

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE GOIÁS – CAMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS III
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA DE
TRANSPORTES

Efeitos de Altas Temperaturas em Concretos Asfálticos de Pavimentos

João Victor Juliano Carvalho
Matheus Lourenço Moreira de Queiroz
Olavo Niesciur Lopes

GOIÂNIA
NOVEMBRO/2018

João Victor Juliano Carvalho
Matheus Lourenço Moreira de Queiroz
Olavo Niesciur Lopes

Efeitos de Altas Temperaturas em Concretos Asfálticos de Pavimentos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Transportes do Departamento de Áreas Acadêmicas III do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. M.Sc. Ricardo Freire Gonçalves

GOIÂNIA
NOVEMBRO/2018

C2532e Carvalho, João Victor Juliano.

Efeitos de altas temperaturas em concretos asfálticos de pavimento / João Victor Juliano Carvalho; Matheus Lourenço Moreira de Queiroz; Olavo Niesciur Lopes. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2018.

85 f.: il.

Orientador: Prof. Me. Ricardo Freire Gonçalves

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia de Transportes, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Pavimentos flexíveis. 2. Concreto asfáltico. 3. Rodovias brasileiras. I. Queiroz, Matheus Lourenço Moreira de. II. Lopes, Olavo Niesciur. III. Gonçalves, Ricardo Freire (orientador). IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. V. Título.

CDD 625.8

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo dos Autores: João Victor Juliano Carvalho, Matheus Lourenço Moreira de Queiroz e Olavo Niesciur Lopes

Matrículas: 20141011180067, 20141011180083 e 20141011180156

Título do Trabalho: Efeitos de Altas Temperaturas em Concretos Asfálticos de Pavimentos

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 13/12/2018

O documento está sujeito a registro de patente? ☒ Sim ☐ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☒ Sim ☐ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

João Victor Juliano Carvalho 23/11/18
Local Data

Matheus Lourenço Moreira de Queiroz
Olavo Niesciur Lopes

Assinatura dos Autores e/ou Detentores dos Direitos Autorais

JOÃO VÍCTOR JULIANO CARVALHO
MATHEUS LOURENÇO MOREIRA DE QUEIROZ
OLAVO NIESCIUR LOPES

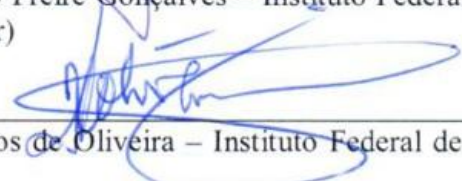
EFEITOS DE ALTAS TEMPERATURAS EM CONCRETOS ASFÁLTICOS DE
PAVIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Transportes do Departamento de Áreas Acadêmicas III Bacharelado do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Transportes.

Aprovado em: 13/11/2018

Banca Examinadora:


Prof. M.Sc. Ricardo Freire Gonçalves – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (orientador)


Prof. Dr. João Carlos de Oliveira – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás


Engª. Carolina Queiroz Arantes Prudente – Mestra pela Universidade Federal de Goiás

*Dedicamos este trabalho ao nosso país, às
nossas famílias, amigos e professores.*

AGRADECIMENTOS

Diante das várias dificuldades impostas no período de trabalho o sentimento de gratidão é o que será levado pelo grupo além de toda a experiência e conhecimento acumulado no processo. Com respeito e admiração, agradecemos:

- Primeiramente agradecemos a Deus e ao nosso Senhor Jesus Cristo pela união deste grupo, pelos ensinamentos, força e perseverança para cumprir esta etapa.
- Aos nossos familiares por serem a nossa base fundamental, nos dando apoio, força e que nunca deixaram de acreditar em nós.
- Ao nosso orientador Prof.º M.Sc. Ricardo Freire Gonçalves por aceitar, juntamente conosco, a idealizar e dar forma ao nosso trabalho.
- A Prof.ª. Drª. Luciana Araújo por ter se feito presente, nos aconselhando sempre quando necessário.
- Ao Prof. Dr. João Carlos de Oliveira pelas orientações nos dadas, e as suas orientandas Jéssika Rodrigues e Carina Catani pela parceria nos ensaios.
- Ao Técnico do Laboratório de Pavimentação do IFG Sandro Borges Vale pelas orientações e por sempre estar disposto a nos ajudar. Ao Técnico do Laboratório de Construção Civil Alfredo Portella, que nos ajudou quanto aos ensaios de estabilidade e fluência.
- Ao Grupo Disbral por nos fornecer o ligante asfáltico utilizado no trabalho em um primeiro momento, e posteriormente o aditivo DOPE para que pudéssemos concluir este trabalho. Agradecemos pela disposição em nos ajudar de forma rápida e sem burocracia.
- Formalmente ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás - CBMGO, que desde a protocolação do primeiro ofício, em todas as instâncias, foram solícitos quanto ao que foi preciso para que o trabalho tomasse este formato. Em especial o nosso muito obrigado ao Tenente Basílio por ter sido nossa ponte com Centro de Operações e Tecnologia de Incêndio – COTI.
- Especialmente ao Centro de Operações e Tecnologia de Incêndio do CBMGO, onde vimos que não há limites para ajudar ao próximo. O experimento deste trabalho ocorreu no COTI, tendo contribuição fundamental do Tenente Leonardo e o Sargento

Evangelista. Sem essa parceria este trabalho dificilmente se concretizaria, por isso, o nosso muito obrigado.

- Aos nossos amigos e professores.

*“São suas decisões, e não suas condições, que
determinam seu destino”.*
(Tony Robbins)

RESUMO

No Brasil, os pavimentos flexíveis são os mais utilizados. Frequentemente ocorrem atos de manifestações que ocasionam fechamento de ruas, avenidas e rodovias. Grupos movidos pela insatisfação recorrente das ações de políticas públicas manifestam o descontentamento coletivo, ateando fogo em materiais combustíveis, a fim de interromper o fluxo de veículos buscando maior visibilidade das causas defendidas. Este trabalho teve como proposta a análise dos efeitos de altas temperaturas no concreto asfáltico de pavimentos quando submetida a incêndios. Para isso, foram realizados estudos laboratoriais para caracterização de agregados e ligante utilizados. Para a obtenção dos corpos-de-prova de massa asfáltica, desenvolveu-se os ensaios de dosagem Marshall, para determinar o teor ótimo de ligante para a faixa granulométrica utilizada. A submissão dos corpos-de-prova a elevadas temperaturas foi realizada por meio de incêndio controlado realizado em parceria Centro de Operações e Tecnologia de Incêndios (COTI), do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás (CBMGO). Os tempos de queima foram definidos juntamente com os bombeiros do COTI, sendo 5, 10, 15 e 20 minutos. Após o experimento de queima, foram realizados os ensaios mecânicos para obtenção de valores para estabilidade e fluência para fins de comparação com corpos-de-prova que não foram submetidos ao incêndio. Os resultados obtidos mostraram que todos os corpos-de-prova submetidos a elevadas temperaturas perderam resistência quanto a estabilidade e obtiveram aumento de fluência. Também foi observado processo de desagregação do material betuminoso. Observou-se que quanto maior o tempo de exposição ao incêndio, maiores são os efeitos negativos de perda de estabilidade e aumento de fluência.

Palavras-chave: Concreto Asfáltico. Pavimentos Flexíveis. Dosagem Marshall. Elevadas Temperaturas. Incêndio Sobre Pavimentos.

ABSTRACT

In Brazil, flexible paving is more used. Often acts of manifestation which causes the closing of streets, avenues and highways. Groups moved by recurrent dissatisfaction with public policy actions manifests the discontent collective, firing on combustible material to stop the flow of vehicles seeking greater visibility of the causes defended. This work had as proposal the analysis of the effects of high temperatures on asphalt pavement concrete when subjected to fires. Laboratory studies were carried out to characterize the aggregates and binder used. In order to obtain the asphalt mass specimens, the Marshall dosage assays were developed to determine the optimal binder content for the granulometric range used. The subsection of the specimens to high temperatures was carried out by means of controlled fire conducted in partnership with Operations Center and Fire Technology (COTI) of the Military Fire Brigade of the State of Goiás, Brazil (CBMGO). The burning times were defined together with the COTI, being 5, 10, 15 and 20 minutes. After the firing experiment, the mechanic tests to obtain values for stability and fluency for purposes of comparison with which those were not subjected to the fire. The results obtained showed that all specimens subjected to high temperatures lost resistance to stability and obtained increased fluency. It was also observed a process of disintegration of the bituminous material. It was observed that the longer the exposure time to fire, the greater the negative effects of loss of stability and creep increase.

Key Words: Asphalt Concrete. Flexible Pavements. Dosage Marshall. High Temperatures. Fire on Pavements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo de situação de fogo sobre o pavimento (G1, 2017)	23
Figura 1.2 - Manifestantes boqueiam rodovia com fogo (G1, 2018).....	23
Figura 1.3 - Carretas em chamas devido a acidente (G1, 2015).....	24
Figura 1.4 - Focos de incêndios no estado de Goiás perto de rodovias pavimentadas	24
Figura 2.1 - Exemplo de Pavimento flexível (CNT, 2017a)	28
Figura 2.2 - Deformação elástica pela carga no pavimento flexível (CNT, 2017a).....	28
Figura 2.3 - Prensa Marshall e gráfico de estabilidade x fluência (BERNUCCI et al., 2008)..	37
Figura 3.1 - Investimentos públicos federais em infraestrutura de transporte rodoviário (adaptado CNT, 2017c).....	46
Figura 3.2 - Evolução dos investimentos em rodovia pelas concessionárias no Brasil (adaptado CNT, 2017c).....	47
Figura 3.3 - Condições das rodovias pavimentadas brasileiras em 2017 com dados da CNT (2017b)	47
Figura 4.1 - Primeira etapa da metodologia	48
Figura 4.2 - Segunda etapa da metodologia	49
Figura 4.3 - Pedreira na região metropolitana de Goiânia	50
Figura 4.4 - Penetrômetro.....	56
Figura 4.5 - Equipamento Saybolt-Furol	57
Figura 4.6 - Ensaio de adesividade	58
Figura 4.7 - Mistura asfáltica.....	59
Figura 4.8 - Compactação	60
Figura 4.9 - Desmoldagem	60
Figura 4.10 - Rompimento dos corpos-de-prova.....	61
Figura 4.11 - Posicionamento de corpos-de-prova	63
Figura 4.12 - Preparação do experimento	63
Figura 4.13 - Experimento em andamento	64
Figura 4.14 - Aferição de temperatura	64
Figura 5.1 - Curva granulométrica da brita 1	66
Figura 5.2 - Curva granulométrica da brita 0	67
Figura 5.3 - Curva granulométrica do pó de pedra.....	67

Figura 5.4 - Curva Viscosidade x Temperatura Saybolt-Furol	68
Figura 5.5 - Ensaio de adesividade com adição de DOPE com 0,8%, 0,9% e 1,0% respectivamente.	69
Figura 5.6 - Composição granulométrica da mistura - Faixa C	70
Figura 5.7 - Teor de ligante x Gmb	72
Figura 5.8 - Teor de ligante x DMT	73
Figura 5.9 - Teor de ligante x Vv	73
Figura 5.10 - Teor de ligante x VAM	73
Figura 5.11 - Teor de ligante x RBV	74
Figura 5.12 - Teor de ligante x Estabilidade	74
Figura 5.13 - Variação da Temperatura do Incêndio Durante o Experimento	75
Figura 5.14 - Temperatura dos corpos-de-prova imediatamente após serem retirados do incêndio	75
Figura 5.15 - Comparação de estabilidade	76
Figura 5.16 - Relação estabilidade, tempo e temperatura	77
Figura 5.17 - Corpo-de-prova após 20 minutos de queima	78
Figura 5.18 - Comparação de fluência	78
Figura 5.19 - Relação fluência, tempo e temperatura	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 - Ensaio e normas	51
Quadro 4.2 - Peneiras utilizadas na granulometria dos agregados	52
Quadro 4.3 - Massa mínima, por amostra de ensaio (adaptado da norma DNER ME 083/98)	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Composição de concreto asfáltico (adaptado da norma DNIT ES 031/2006)	53
Tabela 4.2 - Graduação para ensaio de abrasão (adaptado da norma DNER ME 035/1998) ..	54
Tabela 4.3 - Carga Abrasiva (adaptado da norma DNER ME 035/1998)	55
Tabela 5.1 - Dados granulométricos da brita 1 e 0	65
Tabela 5.2 - Dados granulométricos do pó de pedra	66
Tabela 5.3 - Características do CAP 50/70	68
Tabela 5.4 - Composição granulométrica	70
Tabela 5.5 - Composição dos corpos-de-prova	71
Tabela 5.6 - Temperatura de mistura e compactação dos corpos-de-prova	71
Tabela 5.7 - Parâmetros dos corpos-de-prova	71
Tabela 5.8 - Estabilidade e fluência da mistura	72
Tabela 5.9 - Requisitos de dosagem de concreto asfáltico	72
Tabela 5.10 - Estabilidade dos CPs após o incêndio	76
Tabela 5.11 - Perda de massa dos CPs após a queima	77
Tabela 5.12 - Fluência dos Cps após a queima	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCR	Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfalto Diluído de Petróleo
AGETOP	Agência Goiana de Transporte e Obras
AMB	Asfalto Modificado por Borracha
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
AR	Agentes rejuvenescedores
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBMGO	Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
COTI	Centro de Operações e Tecnologias de Incêndios
CP	Corpo-de-prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
DMC	Dimensão Máxima Característica
DMT	Massa Específica Máxima Teórica ou Densidade Máxima Teórica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
ES	Especificação de Serviço
GO	Goiás
IF	Índice de Forma
INPE	Instituto Nacional Pesquisas Espaciais
IFG	Instituto Federal de Goiás
ME	Método de Ensaio
NBR	Normas Brasileiras
PIB	Produto Interno Bruto
RBV	Relação Betume/Vazios

SGP	Sistema de Gerência de Pavimentos
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VCB	Volume de Vazios com Betume
WWF	<i>World Wide Fund</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
%a	Porcentagem do teor de asfalto na mistura
%A	Porcentagem do teor de areia na mistura
%B ₀	Porcentagem do teor de brita 0 na mistura
%B ₁	Porcentagem do teor de brita 1 na mistura
%f	Porcentagem do teor de fíler na mistura
%P	Porcentagem do teor de pó de pedra na mistura
%pas	Porcentagem passante
%ret	Porcentagem retida
%ret acum	Porcentagem retida acumulada
cm	Centímetro
cP	Centipoise
g	gramas
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
Grad.	Graduação
G _A	Densidade da areia
G _a	Densidade do asfalto
G _{B0}	Densidade da brita 0
G _{B1}	Densidade da brita 1
G _f	Densidade do fíler
Gmb	Massa específica aparente da mistura
G _P	Densidade do pó de pedra
kg	Quilograma
kgf	Quilograma força
km	Quilômetros
m	Metro
Máx.	Máximo
min	Minuto
Mín.	Mínimo
mm	Milímetro

Mpa	Mega Pascal
Ms	Massa seca
Msss	Massa na condição seca saturada
Msssub	Massa na condição seca saturada e submersa
N	Newton
nº/Nº	Número
Pas.	Passante
°C	Grau Celsius
R\$	Reais
Ret.	Retida
rpm	Rotações por minuto
s	Segundos
SSF	Segundo Saybolt Furol
T	Teor de asfalto
V	Volume
Vv	Volume de Vazios

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
1.1 OBJETIVOS	21
1.1.1 Objetivo Geral.....	22
1.1.2 Objetivos Específicos.....	22
1.2 JUSTIFICATIVA	22
1.3 HIPÓTESES	25
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA.....	27
2.1 PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	27
2.2 LIGANTES ASFÁLTICOS.....	29
2.3 AGREGADOS	31
2.4 CONCRETO ASFÁLTICO.....	32
2.5 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS	34
TEMPERATURA, CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO	38
3.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO REVESTIMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	38
3.2 PATOLOGIAS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	40
3.3 CONSERVAÇÃO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS FLEXÍVEIS.....	43
3.4 GERENCIAMENTO DAS RODOVIAS BRASILEIRAS	44
METODOLOGIA.....	48
4.1 MATERIAIS EMPREGADOS	49
4.2 PRIMEIRA ETAPA DA METODOLOGIA	50
4.2.1 Agregados.....	51
4.2.1.1 Granulometria.....	51

4.2.1.2 Massa Específica	53
4.2.1.3 Abrasão “Los Angeles”	54
4.2.1.4 Índice de Forma	55
4.2.2 Ligantes Asfálticos	55
4.2.2.1 Ensaio de Penetração	56
4.2.2.2 Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol	57
4.2.2.3 Ensaio de Adesividade	58
4.2.3 Mistura Asfáltica	58
4.3 SEGUNDA ETAPA DA METODOLOGIA	62
4.3.1 Submissão dos Corpos-de-Prova a Elevadas Temperaturas.....	60
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	65
5.1 AGREGADOS	65
5.2 LIGANTE ASFÁLTICO	68
5.3 MISTURA ASFÁLTICA PELO MÉTODO MARSHALL.....	69
5.4 SUBMISSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA AO INCÊNDIO.....	75
5.4.1 Estabilidade.....	76
5.4.2 Fluência	78
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
6.1 CONCLUSÕES.....	80
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS.....	82

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A utilização de rodovias pavimentadas no Brasil teve início em 1861, ano em que foi inaugurada a Estrada União Indústria que interligava os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, sendo esta considerada a Primeira Estrada de Rodagem do Brasil (CNT, 2014). Em meados da década de 1940, o país contava com apenas 423 km de rodovias pavimentadas. No ano de 1950 a malha pavimentada chegava aos 968 km (DNIT, 2018), sendo que a partir desse ano inicia-se o domínio e a expansão das rodovias no país, impulsionada por políticas de incentivos ao transporte rodoviário e à indústria automobilística.

Atualmente, de acordo com pesquisa da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2018) de rodovias, a malha rodoviária pavimentada brasileira chega a 213.453 km. Em contrapartida, a malha não pavimentada compreende a 1.507.248 km de extensão. Cabe ressaltar que uma infraestrutura de transportes adequada ajuda na manutenção de índices de atividades econômicas elevados, sendo, portanto, os investimentos nessa área um importante fator de desenvolvimento econômico e social.

O transporte realizado pelo modo rodoviário exerce função importante na sociedade e na economia do estado brasileiro, visto que tem-se constituído como a principal base para a circulação de cargas e pessoas em todo o território nacional. No Brasil, a malha rodoviária impulsiona o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) ao movimentar as riquezas, conectar áreas produtoras a mercados consumidores e promover as exportações.

É inegável que os custos com transportes são influenciados diretamente pelas condições da infraestrutura de transportes. Vale destacar que o sistema logístico brasileiro é fortemente dependente do modo rodoviário. Entretanto, sabe-se que apesar da importância das rodovias no meio social e econômico brasileiro, observa-se que os investimentos em ampliação e manutenção da malha rodoviária são insuficientes, já que a qualidade dos pavimentos das rodovias geralmente não é satisfatória (CNT, 2017a).

Para se ter uma base da importância da malha rodoviária no Brasil, cerca de 95% do transporte de passageiros e 61% do transporte de cargas são transportados pelo modo rodoviário (CNT, 2017b). Esses números se refletem devido aos baixos investimentos em outros modais de transportes como as ferrovias e hidrovias. Outros fatores responsáveis são os custos de construção e manutenção de rodovias de pavimentos flexíveis relativamente mais baixos do que os pavimentos rígidos e ferrovias, bem como as suas facilidades construtivas.

Para que o transporte opere de forma eficiente, é importante que o pavimento das rodovias esteja em boas condições, de forma que ofereça economia, segurança e comodidade aos usuários. Entretanto, ao transitar pela malha viária brasileira é comum observar patologias no revestimento como deformações permanentes, fissuras, perda de aderência e outros. No geral, esses problemas estão relacionados com o tráfego, estrutura do pavimento, materiais empregados e condições climáticas.

Um planejamento adequado aliado a informações técnicas precisas são essenciais para a melhoria e expansão da qualidade da malha rodoviária brasileira. Para isso, é necessário que se realizem estudos a respeito das condições das rodovias brasileiras, bem como dos problemas estruturais que possam ocorrer.

Frequentemente em atos como manifestações, é comum ocorrer o bloqueio de vias utilizando fogo em pneus, madeira e outros materiais sobre o pavimento. Também acontece em acidentes de trânsito, a combustão de veículos envolvidos sobre a via e ainda tem as queimadas que ocorrem às margens das rodovias. Em todos os casos, a massa asfáltica do revestimento é submetida a elevadas temperaturas. A partir desses fatos levanta-se o seguinte questionamento: quais os possíveis efeitos ou danos à massa asfáltica do pavimento quando submetidos a altas temperaturas? Dessa forma, a proposta de estudo vincula apresentar os possíveis efeitos ou danos ao pavimento, quando submetido às altas temperaturas.

