



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DE FÍLER NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO ASFÁLTICO**

Michel Castoldi

Lajeado/RS, 13 de Julho de 2021

Michel Castoldi

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DE FÍLER NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO ASFÁLTICO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Carolina Becker Pôrto Fransozi

Lajeado/RS, 13 de Julho de 2021

Michel Castoldi

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DE FÍLER NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO ASFÁLTICO**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Profª. Me. Carolina B. P. Fransozi - Orientadora
Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES

Profª. Me. Helena Batista Leon
Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES

Prof. Me. Matheus Lemos Nogueira
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Lajeado/RS, 13 de Julho de 2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, pela força nos momentos de dificuldade, impedindo-me de desistir e permitindo, com isso, a realização deste trabalho.

Aos meus pais, que sempre me incentivaram a continuar e seguir em frente. A minha companheira Jesika de Quadros que esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis, sempre com palavras de incentivo acalmando nos momentos de aflição.

Agradeço à minha orientadora Professora Me. Carolina B. P. Fransozi, pela paciência, pelo apoio e disponibilidade nos momentos de dúvida. Agradeço também ao meu primeiro orientador, o Professor Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos, por todo auxílio oferecido durante a primeira etapa do trabalho.

Aos amigos da empresa Conpasul Construção e Serviços LTDA, pelo fornecimento do material, em especial ao amigo e laboratorista Sr. Ederson Garcia de Quadros, que contribuiu e auxiliou em momentos de dúvida.

Aos amigos encontrados no Laboratório de Tecnologias da Construção - LATEC da UNIVATES, Henrique Ferronato, Amanda e Tiago que sempre estiveram dispostos a ajudar e ofereceram o suporte necessário para a realização dos estudos.

Agradeço também a empresa Só Escritório que permitiu que eu saísse por diversas vezes em horário de trabalho para realizar os ensaios necessários para realização desta pesquisa.

Por fim gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma durante os anos de minha graduação e que por ventura não foram citados.

RESUMO

O filer, conforme definição, é um material inerte quando comparado aos demais materiais utilizados em uma mistura asfáltica. Porém, devido ao tamanho e características de sua superfície, o filer atua de maneira ativa como interface filer/ligante. Dessa maneira, deixando de ser um material inerte como definido em sua especificação. A presente pesquisa apresenta uma avaliação e comparação das propriedades volumétricas e mecânicas de três misturas asfálticas com diferentes teores de filer agregados. As três misturas asfálticas foram distribuídas dentro das tolerâncias definidas para a faixa C do DNIT. As dosagens foram realizadas pelo método de dosagem Marshall, através da execução de 15 corpos de prova para cada porcentagem de filer agregado, para se encontrar o teor ideal de ligante para cada mistura estudada. As propriedades volumétricas são apresentadas por meio de características como, densidade aparente, volume de vazios e relação betume vazios encontrados para cada mistura. Já propriedades mecânicas podem ser observadas através dos resultados obtidos para ensaios de estabilidade, fluência e de resistência à tração por compressão diametral. Todas as amostras estudadas apresentaram resultados satisfatórios no que diz respeito aos limites estabelecidos pelas normas. As amostras estudadas apresentaram valores de estabilidade e resistência à tração por compressão diametral superiores ao limite estabelecido pela especificação, da mesma forma que apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos para uma relação betume vazios (RBV). Pode-se observar que os maiores teores de filer apresentaram um teor de ligante ótimo menor, desta forma gerando uma mistura mais econômica, com um menor custo de produção e com as características necessárias para uma camada de rolamento.

Palavras-chave: Filer. Concreto asfáltico. Mástique. Ligante asfáltico.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
1.1 Problema de pesquisa	5
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo geral	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Justificativa da pesquisa	6
1.4 Estrutura do trabalho	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Revestimento	10
2.1.1 Tipos de Revestimentos	11
2.2 Agregados	12
2.2.1 Classificação dos agregados	12
2.2.1.1 Quanto à Natureza	13
2.2.1.2 Quanto ao Tamanho	14
2.2.1.3 Quanto à Graduação	16
2.3 Ligante Asfáltico	17
2.3.1 Tipos de ligantes asfálticos	17
2.3.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	17
2.3.2.1 Natureza	18
2.3.2.2 Composição Química	19
2.4 Concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ)	20
2.4.1 Granulometria	21
2.4.2 Teor de ligante e volume de vazios	22
2.5 Dosagem de misturas asfálticas a quente	23
2.5.1 Método Marshall	24
2.6 A influência do filer na camada de revestimento da pavimentação	26
2.6.1 Mástique	28

2.6.2 Tipos de filler	29
2.6.3 Características encontradas por outros autores	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Materiais	34
3.1.1 Agregados	34
3.1.2 Ligante asfáltico	36
3.2 Métodos	37
3.2.1 Misturas Asfálticas	38
3.2.2 Preparação dos agregados	40
3.2.3 Dosagem Marshall para misturas asfálticas	42
3.2.4 Ensaio volumétricos	49
3.2.5 Determinação da Estabilidade e Fluência	52
3.2.6 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 Resultados da mistura asfáltica com teor de filler de 4%	57
4.2 Resultados da mistura asfáltica com teor de filler de 6%	60
4.3 Resultados da mistura asfáltica com teor de filler de 8%	63
4.4 Análise comparativa entre os resultados encontrados	67
5 CONCLUSÕES	75
5.1 Sugestão para trabalhos futuros	76
REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Grande parte da produção de *commodities* produzida em território nacional é escoada por meio do modal rodoviário, também por ele são movimentadas cargas para abastecimento de suprimentos para estados e municípios. Entende-se, assim, a importância do modo rodoviário para o desenvolvimento do país. Nos últimos anos, devido à falta de recursos do país, o investimento nesta área tem sido reduzido. Porém, a demanda por escoamento da produção gera a necessidade da pavimentação de novas rodovias, vias de acesso a municípios, dentre outros, que necessitam de uma estrutura de tráfego mais consistente, reduzindo os custos de manutenção dos veículos utilizados para o transporte e aumentando a segurança dos trabalhadores que utilizam as vias de acesso.

Conforme pesquisa realizada pela Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2020), o modal rodoviário brasileiro, é responsável pela movimentação de 61% na matriz de transportes de mercadorias e ainda 95% no que se refere a passageiros, ressaltando a importância de uma infraestrutura adequada à demanda, possibilitando o desenvolvimento econômico do Brasil. Outro dado apresentado pela pesquisa demonstra o quanto o país está atrasado no que se refere a pavimentação asfáltica. A mesma pesquisa aponta que o Brasil possui 1.720.700 km de rodovias, sendo que apenas 12,4% possuem infraestrutura de rodagem pavimentada e o planejamento de pavimentação é para apenas 9,1% do total existente.

Ainda, conforme dados da CNT (2020), pode se confirmar a baixa disponibilidade do modal rodoviário brasileiro quando comparado a outros países que possuem um território

vizinho ao brasileiro, ficando para trás de países como o Uruguai, Argentina e Equador. Ainda, se comparado aos Estados Unidos, o país possui apenas 5% da pavimentação apresentada por eles.

Conforme os dados apresentados nos parágrafos anteriores, verifica-se a necessidade do desenvolvimento de misturas asfálticas que possam apresentar uma vida útil mais longa ao revestimento do pavimento, minimizando os custos de manutenção e possibilitando o investimento em novas rodovias, facilitando assim os meios de transporte e deslocamento dos usuários. Os principais defeitos encontrados nas rodovias do país, são defeitos relacionados a deformações permanentes, e ao trincamento do revestimento, que possibilita a entrada de água no corpo estradal e intensifica a degradação do pavimento existente.

Balbo (2007) enfatiza que o revestimento do pavimento, dentre outras atribuições, deve receber as cargas sem que sofra grandes deformações (elásticas ou plásticas), perca sua compactação e nem desagregue seus componentes. Senço (2007) aponta que os materiais passaram a ter maior atenção e maior cobertura de estudos tecnológicos, permitindo assim o uso de materiais que estejam mais próximos do local de execução do pavimento, gerando como consequência uma maior economia na construção, e qualificando a mão de obra devido a experiência adquirida por estes rotineiros trabalhos de controle de qualidade.

Em se tratando de misturas asfálticas, conforme Ceratti et al. (2011), durante o procedimento da sua dosagem para execução da camada de revestimento, deve-se determinar um teor de ligante, uma vez que esteja pré-definida a faixa granulométrica e os procedimentos experimentais. Os autores ainda destacam que, o teor de projeto terá variação dependendo da sua energia de compactação, temperatura de serviço, mistura asfáltica escolhida, dentre outros fatores.

Conforme Bardini (2013), o filer mineral, que também pode ser chamado de material de enchimento, é um material inerte quando comparado aos outros materiais utilizados na mistura asfáltica, sendo ele um material com 65% de suas partículas passantes na peneira número 200. Este material fornece mais pontos de contato entre os agregados maiores, podendo ser considerado como uma extensão das frações de agregados. Outra importante característica do filer é o aumento da estabilidade da mistura, desta forma aumentando a viscosidade do ligante, mudando assim suas propriedades como a trabalhabilidade e

influenciando até mesmo na sua compactação. Conforme a autora, pode-se atribuir as características do ligante, bem como, as propriedades do filer, a relação com o processo de fadiga do revestimento asfáltico, afetada pela finura e pelas características de superfície do filer.

1.1 Problema de pesquisa

Dada a relevância do assunto, pode-se definir como problema de pesquisa a seguinte pergunta: qual a influência da proporção de filer adicionado à mistura asfáltica no comportamento mecânico do concreto asfáltico?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os efeitos da porcentagem de filer mineral no comportamento mecânico do concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), utilizando agregado basáltico e CAP 50/70 como ligante.

1.2.2 Objetivos específicos

Visando atingir o objetivo geral desta pesquisa, definiram-se como objetivos específicos:

- a) Estabelecer, através da dosagem Marshall, o teor de ligante ótimo, para o projeto de misturas asfálticas com diferentes percentuais de filer na composição granulométrica dos agregados;
- b) Comparar as três misturas com diferentes teores de filer estudados, a partir das suas propriedades volumétricas e mecânicas;
- c) Medir a estabilidade e fluência das misturas;
- d) Medir a resistência à tração por compressão diametral das misturas.

1.3 Justificativa da pesquisa

Conforme Bardini (2013), o filler possui partículas muito pequenas e devido às características da sua superfície, tem em sua ação a parte ativa, agindo como uma interface filler/ligante, não sendo apenas um material inerte. O filler atua no papel de preencher os vazios entre os agregados maiores e ainda altera as propriedades do ligante asfáltico. Age como parte ativa do mástique, e como este afeta suas propriedades mecânicas bem como sua trabalhabilidade. O filler tem relação direta com o processo de fadiga, desenvolvendo microfissuras que prejudicam o revestimento asfáltico.

O tema da pesquisa torna-se relevante, dado o fato de que o teor de filler ter efeito importante nas propriedades volumétricas das misturas asfálticas, influenciando por exemplo no volume de vazios (VV) e na relação betume vazios (RBV). O teor de filler é fundamental para o projeto de revestimento asfáltico, visto que, além da qualidade superior que oferecerá ao pavimento, proporcionará uma economia indispensável ao empreendimento. Outro importante fator desempenhado pelo filler é a sua atuação na parte ativa do mástique, combinação que influencia diretamente nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica, como exemplo pode-se citar a trabalhabilidade e também na sua estabilidade.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho apresenta no primeiro capítulo a introdução, com os objetivos, justificativa da pesquisa e informações sobre a estrutura do trabalho.

Já no segundo capítulo aborda-se o referencial teórico sobre o tema pesquisado, apresentando bibliografias sobre pavimentos, agregados, ligantes asfálticos, tipos de filler, dentre outros estudos realizados por diferentes autores.

O terceiro capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento da pesquisa, com as curvas granulométricas utilizadas, propriedades dos materiais utilizados e os métodos utilizados para realização da pesquisa.

No quarto capítulo, apresenta-se os resultados encontrados para as três misturas asfálticas, apresentando uma comparação entre estes resultados encontrados, com resultados apresentados por outros autores.

Por fim, no quinto capítulo, apresenta-se a conclusão da pesquisa bem como sugestões para realização de trabalhos futuros relacionados com o teor de filler utilizado no concreto asfáltico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

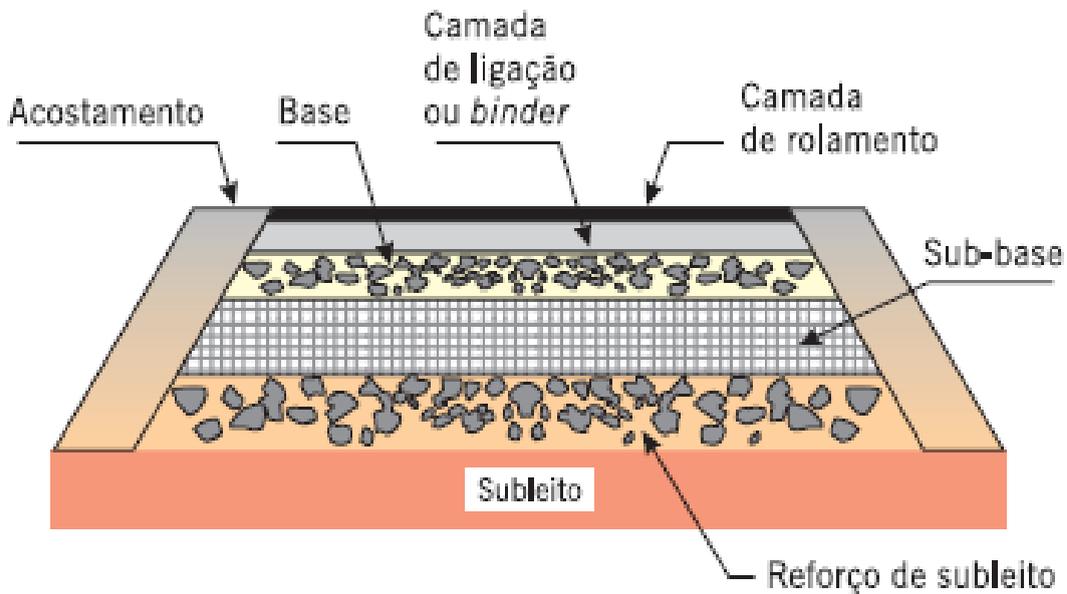
Conforme Branco et al. (2016), a principal função de um pavimento rodoviário é garantir ao usuário conforto e segurança ao longo do período de vida útil do empreendimento, resistindo às ações do tráfego e suportando as intempéries. Balbo (2007) destaca que, ao melhorar a via de rolamento, se produz um efeito de diminuição dos custos operacionais para o transporte de cargas, dado o fato de que os custos de operação e de manutenção dos meios de transporte são reduzidos drasticamente.

Segundo Bernucci et al. (2008), define-se o pavimento como uma estrutura de camadas múltiplas, sendo ela construída sobre uma superfície trabalhada, denominada terraplanagem, tendo como seu objetivo principal melhorar o tráfego, propiciando ao usuário conforto e segurança, e durante a sua execução oferecer economia e viabilidade técnica. Senço (2007) classifica o pavimento como uma estrutura que tem como objetivos técnicos e econômicos suportar os esforços de origens verticais, originado pelo tráfego, com a função de distribuí-los, melhorando as condições de deslocamento, gerando conforto e segurança aos usuários, além de resistir aos esforços horizontais ou do desgaste, aumentando sua vida útil.

A estrutura dos pavimentos é formada por camadas finitas denominadas sub-base, base e revestimento, podendo este ser asfáltico ou de concreto, executados sobre uma superfície de fundação, o subleito. Ainda, em alguns casos, faz-se necessária a execução de um reforço do subleito. Para que se escolha o material ideal para cada camada, são utilizadas técnicas tradicionais, dentre as mais usuais a distribuição granulométrica e a medida da sua resistência, bem como a avaliação da sua forma e da durabilidade no que diz respeito aos

grãos (BERNUCCI et al., 2008). Na Figura 01, pode-se observar cada camada que compõe o corpo estradal.

Figura 01: Estruturas do pavimento



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Segundo Balbo (2007), o pavimento deve atender as demandas de estrutura e tráfego, oferecendo durabilidade e minimizando os custos de produção do mesmo, além de oferecer uma estrutura que seja de fácil manutenção preventiva. As cargas que são transmitidas às fundações chegam de forma branda, não provocando deformações que prejudiquem a vida útil do pavimento. Para o autor a camada inferior é considerada a fundação de toda a estrutura.

Conforme Branco et al. (2016), a fundação do pavimento é preparada por meio da regularização e compactação do terreno natural, fazendo com que este chegue a um grau de compactação que forneça suporte às camadas superiores, sendo chamado também de subleito do pavimento. Na Figura 02, pode-se observar o trabalho dos rolos pé de carneiro, compactando o subleito do corpo estradal.

Figura 02: Compactação do subleito com trabalho do terreno natural



Fonte: Autor (2021).

Conforme Balbo (2007), a base é a camada que fica logo abaixo da camada de revestimento e normalmente é constituída por materiais pétreos, tendo como função principal a transmissão dos esforços para as camadas dispostas prontamente abaixo, como sub base e subleito. Para todas as camadas dos pavimentos, a espessura deve ser calculada conforme a intensidade do tráfego, e facilitando o processo construtivo do pavimento.

Balbo (2007) cita como principais características de pavimentos flexíveis o fato de serem estruturas mais espessas, fortemente afetadas por produtos químicos, que apresentam diminuição da visibilidade durante o período da noite, nas quais são necessárias recorrentes manutenções, provoca uma melhor aderência das sinalizações horizontais e uma vida útil não superior a 10 anos.

2.1 Revestimento

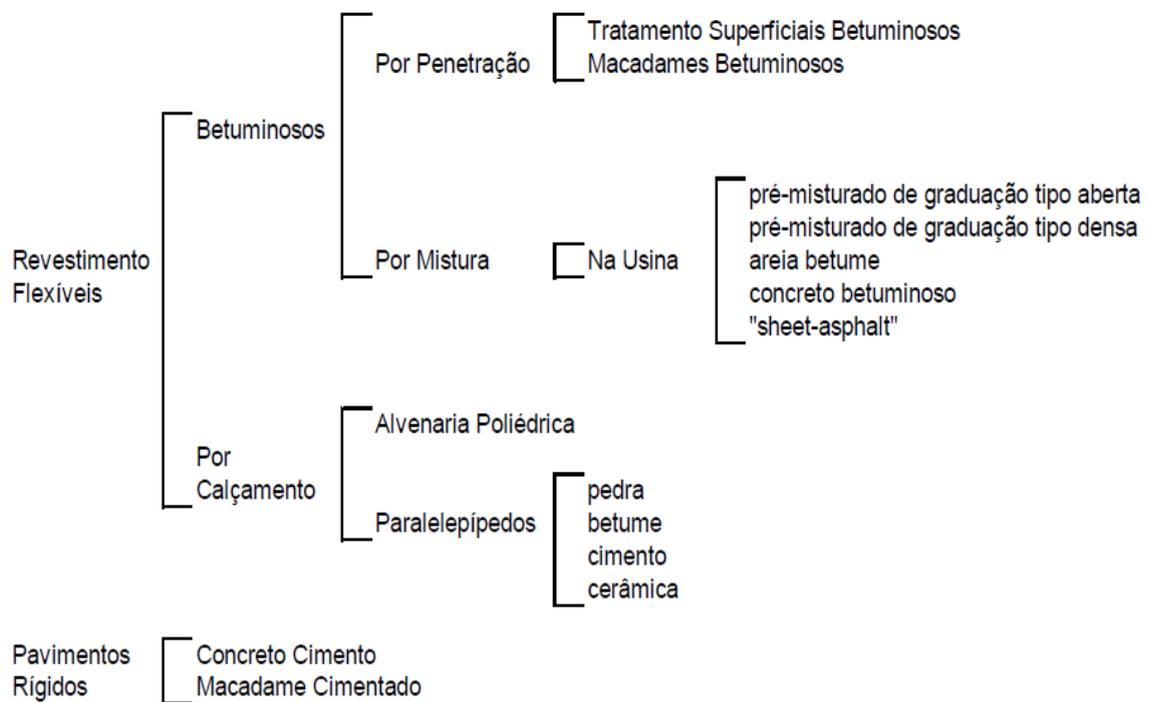
Conforme Bernucci et al. (2008), o revestimento de um pavimento é a camada destinada a receber as ações climáticas, além de receber a carga dos veículos. Portanto,

pode-se considerar que é de fundamental importância que esta camada seja impermeável e resistente aos esforços de contato entre o pavimento e o pneu em movimento. No Brasil, a mistura que é mais utilizada nos revestimentos é uma mistura de agregados minerais de diferentes granulometrias e ligante asfáltico.

