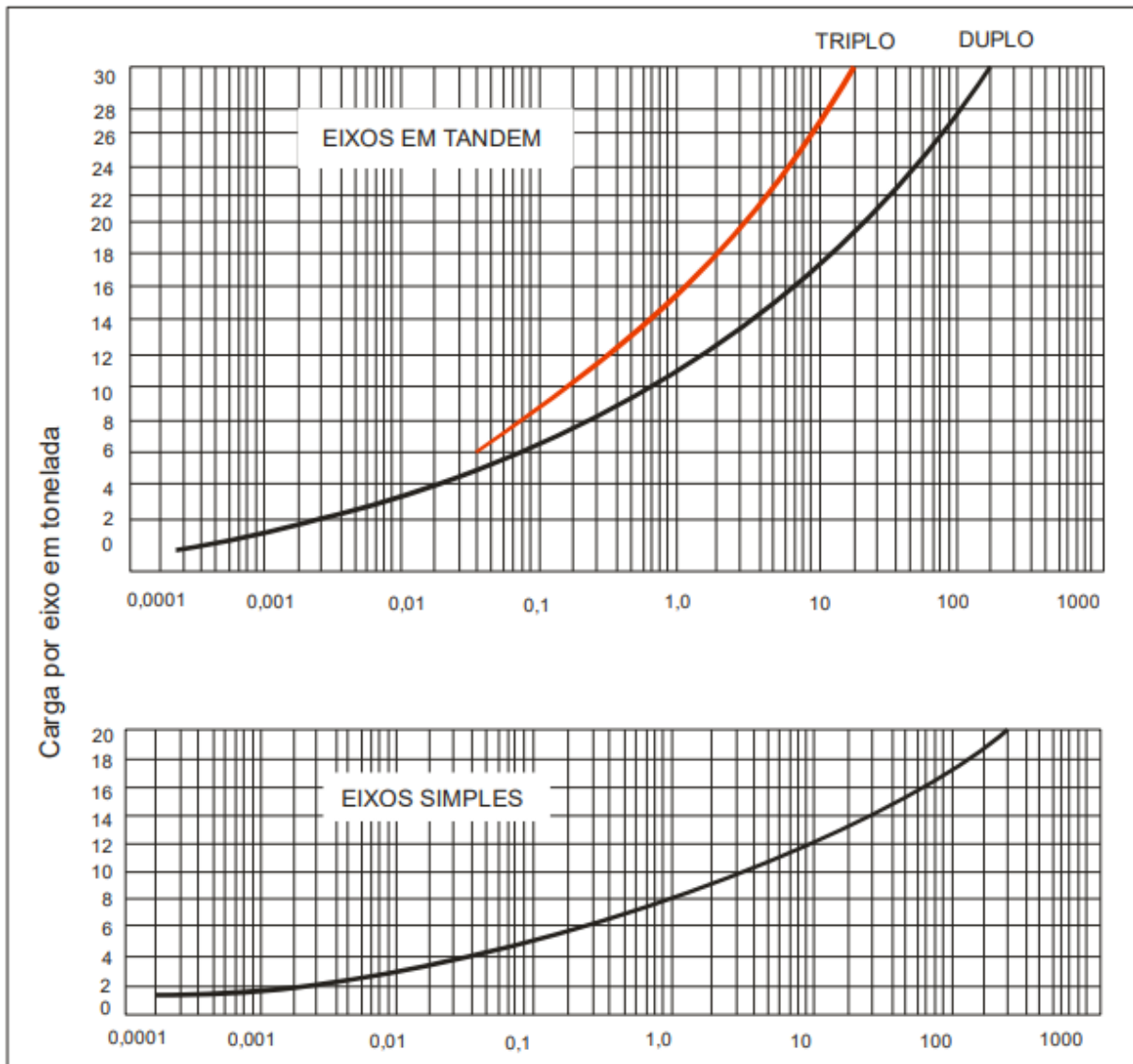
SOUZA, W. A. **Tratamento de água**. Natal: CEFET/RN. 2007. p. 152.