1.1 OBJETIVOS

A seguir, serão descritos os objetivos geral e específicos desta pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral determinar por meio de ensaios em laboratório, possíveis efeitos ou danos no concreto asfáltico quando submetido a elevadas temperaturas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os agregados e o ligante asfáltico utilizado para o estudo.
- Realizar o estudo de dosagem Marshall para mistura de concreto asfáltico, determinando os parâmetros de fluência (deformação total) e estabilidade (resistência máxima à compressão radial).
- Submeter Corpos-de-prova a temperaturas elevadas por meio de incêndio controlado e posteriormente determinar os parâmetros de estabilidade e fluência.

1.2 JUSTIFICATIVA

No Brasil, frequentemente ocorrem atos de manifestações que ocasionam fechamento de ruas, avenidas e rodovias. Grupos movidos pela insatisfação recorrente das ações de políticas públicas manifestam o descontentamento coletivo, ateando fogo em materiais combustíveis, a fim de interromper o fluxo de veículos buscando maior visibilidade das causas defendidas.

Casos como o aumento do preço dos combustíveis ocorrido em 2017, repercutiu em todo o país e as rodovias foram fechadas pelo ato que ficou conhecido como a greve geral dos caminhoneiros (Figura 1.1). Segundo o portal de notícias G1 (2017), as rodovias BR-101 no Espírito Santo, BR-167 no Mato Grosso, assim como rodovias em Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e São Paulo foram fechadas em diversos pontos em sinal de protesto, sendo ateado fogo em materiais de combustão sobre o pavimento, submetendo-o a elevadas temperaturas ocasionadas pelas chamas.

Figura 1.1 – Exemplo de situação de fogo sobre o pavimento (G1, 2017)



Já no ano de 2018, a prisão do ex-presidente Luiz Inácio Lula da Silva movimentou novamente o Brasil. Em atos contrários a prisão do político condenado pela justiça por crimes de corrupção, rodovias foram fechadas com o uso de fogo sobre o pavimento (Figura 1.2), como noticiado também no site de notícias G1 (2018).

Figura 1.2 - Manifestantes boqueiam rodovia com fogo (G1, 2018).



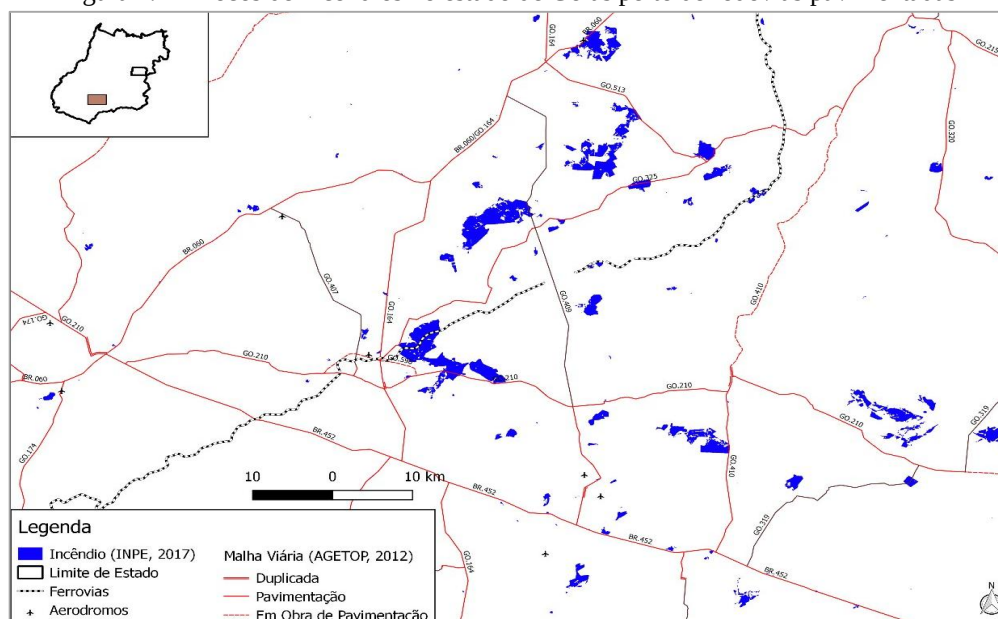
O superaquecimento dos pavimentos flexíveis também pode ser observado em casos mais pontuais como em acidentes de trânsito (Figura 1.3), em que os veículos envolvidos podem entrar em combustão dependendo das circunstâncias do acidente, elevando por um período de tempo a temperatura do pavimento.

Figura 1.3 - Carretas em chamas devido a acidente (G1, 2015)



Outro fator que submete o pavimento asfáltico a altas temperaturas são os incêndios na vegetação às margens das rodovias. No estado de Goiás, o cerrado possui uma particularidade, que a vegetação nativa em certos períodos, se queima naturalmente, como, por exemplo, através de raios, combustão espontânea e outros (MUNDO EDUCAÇÃO, 2018). A prática de provocar queimadas para fins de atividade agropecuária acontecem com frequência, pois geram custos reduzidos no preparo inicial do solo (WWF, 2018). A Figura 1.4 demonstra focos de queimadas às margens de rodovias pavimentadas no estado de Goiás com dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e da Agência Goiânia de Transportes e Obras (AGETOP).

Figura 1.4 - Focos de incêndios no estado de Goiás perto de rodovias pavimentadas



Sabe-se que a manutenção das rodovias consome boa parte dos recursos públicos destinados para o setor rodoviário. Segundo a CNT (2017c), em 2004 era despendido 52,2% do total de investimento para a construção, e 30,7% para a manutenção. Porém em 2016 este percentual foi invertido em 28,1% e 64,3% respectivamente. Estes investimentos são fundamentais para viabilizar os ganhos econômicos de uma operação mais eficiente do transporte rodoviário de cargas e de passageiros.

Diante desta ocorrência cabe justificar o presente trabalho, apresentando possíveis fatos que comprovam que quando o pavimento é submetido a temperaturas não convencionais ele pode ser prejudicado, perdendo suas características mecânicas gerando patologias permanentes, tornando insegura e ainda mais onerosa a manutenção das vias pavimentadas, prejudicando como um todo o sistema de transporte no Brasil.

1.3 HIPÓTESES

Para responder o problema feito na introdução deste trabalho, tem-se como hipótese que quando a massa asfáltica é submetida a elevadas temperaturas, como ocorre em incêndios sobre o pavimento, ocorrem alterações quanto a resistência máxima à compressão radial (estabilidade) e a deformação total (fluência) do revestimento asfáltico devido a alterações de sua estrutura.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este é um trabalho de ordem quantitativa, onde são analisados corpos-de-prova de massa asfáltica antes e depois de serem submetidos a elevadas temperaturas. Dessa forma, este trabalho será dissertado em seis capítulos.

- O primeiro capítulo será composto por uma introdução sobre o assunto, os objetivos geral e específico, as justificativas, as hipóteses do problema e a estrutura do trabalho.
- O segundo capítulo abordará a revisão de literatura, onde se destaca informações sobre os pavimentos asfálticos, ligantes asfálticos e o método Marshall.
- O terceiro capítulo continuará a revisão de literatura, em que será abordado a influência da temperatura nos revestimentos, patologias nos pavimentos, conservação e gerenciamento das rodovias.
- O quarto capítulo refere-se a metodologia de pesquisa adotada neste trabalho, destacando o método de obtenção de corpos-de-prova e ensaios mecânicos.

- O quinto capítulo se destacará os resultados obtidos da caracterização dos materiais utilizados, bem como da comparação dos resultados dos ensaios mecânicos realizados nos Corpos-de-prova antes e depois de serem submetidos a altas temperaturas.
- Por fim, no capítulo 6 será apresentado as conclusões deste estudo, assim como sugestões de pesquisas futuras visando o avanço dos estudos na área de pavimentação asfáltica.

CAPÍTULO 2

PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

A construção de vias de transportes sempre foi uma preocupação e uma atividade importante desde a Antiguidade. As civilizações mais antigas já sabiam que pavimentar as vias era algo essencial para a adequação e preservação dos caminhos estratégicos, seja por razões econômicas, de integração ou de cunho militar (BALBO, 2007).

A pavimentação asfáltica proporciona conforto aos usuários, melhores condições de limpeza e níveis mais adequados de segurança, velocidade e economia no transporte de cargas e pessoas.

2.1 PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

O pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem por meio de camadas de vários materiais de diferentes características de resistência e deformabilidade. Esta estrutura assim constituída apresenta um elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo das tensões e deformações (BARRETO, 2016).

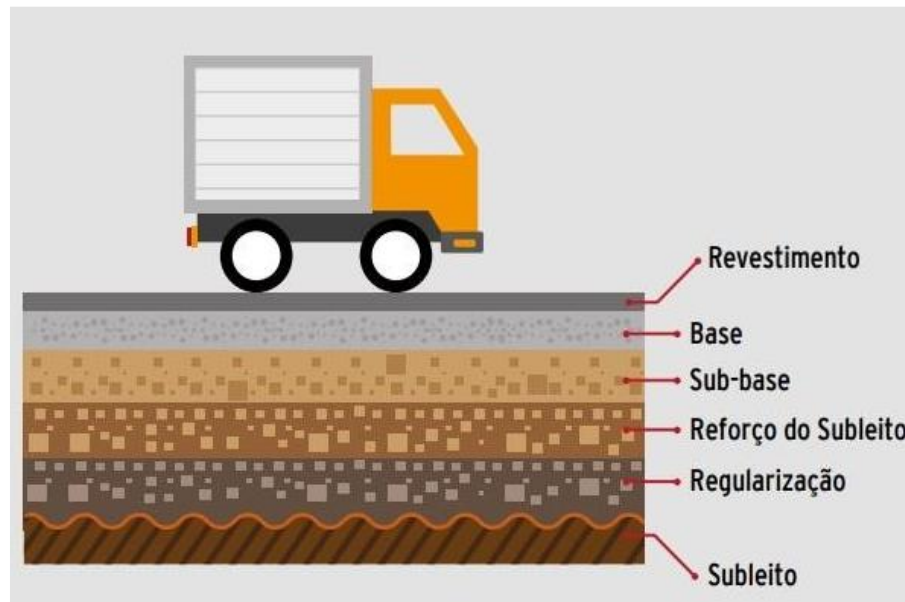
Santana (1993) afirma que o pavimento tem como função principal fornecer aos usuários segurança e conforto, que devem ser conseguidos sob o ponto de vista da engenharia, isto é, com a máxima qualidade e o mínimo custo. Pode-se afirmar que o Pavimento do ponto de vista estrutural e funcional é uma estrutura “[...] destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança” (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os principais tipos de pavimentos a considerar são: os pavimentos rígidos, semirrígidos e flexíveis. Estes diferem-se quanto a sua constituição e modo de funcionamento. O comportamento de um pavimento rodoviário depende das propriedades dos materiais de pavimentação de cada camada que o constituem, bem como da espessura e os tipos de camadas utilizadas (CUNHA, 2010).

O pavimento flexível (Figura 2.1) é definido como aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica sob a ação de cargas aplicadas, que se distribuem de forma equivalente entre as camadas (DNIT, 2006a). Nos pavimentos flexíveis as camadas superiores são

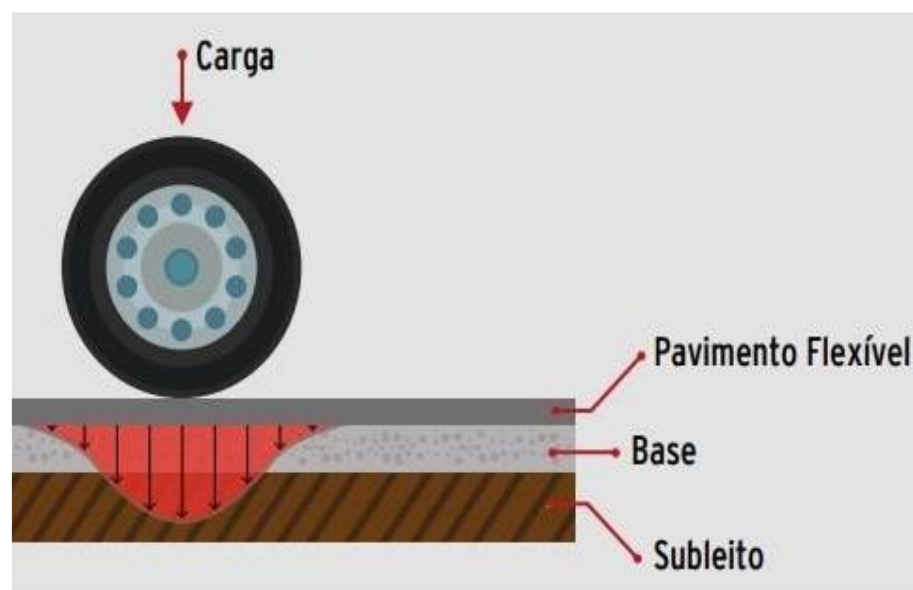
constituídas por materiais de elevada deformabilidade, quando comparado aos outros. A sua constituição básica consiste em um conjunto de camadas com materiais granulares e misturas betuminosas (MINHOTO, 2005).

Figura 2.1 – Exemplo de Pavimento flexível (CNT, 2017a)



Os pavimentos flexíveis são compostos por várias camadas que sofrem deformação elástica e distribuem as cargas para uma área menor do subleito (Figura 2.2). Isso exige que as camadas do pavimento sejam mais espessas a fim de proteger o subleito (CNT, 2017a).

Figura 2.2 - Deformação elástica pela carga no pavimento flexível (CNT, 2017a)



Os pavimentos flexíveis possuem o revestimento constituído basicamente por uma combinação de agregados e ligantes asfálticos. Nestes pavimentos, o revestimento é a camada que se destina a receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática. Para tanto, esta superestrutura precisa de cuidados para desenvolver com maestria as solicitações que lhe são impostas. Logo, a sua manutenção preventiva, e quando se faz necessário corretiva, é fundamental para a sua longevidade e o seu retorno como estrutura de recobrimento do leito natural, garantindo a segurança e conforto aos usuários das vias.

2.2 LIGANTES ASFÁLTICOS

O asfalto ou ligante asfáltico, é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção empregados pela humanidade e a sua utilização em pavimentação é um dos empregos mais importantes. Na maior parte dos países, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. Há diversos motivos para a utilização dos ligantes asfálticos em obras de pavimentação, dentre elas podem-se citar: a forte adesão dos agregados, flexibilidade controlável, impermeabilização, pode ser usado aquecido ou emulsionado, durabilidade, resistência à ação de boa parte dos ácidos, álcalis e sais, possibilidade de modificação de sua estrutura por adição de aditivos ou polímeros, dentre outros (BERNUCCI *et al.*, 2008).

No Brasil, está habituado a utilização do termo asfalto para designação do ligante proveniente do petróleo. Uma das conceituações empregadas ao ligante asfáltico é a seguinte: “Asfalto: mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo por destilação ou de forma natural cujo principal componente é o betume, mas pode conter oxigênio, nitrogênio e enxofre em pequena proporção” (CNT, 2017a).

Os ligantes asfálticos são produtos oriundos de processos industriais, e utilizados na pavimentação de vias. Os principais tipos de ligantes asfálticos disponíveis no mercado são: cimento asfáltico de petróleo (CAP), asfalto diluído de petróleo (ADP), emulsões asfálticas de petróleo (EAP), asfaltos modificados por polímero (AMP), asfaltos modificados por borracha de pneus (AMB), agentes rejuvenescedores (AR) e outros.

O asfalto recebe a denominação de Cimento Asfáltico de Petróleo, ou simplesmente CAP, quando passa a se enquadrar em uma classificação quanto a suas propriedades físicas, que proporcionam boa performance do material em obras de pavimentação (CNT, 2017a). O CAP é um material de elevada consistência, que possui qualidades aglutinantes e

impermeabilizantes, durabilidade, flexibilidade e alta resistência. Mais especificamente, o Cimento Asfáltico de Petróleo pode ser definido como:

[...] líquido viscoso, semi-sólido ou sólido, a temperatura ambiente, que apresenta comportamento termoplástico, tornando-se líquido se aquecido e retornando ao estado original após resfriamento. Obtido através de diversos processos de destilação do petróleo, ele é quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno e em bissulfeto de carbono (BETUNEL, 2018).

O CAP pode ser utilizado em variados tipos de misturas a quente como o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), tratamentos superficiais ou macadame betuminoso a quente na construção de camadas asfálticas de pavimentos rodoviários e urbanos. É classificado por ensaio de penetração à 25°C, sendo relacionada à sua consistência e expressa em décimos de milímetros, conforme a profundidade que uma agulha atinge verticalmente uma amostra do ligante. Valores baixos de penetração sugerem maior consistência do CAP (SANTOS, 2017). Os tipos de CAPs empregados atualmente são: CAP-30/45, CAP-50/70, CAP-85/100 e CAP-150/200.

Para poder ser empregado em pavimentação, o CAP, que é um material termoplástico, necessita ser aquecido para alcançar a viscosidade apropriada à mistura, normalmente a temperaturas superiores a 100 °C (PETROBRAS, 1996 *apud* ODA, NASCIMENTO & EDEL, 2005). Como forma de obter uma faixa de temperatura para se trabalhar com o CAP, a obtenção de uma curva de viscosidade x temperatura do material é essencial.

Um dos métodos utilizados no Brasil para obtenção da curva viscosidade x temperatura é o Saybolt Furol, e de acordo com a norma NBR 14950 da ABNT (2003), consiste no tempo em segundos para que 60 mL da amostra do material escoie em fluxo contínuo por meio de um orifício de dimensões padronizadas sob determinadas especificações. O equipamento utilizado é o viscosímetro Saybolt Furol e os valores são dados em Segundos de Saybolt Furol ou simplesmente SSF.

Outro método de determinação da viscosidade de ligastes asfálticos é a viscosidade rotacional por meio do viscosímetro de Brookfield que permite obter a curva viscosidade-temperatura em ampla faixa de determinação com a mesma amostra. Este equipamento possibilita medir as propriedades de consistência relacionadas ao bombeamento e à estocagem (BERNUCCI *et al.*, 2008). A unidade de medida utilizada é o centipoise (cP).

2.3 AGREGADOS

Os agregados podem ser definidos como materiais inertes, granulares, de composição mineral, como por exemplo pedra britada, areia, pedregulho, e escória, sem dimensões e forma definidas, com atributos adequados na composição de camadas ou misturas para emprego nos mais variados tipos de obras (GODOI, 2011). Rohde (2007) afirma que os agregados podem ser divididos em naturais, quando são de origem de processos naturais de degradação de rochas ou são produzidos por meio de britagem (areia natural, brita e outros), e artificiais, quando são originados de processos industriais por transformação química e física de materiais (escórias siderúrgicas, argila expandida e outros).

Os agregados possuem considerável importância no processo construtivo de um pavimento. Em todos os casos, ele se encontra presente desde simples tratamentos superficiais até as camadas mais elaboradas de revestimento enriquecidos com polímeros. Todos os revestimentos asfálticos flexíveis se constituem de associações de ligantes asfálticos e de agregados, logo se faz importante o estudo e a correta classificação destes materiais (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os agregados representam a maior porcentagem da constituição de uma mistura asfáltica, podendo chegar a mais de 90% da massa total ligante-agregado (ROHDE, 2007). Logo para garantir uma mistura com um bom desempenho é necessária uma distribuição granulométrica adequada ao tipo de mistura asfáltica, bem como das propriedades dos mesmos.

A NBR 9938 da ABNT (2013) subdivide as definições de agregado desde a sua forma bruta como e rocha, passando pela forma especial até a areia cujo qual a norma considera como agregado miúdo. Ainda com esta norma, em termos relativos a natureza dos agregados temos:

- Rochas ou Materiais Pétreos: Material natural consolidado na crosta terrestre, formado essencialmente por minerais.
- Agregado: Material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto.
- Agregado Natural: Material pétreo granular que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza, podendo ser submetido à lavagem, classificação ou britagem.
- Areia: Agregado miúdo originado através de processos naturais ou artificiais de desintegração de rochas ou proveniente de processos industriais. É chamada de areia natural se resultante de ação de agentes da natureza, de areia artificial quando

proveniente de processos industriais; de areia reciclada, quando proveniente de processos de reciclagem; e de areia de britagem, quando proveniente do processo de cominuição mecânica de rocha, conforme norma.