2.1.1 Tipos de Revestimentos

De acordo com DNIT (2006), revestimentos flexíveis têm por sua característica, a mistura entre agregados e ligantes asfálticos. Senço (2007) cita pavimentos de concreto como aqueles revestidos por concreto que utiliza como aglomerante o cimento. Podem se agrupar e classificar os revestimentos flexíveis e rígidos como exposto na Figura 03, onde revestimentos flexíveis estão apresentados como betuminosos e pelos calçamentos, enquanto pavimentos rígidos estão relacionados pelo concreto cimento e macadame cimentado.

Figura 03: Classificação dos revestimentos



Fonte: DNIT (2006).

Ainda segundo Bernucci et al. (2008), o revestimento asfáltico pode ser definido por revestimentos compostos por agregados e ligantes asfálticos, formado pela camada de rolamento também denominado *binder*, sendo o revestimento asfáltico a camada destinada a

suportar as ações do tráfego, minimizando as tensões que são transmitidas às camadas inferiores do pavimento.

A seguir são apresentados os materiais que são utilizados para a produção do revestimento asfáltico, bem como, suas principais características.

2.2 Agregados

Conforme Ambrozewicz (2012), pode-se definir como agregado o material granular que não possui forma e nem volume definido, tendo atividade química inerte. Também possui dimensões e propriedades adequadas que favorecem o uso em concretos de diferentes tipos, de baixo custo e ocupando maior parte dos volumes utilizados para a produção de concretos, sendo de grande importância a sua qualidade.

Partindo do ponto de vista da engenharia, os agregados podem ser definidos como materiais inertes, que não possuem forma ou dimensão definida, tendo as propriedades adequadas para a produção de misturas ou camadas que são necessárias para os mais diversos tipos de obras. O uso de agregados para pavimentação ocorre após a fragmentação da rocha sã por meio de britadores, que deixam a rocha em dimensões que possibilitam seu manuseio e facilitam a produção da mistura a ser utilizada (SENÇO, 2007).

Balbo (2007) aponta que os agregados devem possuir características específicas para garantir a qualidade do material a ser produzido, estando dentre elas a dureza, a faixa granulométrica, a porosidade, a forma das partículas bem como a adesividade.

O filler é classificado pela norma EM 367 (DNER, 1997) como o material que passa em pelo menos 65% das partículas pela peneira número 200, ou menor que 0,075 mm, pode se ter uma ideia do tamanho pensando que esta espessura de grãos é a mesma que a cal hidratada ou o cimento Portland.

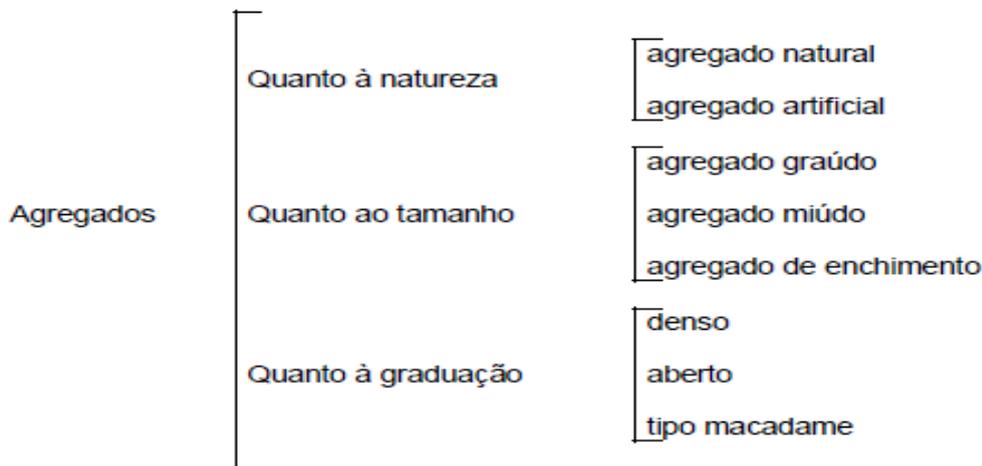
2.2.1 Classificação dos agregados

Os agregados são classificados como naturais ou artificiais. Os naturais são encontrados na natureza, e podem ser processados por meios mais simples como seleção e

lavagem, disponíveis na crosta terrestre, originados por processos geológicos, sendo eles utilizados após processos de britagem que possibilitem o seu uso, pode se citar como exemplos areias e pedregulhos ou cascalhos. Já os artificiais são originados a partir do descarte industrial, tendo como exemplo escórias de indústrias siderúrgicas dentre outros que são processados industrialmente (AMBROZEWICZ, 2012; BALBO, 2007).

Na Figura 04, pode-se verificar a metodologia aplicada pelo DNIT (2006), para a classificação dos agregados em geral, classificando em relação à sua natureza, seu tamanho e sua graduação.

Figura 04: Classificação dos Agregados



Fonte: DNIT (2006).

2.2.1.1 Quanto à Natureza

Para Bernucci et al. (2008), no que diz respeito à natureza dos agregados eles podem ser classificados como naturais, artificiais ou reciclados. Os naturais são provenientes de fontes naturais e obtidos por meio do desmonte da rocha sã, e obtidos por meio do processo de britagem, sendo utilizados britadores para facilitar a fragmentação dos mesmos.

Ainda, segundo os autores, é necessário que se garanta a homogeneidade do produto final, sendo que quando se extrai a rocha de diferentes partes da pedreira suas propriedades

podem variar, portanto durante a extração deve se garantir o controle de qualidade do material que alimenta o britador. Na Figura 05, um exemplo de uma jazida de basalto.

Figura 05: Jazida de extração mineral de basalto para produção de CAUQ



Fonte: Autor (2021).

2.2.1.2 Quanto ao Tamanho

Conforme ABNT NBR 9935/2011, que cita as características dos agregados, como materiais que não possuem forma ou volume definido, sendo ele geralmente inerte e deve possuir as dimensões e propriedades que permitam a produção de argamassas e concretos. Segundo Bernucci et al. (2008), os agregados devem ser classificados para utilização em pavimentação como miúdos, graúdos e podem ter a classificação de material de enchimento ou filer.

Conforme Ambrozewicz (2012), os agregados miúdos são grãos de origem natural podendo ser areias ou rochas originadas na etapa de produção no britamento, tendo como grãos de maior porte passantes em seu mínimo 85% na peneira ABNT 4,8mm de abertura, e

sendo retidos pela peneira ABNT 0,075 mm, sendo que o percentual que passa por esta peneira é classificados como filer.

Já o agregado graúdo pode ser composto por pedregulhos ou origem de material britado tendo os grãos passantes na peneira com abertura de 152 mm e retidos pela peneira ABNT 4,8 mm (85%). Na Figura 06, uma britagem para produção de diferentes tamanhos de agregados. A rocha in situ passa pelo processo de desmonte e é submetida ao britador primário. Em seguida a rocha esmagada em frações segue para o britador secundário e é conduzida para as peneiras, de onde são classificadas e separadas conforme a granulometria. As esteiras vistas na figura tem a função de conduzir as frações granulométricas separadas pelas peneiras até o local de estoque de cada granulometria.

Figura 06: Britador para a produção de agregados para pavimentação

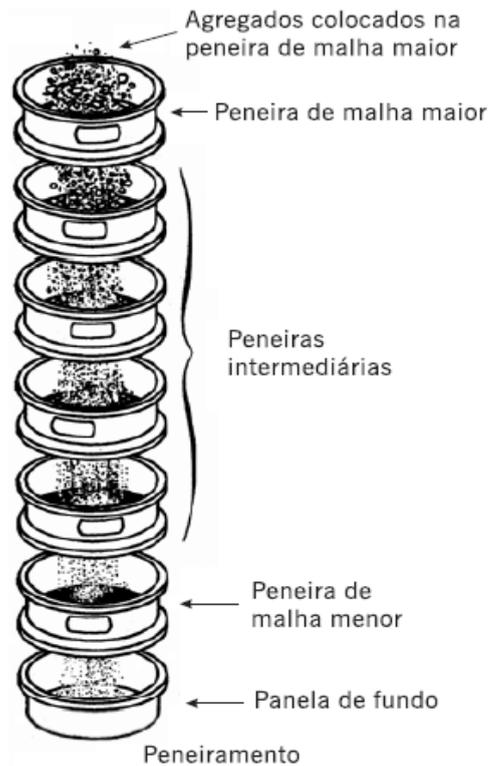


Fonte: Autor (2021).

Na Figura 07, pode-se entender como funciona o peneiramento para classificação dos agregados. O agregado é colocado na peneira superior e conforme o material é agitado ele vai passando para as peneiras com menores dimensões e segue sendo classificado. Ao final, o

material retido em cada peneira é armazenado em um recipiente individual para posterior utilização.

Figura 07: Peneiramento dos Agregados



Fonte: Bernucci et al. (2008).

2.2.1.3 Quanto à Graduação

Conforme DNIT (2006), quanto a sua graduação pode-se classificar como densa, aberta e tipo macadame. A graduação densa apresenta curva granulométrica contínua, comum a um material bem graduado, tendo material fino suficiente para o preenchimento dos vazios. A graduação aberta também apresenta uma curva granulométrica comum a materiais bem graduados, porém com insuficiência de finos para preencher os vazios. Já a graduação do tipo macadame, apresenta partículas de um tamanho único, sendo um material de granulometria uniforme tendo como diâmetro máximo o dobro do diâmetro mínimo.

2.3 Ligante Asfáltico

Conforme Bernucci et al. (2008), o asfalto, além de ser dos mais antigos materiais utilizados pelo homem, é muito importante para a execução de obras de pavimentação, sendo utilizado na maioria dos países. Os principais benefícios oferecidos pelo ligante são a impermeabilização, flexibilidade controlável, durabilidade, resistência a ácidos, álcalis e sais, e ainda a aderência proporcionada aos agregados empregados. Já para Senço (2007), o asfalto tem como propriedades fundamentais para a produção de revestimentos asfálticos a adesividade que oferece aos agregados, a impermeabilidade, a durabilidade, a sua excelente variação térmica e o seu preço competitivo.

2.3.1 Tipos de ligantes asfálticos

Bernucci et al. (2008) cita como principais ligantes existentes e comercializados no mercado nacional brasileiro:

- a) cimentos asfálticos de petróleo (CAP);
- b) asfaltos diluídos (ADP);
- c) emulsões asfálticas (EAP);
- d) asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- e) asfaltos modificados por polímero (AMP) ou por borracha de pneu (AMB);
- f) agentes rejuvenescedores (AR e ARE).

Os autores ainda citam como complemento, que, praticamente todos os outros produtos produzidos para a finalidade, tem como base o CAP ou cimento asfáltico de petróleo.

2.3.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP, de acordo com Balbo (2007), é produzido a partir do refinamento do petróleo cru, e tem seu emprego na pavimentação devido suas propriedades apropriadas ao uso juntamente com os agregados, dado a sua boa aderência, além de suas características impermeabilizantes, que facilitam seu emprego na engenharia civil. Possui cor negra ou

marrom escuro e é um material muito viscoso, tendo consistência sólida ou semi sólida, como pode ser observado na Figura 08.

Figura 08: Cimento Asfáltico do Petróleo (CAP)



Fonte: Bernucci et al. (2008).

2.3.2.1 Natureza

Segundo Balbo (2007), pode se definir como asfaltos ou CAP os materiais que tem por finalidade o uso em pavimentação, que possuem grande quantidade de betume, alta viscosidade, de cor negra que servem como ligantes, e oferecem boa aderência aos agregados.

Conforme Bernucci et al. (2008), o CAP é composto basicamente por hidrocarbonetos, quanto mais saturados, menor será sua viscosidade, quanto mais aromáticos, terão suas propriedades físicas superiores, quanto mais resinosos, maior será sua ductilidade e quanto mais asfaltenos, maior será sua viscosidade. Quando exposto a temperaturas excessivas,

quanto mais calor, maior será a oxidação sofrida e quanto mais frio, maior será a retração térmica, o que pode causar fissuração do ligante.

Conforme Senço (2007), quanto à natureza pode-se citar como exemplo as rochas asfálticas, arenitos betuminosos, asfaltos nativos ou naturais, asfaltos de petróleo, origem vulcânica, origem humana, asphaltização do petróleo e origem orgânica. De maneira geral, podem ser de três tipos: petróleos asfálticos, asfaltos-parafínicos e parafínicos.

2.3.2.2 Composição Química

Bernucci et al. (2008) enfatiza que óleos crus têm em sua variação líquidos negros viscoso, tendo como composição química parafínica, naftênica ou aromática, existindo cerca de 1500 tipos de petróleos diferentes explorados em diferentes partes do mundo, sendo que apenas uma pequena parte deles torna se apropriado para a produção de asfalto.

A estrutura do CAP é constituída basicamente de 95% hidrocarbonetos e 5% de heteroátomos. Possui composição química complexa e influência em seu desempenho mecânico e físico tendo maior influência quando exposto a agentes como polímeros.

Os CAPs são especificados conforme penetração ou viscosidade absoluta, obtidos por meio de ensaios físicos descritos pelas normas ME 155 (DNIT, 2010) e ME 004 (DNER, 1994). Na Tabela 01 pode se verificar a especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo. Pode-se observar que cada CAP disponível apresenta características diferentes que influenciam nas dosagens, como principais características pode-se citar a viscosidade, o ponto de amolecimento, a penetração e a ductilidade.

Tabela 01: Especificações dos diferentes CAPs disponíveis

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	MÉTODOS		LIMITES			
		ABNT	ASTM	CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200
PENETRAÇÃO (100G, 5S, 25°C)	0.1 mm	NBR - 6576	D5	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200
PONTO DE MOLECIMENTO, min.	°C	NBR - 6560	D 36	52	46	43	37
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROL							
135°C, MIN.	Cp	NBR - 14950	E 102	192	141	110	80
150°C, MIN.				90	50	43	36
177°C				40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60
OU							
VISCOSIDADE BROOKFIELD							
135°C, SPINDLE 21, 20 rpm, min.	Cp	NBR - 15184	D 4402	374	274	214	155
150°C, MIN.				203	112	97	81
177°C				76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114
ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE TÉRMICA (1)				(-1.5) a (+0.7)	(-1.5) a (+0.7)	(-1.5) a (+0.7)	(-1.5) a (+0.7)
PONTO DE FULGOR	°C	NBR - 11341	D 92	235	235	235	235
SOLUBILIDADE EM TRICLOROETILENO, min.	% MASSA	NBR - 14855	D 2042	99.5	99.5	99.5	99.5
DUCTILIDADE A 25°C, min.	CM	NBR - 6293	D 113	60	60	100	100
EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT) a 163°C, 85 MINUTOS							
VARIAÇÃO EM MASSA, MÁX (2)	%	NBR - 15235	D 2872	0.5	0.5	0.5	0.5
DUCTILIDADE A 25°C, min.	CM	NBR - 6293	D 113	10	20	50	50
AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO, MÁX	°C	NBR - 6560	D 36	8	8	8	8
PENETRAÇÃO RETIDA, MÍN. (3)	%	NBR - 6576	D 5	60	55	55	50

Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008).

2.4 Concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ)

Como definição para o concreto asfáltico usinado a quente, o DNIT (2006), cita pré misturados a altas temperaturas, com graduação densa, exigindo investimento tecnológico e em equipamentos e usinagem, tendo dentre eles a granulometria, o teor de betume, estabilidade, volume de vazios, dentre outros.

A seguir serão apresentados os parâmetros e métodos que servem como referência para o estudo de diferentes misturas asfálticas.

2.4.1 Granulometria

Conforme Bernucci et al. (2008), pode-se dividir as misturas asfálticas a quente em três grupos distintos conforme a graduação dos seus agregados e levando se em consideração o filer, são elas:

- a) graduação densa: é uma graduação que possui uma curva granulométrica bem graduada e contínua, o que proporciona um corpo do revestimento com poucos vazios, sendo estes preenchidos pelos agregados de dimensões menores;
- b) graduação aberta: possui agregados quase que do mesmo tamanho, o que proporciona um índice maior de vazios, tendo insuficiência de material fino (menor que 0,075mm), sendo esta uma graduação com propriedades drenantes, que possibilitam a percolação de água;
- c) graduação descontínua: curva granulométrica que possui maior quantidade de grãos de maiores dimensões em relação a grãos intermediários e são completados por finos, o esqueleto mineral torna-se mais resistente quanto a deformações, visto que, ocorre um maior contato entre o agregado de maiores dimensões.

Na Figura 09, pode-se observar diferentes tipos de agregados que compõem as misturas abertas, descontínuas e densas.

Figura 09: Exemplo de agregados que compõem uma mistura aberta (1ª), descontínua (2ª) e densa (3ª)



Fonte: Bernucci et al. (2008).

2.4.2 Teor de ligante e volume de vazios

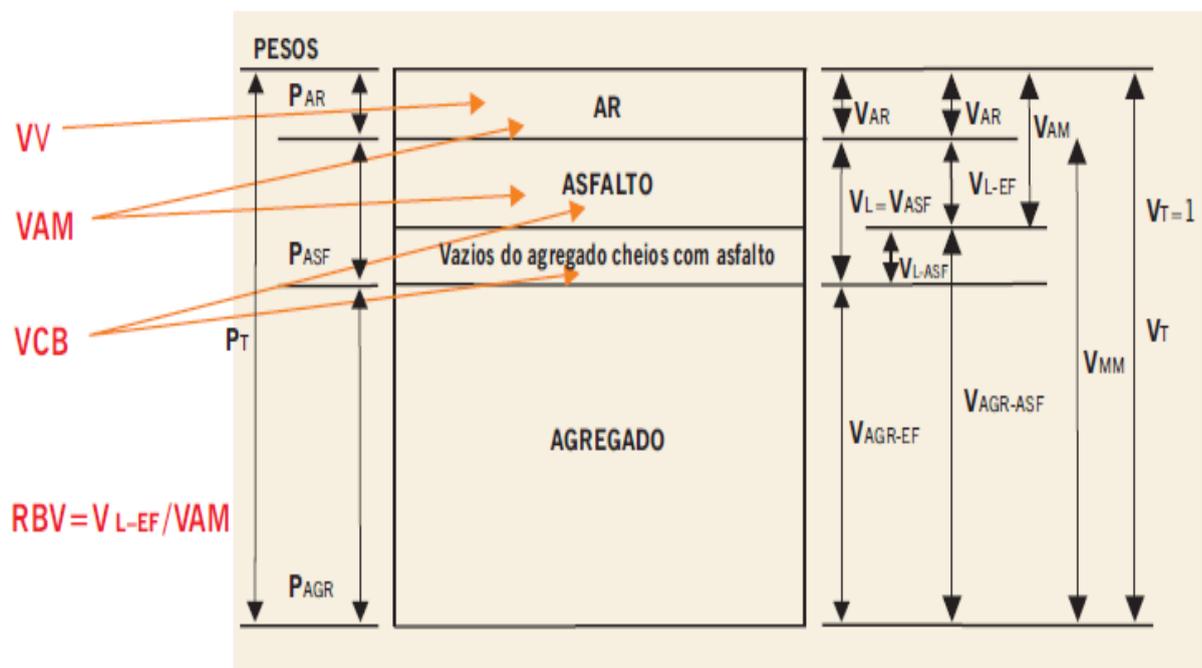
Conforme Ceratti et al. (2011), quando utilizado o método de dosagem Marshall, pode-se utilizar diversas opções de teor de ligante asfáltico. O teor de asfalto utilizado no projeto tem como base o volume de vazios. No Brasil, o volume de vazios adotado normalmente é de 4%, por ser o valor médio citado nas especificações. Outra forma de se atingir um teor de projeto, é fazendo uma média de três teores, a partir da estabilidade Marshall, utilizando se volume de vazios e massa específica aparente, ou utilizando dois parâmetros volumétricos: volume de vazios (VV) e relação betume / vazios (RBV). O autor considera importante o ajuste do projeto de dosagem quando se confirmem os seguintes casos:

- a) a mistura possua um volume de vazios menor de 3% e que sua estabilidade seja considerada insatisfatória, deve se ajustar a quantidade de filer ou do ligante, ou ajustar as proporções dos agregados miúdo e graúdos;
- b) a mistura possua um volume de vazios maior que 5% e que sua estabilidade seja satisfatória, devendo se aumentar a quantidade de filer ou de ligante, podendo também ser ajustada a quantidade de agregado miúdo e graúdo;
- c) a mistura possua volume de vazios menor que 3% e que sua estabilidade seja baixa, pode se aumentar a quantidade de filer e diminuir a participação do ligante, ou aumentar a proporção do agregado graúdo;
- d) a mistura possua volume de vazios maior que 5% e que sua estabilidade seja considerada baixa, o ajuste se dá com o aumento da quantidade de filer utilizada, podendo ajustar as quantidades de agregados miúdos e graúdos;
- e) a mistura possua volume de vazios entre 3% a 5% e que tenha a estabilidade baixa, neste caso deve se reduzir a quantidade de ligante utilizado, ou aumentando a quantidade utilizada de agregado graúdo, devendo ser verificada a forma dos grãos utilizados;

- f) a mistura possua volume de vazios entre 3% a 5% e que sua estabilidade seja considerada alta quando indesejável, neste caso é indicado aumentar a quantidade de ligante e diminuir a proporção do filer.