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DE ÁGUAS NATURAIS PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO

Tipos	A	B	C	D
DBO 5 dias (mg/L):				
- média	Até 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 4,0	> 4,0
- máxima em qualquer amostra	1 – 3	3 – 4	4 – 6	> 6
Coliformes (NMP/100 mL):				
- média mensal em qualquer mês	50 – 100	100 – 5000	5000 – 20000	> 20000
- máximo	> 100 cm menos de 5% das amostras	> 5000 cm menos de 20% das amostras	> 20000 cm menos de 5% das amostras	-
Ph	5 – 9	5 – 9	5 – 9	3,8 – 10,3
Cloretos	< 50	50 – 250	250 – 600	> 600
Fluoretos	< 1,5	1,5 – 3,0	> 3,0	-

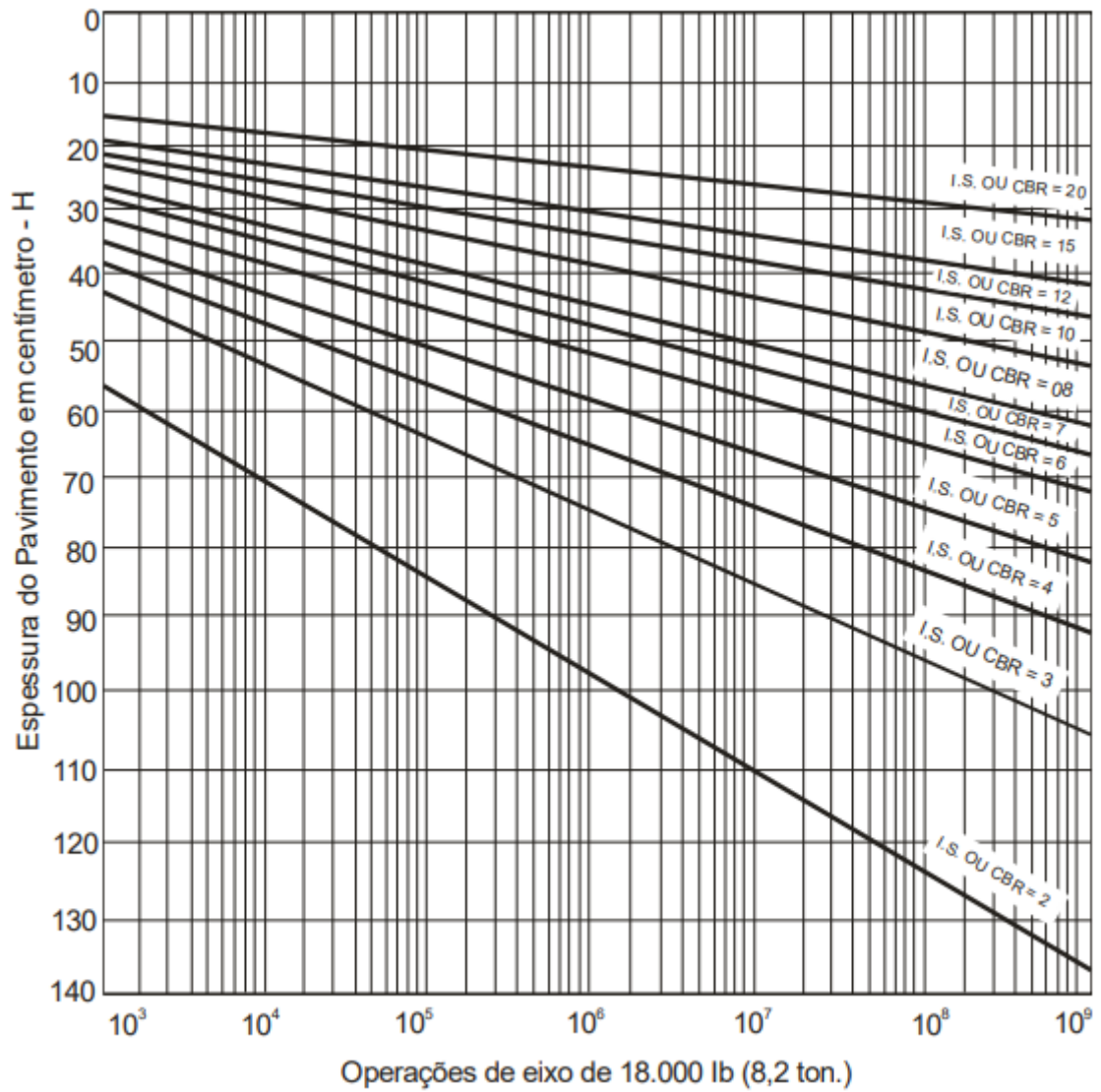
Fonte: Associação brasileira de normas técnicas, 1992.

ANEXO B – FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE OPERAÇÃO



Fonte: Manual de Pavimentação (DNIT, 2006).

ANEXO C – DETERMINAÇÃO DE ESPESSURAS DO PAVIMENTO



Fonte: Manual de Pavimentação (DNIT, 2006).