Para a escolha adequada dos agregados para a utilização em misturas asfálticas, existem diversos ensaios para avaliação das propriedades dos materiais. Nogueira (2008), Bernucci *et al.* (2008) e Rohde (2007) destacam os principais aspectos que devem ser analisados:

- Tamanho e graduação: Utiliza-se o ensaio de peneiramento para a classificação granulométrica do material, que consiste na passagem de forma progressiva do agregado por uma série de peneiras padronizadas e posterior pesagem do material retido em cada uma das peneiras. Ao final obtém-se a curva granulométrica.
- Resistência mecânica: Os agregados estão sujeitos a abrasão e quebras durante o uso e manuseio, por isso devem apresentar certa resistência a esses fatores. Para isso, utilizasse o ensaio de abrasão “Los Angeles” que consiste na colocação de determinada quantidade de material em um cilindro e um número variado de esferas de aço, e posterior acionamento para ser submetido a um determinado número de rotações.
- Massa específica: É a relação entre a quantidade de material e o volume e é determinada pelo ensaio de massa específica. No estudo de agregados, são definidas três designações de massa específica: real, aparente e efetiva.
- Forma: o índice de forma determina a variação dos eixos multidirecionais das partículas que constituem o agregado. Permite avaliar a qualidade de um agregado graúdo em relação à forma dos grãos.
- Adesividade ao ligante asfáltico: Propriedade que o agregado tem de ser aderido por ligante asfáltico. Consiste no não deslocamento do ligante em torno do agregado submerso em água destilada por 72 horas.

Os agregados influenciam diretamente no desempenho de campo de uma mistura asfáltica, pois algumas patologias no pavimento flexível como segregação e deformações, podem ter como uma das causas a escolha inadequada de material, que resulta numa estrutura pouco resistente (PEREIRA, 2012).

2.4 CONCRETO ASFÁLTICO

A massa asfáltica é constituída basicamente por ligante asfáltico e agregado miúdo e graúdo nas proporções adequadas, podendo ser misturadas a quente ou a frio. Segundo Bernucci *et al.*

(2008), as misturas asfálticas devem garantir, flexibilidade, impermeabilidade, durabilidade, estabilidade, resistência à fadiga, resistência à derrapagem e ao trincamento térmico, de acordo com as características do local.

Dentre as massas asfálticas a quente mais comuns estão: Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) ou Concreto Asfáltico (CA), Camada Porosa de Atrito (CPA) e *Stone Matrix Asphalt* (SMA), sendo que se diferem pelo teor de ligante, granulometria, percentagem de vazios e função estrutural (PATRIOTA, 2004). Segundo Bernucci *et al.* (2008), para o concreto asfáltico (CA), utiliza-se a graduação densa, onde a curva granulométrica é contínua e bem graduada, com poucos vazios.

Uma das massas asfálticas mais utilizada no Brasil para pavimentos flexíveis é o concreto asfáltico, sendo bastante difundido na construção dos revestimentos flexíveis de vias (BALBO, 2007). A norma 031/2006 - ES do DNIT (2006), define o concreto asfáltico como a mistura executada a quente, em usina adequada, com propriedades específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (filer) caso necessário e ligante asfáltico, espalhada e compactada a quente.

O concreto asfáltico deve possuir um rigoroso controle tecnológico, no que se trata de granulometria, teor de betume, estabilidade, vazios, temperatura e equipamentos. Quando utilizado agregado e CAP é chamado de convencional, mas também pode-se ter o uso de ligante asfáltico modificado por polímero, asfalto-borracha ou ainda misturas de módulo elevado. A modificação por polímero ou asfalto-borracha, torna o revestimento mais resistente e durável. Já as misturas de módulo elevado são assim denominadas por exibir módulo de resiliência elevado e alta resistência à deformação permanente (OLIVEIRA, ANDRADE e LAPERCHE, 2014).

Bernucci *et al.* (2008) cita que a mistura asfáltica depois de produzida na usina é transportada posteriormente por caminhões para a via, onde é espalhada por equipamento apropriado, denominado vibro acabadora. Logo depois é compactada por meio de rolos compactadores, até alcançar um grau de compressão tal que resulte num arranjo estrutural estável e resistente, tanto às deformações permanentes quanto às deformações elásticas repetidas da passagem do tráfego

2.5 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

A dosagem de uma mistura asfáltica no Brasil tem consistido atualmente na escolha, por meio de métodos experimentais, de um teor dito “ótimo” de ligante asfáltico, a partir de uma faixa granulométrica pré-estabelecida. Um dos métodos de dosagem de mistura asfáltica a quente mais usual no mundo faz a utilização da compactação por impacto e é conhecido como Método Marshall (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O Método Marshall foi desenvolvido durante a II Guerra Mundial (década de 1940) devido às necessidades dos militares do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, já que estes necessitavam de pavimentos mais resistentes as demandas de solicitações de cargas de aeronaves militares. Esse método foi desenvolvido pelo engenheiro Bruce G. Marshall do Departamento de Transporte do Estado do Mississippi, sendo posteriormente difundido por todo o mundo (SENÇO, 2001). No Brasil, o método Marshall é regido pela norma ME 043/95 do DNER, sendo denominada Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall.

O método Marshall consiste na escolha de teores de agregados e ligantes asfálticos que atendam aos requisitos pré-estabelecidos nos projetos fornecidos quanto a propriedades mecânicas e físicas para cada energia de compactação. Trata-se da aplicação de uma carga de compressão em um corpo-de-prova cilíndrico com dimensões padronizadas, compactado por energia de impacto, a qual pode ser realizada manual ou mecanicamente (SILVA; SIQUEIRA; SEVERINO, 2016).

Primeiramente, determinam-se as massas específicas dos agregados e do cimento asfáltico. Com a determinação da faixa granulométrica a ser utilizada, realiza-se o enquadramento dos teores obtidos aos limites fornecidos, considerando as características do projeto. Determinados os teores de CAP e suas variantes, procede-se para a produção mínima de três corpos-de-prova para cada teor de ligante, sendo sugerido um teor de asfalto (T, em %) para o primeiro grupo, e teores de asfalto acima (T+0,5% e T+1,0%) e abaixo (T-0,5% e T1,0%) (BERNUCCI *et al.*, 2008). Ressalta-se que as temperaturas de mistura e compactação da mistura asfáltica são escolhidas de acordo com os resultados obtidos da curva de Viscosidade x Temperatura do ligante asfáltico utilizado.

Os Corpos-de-prova são moldados e compactados de acordo com a norma ME 043 do DNER (1995), podendo ser uma compactação manual ou mecânica, sendo que ao final os Corpos-de-prova deverão estar com as dimensões dentro dos limites estabelecidos pela norma. O próximo

passo é a determinação da massa seca (Ms), submersa em água (MSsub), a massa específica aparente dos corpos-de-prova (Gmb) e a massa específica máxima teórica (DMT), de modo a permitir obter as relações volumétricas típicas da dosagem. Para isso, serão utilizadas as seguintes fórmulas descritas por Bernucci *et al.* (2008) e Silva, Siqueira e Severino (2016):

- Massa específica máxima teórica:

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%B_1}{G_{B1}} + \frac{\%B_0}{G_{B0}} + \frac{\%P}{G_P} + \frac{\%A}{G_A} + \frac{\%f}{G_f}} \quad (2.1)$$

Onde:

$\%a$: Porcentagem do teor de asfalto na mistura;

G_a : Densidade do asfalto;

$\%B_1$: Porcentagem do teor de brita 1 na mistura;

G_{B1} : Densidade da brita 1;

$\%B_0$: Porcentagem do teor de brita 0 na mistura;

G_{B0} : Densidade da brita 0;

$\%P$: Porcentagem do teor de pó de pedra na mistura;

G_P : Densidade do pó de pedra;

$\%A$: Porcentagem do teor de areia na mistura;

G_A : Densidade da areia;

$\%f$: Porcentagem do teor de fíler na mistura;

G_f : Densidade do fíler.

- Volume dos corpos-de-prova:

$$V = M_s - M_{Ssub} \quad (2.2)$$

Onde:

M_s : Massa seca;

M_{Ssub} : Massa seca submersa.

- Massa específica aparente da mistura:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_{SS} - M_{SSsub}} \times 0,9971 \quad (2.3)$$

Onde:

M_{ss}: Massa na condição seca saturada;

M_{ss_{sub}}: Massa na condição seca saturada e posteriormente submersa em água.

- Volume de Vazios:

$$V_v = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \quad (2.4)$$

- Volume de vazios com betume:

$$V_{CB} = \frac{G_{mb} \times V_v}{G_a} \quad (2.5)$$

- Vazios do agregado mineral:

$$V_{AM} = V_v + V_{CB} \quad (2.6)$$

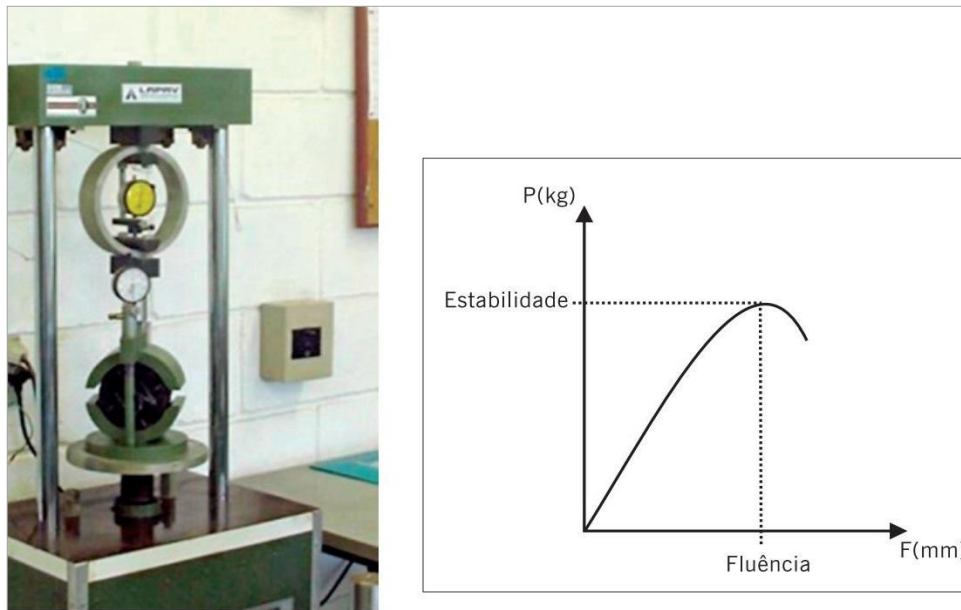
- Relação betume/vazios:

$$RBV = 100 \times \left(\frac{V_{AM} - V_v}{V_{AM}} \right) \quad (2.7)$$

Em seguida tem-se a realização do ensaio de compressão diametral na prensa Marshall (Figura 2.3), em que são aferidos os valores de fluência e estabilidade. O procedimento é realizado a partir da aplicação de uma carga de compressão sobre o corpo-de-prova, que deve possuir 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, e estar a uma temperatura de 60 °C no momento do ensaio, sendo que a taxa de carregamento é de 5 cm/minuto (BERNUCCI *et al.*, 2008). A norma ME 043 do DNER (1995) define a estabilidade e fluência como:

- Estabilidade: é definida como a resistência máxima à compressão radial a qual o corpo-de-prova resiste antes da ruptura. A estabilidade é expressa em N ou Kgf.
- Fluência: deformação total na vertical apresentado pelo corpo-de-prova correspondente à aplicação da carga máxima. A fluência é expressa em décimos de mm ou centésimos de polegada.

Figura 2.3 - Prensa Marshall e gráfico de estabilidade x fluência (BERNUCCI *et al.*, 2008)



Na dosagem de misturas asfálticas é importante conhecer todos os elementos envolvidos para se obter uma mistura que garanta um bom desempenho do pavimento. A dosagem irá definir a proporção de cada elemento, de modo que resulte em uma estrutura de pavimento com boa resistência e bom desempenho (ROSSI, 2017).

Outro método de dosagem de misturas asfálticas a destacar é o Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*), muito utilizado na América do Norte. Esta dosagem também é determinada conforme parâmetros volumétricos da mistura e representa de modo mais realista a carga aplicada no pavimento, empregando compactação por amassamento (SILVA, SIQUEIRA E SEVERINO, 2016). O Superpave também analisa os conceitos de pontos de controle e zona de restrição para a seleção dos agregados a serem utilizados (BERNUCCI *et al.*, 2008).

CAPÍTULO 3

TEMPERATURA, CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO

O transporte rodoviário é predominante na matriz de transportes do Brasil. A má gestão das rodovias implica na má conservação das mesmas, o que resulta em impactos socioeconômicos negativos. Os investimentos do Governo Federal em pavimentação, tanto para construção quanto para manutenção e conservação são insuficientes, portanto, deve-se buscar a racionalização destes recursos. As vias de pavimentos flexíveis estão sujeitas a diversas patologias podendo ter mais variadas causas, dentre elas a influência da temperatura.

3.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO REVESTIMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

As vias localizadas em regiões sujeitas a altas temperaturas são mais susceptíveis a patologias como exsudação ou deformações em trilhas de roda nos revestimentos asfálticos, especialmente se esse caso estiver combinado com a existência de rampas (CERATTI, BERNUCCI & SOARES, 2015).

Para tal fato, ressalta-se que os asfaltos necessitam apresentar requisitos de qualidade para atender às necessidades de emprego em pavimentações. Uma dessas Características é a suscetibilidade térmica, que é capacidade de tolerar mudanças de temperatura sem perder a ductilidade e a consistência. Na pavimentação de vias é relevante que se avaliem as condições de temperatura em que o CAP amolecerá e escorrer, com o propósito de evitar o aparecimento de fissuras ocasionadas pela alta consistência em temperaturas baixas durante o período de inverno, e a deformação permanente, devido baixa consistência em temperaturas elevadas, durante o período de verão (PETROBRAS, 2015).

Outro problema que ocorre no revestimento devido à temperatura combinado com outros fatores é o processo de envelhecimento do ligante presente na mistura asfáltica, que acontece de forma lenta e continua. Esse envelhecimento torna o asfalto mais rígido e, conseqüentemente a mistura asfáltica, o que afeta diretamente no desempenho do pavimento (JUNIOR, 2004).

Percebe-se que há vários problemas que podem ocorrer devido a atuação da temperatura do ambiente no revestimento asfáltico. Um problema recorrente e que deve também ser levado em consideração é a diminuição da rigidez do concreto asfáltico (CA) quando este passa por diferentes amplitudes térmicas ao longo do dia, e quando combinado com o intenso fluxo de veículos pode acarretar patologias permanentes reduzindo assim seu desempenho mecânico.

O efeito de cargas de tráfego repetida, em forma de ciclos, pode ocasionar danos no pavimento por fadiga pela diminuição da rigidez do concreto asfáltico. A tensão da tração do carregamento de tráfego a cada ciclo se desenvolve no fundo da camada do CA, promovendo de baixo para cima patologias como as trincas couro de jacaré. Um único veículo trafegando sobre o pavimento não demonstra danos ao CA, no entanto em demasiados ciclos o tráfego como um todo pode gerar fadiga. Assim como o efeito acumulativo do tráfego, o ciclo acumulado da temperatura em forma de amplitude térmica ocasionado pelas mudanças climáticas do dia e noite também causa danos ao CA. Os danos a uma única flutuação de temperatura podem ser pequenos, contudo ao longo do tempo, estes danos podem ser irreversíveis ao pavimento (ISLAM, 2015).

Medina e Motta (2015) afirmam que a rigidez dos revestimentos asfálticos é diretamente ligada à temperatura, ou seja, a deformabilidade de um pavimento seja ela maior ou menor, é condicionada a variações de temperaturas (do ar ou condições meteorológicas). Segundo Motta (1991, *apud* BALBO, 2007), o grande problema das massas asfálticas no Brasil, mais especificamente do seu controle, refere-se à questão de elevadas temperaturas, já que a variação aproximada de mistura asfáltica no país pode variar entre 15 e 60 °C, sem muita discrepância entre as várias regiões.

Seguindo a premissa que a temperatura interfere diretamente no desempenho mecânico do pavimento, a amplitude térmica e a exposição a gradientes térmicos em concretos asfálticos é bastante difundido em meio a literatura. Segundo Alkasawneh *et al.* (2007), Huang (1993), Medina e Motta (2005), Pradeep *et al.* (2005) e Specht *et al.* (2008) conforme citado por Vassoler, Wang e Specht (2011), os pavimentos flexíveis e rígidos, quando expostos a gradientes térmicos alteram seu estado de tensão e deformação. A alteração no CA em amplitude entre 20,5 a 65° C faz com que a rigidez deste pavimento varie de 10.900 a 600 MPa, quando verificado na superfície e a 7,7 cm de profundidade a variação na temperatura de 23 a 54°C, faz com que o CA apresente a oscilação de 8.800 a 1.250 MPa. Este fato, justifica o estudo quando relacionamos que a superfície do pavimento pode chegar a temperaturas ainda

mais expressivas quando submetidas direta ou indiretamente a fontes de combustão, podendo alterar a rigidez do CA, reduzindo dessa forma seu desempenho mecânico.

O efeito da amplitude térmica na superfície como foi descrito anteriormente promove no pavimento efeitos negativos quanto a sua capacidade mecânica ocasionado pela anisotropia. Entretanto quando na fase de projeto, o efeito térmico não é levado em consideração tanto na superfície quanto na parte inferior do concreto asfáltico.

O efeito das variações térmicas na parte inferior do pavimento, que provoca expansão e contração térmica é totalmente negligenciada na fase de projeto e execução no processo construtivo (ISLAM e TAREFDER, 2014). No entanto esta variação é uma das causas que mais influência a falha por fadiga na parte inferior ao pavimento. O Guia de Desempenho de Pavimentas Mecânicos – Empíricos (MEPDG) confirma esta negligência e reafirma a importância de se ler levado em consideração esse efeito térmico no pavimento.

Fang e Sergious (1994) *apud* Islam e Tarefder (2014), já previam o efeito da temperatura no interior do pavimento. Os autores desenvolveram estudos para acompanhar por meio de testes cíclicos, em amostras de asfaltos submetidas a amplitudes térmicas e concluíram que o dano de fadiga é crítico para a variação térmica.

3.2 PATOLOGIAS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

As patologias nos pavimentos asfálticos são decorrentes de ocasiões que vão desde a escolha dos materiais até a execução de manutenções corretivas e preventivas. Dentre os defeitos mais comuns podem-se citar: panelas, deformações, desagregação, exsudação, fissuras, trincas longitudinais ou transversais, em blocos, bordas, solapamentos, remendos entre outros (DOMINGUES, 1993).

A norma 005/2003 do DNIT (2003) descreve os defeitos em pavimentos asfálticos flexíveis. As suas possíveis causas são descritas por Silva (2005) e Bernucci *et al.* (2008):

- Fissura: Fenda de largura capilar existente no revestimento, posicionada longitudinalmente, transversalmente ou obliquamente ao eixo da via, somente perceptível a distâncias inferiores a 1,5 m, com aberturas inferiores a 1 mm. Corresponde a um estágio inicial do fendilhamento.

- Trinca: Fenda existente no revestimento, facilmente visível, com abertura superior à da fissura, podendo apresentar-se sob a forma de trinca isolada (podendo ser transversal, longitudinal ou de retração) ou interligada (tipo bloco ou couro de jacaré).
- O trincamento pode ter como causas estão a fadiga, cargas excessivas, mudanças térmicas, endurecimento do asfalto e outros.
- Afundamento: Deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada ou não de pequena elevação do revestimento asfáltico, podendo apresentar-se sob a forma de afundamento plástico (causado pela fluência plástica) ou de consolidação (causado pela consolidação diferencial). A ação repetida da passagem das cargas de roda dos pneus e o fluxo canalizado dos veículos de carga é são a associação genérica que causam estas deformações. Quando a extensão deste for até 6 metros o afundamento é local, caso contrário é denominado afundamento de trilha de roda.
- Corrugação: Também conhecida como costela de vaca, são deformação caracterizada por pequenas irregularidades transversais ao eixo da via, com pequenas ondulações em intervalo da ordem de centímetros, devido à baixa resistência da massa asfáltica e base instável. Este defeito está associado às tensões de cisalhamento horizontais geradas pelos veículos no momento de aceleração e frenagem.
- Ondulação: São deformações transversais ao eixo da via, normalmente decorrentes da consolidação diferencial do subleito, diferenciadas da corrugação pelo comprimento de onda entre duas cristas da ordem de metros. As ondulações do revestimento asfáltico são denominadas de escorregamento de massa e possuem como causa a baixa instabilidade da mistura asfáltica, quando sujeita ao intemperismo e ao tráfego.
- Irregularidade Longitudinal: Desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas da via.
- Escorregamento: Deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento, com aparecimento de fendas em forma de meia lua que ocorre devido à falta de aderência entre o revestimento e a camada subjacente ou por causa de baixa resistência da mistura asfáltica. Acontece em locais de frenagem e interseções.
- Exsudação: Excesso de ligante betuminoso na superfície do pavimento, causado pela migração do ligante através do revestimento. Com temperaturas elevadas, o asfalto dilata e não existindo espaço para o mesmo ocupar, ele exsudará por meio do

revestimento até a superfície, que brilha por causa do excesso de ligante asfáltico. Normalmente a superfície afetada é na trilha de roda.