Na Figura 10, apresenta-se a volumetria encontrada em uma mistura asfáltica, bem como onde se encontram suas devidas propriedades.

Figura 10: Volumetria de uma mistura asfáltica

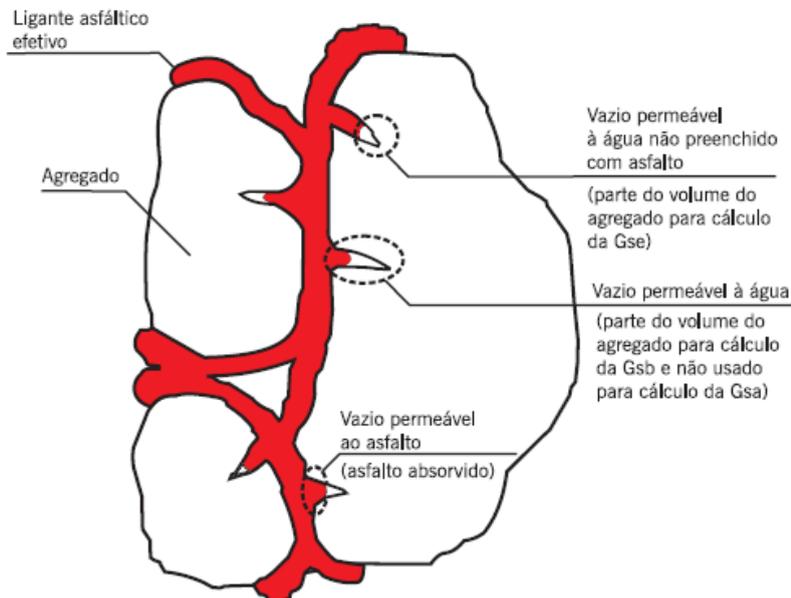


Fonte: Bernucci et al. (2008).

2.5 Dosagem de misturas asfálticas a quente

Conforme Balbo (2007), pode-se definir como prioridade no momento de uma dosagem de mistura asfáltica a obtenção de uma trabalhabilidade adequada à mistura. Outra característica importante é que seja estável quando houver a solicitação de cargas, sendo também imprescindível que tenha durabilidade e que tenha baixa deformação. A mistura deve ter adequado teor de vazios e controle do teor de asfalto. Na Figura 11 pode-se entender a dinâmica das misturas entre ligante asfáltico e agregados. O ligante asfáltico envolve os agregados e entra pelos poros, unindo a mistura.

Figura 11: Componentes da mistura asfáltica



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Conforme Balbo (2007), não existe apenas um critério de dosagem para misturas asfálticas, deve-se levar em conta os fatores locais, os equipamentos disponíveis, e ainda deve-se considerar por meio de ensaios tecnológicos a degradação que a mistura sofrerá na pista.

2.5.1 Método Marshall

Segundo Bernucci et al. (2008), o método Marshall, criado pelo engenheiro Bruce Marshall, consiste em um passo a passo para a dosagem do concreto asfáltico que pode ser descrito conforme os passos a seguir:

- inicia-se pela determinação da massa específica dos agregados e do CAP;
- deve-se fazer a escolha de uma faixa granulométrica que será utilizada, sendo que esta irá depender do órgão responsável pela rodovia;
- escolhe-se o material enquadrando a mistura dentro da faixa granulométrica que foi selecionada, ou seja, é escolhida a massa de cada agregado a fim de constituir a mistura;

- d) escolhe-se as temperaturas que serão utilizadas para mistura e compactação, de acordo com a especificação, em função da relação temperatura-viscosidade do ligante escolhido, não sendo inferior a 107°C e nem superior a 177°C (DNIT 031, 2006);
- e) o próximo passo é a adoção de diferentes teores de asfalto para grupos de corpos de prova, tendo no mínimo 3 CPs por grupo;
- f) após o resfriamento do corpo de prova, são aferidas as medidas de altura e diâmetro das amostras, tornando possível a determinação das massas seca e submersa. Em posse destas massas, é possível determinar sua massa específica aparente, que comparada a massa específica teórica, permite realizar relações volumétricas de dosagem;
- g) conforme o teor de asfalto encontrado nos grupos de CPs, pode-se ajustar a massa utilizada de cada agregado em percentual. Tendo como base a massa específica e o percentual em massa do agregado, e do teor de asfalto do grupo de CPs, é calculada a massa específica teórica;
- h) em seguida é calculado o volume do corpo de prova e a massa específica aparente da mistura;
- i) os corpos de prova são submersos em água a 60 graus Celsius, entre 30 a 40 minutos, conforme exigência da especificação, e em seguida são submetidos a teste de compressão, sendo determinados pela prensa Marshall sua estabilidade e fluência.

Conforme Ceratti et al. (2011), os principais parâmetros determinados pela prensa Marshall, apresentada na Figura 12, são a estabilidade e a fluência. A estabilidade pode ser definida como a leitura da carga no ponto máximo em que o corpo de prova suporta antes que aconteça a ruptura, sendo definida como o ponto em que acontece um deslocamento do agregado, ou até mesmo uma quebra. A fluência é caracterizada por um deslocamento do corpo de prova, quando aplicada a carga máxima. Ainda na prensa Marshall, pode-se determinar a resistência à tração dada por compressão diametral.

Figura 12: Prensa Marshall



Fonte: Bernucci et al. (2008).

2.6 A influência do filer na camada de revestimento da pavimentação

Segundo EM 367 (DNER, 1997), classifica-se o filer mineral, que também pode ser chamado de enchimento, como um material inerte, se comparado aos outros materiais utilizados em uma mistura asfáltica. Para se enquadrar nesta faixa de material, o agregado deve ser, pelo menos, 65% passante na peneira com abertura de 0,075mm.

Para Balbo (2007), o filer nada mais é do que a fração mais fina originada no processo de britagem, também podem ser utilizados como filer a cal, o cimento Portland, dentre outros materiais finos. A principal função do filer na pavimentação é o preenchimento dos vazios que são originados nas misturas de agregados miúdos e graúdos, sendo de uso comum nas misturas asfálticas como o CBUQ.

Conforme Bardini (2013), existem diversos tipos de patologias a serem resolvidos no que se diz respeito a pavimentação asfáltica, mas pode se colocar em destaque as trincas por fadiga que aparecem e se propagam, as trilhas de rodas, bem como o trincamento térmico devido às variações de temperatura. A solução destas questões passa pelo estudo do ligante e do filer utilizado na mistura, com intuito de se encontrar um melhor projeto de misturas asfálticas. A importância do filer no comportamento das misturas asfálticas é reconhecida há muito tempo, sendo ele o responsável pelo preenchimento dos vazios originados pelo agregado graúdo, alterando também as propriedades do ligante asfáltico agindo como a parte ativa do mástique.

Bernucci et al. (2008) explicam a importância das frações mais finas, que são as frações passantes na peneira #200, sendo necessária a limitação da porcentagem utilizada, uma vez que nos solos elas aumentam a plasticidade dos mesmos, nos materiais utilizados para sub base ou base graduada reduzem a permeabilidade e rigidez dos materiais, aumentando sua deformabilidade e principalmente na presença de água aumentam a expansão volumétrica, reduzindo assim a sua resistência.

Com relação ao revestimento asfáltico, Bernucci et al. (2008) enfatizam que conforme o percentual de pó aumenta, os vazios são reduzidos aumentando assim a trabalhabilidade, beneficiando até determinado ponto. Acima disto, o teor de filer tem um efeito oposto e começa a prejudicar tanto a estabilidade quanto a trabalhabilidade do esqueleto mineral, afetando inclusive a compactação do revestimento.

Conforme Bardini (2013), o filer quando utilizado em misturas asfálticas ajuda na adesão do sistema entre ligante e agregado, por meio de mecanismos físico-químicos mecânicos. Como mecanismo mecânico pode-se citar o aumento no que diz respeito a viscosidade do ligante, aumentando a sua resistência ao descolamento. Já para os mecanismos físico e químico pode-se citar a interface que produz entre o agregado e o mástique, tendo como principal exemplo a cal hidratada, que é utilizada tradicionalmente para melhorar a adesividade em misturas asfálticas, e sendo ela utilizada na razão de 1 a 3% do peso dos agregados.

2.6.1 Mástique

Conforme Bardini et al. (2010), o mástique tem por definição a mistura entre filer e ligante asfáltico que tem por função envolver os agregados graúdos e preencher os vazios que se formam no esqueleto mineral garantindo compacidade, trabalhabilidade e impermeabilidade nas misturas asfálticas. Pode-se citar como motivos para utilização de filer nas misturas asfálticas a redução dos custos iniciais, a obtenção de misturas asfálticas mais rígidas e consequente melhora no desempenho dos pavimentos.

Balbo (2007) chama a atenção para a mistura entre o CAP e o filer, denominada mástique, sendo que, mais do que servir como preenchimento dos vazios, o filer causa um aumento da viscosidade do CAP, ajudando no ponto de amolecimento e na estabilidade, além de contribuir também ao módulo de resiliência, também contribui com o aumento da resistência da mistura, tendo porém que ser limitado até um certo ponto.

Para Bardini et al. (2013) o filer executa papel fundamental no que diz respeito ao comportamento de misturas asfálticas. Ele é responsável pelo preenchimento dos vazios, que são originados em meio ao agregado graúdo, alterando as propriedades do ligante asfáltico tendo em si a parte ativa do mástique.

Conforme Rodrigues (2019), o mástique asfáltico tem influência direta na lubrificação dos agregados de maiores dimensões, também influencia o volume de vazios da mistura, interferindo diretamente na compactação e no teor de asfalto que será utilizado no projeto.

Bardini (2013) aponta que a qualidade do mástique tem influência direta nas respostas mecânicas, afetando assim a sua trabalhabilidade. O processo da fadiga se dá inicialmente pelo desenvolvimento de microfissuras no mástique, sendo diretamente influenciado pela característica do ligante asfáltico, pelas propriedades do filer utilizado e ainda pela interação físico e química entre filer e ligante, esta interação é afetada pela finura e pela característica da superfície do filer utilizado.

2.6.2 Tipos de filer

Conforme Bardini (2010) os fileres possuem características indispensáveis para que ocorra interação com o ligante asfáltico estando dentre elas, o tipo de filer no que diz respeito a sua graduação, forma dos grãos, superfície específica e textura superficial. Outra característica importante é a sua natureza, ou seja, sua composição mineralógica e a atividade físico-química que podem afetar a sua interação com o ligante asfáltico. Além de todos estes fatores deve-se levar em conta também a concentração de filer que será utilizada na mistura asfáltica. Estes são os fatores fundamentais quando se leva em consideração o filer a ser utilizado na mistura asfáltica.

Bardini (2013) em seu estudo utiliza como fileres o pó de sílica, cal hidratada (CH-III), pó calcário e cimento Portland. Considera em sua pesquisa os materiais como ativos, citando como exemplo a cal hidratada e o cimento Portland. Considera também que o pó calcário e o pó de sílica são fileres do tipo inativos.

Apaza et al. (2018) aponta em seu estudo a utilização de resíduos de minério de ferro, Figura 13, na execução de microrrevestimento asfáltico, estes resíduos são provenientes do beneficiamento de minérios de ferro da cidade de Mariana em Minas Gerais e foram utilizados como filer na mistura asfáltica. O Brasil, conforme apontamentos da Conferência das Nações Unidas Sobre Comércio e Desenvolvimento é o segundo país que mais produz minério de ferro em todo o mundo, possuindo reservas de até 29 bilhões de toneladas.

Rodrigues (2019) utilizou em sua pesquisa dois tipos diferentes de fileres, um originado de pó de basalto oriundo de uma jazida da região do triângulo mineiro e outro o metacaulim, que é um produto industrializado. O metacaulim tem em sua estrutura essencialmente óxido de silício e óxido de alumínio, contendo uma elevada atividade pozolânica.

Figura 13: Resíduo de minério de ferro utilizado com fíler na mistura asfáltica



Fonte: Apaza et. al (2018).

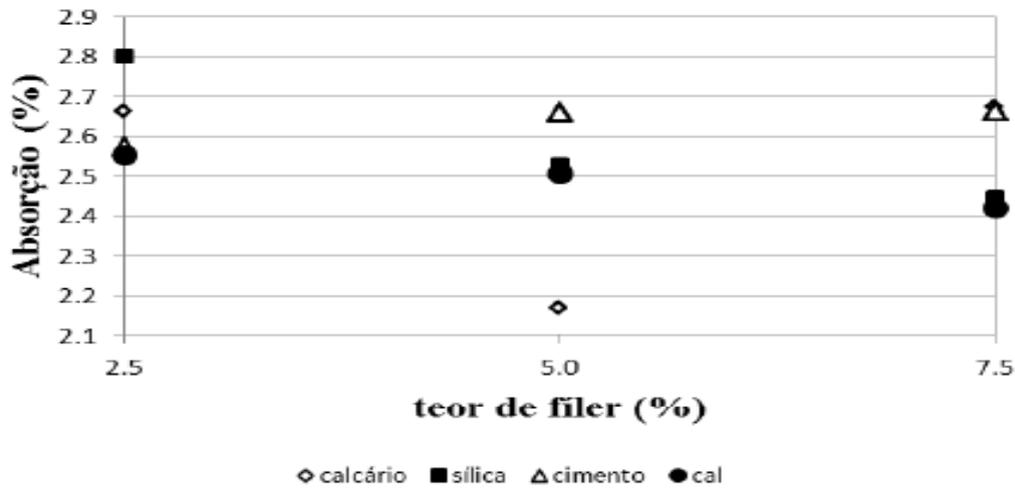
2.6.3 Características encontradas por outros autores

Neste item pode-se acompanhar alguns resultados apresentados por diferentes autores no estudo do tipo e do teor de fíler utilizado em diferentes misturas asfálticas. Pode-se perceber nos parágrafos anteriores uma diversidade de fileres utilizados por diferentes autores e a performance de cada material nos testes efetuados.

Conforme Dukatz e Anderson, 1980 (apud, BARDINI) a utilização de dois tipos de fíler mineral provocam diferentes efeitos no enrijecimento no momento em que é adicionado a um ligante asfáltico, sendo esses efeitos provocados pelas interações físicas e químicas e também levando em consideração a granulometria do fíler. Quanto maior a relação entre fíler e aglomerante maior será seu efeito enrijecedor. Uma mistura que contém fíler de calcário é 100 vezes mais rígida que uma que contenha ligante asfáltico puro.

Na Figura 14, Bardini (2013) apresenta os resultados referentes à absorção de ligante, considerando agregados compostos por basalto utilizando CAP 50/70, tendo em função o teor de fíler dos diferentes minerais citados acima. Percebe-se que a absorção de ligante diminui conforme o teor de fíler é aumentado e em função do material utilizado na mistura asfáltica.

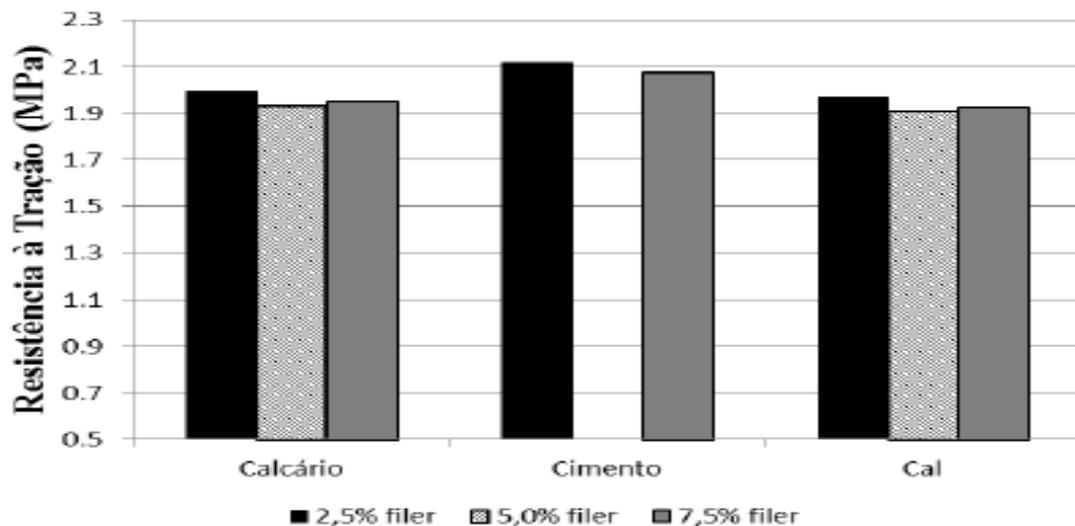
Figura 14: Gráfico de absorção de ligante conforme o teor e tipo de filler



Fonte: Bardini (2013).

Quanto a resistência à tração, Bardini (2013) apresenta como resultado para misturas que utilizaram CAP 50/70 os maiores valores, sendo agregados basálticos os que também apresentaram uma maior resistência à tração. Quanto ao tipo de filler, as misturas feitas com a utilização de cimento Portland foram os que apresentaram os maiores valores para resistência à tração. Na Figura 15, Bardini (2013) apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração, das misturas citadas acima.

Figura 15: Gráfico de resistência à tração conforme o teor e o filler utilizado

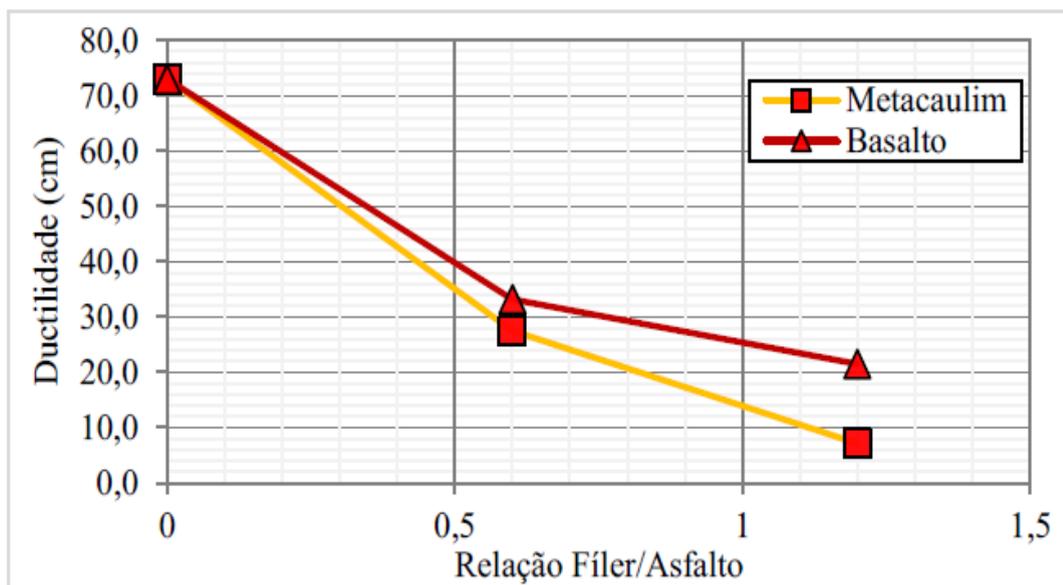


Fonte: Bardini (2013).

Conforme os resultados apresentados por Apaza et al. (2018) os resíduos de minério de ferro não apresentaram fatores que indicassem um prejuízo ao meio ambiente. Segundo ensaios de lixiviação e solubilização o material mostrou-se apropriado para ser utilizado em misturas asfálticas, em seu estudo aponta vantagens técnicas e ambientais para a utilização do resíduo de minério de ferro.