- Desgaste: Efeito do arrancamento progressivo do ligante e do agregado do pavimento, caracterizado por aspereza superficial do revestimento e provocado por esforços tangenciais causados pelo tráfego. O arrancamento ocorre em idades avançadas, sendo que antes desse, é comum o polimento da superfície do revestimento, o que gera risco de derrapagem. Além do tráfego, a volatilização e a oxidação do asfalto e o intemperismo são causas de desgaste. Quando esta patologia ocorre pouco tempo depois de concluída a obra, com a perda progressiva de agregado, é sinal de que houve um superaquecimento do asfalto na usina ou porque a quantidade de ligante na mistura asfáltica foi insuficiente.
- Panela: Também conhecido popularmente como buraco, pode ser definido como uma cavidade que se forma no revestimento por diversas causas, podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento e provocar a desagregação dessas camadas. É considerado uma evolução das trincas, afundamentos e desgastes. Essa patologia é muito séria, tanto em caráter estrutural como funcional, pois torna as camadas subjacentes do pavimento vulneráveis (principalmente a ação da água), afetando negativamente a segurança do tráfego, o conforto do usuário e aumenta os custos de transporte.
- Remendo: Panela preenchida com uma ou mais camadas de pavimento na operação denominada de “tapa-buraco”. Pode ser profundo, quando há substituição do revestimento e, eventualmente, de uma ou mais camadas inferiores do pavimento. Usualmente, apresenta forma retangular. E pode ser também superficial, quando a correção ocorre em área localizada, da superfície do revestimento, pela aplicação de uma camada betuminosa.

As misturas asfálticas são comumente empregadas nos pavimentos como camadas de revestimentos. As patologias mais sérias que acontecem em estruturas flexíveis, se refletem na capa de rolamento e permitem observar dois modos distintos de solicitação mecânica: flexão repetida, responsável pela fadiga do material e a compressão simples, que acarreta o acúmulo de deformações permanentes (SPECHT, 2004). Vale ressaltar que algumas dessas patologias tem como influência a temperatura combinada com outros elementos.

3.3 CONSERVAÇÃO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS FLEXÍVEIS

A redução contínua da qualidade do pavimento tem como contribuição o aparecimento de uma diversidade de degradações, sendo que isso faz parte da evolução de um pavimento flexível ao longo de sua vida. Essas degradações podem ocorrer tanto na estrutura do pavimento como na superfície (ALMEIDA, 2013).

Os pavimentos asfálticos flexíveis são idealizados para durarem um certo tempo. Durante esse período, também denominado de ciclo de vida, o pavimento inicia-se de uma condição ótima e alcança uma condição ruim ou péssima. Neste caso, essa piora da condição ou qualidade é conhecida como deterioração do pavimento (DNIT, 2006a).

A conservação é necessária para que a via pavimentada possa desempenhar, de maneira satisfatória, a sua função durante o tempo para o qual ela foi projetada. A conservação deve ser considerada como um investimento empregado na infraestrutura viária e na prevenção de uma restauração onerosa. Dentre as finalidades da conservação de vias, destacam-se: o prolongamento da vida útil; a redução dos custos de operações dos veículos; e a contribuição para que as vias permaneçam sempre abertas para a circulação do tráfego, permitindo uma maior conforto e segurança aos usuários (DNIT, 2006b).

O conjunto de operações destinadas a manter as características técnicas e operacionais da rodovia, até que tais operações se tornem antieconômicas é denominada de conservação rodoviária (DNIT, 2005). A tarefa de conservação de pavimentos é importante para a preservação da via, mantendo um nível de serviço que possibilite boas condições de circulação com segurança, conforto e redução dos custos de circulação (ALMEIDA, 2013).

Segundo o Manual de Conservação Rodoviária do DNIT (2005), pode-se considerar cinco estratégias de conservação em razão das suas finalidades específicas e suas naturezas:

- Conservação Corretiva Rotineira: Compreende as operações com objetivos de sanar ou reparar defeitos de forma a reestabelecer o conforto e a segurança da rodovia. Dentre os exemplos podem-se citar as selagens de trincas e os remendos.
- Conservação Preventiva Periódica: São as operações de conservação que devem ser realizadas periodicamente com o intuito de prevenir o agravamento ou surgimento de defeitos. São exemplos desse tipo de conservação as atividades de limpeza e desobstrução dos dispositivos de drenagem.

- Conservação de Emergência: Composto por operações, obras e serviços imprescindíveis na realização de recuperação de trechos de vias que tenham sido danificadas, obstruídas ou seccionadas por algum tipo de desastre natural ou evento extraordinário. Dentre os exemplos tem-se a recomposição de aterros, remoção de barreiras e implantação de variantes.
- Restauração: Consiste nas operações que têm como objetivos o reestabelecimento do perfeito funcionamento do pavimento asfáltico. As operações de substituição e reconstituição de camadas do pavimento, recapeamento ou reconstrução, são exemplos deste tipo de conservação.
- Melhoramentos da Rodovia: São as operações que possuem como objetivos acrescentar novas características à via, ou mesmo alterar as que já existem. Alguns exemplos relacionados são arborização, execução de cercas e de itens de drenagem.

O setor rodoviário exige atividades permanentes de manutenção e conservação integradas e coordenadas com ações de planejamento, programação e recursos financeiros disponíveis. Para isso, são necessárias avaliações periódicas com o intuito de verificar a existência de patologias para posteriormente aplicar as ações corretivas adequadas.

3.4 GERENCIAMENTO DAS RODOVIAS BRASILEIRAS

Sabe-se que o modo rodoviário é o principal meio de escoamento de produção no Brasil. As rodovias possuem um papel fundamental na economia do país pois o sistema logístico brasileiro depende diretamente delas. Por isso a execução de um bom planejamento e gerenciamento para as rodovias são importantes. A suspensão ou diminuição da intensidade dos serviços de conservação e manutenção dos pavimentos rodoviários provocam acréscimos significativos nos custos de operação dos veículos. Isso também gera um outro problema que são os aumentos dos custos de investimentos para a recuperação dos pavimentos.

Nas décadas de 1960 e 1970, a malha rodoviária brasileira apresentou uma forte expansão, dos quais 20% do total de recursos arrecadados eram aplicados na infraestrutura rodoviária para manutenção e construção de estradas. Esses recursos financeiros eram oriundos principalmente de tributos sobre os usuários rodoviários. Ou seja, eram recursos vinculados a aplicações no setor de transportes (DNIT, 2005). Contudo, depois da promulgação da Constituição Federal de 1988, a prática de recursos públicos vinculada passou a ser proibida, ocasionando redução de investimentos no setor.

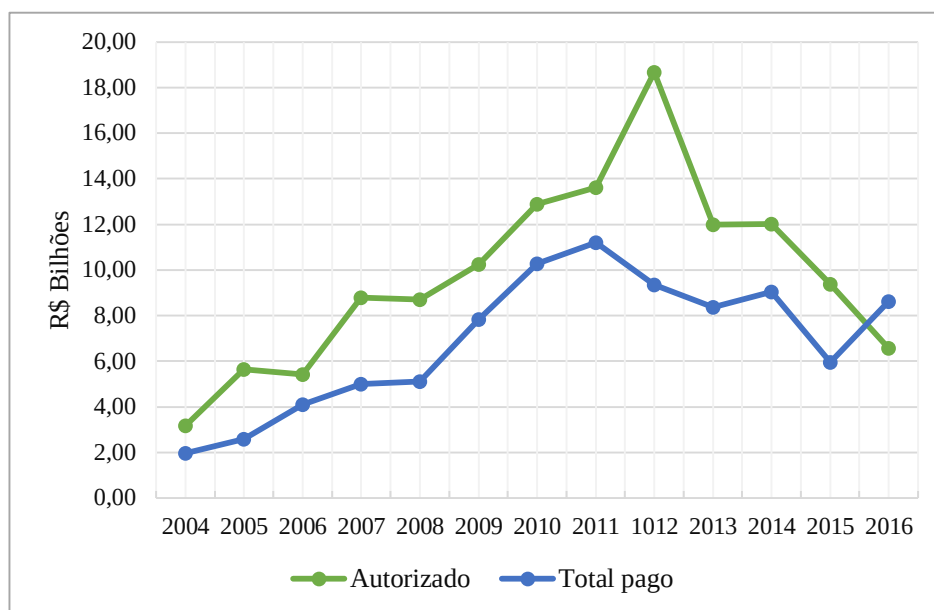
O transporte rodoviário ainda prevalece sobre os demais modais, contudo ainda existe um déficit em relação as condições de circulação da rede de transportes. De acordo com a CNT (2017a), há uma falta de cultura no Brasil em relação a utilização de um forte sistema de gestão de rodovias, principalmente na manutenção preventiva.

O DNIT sofre com problemas gerenciais e administrativos, bem como o excesso de atribuições, a falta de autonomia administrativa e a dependência financeira do Governo Federal. Sobre os recursos financeiros destinadas ao DNIT, após o fim das receitas vinculadas, principalmente para manutenção e conservação de rodovias, os mesmos passaram a ser insuficientes para atender a demanda, sendo que atualmente esses recursos são provenientes das receitas globais do Governo e a sua destinação de aplicação normalmente não são baseadas em decisões técnicas (DNIT, 2005).

A dificuldades orçamentárias impostas pelo Governo Federal ao DNIT, principal órgão responsável pelas rodovias federais, faz com que o mesmo priorize as manutenções corretivas. Ainda de acordo com a CNT (2017a), cerca de 70% da rede sob responsabilidade do DNIT possuem algum tipo de contrato de manutenção. Um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) ainda está em fase de implantação, mas de forma lenta. A falta de um planejamento eficiente e de uma maior integração entre os órgãos, dificulta a implantação de um sistema de gestão forte, além de desperdiçar os escassos recursos financeiros.

De acordo com a CNT (2017b), nos últimos anos, os investimentos do Governo Federal na malha rodoviária brasileira para ações de manutenção, adequação e expansão, apresentaram reduções. A Figura 3.1 mostra que a verba em 2016 equivaleu a 0,14% do Produto Interno Bruto (PIB), o que representa R\$ 8,61 bilhões. Porém, desse total, 67,7% foram destinados para ações que foram realizadas em anos anteriores, mas que só foram pagas em 2016. Isso se reflete em dificuldades de viabilização de novos investimentos, na capacidade de planejamento do Governo Federal, insegurança para as empresas que prestam o serviço ao governo, o que por sua vez eleva os custos dos serviços construtivos.

Figura 3.1 - Investimentos públicos federais em infraestrutura de transporte rodoviário (adaptado CNT, 2017c)

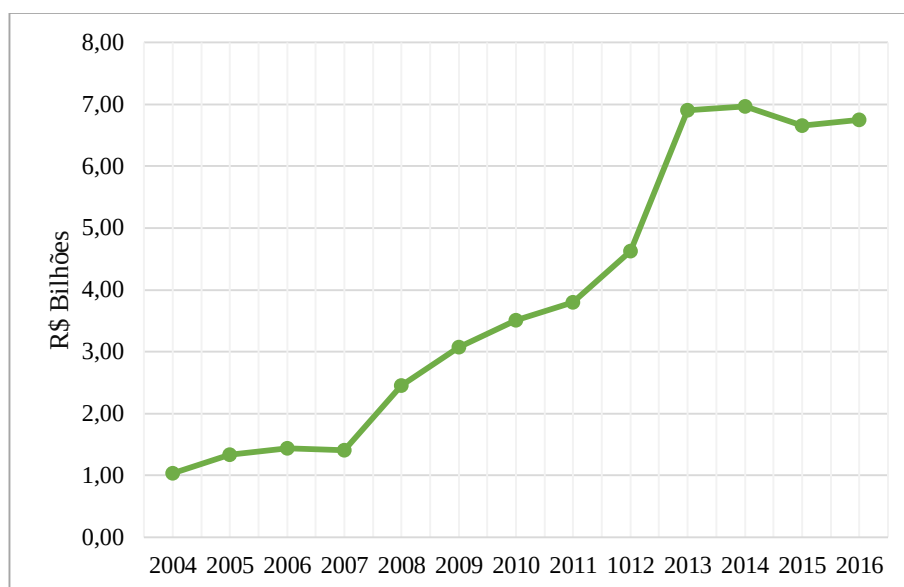


A manutenção, conservação e expansão da malha rodoviária brasileira são fundamentais para que o país se torne economicamente mais competitivo no mercado internacional, de forma a propiciar o crescimento econômico e social. Como a gestão pública não consegue atender a demanda do setor, o Governo viu nas concessões à iniciativa privada uma saída na busca de investimentos com o objetivo de melhorar a qualidade e o gerenciamento das rodovias.

Em meados da década de 1990, devido às restrições orçamentárias, iniciou-se o programa de concessões do Governo Federal, seguido posteriormente por alguns estados como São Paulo e Rio de Janeiro, com o objetivo de conferir à iniciativa privada a responsabilidade pela gerencia de suas rodovias (CNT, 2013).

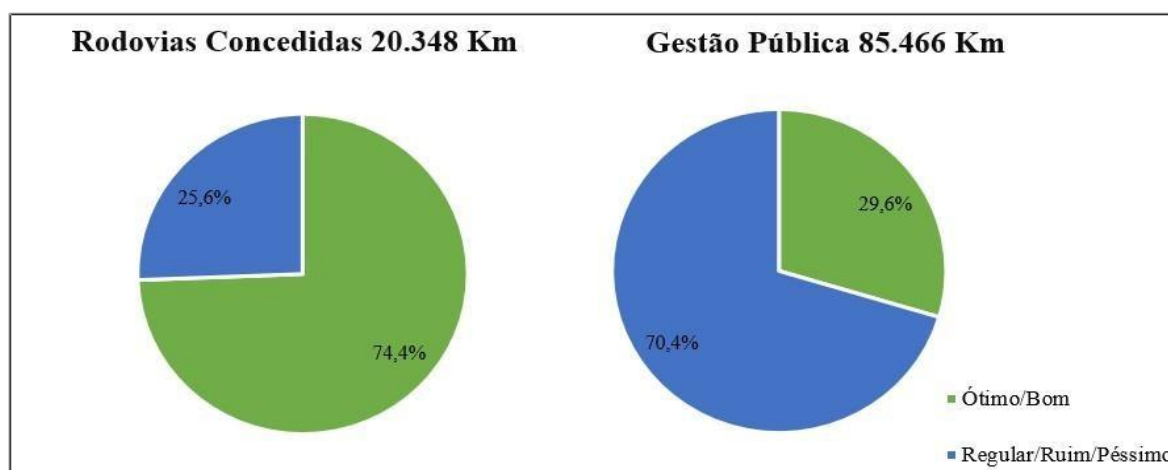
De acordo com a CNT (2017b), houve uma pequena queda dos investimentos privados na malha rodoviária devido à crise econômica e fiscal do Estado brasileiro. No ano de 2016, os recursos privados destinados ao gerenciamento das rodovias foram de R\$ 6,75 bilhões (Figura 3.2). Segundo a ABCR (2016), algumas concessões passaram a sofrer dificuldades devido à crise econômica e fiscal do país, pois impactou os custos de operações e de obtenção de financiamentos.

Figura 3.2 - Evolução dos investimentos em rodovia pelas concessionárias no Brasil (adaptado CNT, 2017c)



Das rodovias sob a gestão pública, 29,6% tiveram a classificação como ótimo ou bom e 70,4% foram classificadas como regular, ruim ou péssimo. Já nos trechos administrados pela iniciativa privada, 74,4% receberam a classificação como ótimo ou bom e 25,6% foram classificadas como regular, ruim ou péssimo (Figura 3.3). Esses números referem-se às condições do pavimento, geometria da via e sinalização, e contemplou a malha pavimentada federal na sua totalidade e as principais rodovias pavimentadas estaduais (CNT, 2017b).

Figura 3.3 - Condições das rodovias pavimentadas brasileiras em 2017 com dados da CNT (2017b)



Os problemas de gerenciamento das rodovias comprometem o desempenho do transporte rodoviário de cargas e passageiros uma vez que a conservação e manutenção das mesmas dependem diretamente de um gerenciamento bem planejado. Vias com gerências inadequadas elevam os custos operacionais, tempos de deslocamento, comprometem a segurança viária e o conforto dos usuários.

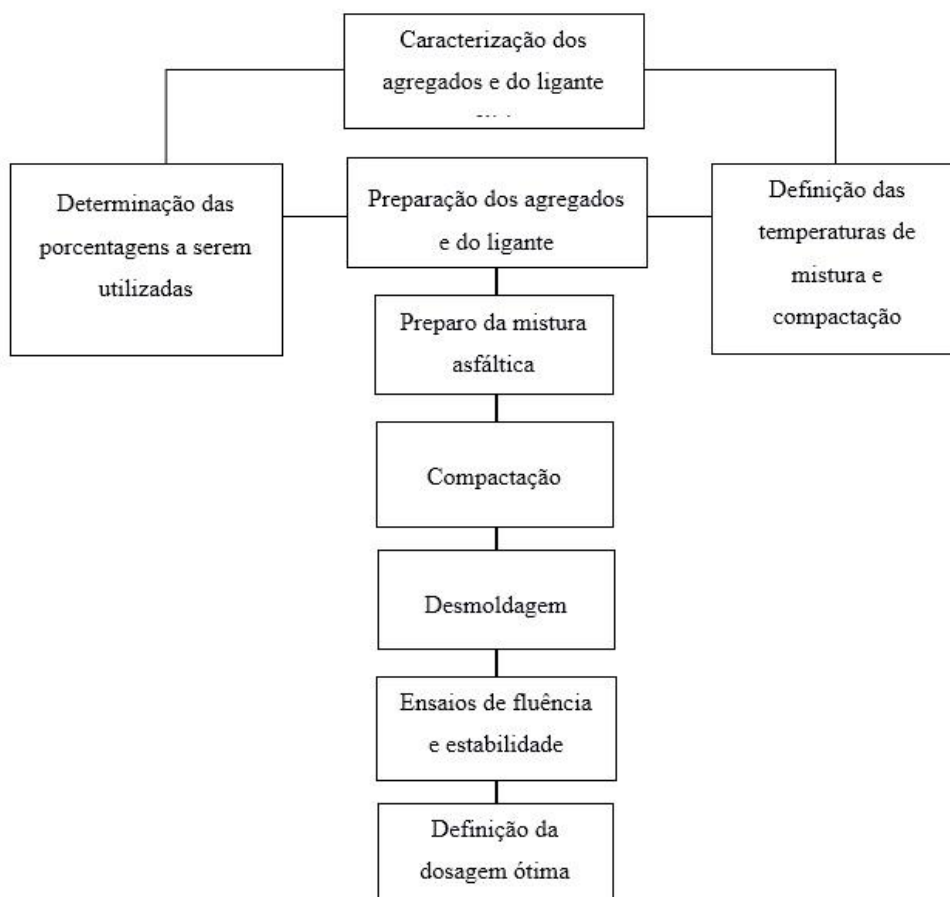
CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Este estudo tem como propósito pesquisar e analisar os efeitos ou danos causados a massa asfáltica quando submetidas a altas temperaturas. Portanto, a pesquisa é de ordem quantitativa, uma vez que serão realizados ensaios em laboratórios do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia.

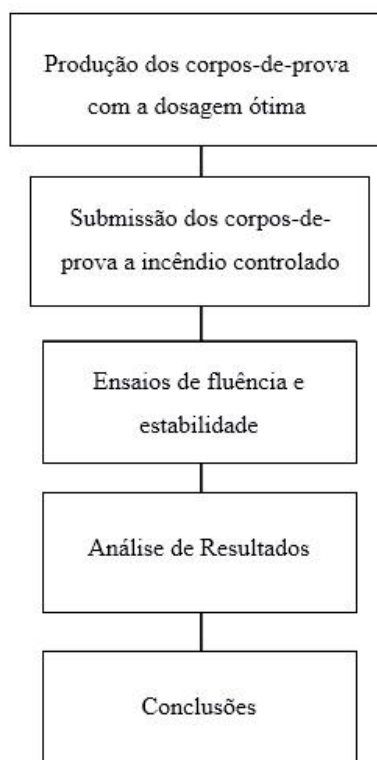
A primeira etapa da metodologia consistiu na produção dos corpos-de-prova de concreto asfáltico tendo como base a norma 031 – ES (DNIT, 2006) e ME 043 (DNER, 1995), sendo complementada por BERNUCCI et al. (2008). O esquema a seguir (Figura 4.1) sintetiza a primeira etapa da metodologia.

Figura 4.1 - Primeira etapa da metodologia



A segunda etapa da metodologia consistiu na exposição dos corpos-de-prova a elevadas temperaturas por meio de incêndio controlado realizado em parceria com o Centro de Operações e Tecnologias de Incêndios (COTI) do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás (CBMGO), sediado na cidade de Anápolis - GO. O esquema a seguir (Figura 4.2) representa a síntese segunda etapa da metodologia.

Figura 4.2 - Segunda etapa da metodologia



Por meio dos valores dos ensaios Marshall foi possível determinar se a massa asfáltica é afetada quando submetida a temperaturas elevadas, sendo possível detectar as alterações de estabilidade e fluência do material analisado.

4.1 MATERIAIS EMPREGADOS

O material pétreo empregado neste estudo foi extraído de rocha do tipo basalto, obtido pela Pedreira Pedra Britada, localizada no município de Goianápolis-GO, como apresentado na Figura 4.3. Os agregados provenientes de basalto foram escolhidos devido serem comuns na região, sendo comum a sua utilização na composição de massas asfálticas utilizadas na pavimentação na região metropolitana de Goiânia.

Figura 4.3 - Pedreira na região metropolitana de Goiânia



Foram coletados brita 1, brita 0 e pó de pedra, que foram utilizados na moldagem dos corpos-de-prova pelo método de dosagem Marshall. O material coletado foi embalado, identificado e remetidos ao Laboratório de Pavimentação do IFG – Campus Goiânia para a execução dos ensaios de caracterização.

O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70 fornecido pelo Grupo Disbral – Distribuidora Brasileira de Asfalto, localizado em Aparecida de Goiânia-GO. O ligante asfáltico CAP 50/70 foi escolhido devido ao fato de ser um dos mais utilizados no Brasil na pavimentação asfáltica flexível.

4.2 PRIMEIRA ETAPA DA METODOLOGIA

Os ensaios e procedimentos laboratoriais propostos para este trabalho, foram executados conforme as normas brasileiras. Estes ensaios e procedimentos foram realizados utilizando as dependências do Laboratório de Pavimentação do IFG – Campus Goiânia. O Quadro 4.1 apresenta um resumo das normas utilizadas neste trabalho.

Quadro 4.1 - Ensaios e normas

Material	Ensaio	Norma
Brita	Granulometria	DNER-ME 083/1998
Brita	Massa Específica	ABNT-NBR 6458/2016
Brita	Índice de Forma	ABNT-NBR 7809/2006
Brita	Abrasão “Los Angeles”	DNER-ME 035/1998
Pó de Pedra	Granulometria	DNER-ME 083/1998
Pó de Pedra	Massa Específica	ABNT-NBR 6508/1984
CAP 50/70	Penetração	DNIT 155/2010-ME
CAP 50/70	Viscosidade Saybolt-Furol	ABNT-NBR14950/2003
CAP 50/70 e Brita	Adesividade	DNER-ME 078/1994
Mistura Asfáltica	Marshall	DNER-ME 043/1995

4.2.1 Agregados

Para a verificação e determinação das características dos agregados utilizados neste trabalho, foram realizados ensaios de granulometria, massa específica, abrasão “Los Angeles” e índice de forma.

4.2.1.1 Granulometria

A determinação da composição granulométrica dos agregados utilizados neste trabalho seguiu as especificações da norma ME 083 (DNER, 1998) sendo complementada pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009). O Quadro 4.2 apresenta as peneiras utilizadas para a análise granulométrica da brita 0, brita 1 e pó de pedra.

O Quadro 4.3 apresenta as massas mínimas por ensaio conforme a norma ME 083 (DNER, 1998).

Quadro 4.2 - Peneiras utilizadas na granulometria dos agregados

Materiais		
Brita 0	Brita 1	Pó de Pedra
12,50 mm	25,00 mm	6,30 mm
9,50 mm	19,10 mm	4,75 mm
6,30 mm	12,50 mm	2,00 mm
4,75 mm	9,50 mm	1,18 mm
2,00 mm	6,30 mm	0,60 mm
-	4,75 mm	0,42 mm
-	2,00 mm	0,30 mm
-	-	0,15 mm
-	-	0,075 mm

Quadro 4.3 - Massa mínima, por amostra de ensaio (adaptado da norma DNER ME 083/98)

Dimensão Máxima Característica do Agregado (mm)	Massa Mínima da Amostra de Ensaio (kg)
Agregados Miúdos: 4,8	1
Agregados Graúdos:	
9,5	5
19,0	7
25,0	10
38,0	15
50,0	20

Para a execução do peneiramento, as amostras dos materiais foram secas em estufa a uma temperatura de 110 °C. Após o resfriamento dos materiais, determinou-se a massa seca de cada um.

No procedimento de peneiramento, o conjunto de peneiras referentes a cada tipo de agregado foi encaixado no peneirador mecânico, seguindo uma ordem decrescente do topo para a base referente a abertura da malha das peneiras. Ressalta-se que antes desse processo, as peneiras foram devidamente limpas e verificadas. Decorrido o tempo de peneiramento, aferiu-se as massas retidas em cada uma das peneiras para posteriormente construir as curvas granulométricas.

Após os ensaios de granulometria, os materiais foram peneirados com o objetivo de enquadrar os mesmos na Faixa C do DNIT, conforme a Tabela 4.1, separando-os de acordo com o diâmetro de cada peneira. Dessa forma, obtém-se uma maior precisão na composição granulométrica dos corpos-de-prova de massa asfáltica. As frações de materiais foram então acondicionadas em sacos plásticos e identificados conforme a granulometria.

Tabela 4.1 - Composição de concreto asfáltico (adaptado da norma DNIT ES 031/2006)

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 (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de Ligação e Rolamento	4,5 - 9,0 Camada de Rolamento	± 0,3%

4.2.1.2 Massa Específica

A determinação da massa específica do agregado graúdo procedeu-se com base na NBR 6458 (ABNT, 2016). É a relação entre a quantidade de grãos e o volume e é determinada pelo ensaio de massa específica. Em um primeiro momento o agregado foi lavado e deixado de molho por no mínimo 24 horas para absorção. A amostra foi subdividida em duas frações, para uma aferição mais segura do lote. Retirou-se o excesso de umidade. Em seguida determinou-se a Massa Saturada Seca. Por último, as frações de amostras foram submersas em água destilada para a determinação da massa imersa. Levou-se a amostra para estufa a 110 °C para a determinação da massa seca.

O procedimento da determinação de massa específica do agregado miúdo foi realizado seguindo a norma NBR 6508 (ABNT, 1984). Foram pesadas duas amostras de 60 g secas em estufas a 110 °C e transferidas para picnômetros. Colocou-se água destilada até a metade do volume do recipiente e aplicou-se vácuo, agitando-se o picnômetro. Em seguida acrescentou-se água destilada até 1 cm abaixo da base do gargalo e aplicou-se novamente o vácuo. Em seguida completou-se com o líquido até a marca de referência. O próximo passo foi a aferição de massas para os cálculos.

4.2.1.3 Abrasão “Los Angeles”

O ensaio seguiu os parâmetros da norma ME 035 (DNER, 1998). O ensaio corresponde a aferição do desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado no equipamento "Los Angeles juntamente com uma carga abrasiva, submetida a um determinado número de revoluções da máquina a uma velocidade de 30 rpm a 33 rpm. O desgaste é normalmente expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malhas quadradas de 1,7 mm. A quantidade de material a ser utilizada e o número de rotações foram definidas com base na Tabela 4.2, sendo que a gradação em questão a B.

Tabela 4.2 - Graduação para ensaio de abrasão (adaptado da norma DNER ME 035/1998)

Peneiras		Amostra – Massa Parcial em Gramas						
Abertura (mm)								
Passa.	Ret.	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500±50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500±50	-	-
50	38	-	-	-	-	2500±50	5000±50	-
38	25	1250±25	-	-	-	-	5000±25	5000±25
25	19	1250±25	-	-	-	-	-	5000±25
19	12,5	1250± 0	2500±10	-	-	-	-	5000±25
12,5	9,5	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500±10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500±10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000±10	-	-	-
Massa Total (g)		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±100	10000±75	10000±50
Nº de Rotações		500	500	500	500	1000	1000	1000

O material foi lavado e seco em estufa à temperatura de 110 °C, sendo verificado seu peso posteriormente. A definição da carga abrasiva foi com base na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Carga Abrasiva (adaptado da norma DNER ME 035/1998)

Graduação	Número de Esferas	Massa da Carga (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3300 ± 20
D	6	2500 ± 15
E	12	5000 ± 25
F	12	5000 ± 25
G	12	5000 ± 25

Decorrido o tempo na máquina “Los Angeles”, retirou-se o material do tambor e peneirou na malha de 1,7 mm, rejeitando o passante. Lavou-se o material e secou-se na estufa a 110 °C, sendo posteriormente aferido a massa para efeitos de cálculos.

4.2.1.4 Índice de Forma

O índice de forma (IF) é empregado para limitar a utilização de agregados lamelares na pavimentação asfáltica, pois os mesmos comumente apresentam uma menor resistência que os agregados de formato cúbico, e quando aplicados em revestimentos podem gerar superfícies polidas e escorregadias, além de consumir uma maior quantidade de CAP.

O ensaio foi baseado na norma NBR 7809 (ABNT, 2006). Este ensaio foi realizado após o ensaio de granulometria, utilizando-se as frações retidas nas peneiras. As frações passantes nas peneiras com abertura de 9,5 mm e com porcentagem menor que 5% foram desprezadas. Aplicou-se uma equação utilizando o material que sobrou para determinar o número de grãos para as peneiras de 9,5 e 12,5 mm. Em seguida, aferiu-se as dimensões necessárias de cada grão com o auxílio do paquímetro digital.

4.2.2 Ligantes Asfálticos

Para a verificação e determinação das características do ligante asfáltico utilizado neste trabalho, foram realizados ensaios de penetração, viscosidade Saybolt-Furol e adesividade.

4.2.2.1 Ensaio de Penetração

O ensaio baseou-se na norma ME 155 (DNIT, 2010), que dá os parâmetros para classificação por penetração do CAP a 25 °C. A penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga, tempo e temperatura.

Para alcançar a fluidez suficiente, a amostra de CAP 50/70 foi aquecida em estufa, agitando-a de forma constante para obter a homogeneização. Posteriormente, a amostra foi transferida para o recipiente apropriado, completando até o limite da borda. A amostra foi submetida ao resfriamento à temperatura ambiente até atingir o necessário especificado pela norma. O próximo passo foi transferir a amostra de CAP para a cuba de transferência e submetida ao banho de água.

O penetrômetro, conforme mostrado na Figura 4.4, foi calibrado, sendo adicionado um peso de 50 gramas acima da agulha, completando 100 gramas todo o conjunto. Preencheu-se a cuba de transferência com água do banho de água até a submersão total da amostra e colocou-se a cuba sobre o prato do equipamento. Ajustou-se a agulha à superfície da amostra de ligante e também se ajustou o ponteiro do equipamento de penetração na posição inicial (zero).

Figura 4.4 - Penetrômetro



Foram realizados ensaios com três amostras de CAP 50/70, liberando-se a agulha e obtendo-se a penetração em 5 segundos. Conforme recomendações, foram realizadas três determinações diferentes pontos superfície da amostra de ligante.

4.2.2.2 Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol

O ensaio de viscosidade Saybolt-Furol é normatizado pela NBR 14950 (ABNT, 2003) e é definido como o tempo em segundos em que 60 ml de amostra fluem por meio do orifício viscosímetro, numa determinada temperatura. O equipamento utilizado é o viscosímetro Saybolt-Furol apresentado na Figura 4.5.

Aqueceu-se 450 gramas de amostra de CAP 50/70 em chapa aquecedora, verificando a temperatura para evitar superaquecimento. Homogeneizando, o ligante foi aquecido 10 °C da temperatura de ensaio. Antes do ensaio em si, todos os utensílios utilizados foram verificados e limpos.

Figura 4.5 - Equipamento Saybolt-Furol



Com a temperatura do banho ajustada, a amostra de CAP foi colocada no viscosímetro e esperou-se até que se atingir-se o equilíbrio térmico. Para 135 °C, que é a temperatura exigida para cimentos asfálticos, retirou-se a rolha e simultaneamente acionou-se o cronômetro, deixando o CAP escoar. O ensaio termina quando se atinge a marca de 60 ml no frasco receptor. O ensaio foi repetido para mais duas temperaturas de forma a obter a curva de Viscosidade x Temperatura.

4.2.2.3 Ensaio de Adesividade

Para o ensaio utilizou-se como parâmetro a norma ME 078 (DNER,1994) que determina a propriedade de aderência entre o ligante e o agregado. Pesou-se 500 gramas de agregado graúdo passante na peneira de 19 mm e retido na de 12,7 mm, sendo que esse material foi lavado e deixado de molho em água destilada e seco em estufa a uma temperatura de 120 °C por 2 horas.

O CAP 50/70 foi aquecido em estufa a 120 °C e a temperatura do agregado reduzida para 100 °C. O ligante foi mistura completamente ao agregado, sendo que a quantidade foi de 17,5 gramas. O material foi então deixado em uma superfície lisa para resfriamento, sendo depois colocado em um Becker coberto com água destilada em uma estufa a 40 °C por 72 horas. O Resultado é satisfatório se após decorrido esse tempo, não houver nenhum deslocamento entre o ligante e o agregado. A Figura 4.6 mostra parte da execução do ensaio de adesividade.

Figura 4.6 - Ensaio de adesividade



Em caso de reprovação, é necessário a adição de aditivo melhorador de adesividade. Para isso, deve-se repetir o ensaio com três porcentagens diferentes de aditivo em relação à massa de CAP. Normalmente essa porcentagem gira em torno de 0,8%.

4.2.3 Mistura Asfáltica

Os ensaios relacionados às misturas asfálticas foram baseados na norma ME 043 (DNER, 1995) de dosagem Marshall. Conforme citado anteriormente, a granulometria utilizada foi a faixa C do DNIT e o ligante empregado é o CAP 50/70.

Determinou-se as porcentagens, em massa, em que os agregados e o ligante seriam misturados, e calculou-se a quantidade de cada um deles para produzir um corpo de prova. Os agregados, separados nas frações conforme a faixa C do DNIT, foram secos em estufa a 110 °C. Como regra, para um corpo de prova de 100 mm de diâmetro e 60 mm de altura é necessário cerca de 1200 gramas de massa asfáltica.

Foram escolhidas as temperaturas de mistura e de compactação, tendo como base a curva viscosidade x temperatura do ligante utilizado. Ressalta-se que a temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150SSF (segundos Saybolt Furol), de preferência entre 75 e 95SSF. A temperatura do ligante não deve ser inferior a 107 °C nem superior a 177 °C.

A temperatura de compactação deve ser tal que o ligante apresente viscosidades na faixa de 125 a 155SSF. Os teores de asfalto para os diferentes grupos de corpos-de-prova a serem moldados adotados foram 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%. Para cada grupo tem-se o mínimo de 3 corpos-de-prova.

Colocou-se no recipiente de mistura o agregado aquecido e misturou-se a seco por 5 segundos. Como a mistura foi manual, fez-se uma depressão no centro do agregado seco misturado e verteu-se o CAP. Com auxílio de um fogão industrial e utilizando tela de amianto, efetuou-se a mistura rapidamente, até completar a cobertura dos agregados, conforme mostrado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Mistura asfáltica



Após colocada toda a mistura no molde, ajeitou-se a mistura com uma espátula aquecida, 15 vezes em volta do perímetro e no interior. Aplicou-se o número estabelecido de 75 golpes de cada lado da mistura com o soquete de compactação especificado (Figura 4.8).

Figura 4.8 - Compactação



Após a compactação, esperou-se alguns minutos para em seguida realizar a desmoldagem (Figura 4.9) dos corpos-de-prova. Os mesmos foram colocados em uma superfície lisa e plana e deixado em repouso à temperatura ambiente, respeitando o período mínimo de 12 horas exigido pela norma.

Figura 4.9 - Desmoldagem



O próximo passo foi a aferição das dimensões dos corpos-de-prova com auxílio de paquímetro digital. Foram aferidas a altura em quatro posições diferente e o diâmetro.

Em seguida, e determinou-se as massas secas (M_s) e submersa em água (M_{Ssub}). Com estes valores foi possível obter a massa específica aparente dos corpos-de-prova (G_{mb}), que, por comparação com a massa específica máxima teórica (DMT), foi possível obter as relações volumétricas típicas da dosagem.

Para a realização dos ensaios mecânicos, colocou-se os corpos-de-prova submersos em banho-maria a 60°C por 30 a 40 minutos. Em seguida, os corpos-de-prova foram colocados no molde de compressão e encaminhados à prensa e submetidos a esforços até o seu rompimento.

Determinou-se então, por meio de prensa, conforme mostrado na Figura 4.10, os parâmetros mecânicos de estabilidade e fluência. Destaca-se que ambos os parâmetros são obtidos de forma simultânea.

Figura 4.10 - Rompimento dos corpos-de-prova



Com a finalização dos ensaios, definiu-se então a dosagem ótima, a partir da qual foram fabricados os corpos-de-prova que foram submetidos a elevadas temperaturas.

4.3 SEGUNDA ETAPA DA METODOLOGIA

Após a primeira etapa da metodologia, compactou-se corpos-de-prova com a dosagem ótima para serem submetidos a elevadas temperaturas por meio de incêndio controlado. Esta etapa contou com a contribuição e amparo do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás (CBMGO). O experimento foi realizado no Centro de Operações e Tecnologia de Incêndio (COTI), situado na cidade de Anápolis-GO.

4.3.1 Submissão dos Corpos-de-Prova a Elevadas Temperaturas

Foram definidos que pares de corpos-de-prova seriam expostos diretamente ao incêndio controlado para simular incêndio sobre uma via pavimentada por períodos de 5, 10, 15 e 20 minutos.

Os tempos de exposição dos corpos-de-prova ao incêndio controlado tiveram como base o trabalho de LIMA (2005), em que para estudos do comportamento de concreto de cimento Portland em altas temperaturas, os tempos de exposição foram de 30 minutos. Como a massa asfáltica é menos resistente do que o concreto de cimento Portland, decidiu-se que os tempos de exposição seriam menores, sendo definidos conforme orientação dos bombeiros do COTI.

Pares de corpos-de-prova também foram expostos ao calor a uma distância de 1,5 metros do foco de incêndio pelos mesmos tempos, conforme mostra a Figura 4.11, a fim de avaliar o efeito do calor excessivo do incêndio às margens de rodovias.

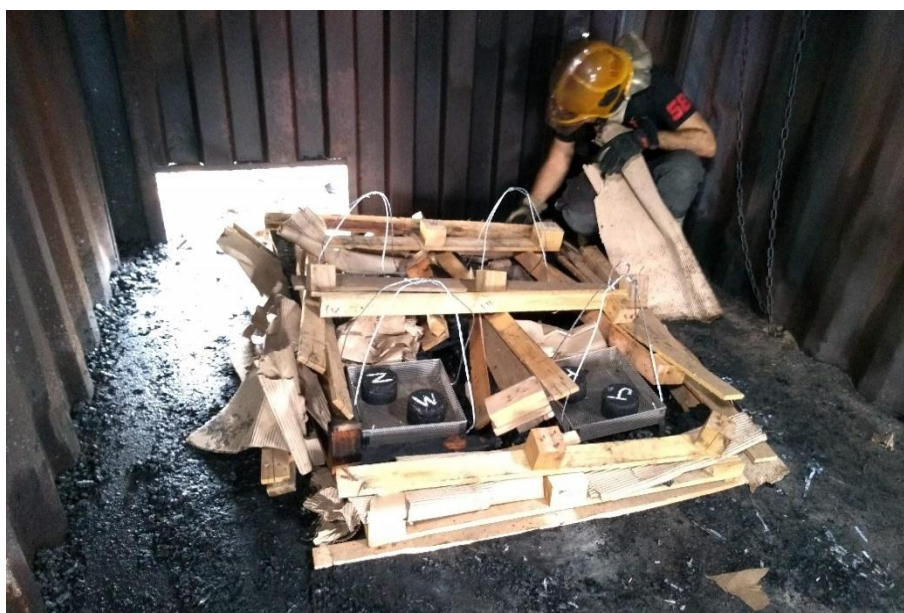
Na preparação do experimento, conforme apresentado na Figura 4.12, foram colocados materiais como madeiras e papelões para combustão ao redor dos corpos-de-prova e definidos a ordem de retirada dos mesmos.