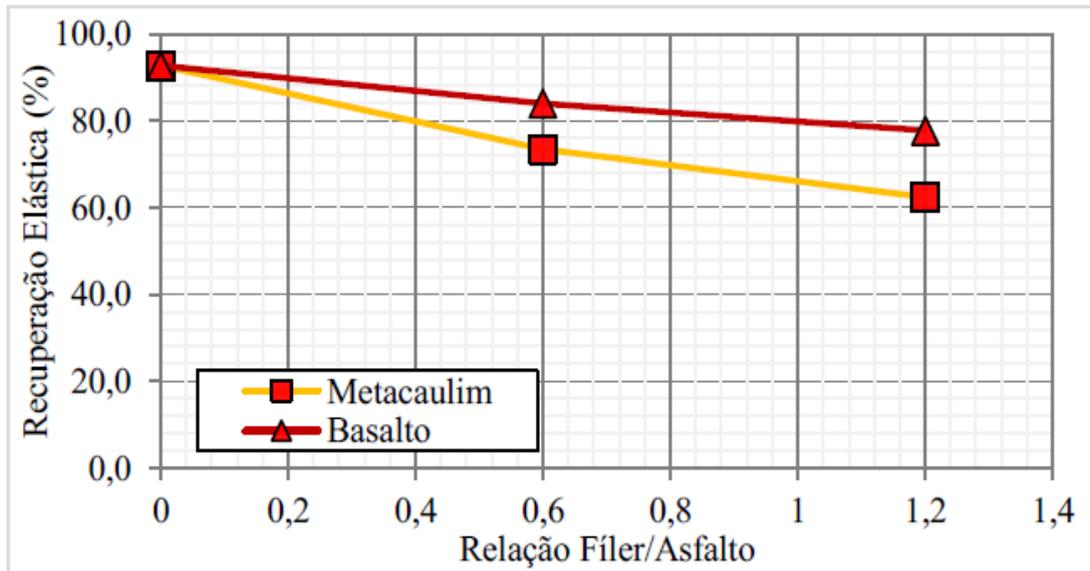
Em seu estudo, Rodrigues (2019), utilizou metacaulim e pó de basalto, como já foi citado anteriormente. Os resultados dos ensaios aplicados resultaram na constatação do aumento da dureza, conforme Figura 16, e em uma redução da recuperação elástica das amostras conforme Figura 17. Quanto maior a quantidade de filer utilizado na mistura, mais evidente foram os efeitos. Para a mistura asfáltica que utilizou metacaulim, ficou evidente uma maior rigidez, menor elasticidade, menor ductilidade e ainda uma perda na trabalhabilidade do material.

Figura 16: Gráfico da ductilidade encontrada para diferentes fileres



Fonte: Rodrigues (2019).

Figura 17: Gráfico dos resultados obtidos para recuperação elástica



Fonte: Rodrigues (2019).

Pode-se perceber que existe uma grande variedade de tipos de fíler que podem ser utilizados em uma mistura asfáltica, e que, cada um tem influência direta nas alterações sofridas pelas propriedades da mistura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e métodos adotados para a elaboração do trabalho, expondo as propriedades dos agregados e do ligante asfáltico utilizados, bem como a faixa de mistura asfáltica utilizada nos três projetos asfálticos. Este estudo tem a intenção de possibilitar uma análise sobre a influência do filler na dosagem e nas características mecânicas do CAUQ.

3.1 Materiais

Neste subitem são apresentados os materiais utilizados na mistura asfáltica e ainda as misturas asfálticas utilizadas para realização desta pesquisa.

3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados para a mistura asfáltica são agregados de origem basáltica oriundos da britagem localizada em Nova Santa Rita, Estrela, RS, da empresa Conpasul. A pedreira possui uma lavra com predominância de basalto, material existente em abundância em todo o estado do Rio Grande do Sul devido a sua formação geológica. O estudo foi desenvolvido comparando os efeitos encontrados nas diferentes misturas asfálticas utilizando diferentes teores de filler. O filler utilizado para esta pesquisa foi de origem basáltica, sendo ele

o material passante pela peneira de número #200 durante o processo de peneiramento dos agregados utilizados.

A caracterização dos agregados foi fornecida pela empresa Compasul Construção e Serviços LTDA. Na Tabela 02 são apresentadas as propriedades do agregado, como densidade solta, densidade aparente, densidade absoluta, percentual de absorção, equivalente de areia do agregado extraído da pedreira. Também apresentam-se dados como a granulometria de cada agregado utilizado na mistura asfáltica, conforme Tabela 03. Para NA leia-se: Não Aplicado.

Tabela 02: Propriedades do agregado utilizado na mistura

PROPRIEDADES	ENSAIO	UNIDADE	PÓ DE PEDRA	PEDRISCO	BRITA 01
DENSIDADE SOLTA	DNER 081/1998	g/cm ³	1.660	1.435	1.450
DENSIDADE APARENTE	DNER 081/1998	g/cm ³	NA	2.830	2.833
DENSIDADE ABSOLUTA	DNER 081/1998	g/cm ³	2.922	2.967	2.954
ABSORÇÃO	DNER 084/1995	%	NA	2.510	2.230
EQUIVALÊNCIA DE AREIA	DNER 054/1997	%	57.000	NA	NA

Fonte: Autor (2021).

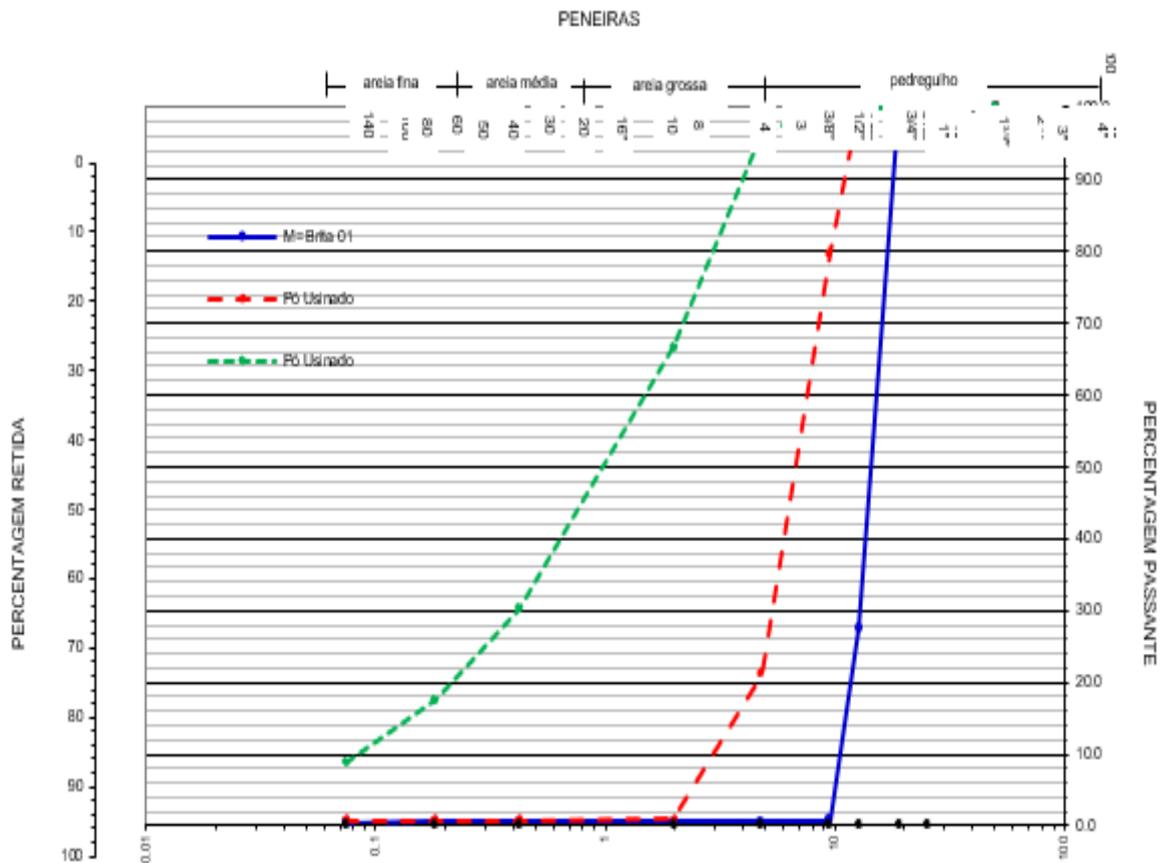
Tabela 03: Granulometria do agregado utilizado na mistura

	PENEIRAS		PÓ DE PEDRA	PEDRISCO	BRITA 1
	#	mm			
GRANULOMETRIA (% PASSANTE ACUMULADO)	2"	50.800	100.00	100.00	100.00
	1 1/2"	38.100	100.00	100.00	100.00
	1 1/4"	31.700	100.00	100.00	100.00
	1"	25.400	100.00	100.00	100.00
	7/8"	22.200	100.00	100.00	100.00
	3/4"	19.000	100.00	100.00	93.20
	1/2"	12.700	100.00	100.00	21.70
	3/8"	9.500	100.00	84.50	0.80
	1/4"	6.300	99.80	41.40	0.30
	4	4.800	98.10	16.30	0.30
	8	2.400	68.50	2.10	0.30
	10	2.000	63.00	1.90	0.20
	16	1.200	48.00	1.80	0.20
	30	0.600	38.70	1.70	0.20
	40	0.400	34.30	1.50	0.10
	50	0.300	31.00	1.40	0.10
	80	0.170	26.40	1.30	0.10
100	0.150	24.00	1.20	0.10	
200	0.075	17.90	1.10	0.04	

Fonte: Autor (2021).

Na Figura 18, pode-se observar a granulometria dos agregados que serão utilizados na mistura asfáltica, com o percentual de agregado retido de cada peneira.

Figura 18: Granulometria dos agregados da mistura asfáltica



Fonte: Autor (2021).

3.1.2 Ligante asfáltico

Como ligante asfáltico optou-se por utilizar na mistura o CAP 50/70, material fornecido pela refinaria da Petrobrás Distribuidora S/A, situada na cidade de Canoas - RS. Na Tabela 04 pode-se observar as propriedades do CAP que será utilizado na mistura asfáltica. Foi escolhido o CAP 50/70 devido a sua grande utilização em rodovias da nossa região, e também pela disponibilidade do produto.

Tabela 04: Propriedades do ligante utilizado na mistura asfáltica

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	MÉTODO		ESPECIFICAÇÃO
		ABNT	ASTM	CAP 50-70
PENETRAÇÃO (100G, 5S, 25°C)	0.1 mm	NBR - 6576	D5	50 a 70
PONTO DE MOLECIMENTO, min.	°C	NBR - 6560	D 36	46
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROL				
135°C, MIN.	Cp	NBR - 14950	E 102	141
150°C, MIN.				50
177°C				30 a 150
OU				
VISCOSIDADE BROOKFIELD				
135°C, SPINDLE 21, 20 rpm, min.	Cp	NBR - 15184	D 4402	274
150°C, MIN.				112
177°C				57 a 285
ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE TÉRMICA (1)				(-1.5) a (+0.7)
PONTO DE FULGOR	°C	NBR - 11341	D 92	235
SOLUBILIDADE EM TRICLOROETILENO, min.	% MASSA	NBR - 14855	D 2042	99.5
DUCTILIDADE A 25°C, min.	CM	NBR - 6293	D 113	60
EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT) a 163°C, 85 MINUTOS				
VARIAÇÃO EM MASSA, MÁX (2)	%	NBR - 15235	D 2872	0.5
DUCTILIDADE A 25°C, min.	CM	NBR - 6293	D 113	20
AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO, MÁX	°C	NBR - 6560	D 36	8
PENETRAÇÃO RETIDA, MÍN. (3)	%	NBR - 6576	D 5	55

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Greca Asfaltos (2020).

3.2 Métodos

A pesquisa foi desenvolvida com base no método Marshall para a dosagem das três misturas asfálticas estudadas. Através do referido método de dosagem, especificado pela norma ME 043 (DNER, 1995), pode-se determinar o teor de ligante do projeto, a estabilidade e a fluência de misturas betuminosas usinadas a quente.

No trabalho foi utilizada como base a dosagem estabelecida pela faixa C do DNIT conforme especificação ME 031 (DNIT, 2006), sendo executadas três misturas asfálticas. Foram realizadas dosagens com 4%, 6% e 8% de teor de filler. Foram escolhidos estes teores para que se pudesse ter uma variação de 2% entre cada mistura, e que as mesmas estivessem dentro dos limites da faixa C do DNIT.

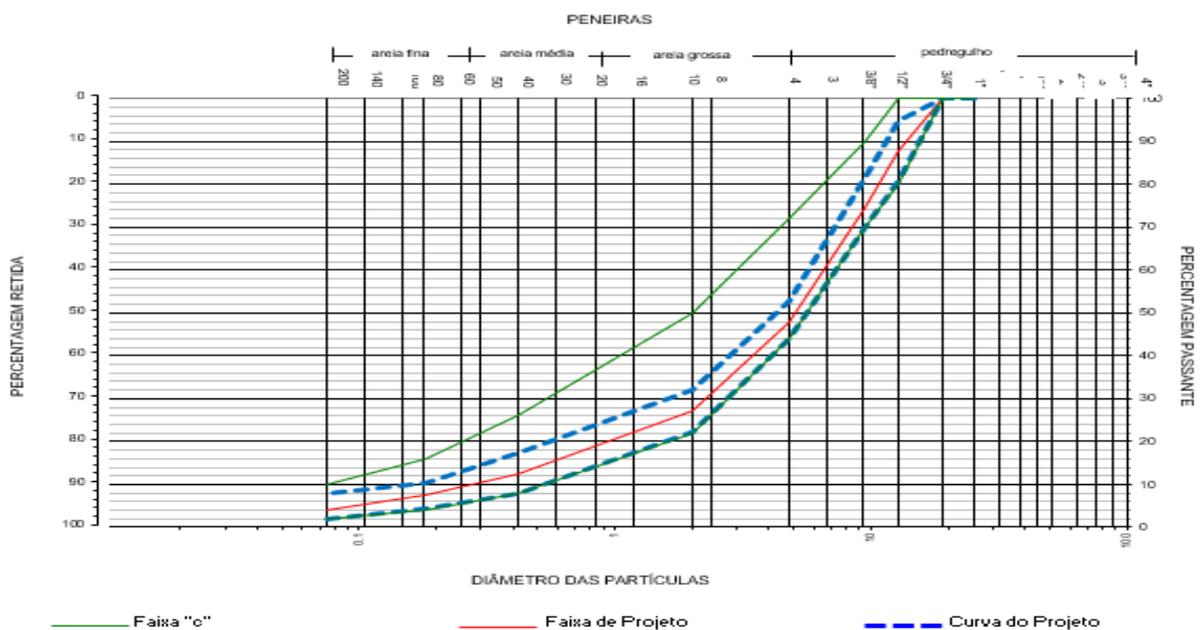
Com a dosagem dessas misturas, pretende-se demonstrar a influência que o teor de finos exerce em uma mistura betuminosa usinada a quente, bem como os efeitos nas propriedades mecânicas de misturas asfáltica.

Os ensaios foram efetuados no Laboratório de Tecnologia da Construção - LATEC da UNIVATES, onde foram realizados ensaios de granulometria para separação dos agregados, dosagem pelo método Marshall e ensaio de resistência à tração por compressão diametral, sendo realizado, para cada mistura, 5 grupos de três corpos de prova para cada teor de asfalto utilizado, totalizando 15 corpos de prova para cada mistura.

3.2.1 Misturas Asfálticas

As misturas asfálticas utilizadas na realização dos estudos foram enquadradas dentro da faixa C do DNIT, e seguem especificação da ME 031 (DNIT, 2006), com utilização de CAP 50/70. Basicamente é um projeto composto por 17% de brita 1, 43% de brita 3/8" e 40% de pó de brita. A Figura 19 apresenta a composição granulométrica da mistura contendo 4% de teor de filer. Esta será a faixa com o menor teor de filer utilizado.

Figura 19: Gráfico da composição granulométrica da mistura com 4% de teor de filer agregado



Fonte: Autor (2021).

Na Tabela 05, apresenta-se a mistura a ser utilizada com teor de fíler de 4%, a faixa de trabalho é a faixa C do DNIT utilizada para todas as misturas asfálticas, sendo esta a faixa a ser utilizada neste estudo.

Tabela 05: Mistura, faixa de trabalho e faixa C do DNIT, bem como sua tolerância, para mistura com 4% de teor de fíler agregado.

#	MISTURA (%)	FAIXA DE TRABALHO (%)		Fx C DNIT (%)		TOLER. (+/-) (%)
1"	100.0	100.0	100.0	100.00	100.00	7.00
3/4"	100.0	100.0	100.0	100.00	100.00	7.00
1/2"	87.7	80.7	94.7	80.00	100.00	7.00
3/8"	74.4	70.0	81.4	70.00	90.00	7.00
n 4	47.9	44.0	52.9	44.00	72.00	5.00
n 10	27.1	22.1	32.1	22.00	50.00	5.00
n 40	12.5	8.0	17.5	8.00	26.00	5.00
n 80	7.4	4.4	10.4	4.00	16.00	3.00
n 200	4.0	2.0	8.0	2.00	10.00	2.00

Fonte: Autor (2021).

Na Tabela 06, apresentam-se as misturas utilizadas para o desenvolvimento do trabalho com os projetos com teores de fíler de 4%, 6% e 8%. Nas três misturas asfálticas foi mantido o mesmo esqueleto mineral, sendo alterado somente o teor de fíler de cada um, possibilitando assim a comparação da modificação referente somente ao teor de fíler.

Tabela 06: Granulometrias utilizadas nas misturas asfálticas

GRANULOMETRIA DAS MISTURAS			
PENEIRA	MISTURA 01	MISTURA 02	MISTURA 03
	TEOR DE FÍLER 4%	TEOR DE FÍLER 6%	TEOR DE FÍLER 8%
	% RETIDO	% RETIDO	% RETIDO
1/2"	12	12	12
3/8"	13	13	13
Nº 4	27	26	25
Nº 10	21	20	20
Nº 40	15	14	14
Nº 80	5	5	5
Nº 200	3	3	3
FUNDO	4	6	8

Fonte: Autor (2021).

3.2.2 Preparação dos agregados

Para realização da pesquisa, seguiu-se a norma ME 083 (DNER, 1998). Inicialmente os agregados coletados na pedreira foram peneirados conforme cada fração granulométrica necessária para a composição do projeto. Para realização do peneiramento o agregado foi seco em estufa e, em seguida, foi realizada a sua separação. Na Figura 20 pode-se observar as peneiras utilizadas para o peneiramento manual dos agregados. O material britado é colocado na parte superior da peneira e as peneiras são vibradas para que os materiais passantes em cada uma consigam descer para as peneiras com menores diâmetros. Ao final, o material retido em cada peneira deve ser armazenado conforme cada granulometria.

Figura 20: Peneiras utilizadas para separação granulométrica dos agregados



Fonte: Autor (2021).

Após a separação granulométrica de cada agregado, eles foram colocados em recipientes separados para que possibilitasse a pesagem de cada fração para compor os corpos de prova do projeto de misturas asfálticas, conforme Figura 21.

Figura 21: Agregados separados conforme cada granulometria de projeto



Fonte: Autor (2021).

Com os agregados separados, procedeu-se à realização de ensaios para determinação de dosagem da mistura asfáltica.

3.2.3 Dosagem Marshall para misturas asfálticas

A dosagem utilizada para este trabalho foi orientada pelo método Marshall conforme a norma ME 043 (DNER, 1995), conforme os procedimentos descritos a seguir.

Primeiramente o agregado selecionado a partir do peneiramento foi lavado, pois o material oriundo da britagem apresenta umidade e, conseqüentemente, finos incorporados ao material graúdo. Em seguida este agregado foi seco em estufa com temperatura aproximada entre 105°C e 110° C. Após a lavagem e secagem dos agregados, os mesmos foram peneirados até que se obtivesse material suficiente para a confecção dos corpos de prova.

Após a etapa de separação granulométrica dos agregados, eles foram pesados conforme os traços apresentados no item 3.2.1, sendo colocados em recipiente que possibilitasse esquentar em estufa antes da realização da dosagem, respeitando as exigências da especificação ME 043 (DNER, 1995). Na Figura 22 pode-se observar as frações

granulométricas separadas conforme traço especificado anteriormente e na Tabela 07 as quantidades em massa utilizadas para cada agregado.

Figura 22: Material sendo preparado para confecção do corpo de prova



Fonte: Autor (2021).