Ressalta-se que o experimento foi realizado em um contêiner, utilizado para o treinamento de bombeiros no combate a incêndios. Para uma maior segurança durante o procedimento, tinha-se a disposição um caminhão de combate a incêndios.

Figura 4.11 - Posicionamento de corpos-de-prova



Figura 4.12 - Preparação do experimento



Antes de iniciar o incêndio, aferiu-se a temperatura de corpos-de-prova na temperatura ambiente.

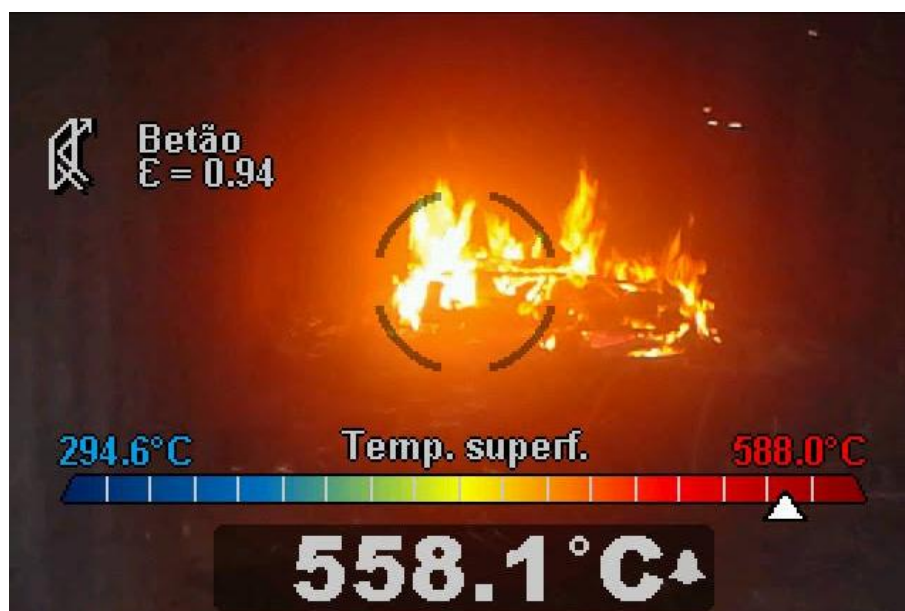
Iniciado o incêndio, conforme mostrado na Figura 4.13, apenas os bombeiros, vestidos com equipamentos especiais, manipulavam diretamente o experimento. Durante o experimento foi monitorado a temperatura do incêndio por meio de um detector térmico com câmera integrada Bosch GIS 1000 C Professional, conforme mostrado na Figura 4.14. Este detector térmico possui medição precisa e registro fácil da temperatura e dos níveis de umidade. Permite ainda

documentar de forma instantânea os valores aferidos em fotos e transferir para outro dispositivo via bluetooth ou cabo de dados.

Figura 4.13 - Experimento em andamento



Figura 4.14 - Aferição de temperatura



Ao passo que os corpos-de-prova eram retirados do incêndio, era feito a aferição da temperatura dos mesmos.

Após o experimento de exposição ao incêndio, os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios mecânicos para determinação da estabilidade e fluência, afim de realizar comparação dos efeitos do incêndio.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de agregados e mistura asfáltica segundo a metodologia adotada. Também é analisado os dados obtidos com a submissão dos corpos-de-prova a elevadas temperaturas por meio do incêndio controlado.

5.1 AGREGADOS

Nos ensaios foram definidas as seguintes características dos agregados: granulometria, abrasão “Los Angeles”, massa específica e índice de forma. Foram coletadas amostras dos agregados brita 0, brita 1 e pó de pedra, as quais passaram por peneiramento mecânico para a obtenção de dados, permitindo a construção da curva granulométrica. As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os resultados da composição granulométrica da brita 1, brita 0 e pó de pedra. Também está indicado a dimensão máxima característica de cada agregado. Cabe ressaltar que a dimensão máxima característica (DMC) dos agregados corresponde à abertura nominal, em mm, da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

Tabela 5.1 - Dados granulométricos da brita 1 e 0

Brita 1						Brita 0			
Peso Seco (g)		10980,00				8460,00			
Peneiras	(mm)	Massa Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pas.	Massa Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pas.
1"	25,00	0,00	0,00	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	-
3/4"	19,10	84,57	0,8	0,8	99,2	0,0	0,0	0,0	100,0
1/2"	12,50	8720,00	79,6	80,3	19,7	6,5	0,1	0,1	99,9
3/8"	9,50	2058,78	18,8	99,1	0,9	1635,6	19,4	19,5	80,5
1/4"	6,30	87,79	0,8	99,9	0,1	5160,0	61,2	80,6	19,4
Nº 4	4,75	0,00	0,0	99,9	0,1	1355,6	16,1	96,7	3,3
Nº 10	2,00	-	-	-	-	263,1	3,1	99,8	0,2
Fundo	-	10,94	0,1	100,0	0,0	16,6	0,2	100,0	100,0
Total	-	10962,08	100,0	100,0	0,0	8437,1	100,0	100,0	0,0
DMC		19 mm				12,5 mm			

Tabela 5.2 - Dados granulométricos do pó de pedra

Pó de Pedra					
Peso Seco (g)		1191,68			
Peneiras	(mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Ret. Acum.	% Pas.
1/2"	12,50	-	-	-	-
3/8"	9,50	-	-	-	-
1/4"	6,30	0,00	0,0	0,0	100,0
Nº 4	4,75	12,20	1,0	1,0	99,0
Nº 10	2,00	418,44	35,2	36,2	63,8
Nº 16	1,18	187,94	15,8	52,1	48,0
Nº 30	0,60	187,70	15,8	67,8	32,2
Nº 40	0,42	62,85	5,3	73,1	26,9
Nº 60	0,30	74,54	6,3	79,4	20,6
Nº 100	0,15	49,13	4,1	83,5	16,5
Nº 200	0,075	74,25	6,3	89,8	10,2
Fundo	-	121,42	10,2	100,0	0,0
Total	-	1188,47	100,0	0,0	100,0
DMC			4,8 mm		

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam as curvas granulométricas dos agregados analisados a partir dos dados obtidos do peneiramento mecânico. Apresentam também os limites indicados para utilização (inferiores e superiores) conforme a norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 5.1 - Curva granulométrica da brita 1

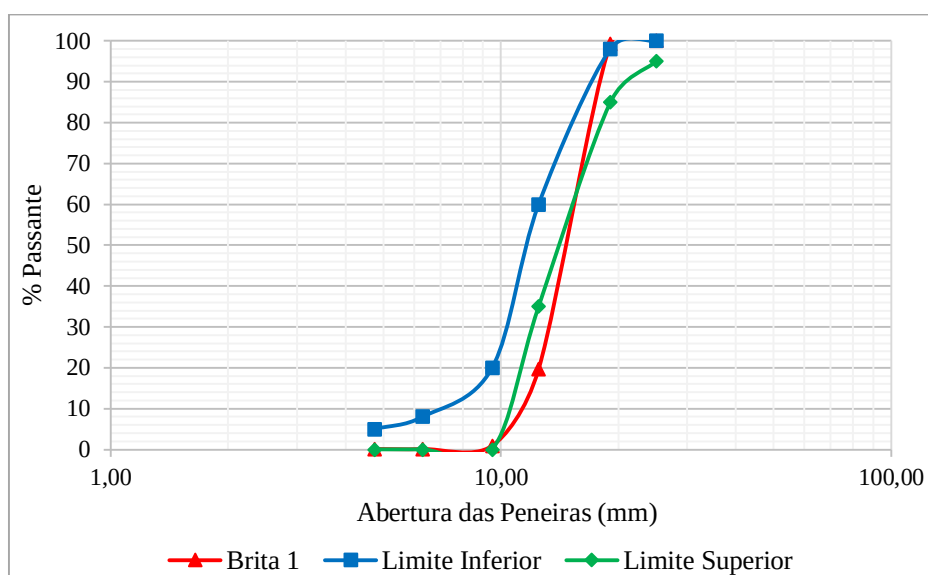


Figura 5.2 - Curva granulométrica da brita 0

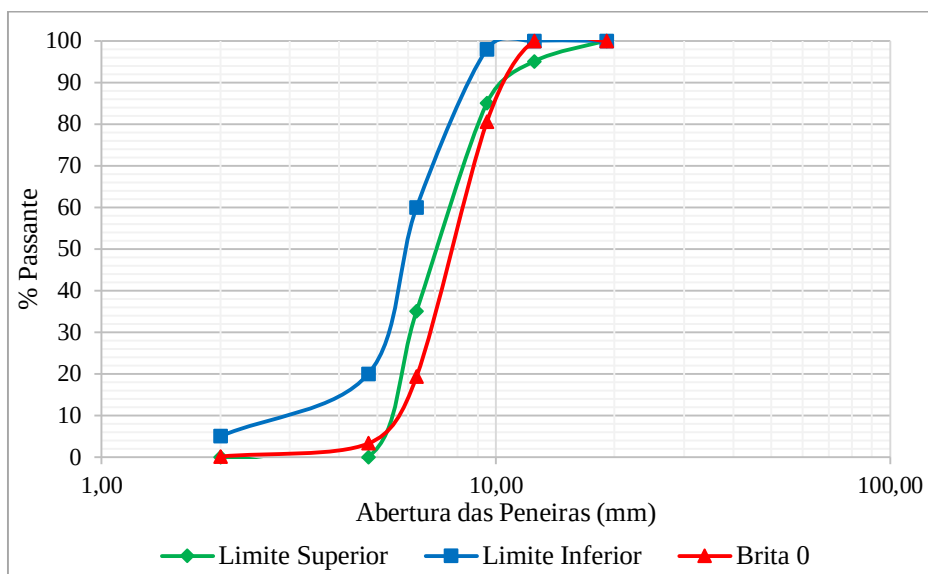
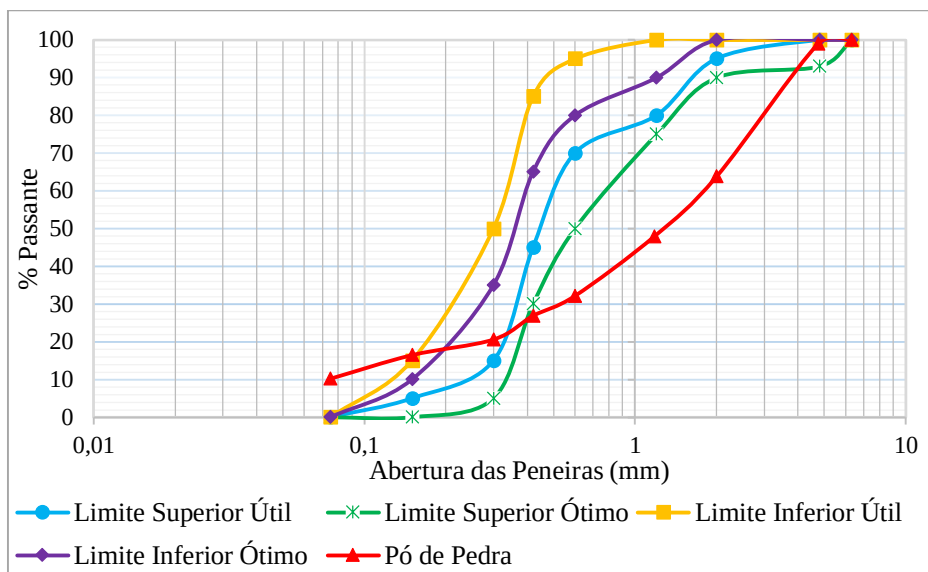


Figura 5.3 - Curva granulométrica do pó de pedra



Conforme demonstra os gráficos, nenhum dos agregados analisados ficou dentro dos limites indicados pela norma. Entretanto, para a continuação dos trabalhos, no momento de produzir as massas asfálticas os agregados foram ajustados manualmente na granulometria da Faixa C do DNIT, sendo separados em frações de cada peneira para a composição dos corpos-de-prova.

Em relação aos ensaios de massa específica, as britas 1 e 0 obtiveram $2,94 \text{ g/cm}^3$ e $2,96 \text{ g/cm}^3$ respectivamente, e o pó de pedra obteve $2,85 \text{ g/cm}^3$. Quanto ao índice de forma, o valor do agregado graúdo foi de 1,41, inferior a 3, ficando, portanto, dentro das conformidades de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009). Já para o ensaio de abrasão “Los Angeles”, o resultado

foi de 14%, sendo inferior a 50% em massa do material, conforme o exigido pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

5.2 LIGANTE ASFÁLTICO

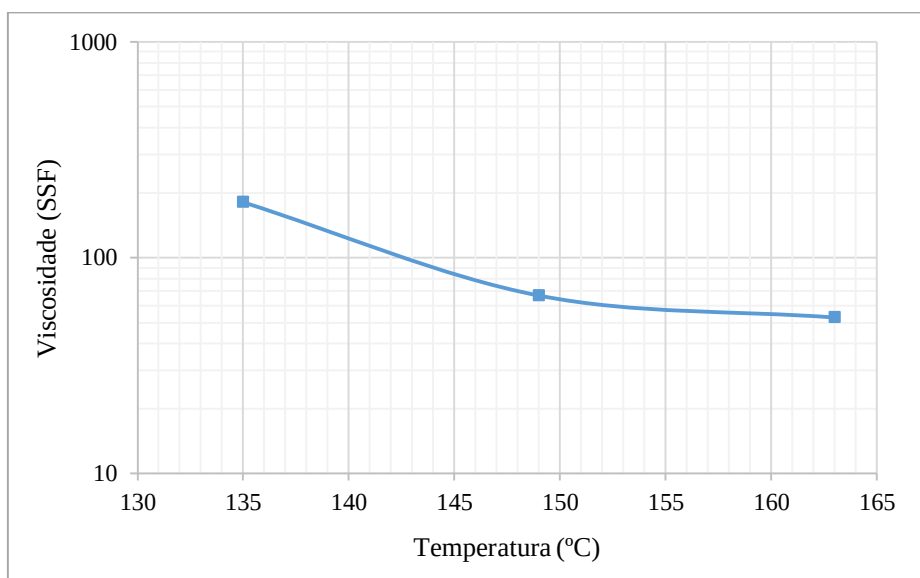
Foram realizados os seguintes ensaios para o ligante asfáltico CAP 50/70: penetração, viscosidade Saybolt-Furol e adesividade. As demais características foram obtidas por meio do trabalho realizado por Silva, Siqueira e Severino (2016), onde foi utilizado o ligante do mesmo distribuidor que este trabalho utiliza, sendo que estas características são: ponto de Fulgor, densidade, massa específica e ponto de amolecimento. A Tabela 5.3 apresenta a caracterização do CAP 50/70 utilizado.

Tabela 5.3 - Características do CAP 50/70

Característica	Unidade	Limite	Resultados
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	50 a 70	63
Ponto de amolecimento	°C	>46	50
Ponto de fulgor	°C	>235	>340
Massa Específica	g/cm ³	-	1,020

Em relação ao ensaio que define a determinação da viscosidade Saybolt-Furol de materiais betuminosos, ao analisar-se os valores obtidos, foi possível traçar a curva de Viscosidade x Temperatura do ligante asfáltico em questão, conforme apresentado pela Figura 5.4.

Figura 5.4 - Curva Viscosidade x Temperatura Saybolt-Furol



No ensaio de adesividade (Figura 5.5) entre o CAP 50/70 e o agregado utilizado, verificou-se que não houve boa adesividade. Sendo assim, foi necessário a adição de um melhorador de adesividade, também conhecido como DOPE. O DOPE *d-fix* fornecido pelo Grupo Disbral, é composto por aditivos químicos termicamente estáveis que promove a afinidade físico/química na interface ligante/agregado, corrigindo a deficiência de aderência entre agregados e ligantes. A dosagem do melhorador foi testada em laboratório com 0,8%, 0,9% e 1,0% em relação a massa do CAP.

Figura 5.5 - Ensaio de adesividade com adição de DOPE com 0,8%, 0,9% e 1,0% respectivamente.



Todos as três concentrações de DOPE *d-fix* apresentaram bons resultados, contudo foi adotado posteriormente a dosagem de 0,9%, para uma maior margem de segurança quanto a dosagem.

5.3 MISTURA ASFÁLTICA PELO MÉTODO MARSHALL

Neste trabalho as misturas foram produzidas de acordo com método de Dosagem Marshall, obtendo valores para estabilidade, fluência e outros. Os resultados obtidos foram verificados e comparados com os valores padrões regidos por norma.

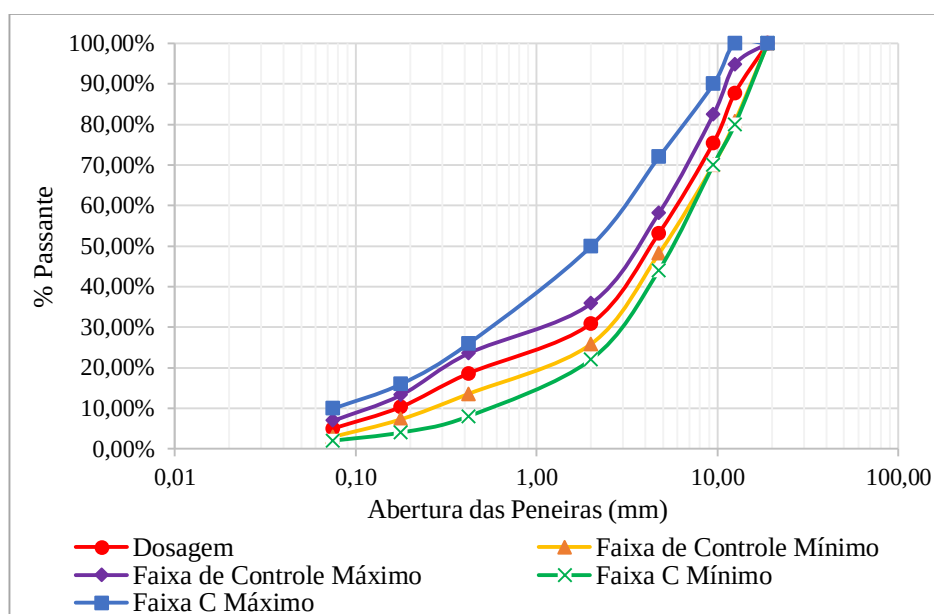
De acordo com Júnior e Rocha (2013), o teor dito “ótimo” de ligante asfáltico gira em torno de 5,0%. Bernucci *et al.* (2008) afirma que o teor “ótimo” de CAP situa-se entre 4,5% e 6,0%. Dessa forma, foram executadas dosagens com os seguintes teores: 4,0%, 4,5%, 5,0% 5,5% e 6,0%. Ainda segundo Júnior e Rocha (2013), o teor ideal de ligante foi determinado conforme a utilização frequente de teores próximos ao adotado na região de estudo.

A Tabela 5.4 mostra a composição granulométrica da mistura asfáltica na faixa C do DNIT de acordo com a Norma 031/2006 – ES. O material foi adequado separando-os nas peneiras 1/2", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 80 e N° 200. Na Figura 5.6 está apresentado o ajuste granulométrico da mistura.

Tabela 5.4 - Composição granulométrica

Peneira		Faixa de Controle			Faixa C - DNIT	
Número	mm	Mín. (%)	Dosagem (%)	Máx. (%)	Mín. (%)	Máx. (%)
3/4"	19,00	100,00	100,00	100,00	100	100
1/2"	12,50	80,71	87,71	94,71	80	100
3/8"	9,50	70,00	75,42	82,42	70	90
N°4	4,75	48,13	53,13	58,13	44	72
N° 10	2,00	25,84	30,84	35,84	22	50
N° 40	0,42	13,55	18,55	23,55	8	26
N° 80	0,177	7,26	10,26	13,26	4	16
N° 200	0,075	2,97	4,97	6,97	2	10

Figura 5.6 - Composição granulométrica da mistura - Faixa C



Conforme descrito na metodologia deste trabalho, foram executados ensaios com teores de ligante asfáltico de 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%. A composição granulométrica de cada corpo-de-prova foi enquadrada de acordo com a faixa de controle e um determinado teor de ligante asfáltico, conforme apresentado na Tabela 5.5. Ressalta-se que as porcentagens indicadas são em relação ao peso total de um corpo-de-prova de 1200 gramas.

Tabela 5.5 - Composição dos corpos-de-prova

Peneira / Teor de Ligante(%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
1/2 (%)	12,43	12,36	12,29	12,22	12,14
3/8 (%)	12,43	12,36	12,29	12,22	12,14
Nº4 (%)	22,43	22,36	22,28	22,21	22,14
Nº10 (%)	22,43	22,36	22,28	22,21	22,14
Nº40 (%)	12,43	12,36	12,29	12,22	12,14
Nº80 (%)	8,43	8,36	8,29	8,22	8,15
Nº200 (%)	5,43	5,36	5,29	5,22	5,15
Total (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Durante o processo de produção dos corpos-de-prova, o controle da temperatura foi fundamental para não alterar as características da mistura. As temperaturas de mistura e compactação, conforme mostrado na Tabela 5.6, foram determinadas com base na curva viscosidade-temperatura do CAP 50/70 utilizado. Ressalta-se que a temperatura do ligante asfáltico no momento de ser misturado aos agregados deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150SSF.

Tabela 5.6 - Temperatura de mistura e compactação dos corpos-de-prova

Temperatura	CAP 50/70
Mistura	150 °C
Compactação	138 °C

Produzidos os corpos-de-prova, foram aferidas as dimensões, massa seca (Ms) e submersa em água (Mssub), para determinação dos parâmetros necessários para se chegar ao teor de ligante “ótimo” do projeto. Os valores são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Parâmetros dos corpos-de-prova

Parâmetros	CAP 50/70				
Ligante (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Densidade do Agregado Graúdo (g/cm³)	2,950	2,950	2,950	2,950	2,950
Densidade do Agregado Miúdo (g/cm³)	2,850	2,850	2,850	2,850	2,850
Densidade do Ligante (g/cm³)	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020
Massa Específica Máxima Teórica - DMT (g/cm³)	2,700	2,677	2,654	2,632	2,610
Massa Específica Aparente - Gmb (g/cm³)	2,530	2,551	2,547	2,535	2,517
Volume de Vazios - Vv (%)	6,3	4,7	4,0	3,7	3,6
Volume de Vazios com Betume - VCB (%)	9,9	11,3	12,5	13,7	14,8
Vazios do Agregado Mineral - VAM (%)	16,2	16,0	16,5	17,4	18,4
Relação Betume/Vazios (%)	61,2	70,5	75,6	78,7	80,5

Os valores de estabilidade e fluência, foram obtidos por meio do rompimento dos corpos-de-prova em prensa. Os valores são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Estabilidade e fluência da mistura

Teor de Ligante (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
4,0	885,05	3,92
4,5	815,72	2,96
5,0	1128,78	4,93
5,5	619,86	3,20
6,0	705,50	3,62

O teor de projeto é selecionado a partir dos parâmetros de volume de vazios (V_v), relação betume/vazios (RBV) e estabilidade para 75 golpes, conforme a norma 031/2004 – ES (DNIT, 2004). A Tabela 5.9 apresenta os limites desses parâmetros para a Faixa C do DNIT.

Tabela 5.9 - Requisitos de dosagem de concreto asfáltico

Parâmetros	Método de Ensaio	Faixa C – Camada de Rolamento
V_v (%)	DNER-ME 043	3 – 5
RBV (%)	DNER-ME 043	75 – 82
Estabilidade (kgf)	DNER-ME 043	Mín. 500

Relacionando graficamente os valores de estabilidade e os parâmetros dos corpos-de-prova com os teores de CAP utilizados (Figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12), determina-se o teor ótimo de ligante da mistura asfáltica produzida.

Figura 5.7 - Teor de ligante x Gmb

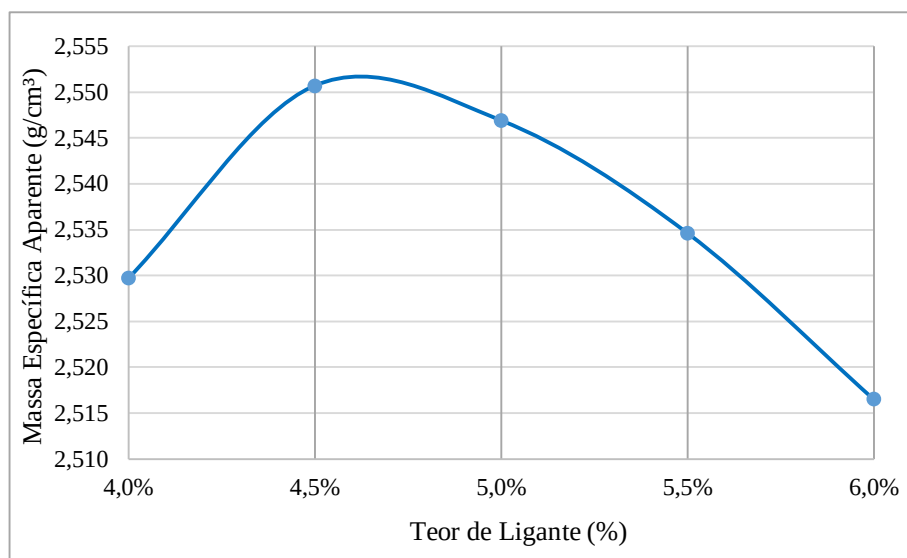


Figura 5.8 - Teor de ligante x DMT

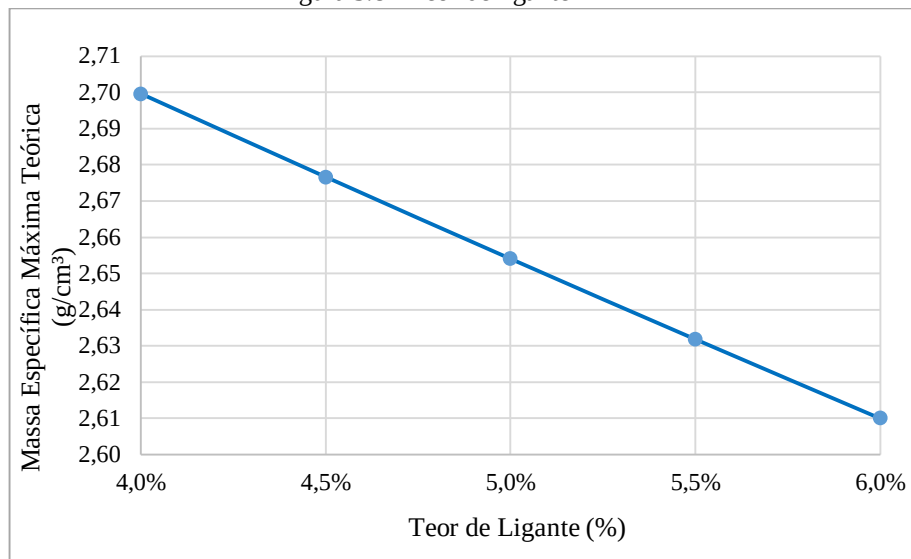


Figura 5.9 - Teor de ligante x Vv

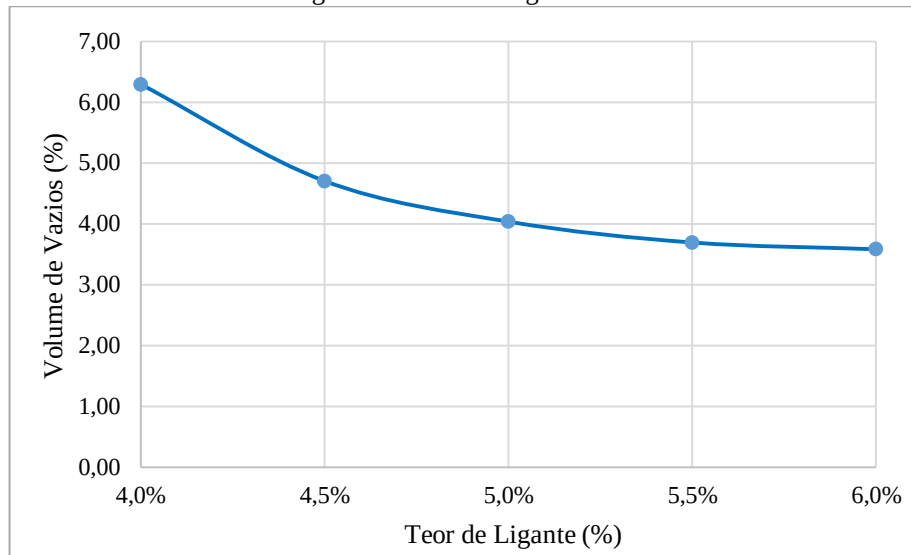


Figura 5.10 - Teor de ligante x VAM

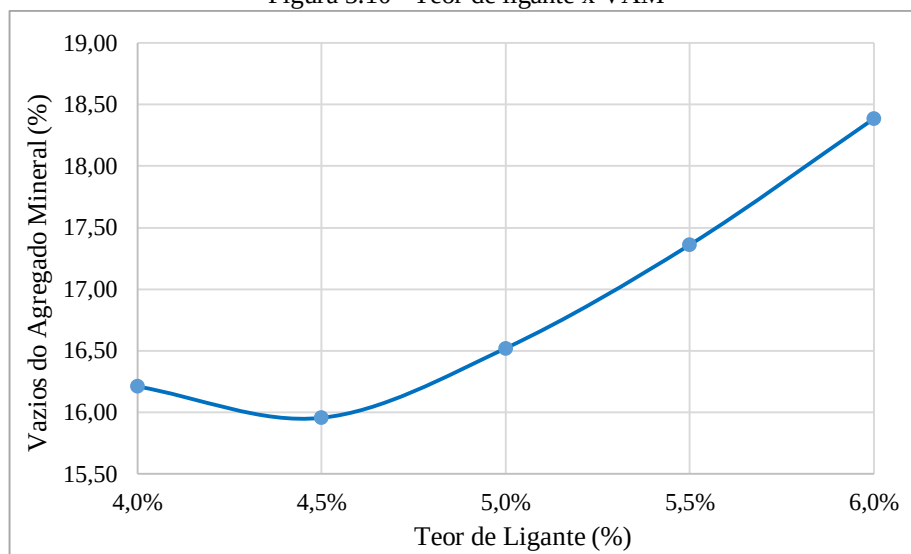


Figura 5.11 - Teor de ligante x RBV

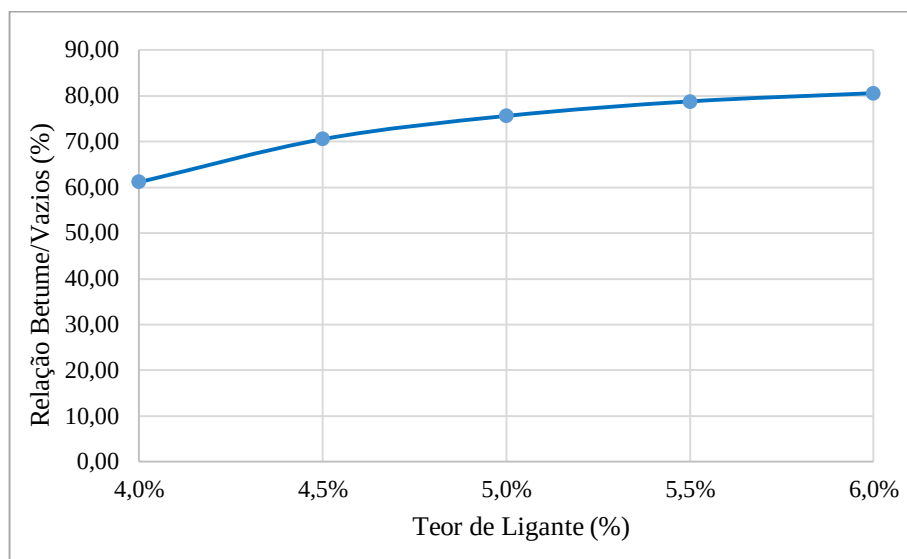
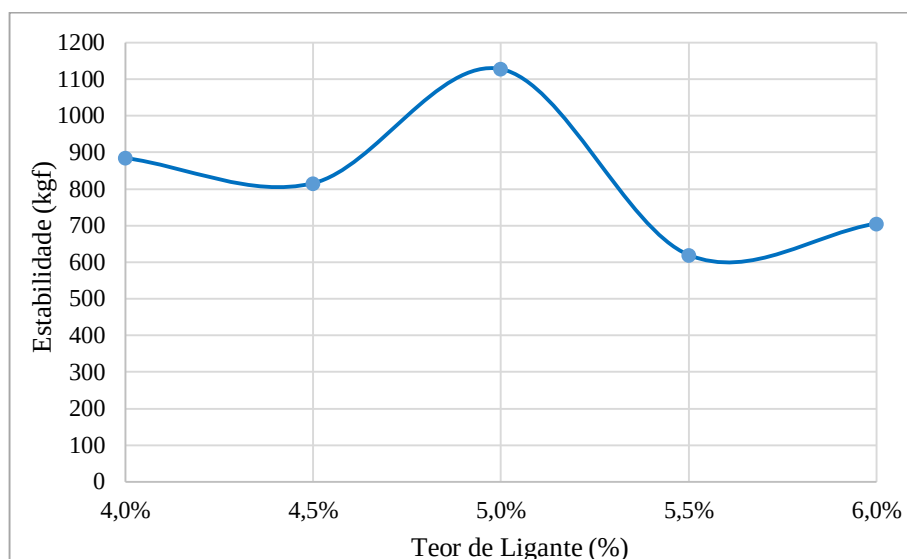


Figura 5.12 - Teor de ligante x Estabilidade



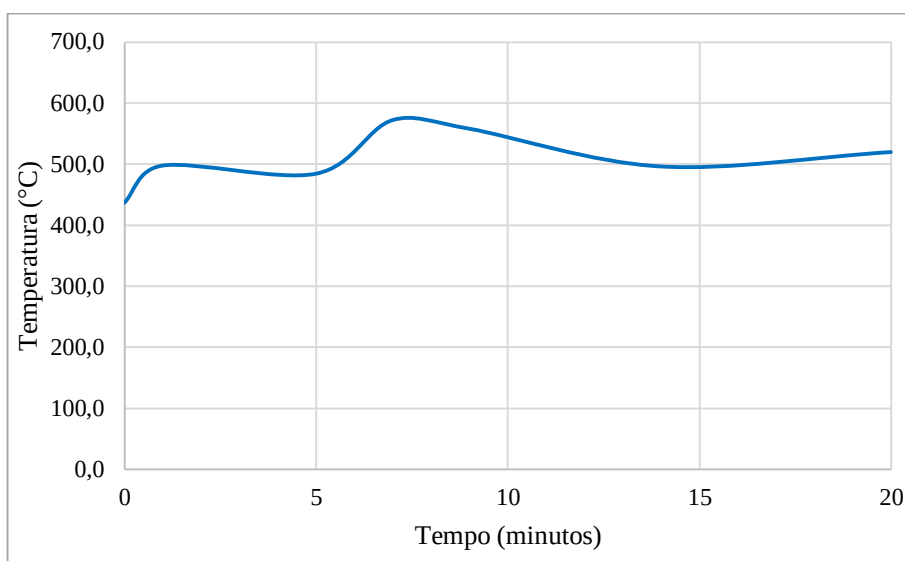
A escolha do teor de ligante asfáltico foi baseado no volume de vazios correspondente a cerca de 4,0% conforme citado por Napa (1982) *apud* Bernucci *et al* (2008). Portanto, conforme o gráfico da Figura 5.9, o teor de ligante “ótimo” é de 5,0%.

Considerando também que o valor mínimo exigido pela norma 031/2006 – ES (DNIT, 2006) para estabilidade é de 500 kgf e que o requisito de relação betume/vazios deve situar-se entre 75% a 82%, percebe-se pelos gráficos apresentados que o teor de ligante de 5,0% atendem as exigências. Os corpos-de-prova com 5,0% de CAP, obtiveram média de 75,57% de RBV e 1128,78 kgf de estabilidade. Os corpos-de-prova desta dosagem foram determinados como referência para comparação com os resultados da segunda etapa da metodologia.

5.4 SUBMISSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA AO INCÊNDIO

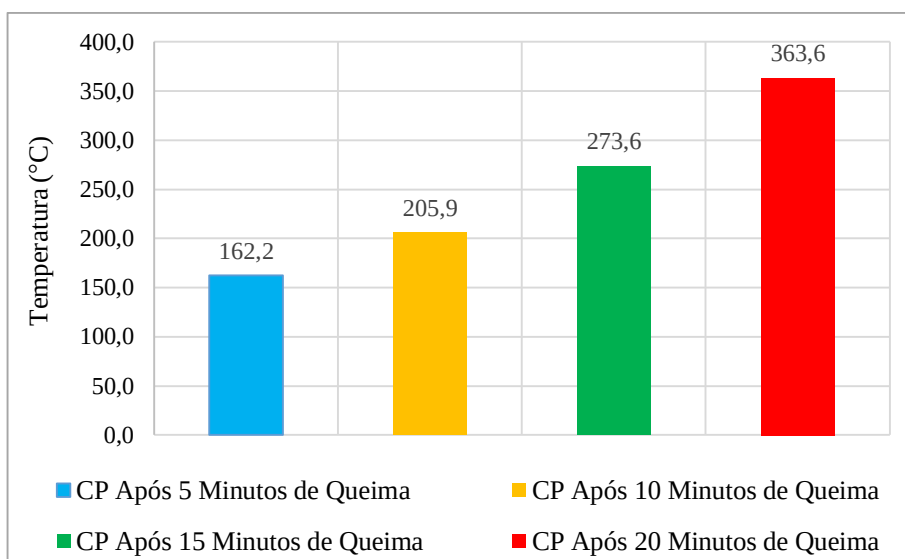
Após a determinação do teor ótimo de ligante, foram produzidos corpos-de-prova que foram submetidos a elevadas temperaturas por meio de incêndio controlado. A Figura 5.13 apresenta o gráfico de variação de temperatura do incêndio durante o experimento que durou 20 minutos. A temperatura inicial e mínima foi de 437,0 °C, enquanto o pico foi de 572,3 °C aos 7 minutos, sendo que a temperatura final foi de 519,9 °C.

Figura 5.13 - Variação da Temperatura do Incêndio Durante o Experimento



A Figura 5.14 mostra a temperatura média na superfície de cada grupo de corpos-de-prova logo após serem retirados do foco de incêndio. Ressalta-se que a temperatura média superficial dos corpos-de-prova antes do incêndio foi de 24,8 °C.

Figura 5.14 - Temperatura dos corpos-de-prova imediatamente após serem retirados do incêndio



Após a submissão dos corpos-de-prova a elevadas temperaturas, os mesmos passaram por ensaio de compressão diametral, sendo aferidos a estabilidade e a fluência com objetivo de comparar seus valores com os dos corpos-de-prova de referência obtidos na primeira etapa da metodologia. A ruptura dos CPs foi realizada 5 dias após o experimento de incêndio controlado.

Para os corpos-de-prova que ficaram a 1,50 metros do incêndio, os mesmos não apresentaram uma uniformidade quanto a exposição as temperaturas elevadas devido ao posicionamento, sendo que as temperaturas aferidas dos corpos-de-prova após a retirada dos pares a cada momento se mostraram inconsistentes. Sendo assim, somente os corpos-de-prova que ficaram diretamente submetidos ao incêndio foram considerados.

5.4.1 Estabilidade

A Figura 5.15 apresenta os valores de estabilidade dos corpos-de-prova (CPs) e a Tabela 5.10 demonstra em porcentagens as perdas em relação aos corpos-de-prova de referência, cujo valor médio foi de 1128,78 kgf.