Tabela 07: Quantidades de agregado em massa, utilizadas nas misturas asfálticas

GRANULOMETRIA DAS MISTURAS			
PENEIRA	MISTURA 01	MISTURA 02	MISTURA 03
	TEOR DE FÍLER 4%	TEOR DE FÍLER 6%	TEOR DE FÍLER 8%
	MASSA (G)	MASSA (G)	MASSA (G)
1/2"	144.24	144.24	144.24
3/8"	154.75	154.75	154.75
Nº 4	311.15	311.15	311.15
Nº 10	242.89	242.89	242.89
Nº 40	171.11	171.11	171.11
Nº 80	59.09	59.09	59.09
Nº 200	40.55	40.55	40.55
FUNDO	46.85	71.80	97.80
	1170.63	1195.58	1221.58

Fonte: Autor (2021).

A temperatura utilizada na compactação foi definida seguindo as exigências da especificação, em função da relação temperatura-viscosidade do ligante escolhido, não sendo

inferior a 107°C e nem superior a 177°C (DNIT 031,2006). Para este trabalho utilizou-se 160°C como temperatura de compactação.

Com a temperatura de compactação estabelecida foi possível estabelecer a temperatura para aquecimento dos agregados que foi de 170°C antes da realização da mistura. Os agregados foram levados até a estufa e aquecidos a uma temperatura de 170° C, seguindo exigência da especificação, que estabelece que a temperatura do agregado seja entre 10°C e 15°C superior a temperatura em que o ligante seja aquecido, sendo que não ultrapasse os 177°C.

O ligante foi aquecido a 160°C, mesma temperatura utilizada para compactação dos corpos de prova. Na Figura 23 pode-se conferir o CAP 50/70 aquecido a uma temperatura controlada de 160°C, antes da realização da dosagem pelo método Marshall.

Figura 23: CAP 50/70 aquecido a 160°C

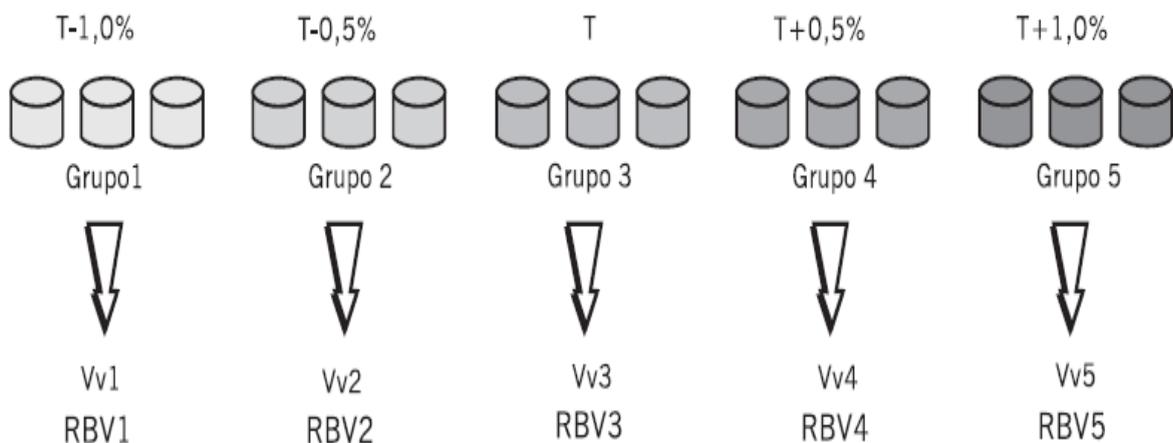


Fonte: Autor (2021).

Para determinação do teor de ligante ótimo da mistura asfáltica, deve-se adotar diferentes teores de ligante para cada grupo de corpo de prova que forem moldados, conforme Figura 24. Tendo cada grupo, no mínimo, 3 corpos de prova, de forma a ser possível verificar as curvas de volume de vazios, traçando no gráfico o volume de vazios de 4%, conforme orientação da especificação, e desta forma possibilitando encontrar o teor ideal da mistura .

A norma ME 031 (DNIT, 2006) ainda permite que a camada de rolamento tenha entre 3 a 5% de volume de vazios. Neste trabalho foi utilizado um volume de vazios de 4% por ser o valor médio citado nas especificações, sendo este o valor que geralmente é adotado em território nacional.

Figura 24: Exemplo de grupos de corpo de provas



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Conforme exigência da especificação ME 043 (DNER, 1995), foram utilizados 5 teores de CAP diferentes para cada mistura, com os teores fixados em 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%, sendo executados 3 corpos de prova para cada teor de ligante a ser utilizado. Na Tabela 08 apresenta-se os teores de ligante utilizados para cada corpo de prova de cada projeto de mistura asfáltica. No total foram moldados 45 corpos de prova, 15 para cada mistura asfáltica.

Tabela 08: Teor de ligante utilizado em cada corpo de prova dos projetos de mistura asfáltica

TEORES DE CAP UTILIZADO PARA OS PROJETOS			
CORPO DE PROVA	MISTURA 01 - 4%	MISTURA 02 - 6%	MISTURA 03 - 8%
	TEOR DE CAP (%)	TEOR DE CAP (%)	TEOR DE CAP (%)
1	4.00	4.00	4.00
2	4.00	4.00	4.00
3	4.00	4.00	4.00
4	4.50	4.50	4.50
5	4.50	4.50	4.50
6	4.50	4.50	4.50
7	5.00	5.00	5.00
8	5.00	5.00	5.00
9	5.00	5.00	5.00
10	5.50	5.50	5.50
11	5.50	5.50	5.50
12	5.50	5.50	5.50
13	6.00	6.00	6.00
14	6.00	6.00	6.00
15	6.00	6.00	6.00

Fonte: Autor (2021).

Com a definição dos teores de ligante e aquecimento dos materiais a serem utilizados nas misturas, efetuou-se a mistura colocando, primeiramente, o agregado, e em seguida, adicionando o ligante asfáltico ao recipiente, conforme Figura 25. A dosagem de cada teor foi efetuada com o auxílio de uma balança com precisão de 0,01g.

Figura 25: Recipiente que recebeu os materiais para dosagem



Fonte: Autor (2021).

Os agregados e o ligante asfáltico foram misturados até que a mistura ficasse homogênea, e colocados a uma temperatura de 160°C, que foi a temperatura escolhida para a compactação dos corpos de prova.

Na Figura 26 é possível ver o método utilizado para a mistura asfáltica, ele foi executado dentro de 2 a 3 minutos conforme exigência da especificação ME 043 (DNER, 1995). Já na Figura 27 é possível observar o aspecto final da mistura asfáltica.

Figura 26: Mistura dos materiais



Fonte: Autor (2021).

Figura 27: Aspecto final da mistura asfáltica



Fonte: Autor (2021).

Os corpos de prova foram compactados com auxílio de um compactador mecânico, sendo o molde do corpo de prova aquecido a aproximadamente 100°C, para que, em seguida, a mistura asfáltica fosse colocada dentro do molde. Um soquete é encarregado da compactação da mistura, sendo aplicados 75 golpes sobre o corpo de prova a uma altura de aproximadamente 46 cm. Em seguida, virou-se o corpo de prova, sendo aplicados mais 75 golpes. O soquete mecânico utilizado para a compactação dos corpos de prova é apresentado na Figura 28.

Figura 28: Soquete mecânico utilizado para a compactação dos corpos de prova



Fonte: Autor (2021).

Após resfriados e desmoldados, conforme Figura 29, o próximo passo foi aferir as medidas finais dos corpos de prova e, em seguida, determinar as massas seca e submersa dos corpos de prova, possibilitando, assim, determinar a massa específica aparente dos corpos de prova, comparando com a massa específica aparente teórica, e assim poder realizar as determinações volumétricas de dosagem.

Figura 29: Corpos de prova compactados e desmoldados em repouso



Fonte: Autor (2021).

A seguir foram realizados os ensaios volumétricos com os corpos de prova, para encontrar suas propriedades, dando continuidade ao trabalho. Os ensaios foram realizados após o resfriamento dos corpos de prova, não sendo necessário esperar por tempo de cura.

3.2.4 Ensaios volumétricos

Para determinação das propriedades volumétricas dos corpos de prova, efetuou-se a aferição das medidas finais dos corpos de prova com utilização de um paquímetro, tanto em relação ao diâmetro final, quanto a sua altura final, chegando ao seu valor a partir das médias encontradas para quatro medidas em cada sentido, conforme Figura 30.

Figura 30: Verificação dos diâmetros dos corpos de prova para registro



Fonte: Autor (2021).

Em seguida, os corpos de prova tiveram suas massas aferidas pesadas secas ao ar e, posteriormente, submersas, com a água a uma temperatura de 25°C. A pesagem realizada da forma descrita se faz necessária para que se possa obter suas propriedades volumétricas e mecânicas.

A densidade máxima teórica foi determinada por meio do cálculo apresentado pelos autores Bernucci et al. (2008), através da ponderação das massas específicas reais dos materiais que compõem a mistura asfáltica, conforme Equação 1.

$$DMT = \frac{P_{cap} + P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_{cap}}{G_{cap}} + \frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (1)$$

Onde:

DMT: Densidade máxima teórica da mistura asfáltica solta;

P: Peso do material;

G: Densidade real dos materiais constituintes.

Tendo como base o teor de ligante, o percentual de agregado e levando em consideração as massas específicas reais dos materiais utilizados, citadas na etapa dos resultados, pode-se calcular a massa específica máxima teórica, que corresponde ao teor de ligante levado em consideração.

Em seguida, foram calculados os parâmetros utilizados para cada dosagem dos corpos de prova. Os parâmetros podem ser obtidos conforme a Equação 2, para o volume do corpo de prova; a Equação 3, para a massa específica aparente da mistura; a Equação 4, para volume de vazios; a Equação 5, para percentagem em massa dos agregados; a Equação 6, para vazios do agregado mineral; e a Equação 7, para relação betume/vazios. Todas as referidas equações podem ser verificadas a seguir.

$$\text{Volume do corpo de prova: } V = M_s - M_{Sub} \quad (2)$$

Onde:

M_s = Massa Seca

M_{Sub} = Massa Submersa

$$\text{Massa específica aparente da mistura: } G_{mb} = \frac{M_s}{V} \quad (3)$$

Onde:

M_s = Massa Seca

V = Volume

$$\text{Volume de Vazios: } V_v = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \quad (4)$$

Onde:

DMT = Massa específica máxima teórica

G_{mb} = Massa específica aparente dos corpos de prova

$$\text{Porcentagem em massa dos agregados: } \sum \% n = 100 - \% a \quad (5)$$

Onde:

$\% n$ = Percentual em massa de cada agregado

$\% a$ = teor de asfalto

$$\text{Vazios do agregado mineral: } VAM = 100 - \left(\frac{G_{mb} \times \sum \% n}{G_{sb}} \right) \quad (6)$$

Onde:

G_{mb} = Massa específica aparente da mistura

$\% n$ = Percentual em massa de cada agregado

G_{sb} = Massa específica aparente do agregado

$$\text{Relação betume / vazios: } RBV = 100 \times \left(\frac{VAM - V_v}{VAM} \right) \quad (7)$$

Onde:

VAM = Vazios do agregado mineral

V_v = Volume de vazios

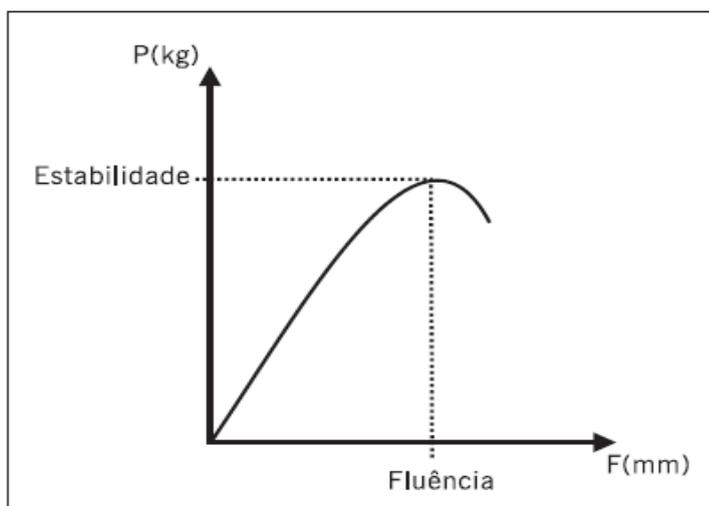
3.2.5 Determinação da Estabilidade e Fluência

Após a realização das medidas referentes a sua volumetria, os corpos de prova foram submetidos a banho-maria a temperatura de 60° C, por um tempo de 40 minutos. Quando retiradas, as amostras foram encaminhadas à prensa Marshall, onde foram determinados parâmetros como:

- a. estabilidade (N): especificada como sendo a carga que o corpo de prova possui resistência antes da ruptura, sendo necessário ao menos três corpos de prova para sua determinação DNER ME 043 (DNER, 1995);
- b. fluência (mm): especificada como sendo o deslocamento vertical identificado no corpo de prova quando aplicada a carga máxima, sendo necessário ao menos três corpos de prova para sua determinação DNER ME 043 (DNER, 1995).

O gráfico resultante do ensaio Marshall apresenta a relação entre estabilidade e fluência do concreto asfáltico, e pode ser expresso conforme a Figura 31.

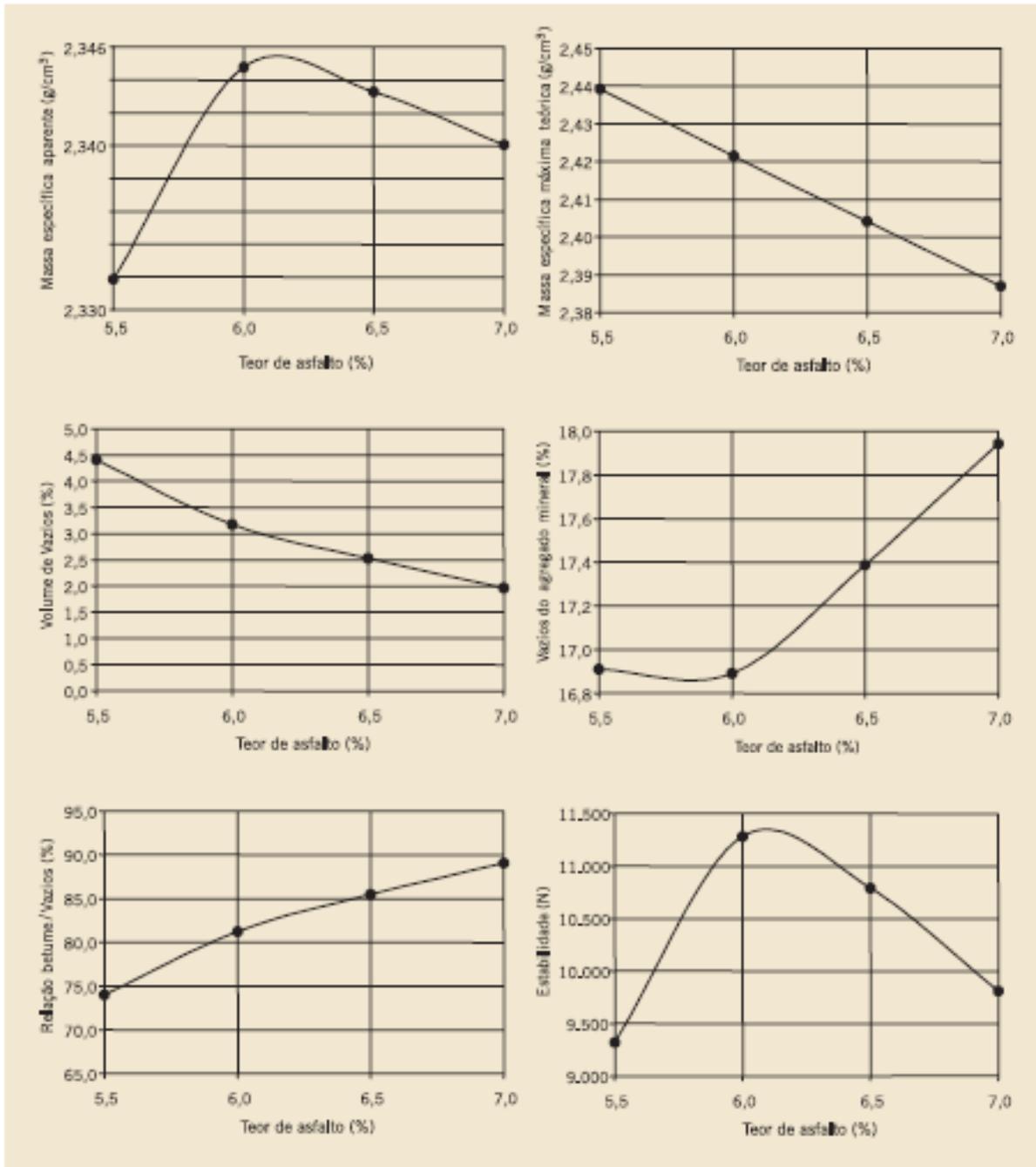
Figura 31: Gráfico que apresenta a curva resultante do ensaio Marshall



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Após a obtenção dos parâmetros desejados, ou seja, parâmetros volumétricos e mecânicos, pode-se plotar seis curvas determinadas a partir do teor de asfalto que podem ser utilizadas para determinar o teor do projeto, como pode-se observar na Figura 32.

Figura 32: Exemplo das curvas que representam os parâmetros encontrados na dosagem Marshall



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Conforme Bernucci et al. (2008), existem vários critérios de dosagem, mas no Brasil, o mais comum acaba sendo usar o teor de ligante que proporciona o volume de vazios de 4% na mistura que corresponde à média das especificações. Esse percentual pode variar dependendo do responsável pela rodovia, seja empresa, órgão ou instituto de pesquisa.

Pode-se escolher o teor de ligante conforme ensaio Marshall, a partir da massa específica aparente e do volume de vazios, sendo que, neste caso, o teor ficará definido na média dos três teores que estarão associados a sua maior estabilidade. Este trabalho utilizou o Método Marshall para determinar as propriedades encontradas para cada traço estudado, e o teor de ligante foi definido a partir do volume de vazios de 4%.

Conforme especificação de serviço ME 031 (DNIT, 2006), dosagens de misturas asfálticas devem seguir limites quanto às suas propriedades volumétricas e mecânicas, tais limites podem ser observados conforme Tabela 09.

Tabela 09: Limites para as propriedades volumétricas e mecânicas

Características	Método de Ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de Vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação Betume/Vazios	DNER-ME 043	75 - 82	65 - 72
Estabilidade Mínima, (kgf) (75 Golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência a tração por compressão diametral estática a 25° C, mínima, MPa	DNER-ME 043	0.65	0.65

Fonte: DNIT 031/2006 - ES (2006, P.5).

3.2.6 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração diametral segue orientações da norma ME 136 (DNIT, 2018), que estabelece parâmetros e procedimentos a serem seguidos para a realização da determinação da resistência à tração diametral. Para este ensaio foram moldados três corpos

de prova para cada teor de filler e o teor de ligante utilizado foi o teor ótimo encontrado para cada uma das misturas estudadas.

Conforme a ME 136 (DNIT, 2018), o ensaio consiste em realizar a medição do corpo de prova com auxílio de um paquímetro, em quatro locais diferentes, tanto na altura como no diâmetro, adotando como medida a média aritmética das quatro leituras, tanto na altura como no diâmetro.

Antes de realizar o ensaio, segundo orientação da ME 136 (DNIT, 2018), deve-se deixar o corpo de prova em temperatura controlada a aproximadamente 25°C. Após o corpo de prova deve ser posicionado no dispositivo centralizador, tendo suas laterais sustentadas por dois frisos metálicos, tendo uma das faces curvas.

O corpo de prova deve ser ajustado até que o equipamento, conforme apresentado na Figura 33, execute uma compressão capaz de manter o corpo de prova na mesma posição. Em seguida deve ser executada a carga vertical de compressão, de maneira progressiva, utilizando velocidade de deformação aproximada de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até o ponto em que ocorra a ruptura completa do corpo de prova, em seu sentido diametral.

Ao final do ensaio, devem ser registrados a carga utilizada para ruptura do corpo de prova e o deslocamento no sentido vertical do corpo de prova.

Figura 33: Dispositivo Centralizador de corpo de prova



Fonte: Autor (2021).

O resultado deve ser obtido calculando a resistência à tração indireta do corpo de prova, uma vez que rompido por meio de compressão diametral, conforme Equação 8:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (8)$$

Onde:

σ_R = Resistência à tração (MPa);

F = Carga de ruptura (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm);

H = Altura do corpo de prova (mm);

Conforme a ME 136 (DNIT, 2018), desde que não haja uma variação maior do que 10% dos resultados obtidos de no mínimo três corpos de provas, deve se realizar a média aritmética destes, sendo essa média o valor referente a resistência à tração por compressão diametral da mistura asfáltica dos corpos de prova moldados em laboratório.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa do trabalho, pode-se analisar os resultados encontrados na pesquisa, contendo também uma comparação com resultados encontrados por outros autores. As principais características encontradas para a mistura estarão apresentadas em forma de gráficos e tabelas, apresentando os resultados de densidade, volume de vazios, estabilidade, fluência, relação betume - vazios (RBV), e vazios do agregado mineral (VAM), conforme especificação Marshall.

4.1 Resultados da mistura asfáltica com teor de filer de 4%

Para a mistura asfáltica com teor de filer de 4%, são apresentados os valores alcançados conforme as características do agregado e do CAP já especificados. Primeiramente apresenta-se os valores encontrados para a característica da mistura dos agregados conforme Tabela 10.

Tabela 10: Características da mistura dos agregados

Característica da mistura dos agregados	
Agregado graúdo da mistura > n° 10 (%)	52
Agregado miúdo da mistura < n° 10 (%)	48
Massa específica real dos agregados (g/cm ³)	2.854
Massa específica aparente dos agregados (g/cm ³)	2.779
Densidade efetiva da mistura (g/cm ³)	2.798

Fonte: Autor (2021).

Com a determinação da densidade efetiva da mistura dos agregados e com a densidade relativa do ligante determinada em $1,003 \text{ g/cm}^3$, foi possível determinar a densidade máxima teórica e em seguida as propriedades volumétricas da mistura, apresentadas na Tabela 11.

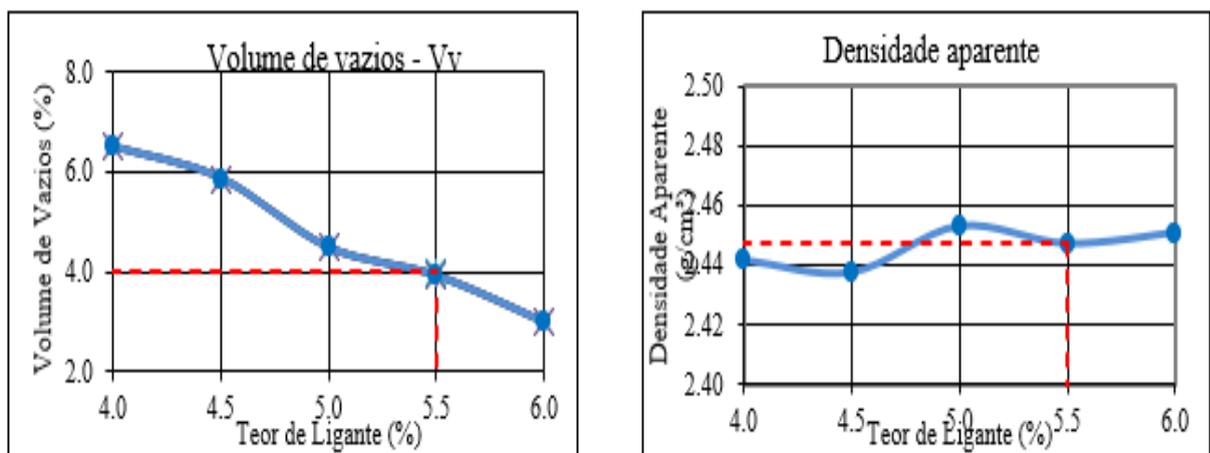
Tabela 11: Propriedades volumétricas da mistura com teor de filler 4%

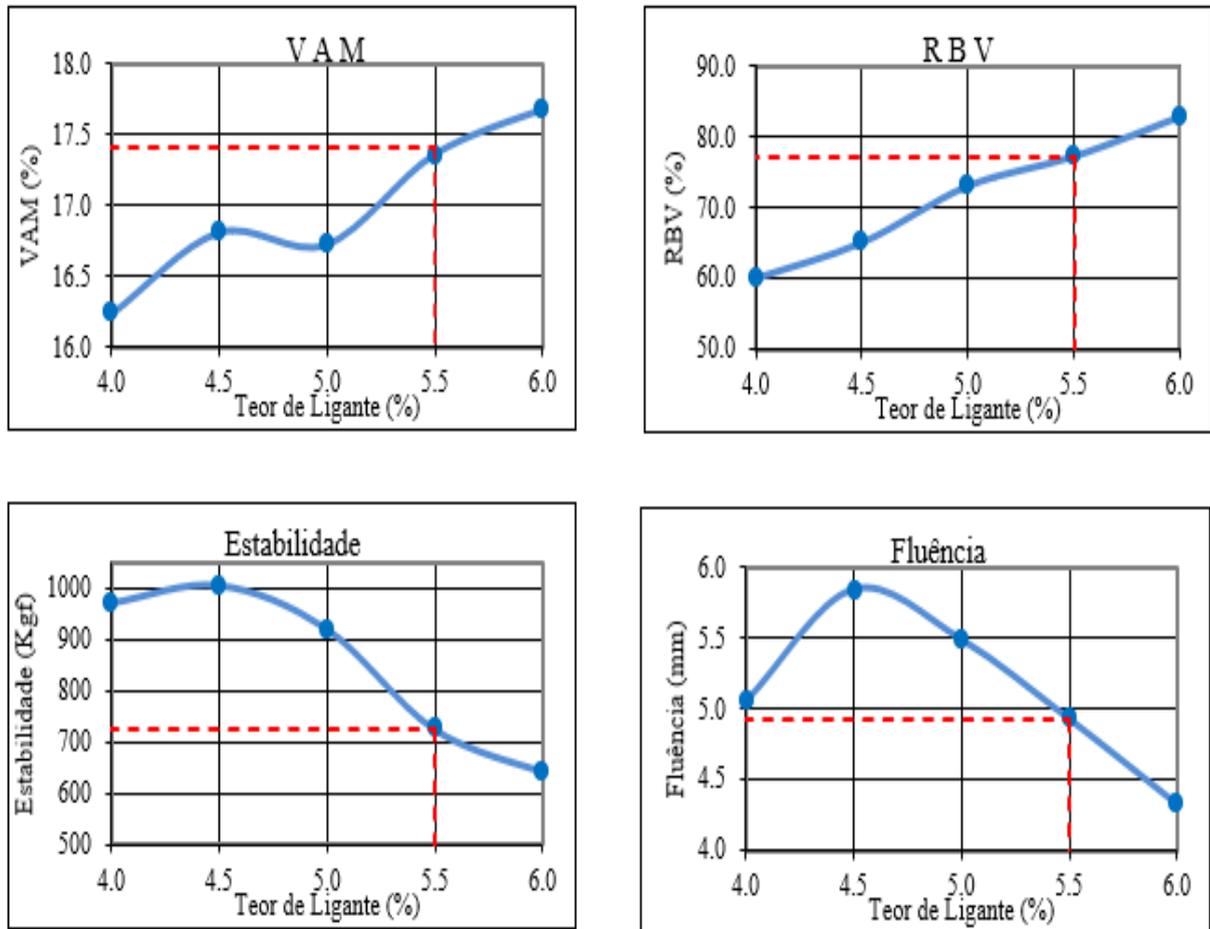
Características da dosagem de Concreto Asfáltico - TEOR DE FÍLER 4% - Método Marshall					
Teor de ligante asfáltico	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Densidade Aparente - Média de 3 CP's (g/cm^3)	2.442	2.438	2.453	2.447	2.451
Densidade máxima teórica - "DMT" (g/cm^3)	2.611	2.590	2.568	2.547	2.527
Volume de vazios da mistura - "Vv" (%)	6.50	5.87	4.50	3.94	3.01
Vazios do agregado mineral - "VAM" (%)	16.23	16.81	16.72	17.36	17.67
Relação betume/vazios - "RBV" (%)	59.99	65.07	73.12	77.31	82.96
Estabilidade - Média de 3 CP's (kgf)	969	1003	919	725	643
Fluência - Média de 3 CP's (mm)	5.05	5.84	5.49	4.93	4.33

Fonte: Autor (2021).

Já na Figura 34, pode-se observar os parâmetros encontrados para o teor de filler de 4% a partir da dosagem Marshall. O teor de ligante foi determinado seguindo orientações da especificação que sugere que o teor de ligante deve ser definido a partir de um volume de vazios de 4%, encontrando um valor de 5,5%.

Figura 34: Parâmetros encontrados a partir da dosagem Marshall para o projeto com teor de filler de 4%





Fonte: Autor (2021).

Na Figura 34 foram encontrados, conforme o teor de asfalto, após verificação da prensa Marshall, densidade de $2,447 \text{ g/cm}^3$, segundo o gráfico de densidade. O volume de vazios ficou em 4,0%, conforme gráfico de volume de vazios. A estabilidade ficou estabelecida em 725 kgf, conforme gráfico de estabilidade. O percentual da relação betume - vazios ficou em 77,04%, conforme gráfico RBV. A fluência ficou estabelecida em 4,93 mm, conforme o gráfico da fluência. O percentual de vazios do agregado mineral ficou em 17,42%, conforme gráfico de VAM.

Quanto à estabilidade da mistura, percebe-se que seu pico esteve em um teor de vazios maior que o adotado como o de projeto, porém a estabilidade encontrada com o teor de vazios de 4% ainda oferece valores superiores aos exigidos pelas normas técnicas, que são de 500 kgf. Valores encontrados para Relação Betume Vazios (RBV), também apresentaram os

valores acima do mínimo exigido pelas especificações. Estes valores serão apresentados a seguir, demonstrando os limites e o comparativos entre as três misturas estudadas.

O teor de ligante asfáltico para o projeto com 4% de teor de filer ficou estabelecido em 5,5%, e o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado com este teor de ligante. Para a resistência à tração por compressão diametral deste projeto foram encontrados os resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para teor de filer 4%

Resultado do ensaio de resistência a tração por compressão diametral teor de filer 4%				
CP 01				
Força (N)	21915.54	$\sigma_R =$	2.13	MPa
Altura do CP (cm)	6.50			
Diâmetro do CP (cm)	10.10			
CP 02				
Força (N)	21876.30	$\sigma_R =$	2.12	MPa
Altura do CP (cm)	6.50			
Diâmetro do CP (cm)	10.10			
CP 03				
Força (N)	20728.53	$\sigma_R =$	2.01	MPa
Altura do CP (cm)	6.50			
Diâmetro do CP (cm)	10.10			
Resistência por compressão diametral Média:			2.09	MPa

Fonte: Autor (2021).

4.2 Resultados da mistura asfáltica com teor de filer de 6%

Para a segunda mistura asfáltica com teor de filer de 6%, são apresentados os valores alcançados conforme as características do agregado e do CAP. Primeiramente apresenta-se os

valores encontrados para a característica da mistura dos agregados e do CAP 50/70, conforme Tabela 13.

Tabela 13: Características da mistura dos agregados

Característica da mistura dos agregados	
Agregado graúdo da mistura > n° 10 (%)	51
Agregado miúdo da mistura < n° 10 (%)	49
Massa específica real dos agregados (g/cm ³)	2.854
Massa específica aparente dos agregados (g/cm ³)	2.780
Densidade efetiva da mistura (g/cm ³)	2.799

Fonte: Autor (2021).

Com a determinação da densidade efetiva da mistura dos agregados e com a densidade relativa do ligante determinada em 1,003 g/cm³, foi possível determinar a densidade máxima teórica e em seguida as propriedades volumétricas da mistura, apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14: Propriedades volumétricas da mistura com teor de filer 6%

Características da dosagem de Concreto Asfáltico - Método Marshall					
Teor de ligante asfáltico	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Densidade Aparente - Média de 3 CP's (g/cm ³)	2.442	2.429	2.431	2.455	2.469
Densidade máxima teórica - "DMT" (g/cm ³)	2.612	2.590	2.569	2.548	2.527
Volume de vazios da mistura - "Vv" (%)	6.51	6.21	5.35	3.64	2.28
Vazios do agregado mineral - "VAM" (%)	16.25	17.11	17.47	17.10	17.05
Relação betume/vazios - "RBV" (%)	59.92	63.70	69.38	78.72	86.62
Estabilidade - Média de 3 CP's (kgf)	965	952	996	896	846
Fluência - Média de 3 CP's (mm)	4.30	4.40	4.56	4.45	4.47

Fonte: Autor (2021).

Já na Figura 35, pode-se observar os parâmetros encontrados para o teor de filer de 6% a partir da dosagem Marshall. O teor de ligante foi determinado seguindo orientações da especificação que sugere que o teor de ligante deve ser definido a partir de um volume de vazios de 4%, encontrando um valor de 5,4%.

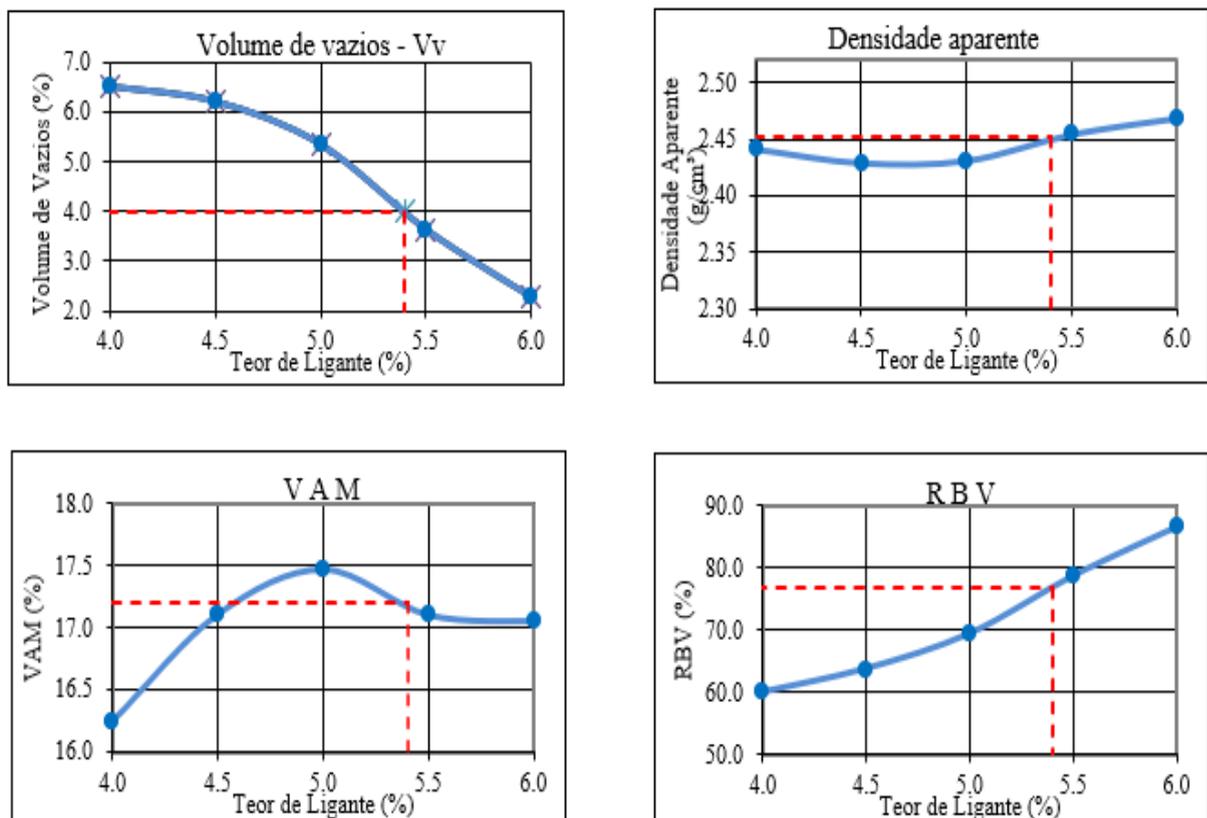
Na Figura 35 foram encontrados, conforme o teor de ligante, após verificação da prensa Marshall, densidade de 2,452g/cm³, segundo o gráfico de densidade. O volume de

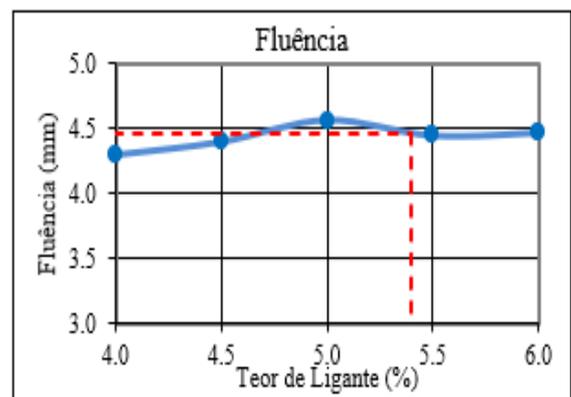
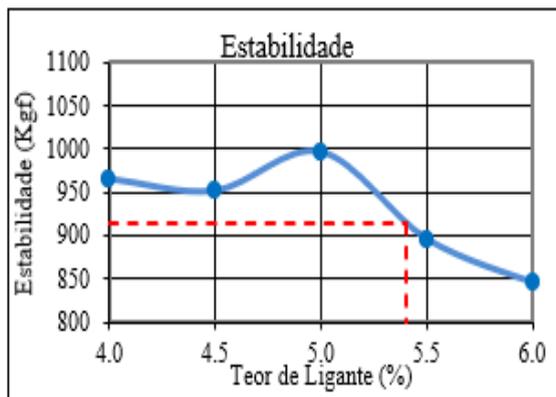
vazios ficou em 4,0%, conforme gráfico de volume de vazios. A estabilidade ficou estabelecida em 915N, conforme gráfico de estabilidade. O percentual da relação betume - vazios ficou em 76,75%, conforme gráfico RBV. A fluência ficou estabelecida em 4,46mm, conforme o gráfico da fluência. O percentual de vazios do agregado mineral ficou em 17,20%, conforme gráfico de VAM.

Nesta mistura o pico dos valores encontrados para a estabilidade e fluência da mistura se encontram bem próximos ao teor de projeto, determinado pelo volume de vazios de 4%, sendo esta uma boa característica da mistura com 6% de teor de filler. Os valores encontrados também ficaram superiores aos valores mínimos exigidos pela especificação.

O teor ótimo de ligante asfáltico para o projeto com 6% de teor de filler ficou estabelecido em 5,4%, e o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado com este teor de ligante. Para a resistência à tração por compressão diametral deste projeto foram encontrados os resultados apresentados na Tabela 15.

Figura 35: Parâmetros encontrados a partir da dosagem Marshall para o projeto com teor de filler de 6%





Fonte: Autor (2021).

Tabela 15: Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para teor de filer 6%

Resultado do ensaio de resistência a tração por compressão diametral teor de filer 6%				
CP 01				
Força (N)	23406.66	$\sigma_R =$	2.27	MPa
Altura do CP (cm)	6.50			
Diâmetro do CP (cm)	10.10			
CP 02				
Força (N)	23416.47	$\sigma_R =$	2.31	MPa
Altura do CP (cm)	6.40			
Diâmetro do CP (cm)	10.10			
CP 03				
Força (N)	22994.64	$\sigma_R =$	2.27	MPa
Altura do CP (cm)	6.40			
Diâmetro do CP (cm)	10.10			
Resistência por compressão diametral Média:			2.28	MPa

Fonte: Autor (2021).

4.3 Resultados da mistura asfáltica com teor de filer de 8%

Para a terceira mistura asfáltica estudada, com teor de filer de 8%, são apresentados os valores alcançados conforme as características do agregado e do CAP. Primeiramente

apresenta-se os valores encontrados para a característica da mistura dos agregados, conforme Tabela 16.

Tabela 16: Características da mistura dos agregados

Característica da mistura dos agregados	
Agregado graúdo da mistura > n° 10 (%)	50
Agregado miúdo da mistura < n° 10 (%)	50
Massa específica real dos agregados (g/cm ³)	2.853
Massa específica aparente dos agregados (g/cm ³)	2.781
Densidade efetiva da mistura (g/cm ³)	2.799

Fonte: Autor (2021).

Com a determinação da densidade efetiva da mistura dos agregados e com a densidade relativa do ligante determinada em 1,003 g/cm³, foi possível determinar a densidade máxima teórica e em seguida as propriedades volumétricas da mistura, apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17: Propriedades volumétricas da mistura com teor de filer 8%

Características da dosagem de Concreto Asfáltico - Método Marshall					
Teor de ligante asfáltico	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Densidade Aparente - Média de 3 CP's (g/cm ³)	2.465	2.455	2.488	2.488	2.486
Densidade máxima teórica - "DMT" (g/cm ³)	2.612	2.590	2.569	2.548	2.527
Volume de vazios da mistura - "Vv" (%)	5.63	5.23	3.16	2.36	1.63
Vazios do agregado mineral - "VAM" (%)	15.46	16.24	15.56	16.01	16.50
Relação betume/vazios - "RBV" (%)	63.59	67.82	79.71	85.23	90.15
Estabilidade - Média de 3 CP's (kgf)	1388	1345	1354	1135	1086
Fluência - Média de 3 CP's (mm)	5.65	5.38	5.66	5.71	5.55

Fonte: Autor (2021).