Figura 5.15 - Comparação de estabilidade

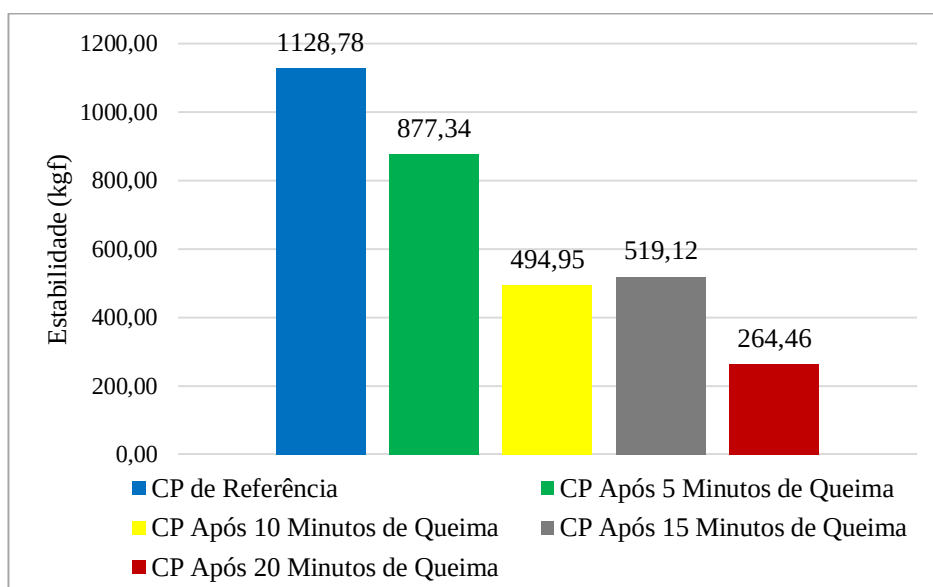


Tabela 5.10 - Estabilidade dos CPs após o incêndio

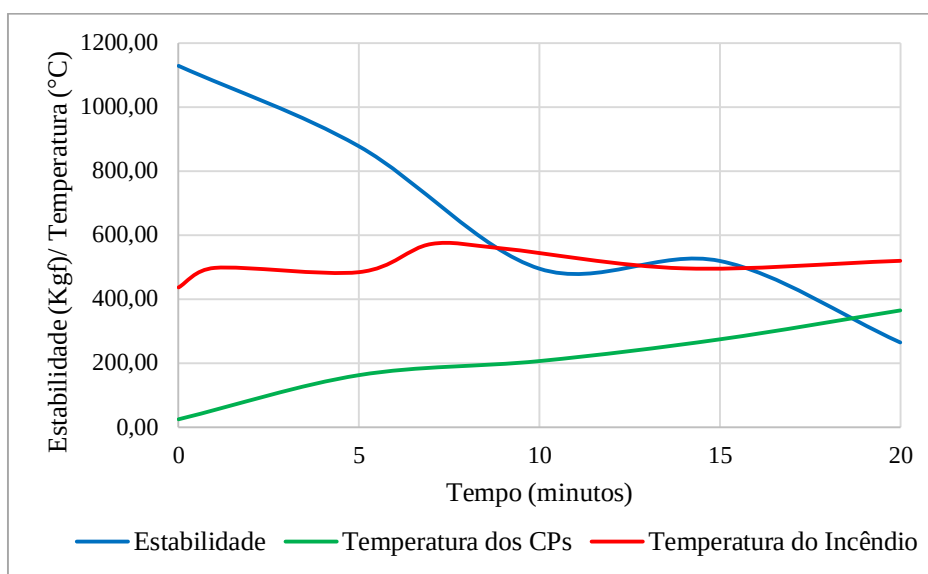
Tempo de Queima (min)	Estabilidade (kgf)	Perda de Estabilidade (%)
	CPs de Referência = 1128,78 kgf	
5	877,34	22,28
10	494,95	56,15
15	519,12	54,01
20	264,46	76,57

Percebe-se pelos valores apresentados que ocorreu perda de resistência quanto a estabilidade em todos os corpos-de-prova submetidos a elevadas temperaturas. Embora os CPs de 15 minutos tenham apresentado uma leve resistência maior do que os de 10 minutos, é possível observar que a perda de resistência quanto a estabilidade é maior conforme o tempo de exposição ao incêndio.

Salienta-se que mesmo os CPs que ficaram apenas 5 minutos expostos ao incêndio perderam resistência a estabilidade. Salienta-se também que a intensidade do incêndio, mais especificamente a temperatura, poderá afetar quanto a porcentagem de perda de estabilidade.

A Figura 5.16 demonstra a relação da perda de estabilidade com o tempo de queima, com a temperatura do incêndio e dos CPs.

Figura 5.16 - Relação estabilidade, tempo e temperatura



Ressalta-se que durante o experimento de queima, os corpos-de-prova perderam uma quantidade de massa. A Tabela 5.11 apresenta a porcentagem média de perda de massa dos grupos de CP.

Tabela 5.11 - Perda de massa dos CPs após a queima

Grupo de CP	Perda de Massa (%)
5	1,52
10	4,98
15	1,78
20	17,14

Figura 5.17 - Corpo-de-prova após 20 minutos de queima

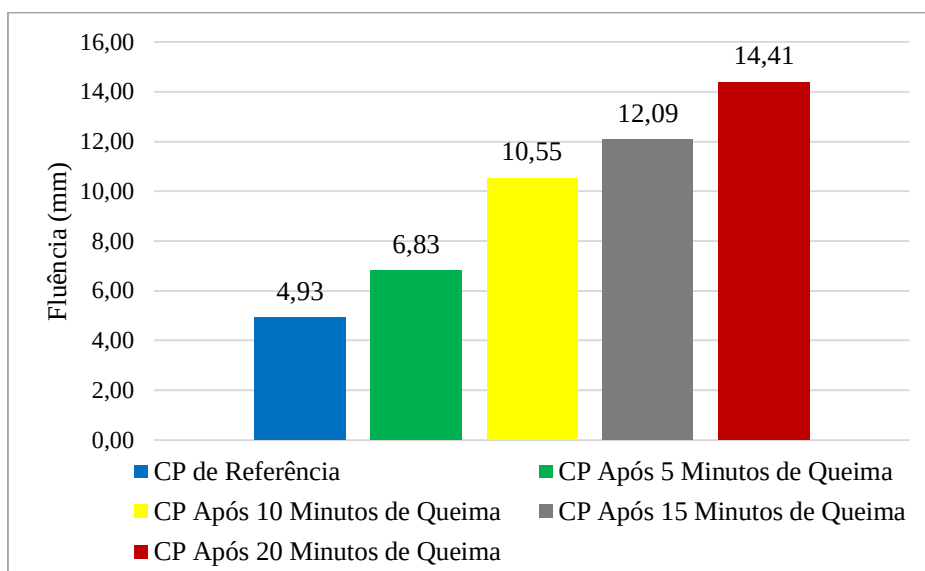


A perda de massa dos CPs, conforme apresentado na Tabela 5.11 e ilustrado na Figura 5.17, ocorreu devido ao aquecimento elevado, que amolece o ligante asfáltico e faz com que a mistura comece a desagregar. Os CPs mais afetados foram os que ficaram 20 minutos no incêndio, ocorrendo maior desagregação em relação aos demais. Percebe-se por meio dos resultados apresentados que as temperaturas elevadas reduzem a resistência a estabilidade, sendo que essa perda de estabilidade também é afetada pela perda de massa dos CPs.

5.4.2 Fluência

A Figura 5.18 apresenta os resultados para fluência dos CPs e a Tabela 5.12 mostra as porcentagens de aumento em relação aos CPs de referência, cujo valor foi de 4,93 mm.

Figura 5.18 - Comparação de fluência



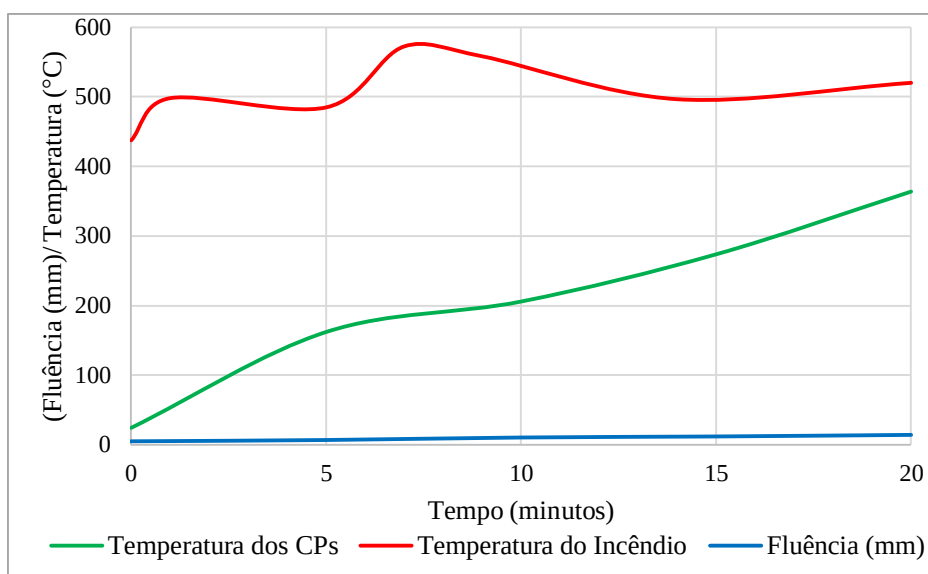
Conforme o gráfico anterior, percebe-se que os valores de fluência são inversos aos valores de estabilidade, ou seja, enquanto os valores de estabilidade reduzem, os de fluência tendem a aumentar.

Tabela 5.12 - Fluência dos CPs após a queima

Tempo de Queima (min)	Fluência (mm)	Aumento de Fluência (%)
	CPs de Referência = 4,93 mm	
5	6,83	38,44
10	10,55	113,89
15	12,09	145,23
20	14,41	192,19

A Figura 5.19 relaciona o aumento de fluência com as temperaturas de incêndio e dos CPs, bem como o tempo de queima.

Figura 5.19 - Relação fluência, tempo e temperatura



Percebe-se que pelos valores apresentados, quanto maior o tempo de queima, maior o valor de fluência.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões deste trabalho são apresentadas neste capítulo. Também são apresentadas sugestões para futuros trabalhos a respeito do efeito de altas temperaturas no concreto asfáltico de pavimentos flexíveis, vindo a complementar este trabalho de conclusão de curso.

6.1 CONCLUSÕES

Ao determinar as propriedades dos materiais que constituem o concreto asfáltico, verificou-se que os mesmos atenderam os requisitos exigidos pelas normas. Foi necessário adequar os materiais separando-os em frações das peneiras conforme a Faixa C de granulometria do DNIT. O ensaio de abrasão “Los Angeles” obteve um valor de 14%, ficando abaixo de 50%, que é o limite estabelecido pela norma. Já o ensaio de índice de forma pelo método do paquímetro, o resultado foi de 1,41, sendo inferior a 3, que é o máximo permitido por norma.

Alguns parâmetros foram obtidos de outros autores que utilizaram material da mesma origem. Contudo, para os ensaios realizados, o de penetração teve como resultado 63 mm^{-1} , ficando dentro do exigido que é entre 50 e 70 mm^{-1} . E por meio da viscosidade Saybolt-Furol foi traçada a curva de Viscosidade x Temperatura do ligante.

Em relação a dosagem da mistura asfáltica pelo método Marshall, foi determinado como teor ótimo de projeto 5% de CAP 50/70. Esta mesma dosagem obteve um RBV de 75,57%, ficando acima dos 75%, que é o mínimo exigido pela norma para este tipo de concreto asfáltico. Quanto a estabilidade dos corpos-de-prova, o valor mínimo estabelecido pela norma é 500 kgf, sendo o resultado obtido para a dosagem ótima foi de 1128,78 kgf. O valor da fluência para a dosagem ótima foi de 4,93 mm. Dessa forma, os corpos-de-prova da dosagem ótima foram considerados a referência para a comparação com a segunda etapa da metodologia deste trabalho.

O experimento de queima durou 20 minutos, onde os grupos de corpos-de-prova foram retirados do incêndio a cada 5 minutos. Após a queima, foram atestados os valores de estabilidade e fluência e comparados com os valores de referência. Para estabilidade, constatou-se perda para

5, 10, 15 e 20 minutos de queima, sendo que essas perdas foram de 22,28%, 56,15%, 54,01% e 76,57% respectivamente. Para fluência, ao contrário da estabilidade, os valores aumentaram. Para os tempos de 5, 10, 15 e 20 minutos, os aumentos foram de 38,44%, 113,89%, 145,23% e 192,19% respectivamente.

A partir da comparação dos resultados obtidos, conclui-se que a massa asfáltica de pavimentos asfálticos flexíveis quando submetidos a elevadas temperaturas oriundas de incêndios, sofre danos de perda de resistência a estabilidade, aumento da fluência e desagregação, comprovando as hipóteses deste trabalho. As severidades dos efeitos podem variar conforme o tempo de exposição ao incêndio e sua intensidade (temperatura). Entretanto, pode-se considerar que quanto maior o tempo de exposição à um incêndio, maior será a perda da resistência máxima a compressão radial e maior será o aumento da deformação total.

Portanto, fica evidenciado por meio dos experimentos realizados e dos resultados obtidos, que em atos de fechamento de vias pavimentadas por manifestações e greves com uso de fogo, ou acidentes veiculares com foco de incêndio, o pavimento pode sofrer danos estruturais, podendo comprometer a sua durabilidade, resistência e podendo ficar suscetível ao aparecimento de alguma patologia.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, tem-se as seguintes sugestões:

- Realizar o mesmo experimento deste trabalho avaliando a resistência a tração antes e depois da submissão de corpos-de-prova a elevadas temperaturas;
- Realizar o mesmo experimento deste trabalho com outros tipos de ligantes asfálticos e misturas asfálticas.
- Realizar estudo de campo, analisando os custos dos danos.
- Analisar a vida útil do pavimento em função dos danos devido as elevadas temperaturas provocadas por incêndios.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. C. **Técnicas de Conservação e de Reabilitação para Pequenas Reparações de Pavimentos Rodoviários**. 2013. 129 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Ambiente) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCESSIONÁRIAS DE RODOVIAS. **Relatório Anual 2016**. São Paulo: ABCR, 2016. 29 p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14950**: Materiais Betuminosos: Determinação da Viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, 2003. 10 p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do Índice de Forma pelo Método do Paquímetro - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2006. 3 p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregado para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9938**: Agregados: Determinação da Resistência ao Esmagamento de Agregados Graúdos. Rio de Janeiro, 2013. 03 p.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de Pedregulho Retidos na Peneira de Abertura 4,8 mm - Determinação da Massa Específica, da Massa Específica Aparente e da Absorção de Água. Rio de Janeiro, 2016. 10 p.
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560 p.
- BARRETO, S. S. Estudo e Abordagem da Origem e Desenvolvimento das Patologias em Pavimento. **Revista Saber Acadêmico**, Presidente Prudente, n. 21 / ISSN 1980-5950, p. 1-9, fev. 2016.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica Para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2008. 504 p.
- BETUNEL. **Asfaltos Convencionais**. Disponível em: < https://www.betunel.com.br/asfaltos_convencionais.html >. Acesso em: 10 fev. 2018.
- CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015. 54 p.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2010: Relatório Gerencial**. Brasília: CNT, 2010. 273 p.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2013: Relatório Gerencial**. Brasília: CNT, 2013. 389 p.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2014: Relatório Gerencial**. Brasília: CNT, 2014. 388 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte Rodoviário: Por Que os Pavimentos das Rodovias do Brasil Não Duram?** Brasília: CNT, 2017a. 160 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017: Relatório Gerencial.** Brasília – CNT, 2017b. 403 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte Rodoviário: Desempenho do Setor, Infraestrutura e Investimentos.** Brasília: CNT. 2017c. 70 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018: Relatório Gerencial.** Brasília: CNT. 2018. 408 p.

CUNHA, C. M. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem.** 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.

DNER: DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 078/94:** Agregado Graúdo – Adesividade a Ligante Betuminoso. Rio de Janeiro, 1994. 3p.

DNER: DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 043/95:** Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995. 11 p.

DNER: DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 083/98:** Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998. 5 p.

DNER: DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 035/98:** Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Conservação Rodoviária.** IPR – 710. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2005. 564 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** IPR – 719. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a. 274 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** IPR – 720. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006b. 310 p.

DNIT: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 005/2003:** Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos: Terminologia. Rio de Janeiro, 2003. 12 p.

DNIT: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **031/2006 - ES:** Pavimentos Flexíveis: Concreto Asfáltico: Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2006. 14 p.

DNIT: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **155/2010-ME:** Material Asfáltico – Determinação da Penetração – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010. 7 p.

DNIT. **Breve Histórico do Rodoviarismo Federal no Brasil.** Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/historico/>>. Acesso em: 26 Abr. 2018.

DOMINGUES, F. A. A. **Manual Para Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos.** São Paulo: F.A. Aranha Domingues, 1993.

GODOI, L. **Estudo do Comportamento dos Ligantes Asfálticos Utilizados na Imprimação Asfáltica Relacionados à Emissão de VOC's.** 2011. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

G1. **Acidente Entre Duas Carretas Mata Duas Pessoas em Rodovia em MT.** G1, Mato Grosso. 16 Dez. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mato-grosso/noticia/2015/12/carretas-pegam-fogo-em-acidente-e-trespessoas-morrem-em-t.html>>. Acesso em: 24 Jun. 2018.

G1. **Caminhoneiros Fazem Protestos nas Estradas Contra Aumento de Combustíveis.** G1, São Paulo, 01 Ago. 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/caminhoneiros-bloqueiam-estradas-em-rotesto-contra-aumento-de-combustiveis.ghtml>>. Acesso em: 24 Abr. 2018.

G1. **Manifestação Contra a Prisão do Ex-Presidente Lula Para Trânsito na Região do Iguatemi, em Salvador.** G1, Bahia, 06 Abr. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/manifestacao-contra-a-prisaodo-ex-presidente-lula-fecha-av-acm-na-regiao-do-iguatemi.ghtml>>. Acesso em: 24 Abr. 2018.

ISLAM, M. R.; TAREFDER, R. A. Quantifying Traffic- and Temperature-Induced Fatigue Damages of Asphalt Pavement. **Springer International Publishing**. AG. Transp. Infrastruct. Geotech. (2015) 2:18–33, Nova York, 2014.

ISLAM, M. R. **Thermal Fatigue Damage of Asphalt Pavement**. 2015. 175 f. Dissertação (Doutorado em Philosophy in Engineering) - University of New Mexico, Albuquerque – Novo México, 2015.

JUNIOR, A. M. **Estudo Sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas**. 2004. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

JÚNIOR., M. L. P. C; ROCHA, P. H. T. **Estudo Preliminar de Misturas Asfálticas a Quente Utilizadas em Obras de Pavimentação na Região Metropolitana de Goiânia**. 2013. 83p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

LIMA, R. C. A. **Investigação do Comportamento de Concreto em Temperaturas Elevadas**. 2005. 257 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 640 p.

MINHOTO, M. J. C. **Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Flexíveis**. 2005. 368 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Minho, Braga, 2005.

MUNDO EDUCAÇÃO. **O Fogo no Cerrado**. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/o-fogo-no-cerrado.htm>>. Acesso em: 01 Mai. 2018.

NOGUEIRA, M. G. **Comparação do Comportamento em Campo de Concretos Asfálticos com CAP 30-45 para Revestimentos de Pavimentos**. 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ODA, S.; NASCIMENTO, L. A. H.; EDEL, G. **Aplicação de Asfalto-Borracha na Bahia**. In: 3ª CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 2005, Salvador. 6 p.

- OLIVEIRA, D. D.; ANDRADE, G. S.; LAPERCHÉ, L. A. **Estudo Comparativo de Concreto Betuminoso Usinado a Quente com Diferentes Tipos de Ligantes na Região Metropolitana de Goiânia**. 2014. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- PATRIOTA, M. B. **Análise Laboratorial de Concreto Betuminoso Usinado a Quente Modificado com Adição de Borracha Reciclada de Pneus – Processo Seco**. 2004. 149 f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.
- PEREIRA, M. M. L. **Estudo de Mistura Asfáltica de Módulo Elevado para Camadas de Base do Pavimento**. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- PETROBRAS. **Asfalto: Informações Técnicas**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2015. 9 p.
- SANTANA, H. **Manual de Pré-misturado a Frio**. IBP. Rio de Janeiro: Comissão de Asfalto. 1993.
- SANTOS, N. S. **Propriedades Reológicas do Ligante Asfáltico (CAP 50/70) Modificado Por Adição de Lignina**. 2017. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.
- SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação: Volume II**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2001. 764 p.
- SILVA, P. F. **Manual de Patologia e Manutenção de Pavimentos**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2005. 128 p.
- SILVA, A. F.; SIQUEIRA, J. C.; SEVERINO, L. F. **Estudo Comparativo de Concreto Betuminoso Usinado a Quente com Diferentes Tipos de Ligantes Utilizados em Goiânia**. 2016. 75 f. Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.
- SINICESP. **Ligantes Asfálticos**. Disponível em: <<http://www.sinicesp.com.br/materias/2010/bt05a.htm>>. Acesso em: 01 Mai. 2018.
- ROHDE, L. **Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos**. 2007. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- ROSSI, A. C. **Etapas de Uma Obra de Pavimentação e Dimensionamento de Pavimento Para Uma Via na Ilha do Fundão**. 2017. 63 f. Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus**. 2004. 279 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- VASSOLER, C. CHONG, W. SPECHT, L. P. Comportamento Mecânico de Pavimentos Flexíveis Submetidos a Gradientes Térmicos. *Acta Scientiarum Technology*. Maringá, v. 33, n. 3, p. 265-271, 2011.
- WWF. **Queimadas em Áreas Protegidas do Cerrado aumentaram em 57,63%**. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?46622>>. Acesso em: 01 Mai. 2018.