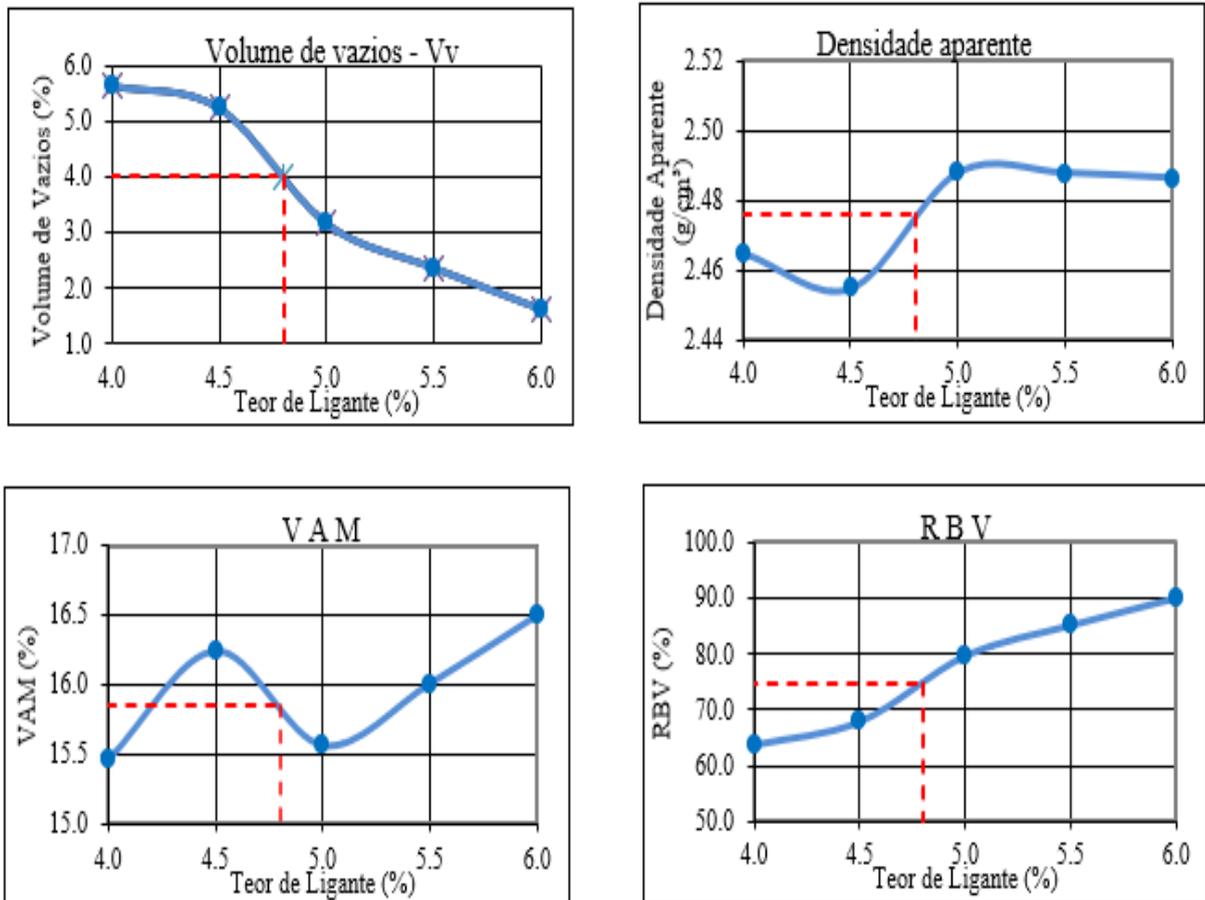
Já na Figura 36, pode-se observar os parâmetros encontrados para o teor de filer de 8% a partir da dosagem Marshall. O teor de ligante foi determinado seguindo orientações da especificação que sugere que o teor de ligante deve ser definido a partir de um volume de vazios de 4%, encontrando um valor de 4,8%.

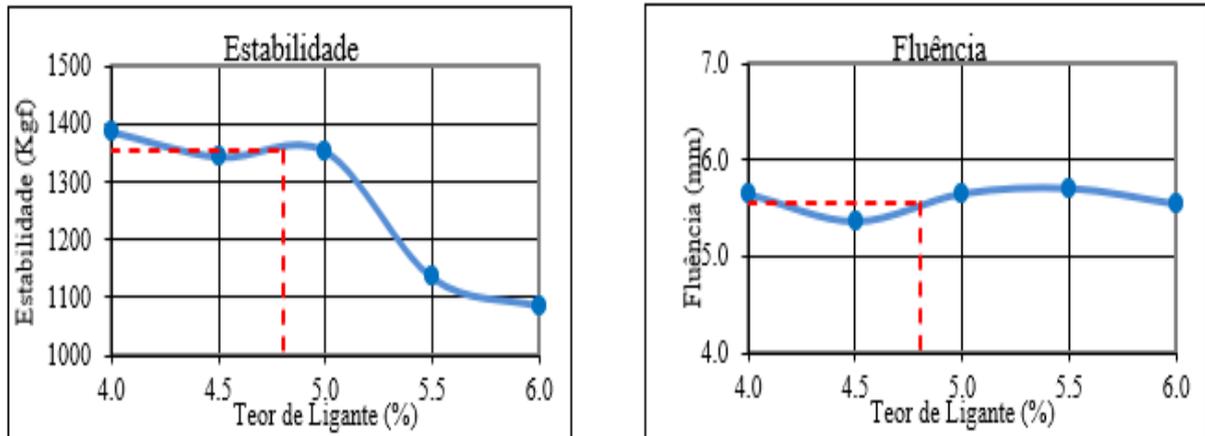
Na Figura 36 foram encontrados, conforme o teor de asfalto, após verificação da prensa Marshall, densidade de 2,476g/cm³, segundo o gráfico de densidade. O volume de

vazios ficou em 4,0%, conforme gráfico de volume de vazios. A estabilidade ficou estabelecida em 1353N, conforme gráfico de estabilidade. O percentual da relação betume - vazios ficou em 74,76%, conforme gráfico RBV. A fluência ficou estabelecida em 5,55mm, conforme o gráfico da fluência. O percentual de vazios do agregado mineral ficou em 15,85%, conforme gráfico de VAM.

Quanto aos valores referentes a estabilidade e fluência da mistura percebe se que o pico dos resultados encontrados ficou bem próximo ao teor de ligante ideal encontrado para a mistura, sendo esta uma boa condição. A relação betume vazios (RBV) ficou praticamente no limite exigido por norma, atendendo também às exigências da especificação para uma camada de rolamento. Na Figura 36 pode-se observar os resultados encontrados para o teor de filer de 8%.

Figura 36: Parâmetros encontrados a partir da dosagem Marshall para o projeto com teor de filer de 8%





Fonte: Autor (2021).

O teor ótimo de ligante asfáltico para o projeto com 8% de teor de filer ficou estabelecido em 4,8%, e o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado com este teor de ligante. Para a resistência à tração por compressão diametral deste projeto foram encontrados os resultados apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para teor de filer 8%

Resultado do ensaio de resistência a tração por compressão diametral teor de filer 8%				
CP 01				
Força (N)	24034.5	$\sigma_R =$	2.33	MPa
Altura do CP (cm)	6.50			
Diâmetro do CP (cm)	10.10			
CP 02				
Força (N)	24181.65	$\sigma_R =$	2.38	MPa
Altura do CP (cm)	6.40			
Diâmetro do CP (cm)	10.10			
CP 03				
Força (N)	26104.41	$\sigma_R =$	2.57	MPa
Altura do CP (cm)	6.40			
Diâmetro do CP (cm)	10.10			
Resistência por compressão diametral Média:			2.43	MPa

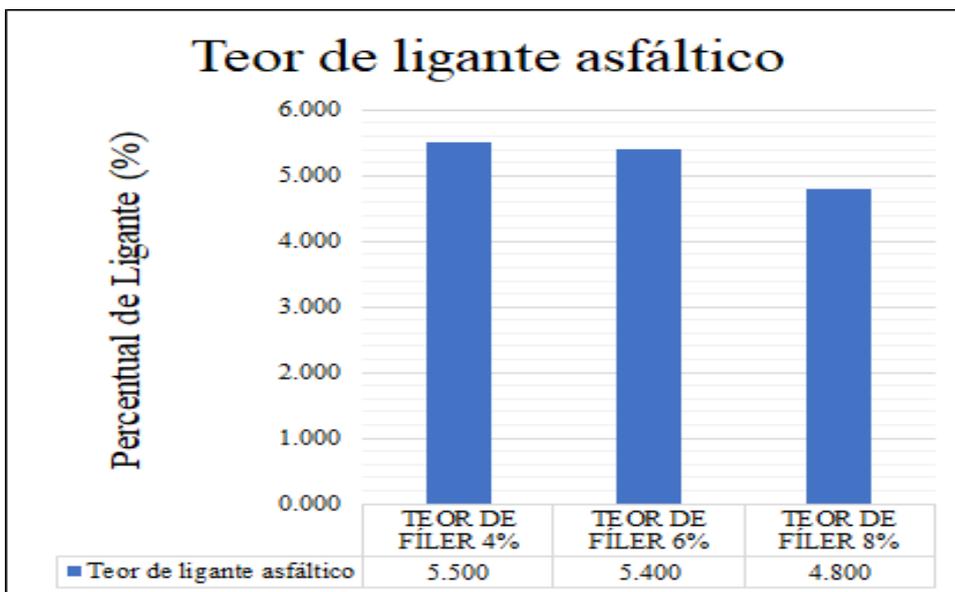
Fonte: Autor (2021).

4.4 Análise comparativa entre os resultados encontrados

Como efeito comparativo, todos os resultados encontrados foram agrupados e foram elaborados gráficos com as principais propriedades encontradas durante a pesquisa, possibilitando assim uma análise completa.

Os resultados apresentados na Figura 37, encontrados para o teor de ligante de cada mistura asfáltica, apresentaram uma variação quando comparados, observando-se um aumento do teor de ligante quando se diminui o teor de filer. As misturas foram realizadas com diferentes teores de ligante, sendo eles 5,5% para a dosagem com 4% de teor de filer, 5,4% para 6% de teor de filer e 4,8% para o teor de filer de 8%. Ficou evidenciado que o teor de ligante utilizado caiu quando foram aumentados os teores de finos, diminuindo assim o volume de ligante utilizado para a mistura asfáltica.

Figura 37: Gráfico comparativo do teor de ligante das três misturas asfálticas



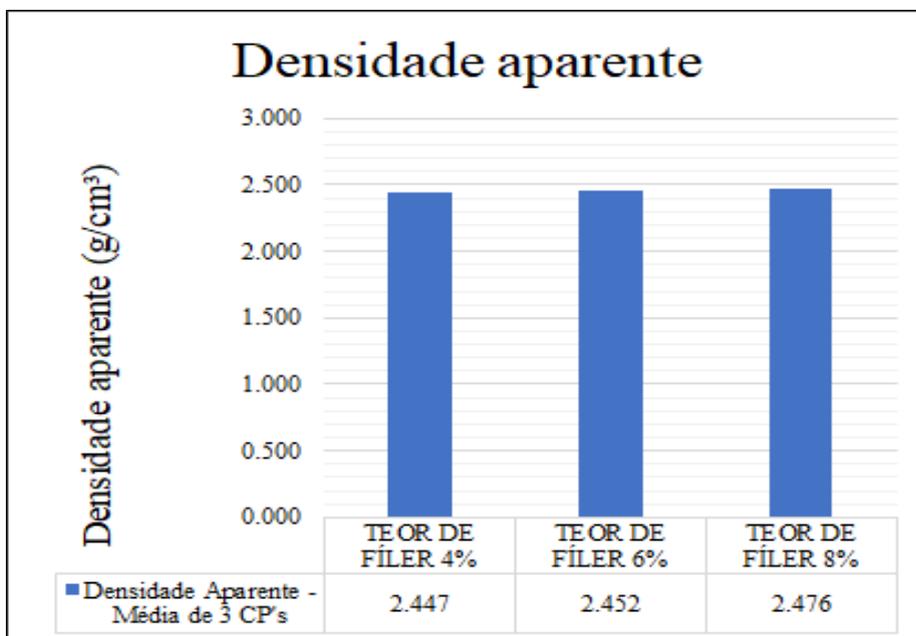
Fonte: Autor (2021).

Os resultados obtidos neste comparativo vão de encontro aos encontrados por Bardini (2013), que encontrou para agregados basálticos uma diminuição do teor de ligante conforme o aumento do teor de filer. Esse resultado se explica devido à importante característica apresentada pelo filer, que tem em sua ação a parte ativa no mástique asfáltico, agindo como uma interface filer/ligante, desta forma não sendo apenas um material inerte.

O filer atua no papel de preencher os vazios entre os agregados maiores e ainda altera as propriedades do ligante asfáltico, influenciando na sua temperatura e também na compactação. Porém, conforme Bernucci et. al (2008), estes benefícios apresentados pelo filer são eficazes até um certo ponto, passando deste ponto o filer pode ser prejudicial à mistura, visto que a deixará com uma trabalhabilidade indesejada se adicionado este material em excesso. Faz-se necessário, então, um controle adequado para que o filer possa contribuir para a qualidade do revestimento asfáltico e não influencie de maneira prejudicial às suas propriedades.

A Figura 38 apresenta os resultados obtidos referentes à densidade aparente das três misturas asfálticas. Percebe-se uma variação nos seus resultados obtidos, isso se explica devido à baixa variação das quantidades de massa alteradas nas misturas dosadas, onde foi modificado somente o teor de filer de cada mistura, e como o volume de massa adicionado foi baixo, a densidade aparente da mistura praticamente não sofreu alteração, porém aumentou conforme o maior volume de filer adicionado.

Figura 38: Gráfico comparativo da densidade aparente das três misturas asfálticas

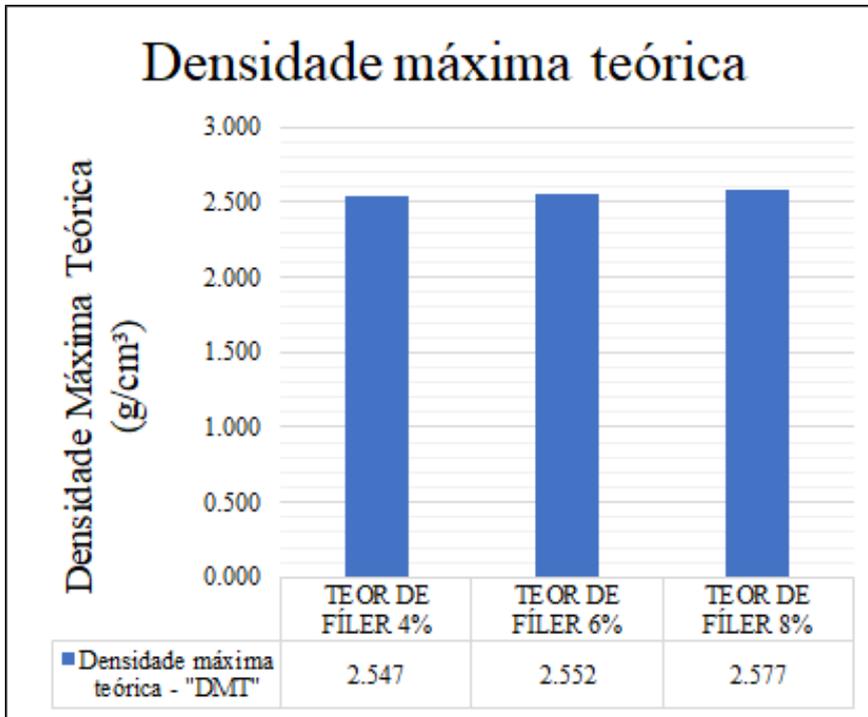


Fonte: Autor (2021).

A Figura 39 apresenta os resultados obtidos para a densidade máxima teórica de cada mistura asfáltica realizada. Os resultados encontrados apresentam uma variação, na qual

percebe-se que existe um aumento nas quantidades conforme maior teor de filer adicionado, apresentando um resultado bem semelhante à densidade aparente apresentada anteriormente.

Figura 39: Gráfico comparativo da densidade máxima teórica das três misturas asfálticas



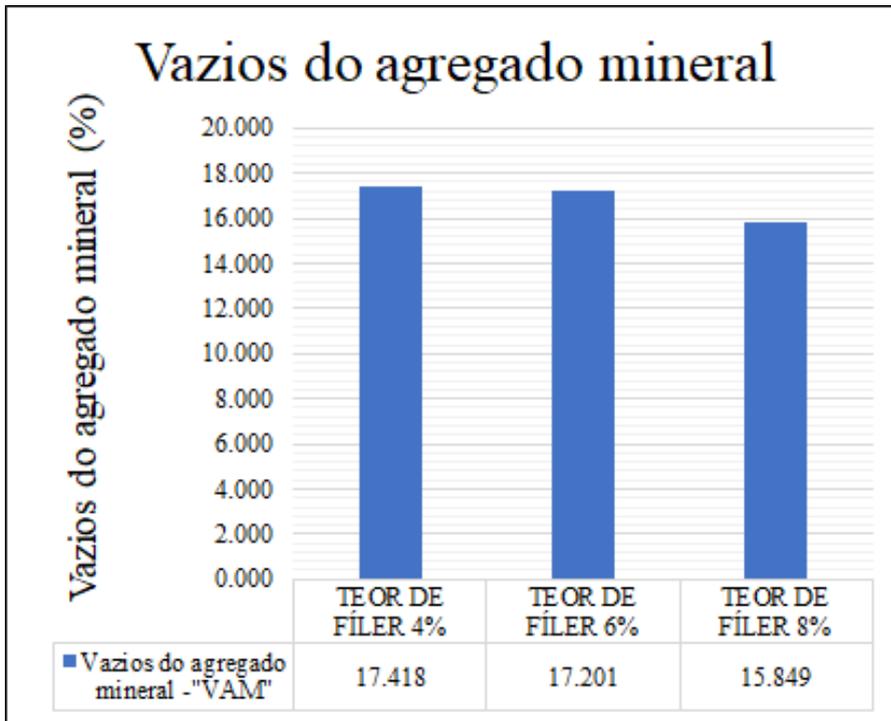
Fonte: Autor (2021).

Quanto à densidade aparente e a densidade máxima teórica das misturas, pode se comparar ao estudo realizado por Rodrigues (2019), em que o autor confirma um aumento no que diz respeito à densidade das misturas asfálticas com maiores concentrações de filer.

Além do aumento da densidade, o autor cita melhorias quanto à estabilidade e rigidez das misturas asfálticas, além de ocorrer alteração no que diz respeito às propriedades do ligante asfáltico.

A Figura 40 apresenta os resultados encontrados referentes aos vazios do agregado mineral de cada uma das misturas. Percebe-se uma diminuição dos vazios do agregado mineral à medida que se aumenta o teor de filer de cada mistura. Esse resultado é explicado pelo aumento de filer que age como extensão dos agregados graúdos existentes na mistura asfáltica.

Figura 40: Gráfico comparativo dos vazios do agregado mineral das três misturas asfálticas



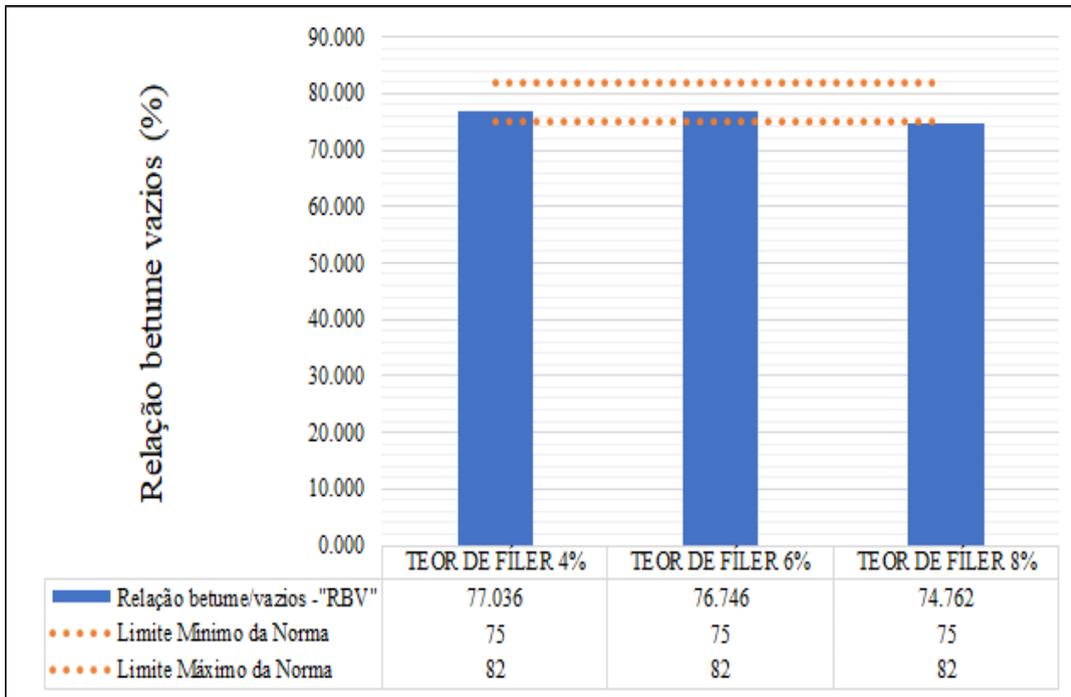
Fonte: Autor (2021).

Bardini (2013) afirma que os vazios do agregado mineral variam conforme a quantidade de fíler mineral é adicionada à mistura, dentre outros aspectos. Quanto maior o teor de fíler, menor seriam os vazios do agregado mineral.

Os resultados apresentados por Bardini (2013) estão acordo com os resultados encontrados nesta pesquisa, onde ocorreu uma diminuição dos vazios do agregado mineral à medida que foi adicionado fíler à mistura asfáltica, sendo que a mistura com 8% de teor de fíler foi a que apresentou o menor resultado para os vazios do agregado mineral (VAM).

A Figura 41 apresenta os resultados encontrados para a relação betume vazios (RBV) de cada mistura asfáltica estudada. No Brasil, os valores de RBV indicados para revestimento de pavimentos estão situados entre um valor máximo de 82% e um valor mínimo de 75%. Para camadas de *Binder* ou de ligação, os valores indicados são valores mínimos de 65% e valores máximos de 72%. Tais valores estão especificados na norma 031 (DNIT, 2006).

Figura 41: Gráfico comparativo da relação betume/vazios das três misturas asfálticas



Fonte: Autor (2021).

Para os resultados encontrados nesta pesquisa, pode se afirmar que estas misturas asfálticas realizadas se enquadram, conforme a norma, em uma camada de rolamento, não servindo como camada de ligação ou *Binder*.

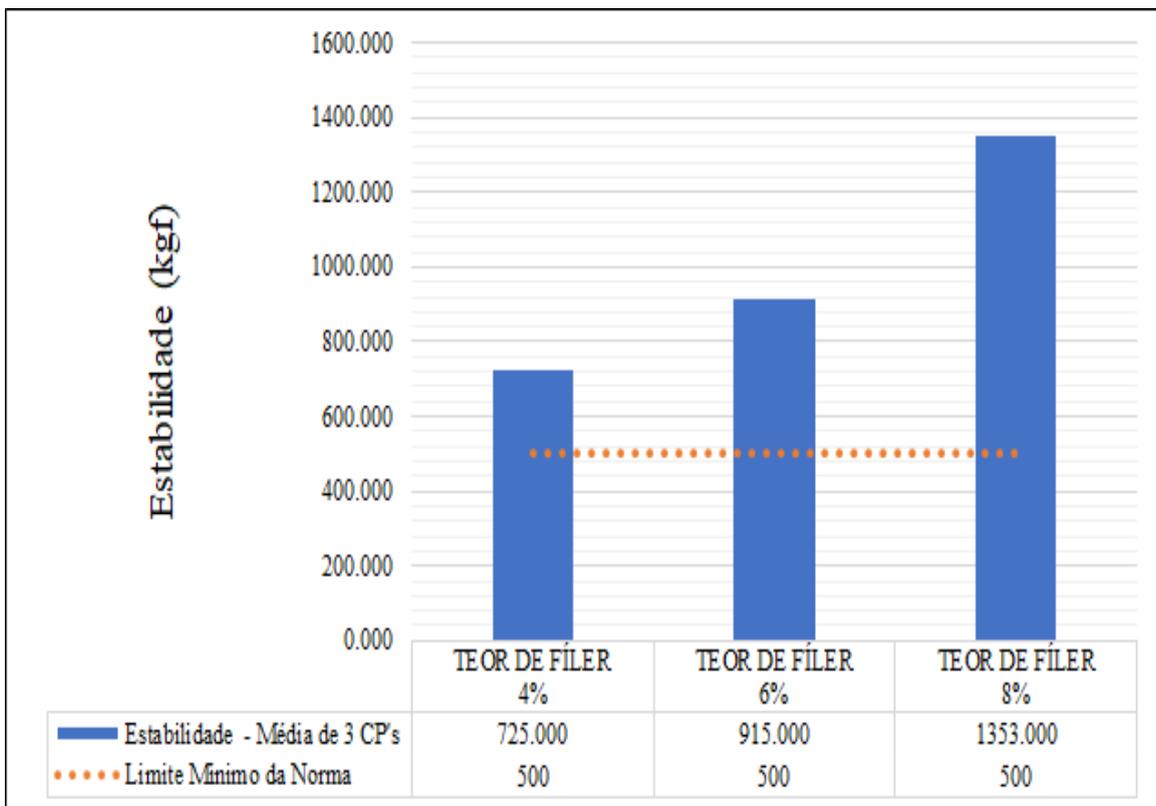
Bardini (2013) cita em seu estudo que um RBV menor que 65% pode fornecer a mistura um endurecimento prematuro ou excessivo da mistura asfáltica, enquanto valores de RBV superiores a 85% podem ocasionar exsudação e deformações permanentes ao revestimento asfáltico, e cita como RBV ideal um valor de 75%.

Nesta pesquisa a mistura com 8% de teor de fíler se enquadra ao valor de RBV ideal citado na pesquisa efetuada por Bardini (2013), enquanto as misturas com 4% e 6% de teor de fíler estão bem próximas ao valor de RBV citado pela autora.

Do ponto de vista da norma 031 (DNIT, 2006), todas as misturas asfálticas estudadas se enquadram dentro dos limites citados para uma camada de rolamento do pavimento asfáltico. Pode-se conferir estes resultados na Figura 41, onde estão demonstrados os resultados encontrados, bem como os limites da norma para esta relação de projeto.

Na Figura 42 apresentam-se os resultados encontrados durante esta pesquisa para estabilidade das misturas asfálticas estudadas. Percebe-se que, conforme o aumento do teor de filer, ocorre um aumento nos resultados encontrados para a estabilidade da mistura asfáltica. No Brasil, a norma 031 (DNIT, 2006), estabelece valores mínimos para estabilidade em 500 kgf, que estão indicados na Figura 42, portanto, as três misturas asfálticas realizadas oferecem valores ideais para estabilidade.

Figura 42: Gráfico comparativo da estabilidade das três misturas asfálticas



Fonte: Autor (2021).

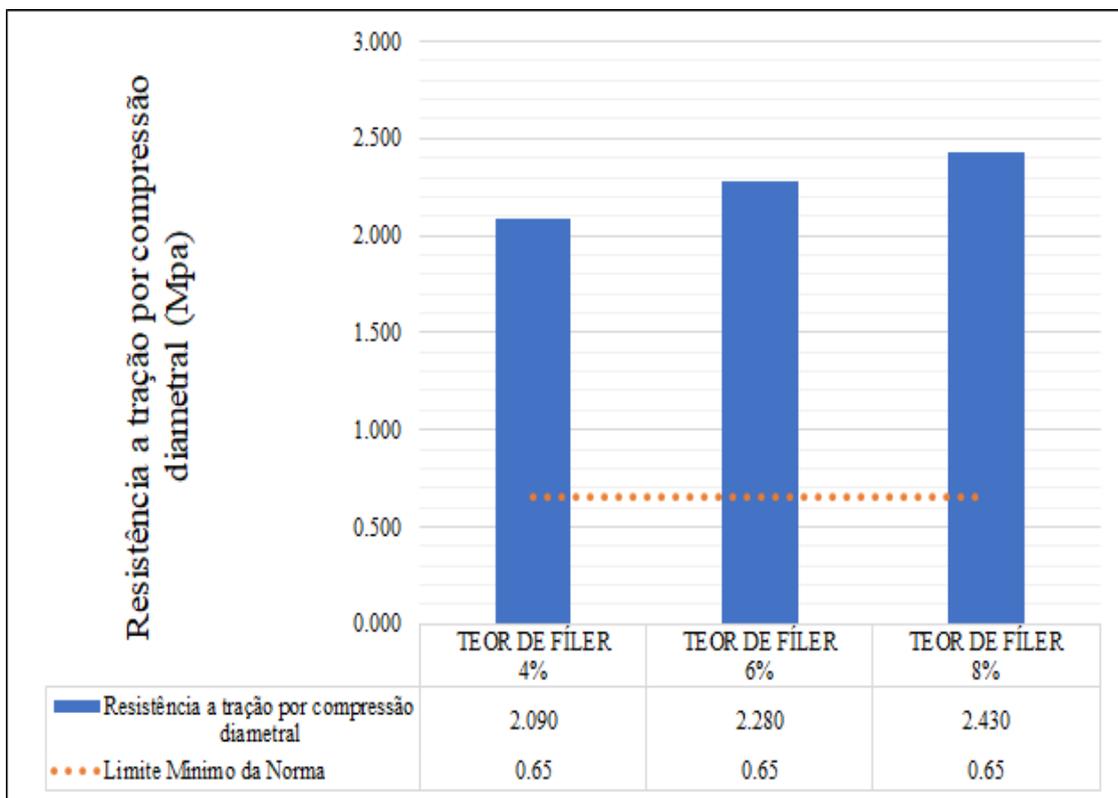
Motta e Leite (2000), explicam que, quando se acrescenta material passante na peneira 200, são reduzidos os vazios existentes no esqueleto mineral, melhorando assim sua trabalhabilidade bem como a sua graduação, mas isso acontece até um certo ponto, ultrapassando este ponto os finos introduzidos começam a prejudicar a estabilidade oferecida ao esqueleto mineral, sendo diminuído o contato com os agregados graúdos existentes na mistura e influenciando inclusive em sua capacidade de compactação.

Portanto, faz-se necessária uma análise mais detalhada do uso do filer em uma mistura asfáltica para saber até que ponto ou que percentual de filer pode se utilizar, para que a

mistura tenha as propriedades adequadas e ofereça a qualidade e durabilidade necessária para que o pavimento tenha uma vida útil elevada.

Nos resultados obtidos para resistência à tração por compressão diametral, pode-se observar um aumento nos resultados estudados à medida que o teor de filer vai aumentando. Esta variação pode ser percebida analisando a Figura 43.

Figura 43: Gráfico comparativo da resistência à tração por compressão diametral das três misturas asfálticas



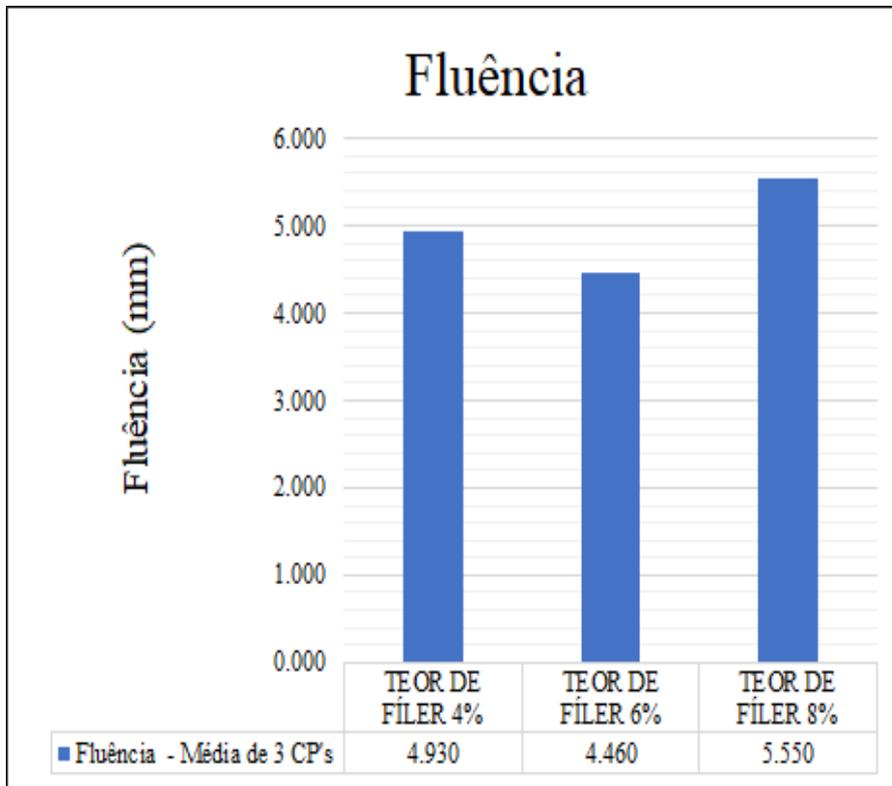
Fonte: Autor (2021).

No Brasil, conforme a norma ES 031 (DNIT, 2006), o limite mínimo permitido para resultados de resistência à tração por compressão diametral é de 0,65 MPa. Portanto, todas as misturas asfálticas efetuadas se encontram com valores ideais para um revestimento asfáltico de qualidade, estando com seus resultados em condições de fornecer a qualidade desejada para a pavimentação asfáltica.

Quanto à fluência das misturas asfálticas estudadas, os resultados podem ser observados conforme a Figura 44. Percebe-se uma variação nos valores encontrados para cada

mistura. A mistura com 6% de teor de filler apresentou a menor deformação entre as misturas estudadas, enquanto que o maior valor foi apresentado na mistura com 8% de teor de filler.

Figura 44: Gráfico comparativo da fluência das três misturas asfálticas



Fonte: Autor (2021).

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve a intenção de avaliar a influência de diferentes teores de filer mineral no comportamento mecânico do concreto asfáltico. O estudo do tema possibilitou um melhor entendimento de quais propriedades são as mais impactadas e a maneira que o filer atua nas misturas asfálticas usinadas a quente. Foi possível entender que as alterações nestas propriedades mecânicas influenciam de maneira direta na vida útil do pavimento que receberá esta mistura asfáltica.

Conforme os resultados encontrados após a realização das análises, pode-se encontrar algumas conclusões a fim de aprofundar o tema e encontrar as quantidades às quais o filer é benéfico para uma mistura asfáltica usinada a quente.

Conforme aumentou-se o teor de filer, ocorreu uma redução do consumo de ligante asfáltico, reduzindo assim o custo de produção das misturas asfálticas usinadas a quente. A mistura com teor de filer 4%, apresentou o maior consumo de ligante asfáltico, enquanto que a mistura com 8% de teor de filer teve o menor consumo de ligante asfáltico.

Ocorreu um aumento quanto a sua densidade aparente e densidade máxima teórica, conforme foi adicionado filer na mistura asfáltica, este aumento da densidade contribui para um aumento na estabilidade e na rigidez das misturas asfálticas. Este aumento nas densidades com maiores percentuais de filer se explica devido a adição de filer e conseqüente aumento na massa utilizada de agregado mineral.

Quanto aos vazios do agregado mineral, pode-se afirmar que os maiores teores de filer apresentaram os menores resultados, onde é possível entender o aumento da sua densidade. A

diminuição dos vazios do agregado mineral ocorre devido a importante característica do filer que age como uma extensão dos agregados graúdos, reduzindo assim os vazios destes agregados.

Quanto à relação betume vazios (RBV), todos os teores de filer apresentaram valores adequados aos valores solicitados pela norma vigente, se enquadrando nas exigências e tornando-se aplicáveis em rodovias e estradas como camada de rolamento e não se enquadrando como camadas de ligação ou *Binder*. Ainda com relação ao RBV, e conforme estudos de outros autores, pode-se afirmar que os resultados encontrados para as três misturas asfálticas encontraram resultados satisfatórios para uma camada de rolamento.

Quanto à estabilidade encontrada para as misturas asfálticas, pode-se afirmar que todas as misturas estudadas ficaram acima dos valores exigidos pela norma vigente, sendo portanto, aplicáveis em rodovias e estradas como camada de rolamento. Ainda com relação à estabilidade, pode-se concluir que este filer adicionado à mistura beneficia até certo ponto.

A resistência à tração por compressão diametral das três misturas asfálticas atenderam a norma vigente, que exige valores superiores a 0,65 MPa, apresentando valores superiores a 2 MPa, desta forma, se enquadrando para uma camada de rolamento.

Ao longo do trabalho comprovou-se a importância do teor de filer, no que diz respeito, a uma mistura asfáltica que atenda aos requisitos das normas e ofereça ao pavimento uma vida útil superior. Pode-se afirmar que o filer impacta no orçamento da obra, oferecendo uma economia superior se adicionado nos volumes ideais.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Diante de todos os estudos realizados durante a pesquisa, pode-se sugerir para futuros trabalhos pesquisas a respeito de:

- a) Qual é o limite de filer a ser inserido em uma mistura asfáltica, ao ponto de que tornará a qualidade da mistura asfáltica superior, e que, ofereça uma vida útil mais prolongada a camada de revestimento;

- b) Qual a influência da utilização de diferentes produtos como filler em uma mistura asfáltica, como o cimento e o cal e quais os impactos em suas principais propriedades mecânicas e volumétricas;
- c) A possibilidade da utilização do rejeito de minério de ferro como filler mineral a ser utilizado em uma mistura asfáltica usinada a quente, e sua viabilidade;
- d) A utilização de diferentes materiais como agregado para as misturas asfálticas, a fim de reduzir o impacto econômico para a etapa do revestimento da pavimentação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados - terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

AMBROZEWICZ, Paulo H. L. **Materiais de Construção: Normas, Especificações, Aplicações e Ensaios de Laboratório**. São Paulo: Pini, 2012.

APAZA, Freddy Richard et al. **Estudo Sobre a Utilização de Resíduos de Minério de Ferro em Microrrevestimento Asfáltico**. Revista Transportes, ISSN: 2237-1346, Volume 26, nº 6, 2018.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2007.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos, KLINSKY, Luis Miguel Gutierrez, FERNANDES JR., José Leomar Fernandes. **A Importância do Fíler para o Bom Desempenho de Misturas Asfálticas**. Revista Minerva, São Carlos, v. 7, n. já/abr. 2010, p.71-78, 2010.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos. **Influência do Fíler mineral em Propriedades de Misturas asfálticas densas**. 2013. 344 f. Tese (Doutorado)- Programa de pós graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2013.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/ ABEDA, 2008.

BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; SANTOS, Luís Picado. **Pavimentos Rodoviários**. Coimbra: Almedina, Abril, 2016.

CERATTI, Jorge A. P.; Reis Rafael M. M. **Manual de Dosagem de Concreto Asfáltico**. São Paulo: Oficina dos Textos; Instituto Pavimentar, 2011.

CNT - Confederação Nacional de Transportes. Disponível em: < <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf> >. Acesso em: 05 set. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 004/1994. Determinação da viscosidade saybolt furol a alta temperatura método da película delgada**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 043/95. Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER EM 367/1997. Material de Enchimento para Misturas Betuminosas**. Rio de Janeiro: DNER, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 083/1998 Agregados - análise granulométrica**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE. **DNIT - ES 031/2006 - ES. Pavimentos flexíveis - Concreto Asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE. **DNIT - ME 155/2010. Determinação da penetração.** Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT - ME 136/2018. Pavimentação Asfáltica - Misturas asfáltica - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

GRECA ASFALTOS. Disponível em: <
<http://www.grecaasfaltos.com.br/wp-content/conteudos/especificacoes-produtos/especificacoes-cap-greca-asfaltos.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2020.

MOTTA, L.M.G., LEITE, L.F.M. **Efeitos do Filer nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas.** Anais do 11º congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte, pp 1007-1017. Gramado-RS, 2000. 19-23, Novembro.

RODRIGUES, Ana L. R.; LEANDRO, R. P. **Efeito do Tipo e da Proporção de Filer no Comportamento do Mástique Asfáltico.** 2019. Disponível em : <
<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/28008/4/EfeitoTipoPropor%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 01 março 2021.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** 2ª Edição, Volume 1. São Paulo: Pini, 2007.



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09