

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE EXPRESSÕES GRÁFICAS E TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GEORGE AUGUSTO PEREIRA SILVA

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE DOPE EM MISTURAS ASFÁLTICAS TIPO
CAUQ NO MARANHÃO**

São Luís

2017

GEORGE AUGUSTO PEREIRA SILVA

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE DOPE EM MISTURAS ASFÁLTICAS TIPO
CAUQ NO MARANHÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de bacharelado em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho.

São Luís

2017

GEORGE AUGUSTO PEREIRA SILVA

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE DOPE EM MISTURAS ASFÁLTICAS TIPO
CAUQ NO MARANHÃO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 06 / 12 / 2017

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho - Orientadora

Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana

Prof. Anderson Nascimento Silva

AGRADECIMENTOS

A Deus por iluminar o meu caminho.

Aos meus pais George Daniel e Sandra Maria por todo suporte, ensinamentos e amor concedidos ao longo de toda minha vida.

A minha irmã pelo carinho e apoio oferecidos diariamente.

A minha namorada pela força, estímulo e compreensão durante todo o curso.

Aos professores do curso de Engenharia Civil pelo conhecimento transmitido, em especial a minha orientadora, professora Maria Teresinha e ao professor Anderson pela disponibilidade e auxílio durante o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Teodoro pelo auxílio com os ensaios realizados em laboratório.

Aos amigos de faculdade pela ajuda e amizade construída durante os 5 anos de curso, em especial a Igor Brandão e Rennan Sales pelo auxílio na realização deste estudo.

Por fim, agradeço a toda minha família e aos demais amigos que ajudaram direta ou indiretamente na minha formação.

RESUMO

Este estudo objetivou avaliar a utilização do DOPE como aditivo em misturas asfálticas tipo CAUQ em estradas do estado do Maranhão, que tem utilizado agregados com adesividade insatisfatória, colocando em dúvida a confiabilidade dos revestimentos executados. Inicialmente buscou-se embasar o estudo através de um levantamento bibliográfico referente aos diversos aspectos sobre a pavimentação, tipos e classificação dos pavimentos, asfalto e agregados. Em seguida foram realizados ensaios laboratoriais para fazer a caracterização e classificação dos materiais, utilizando normas e métodos de ensaios amplamente reconhecidos. Os materiais utilizados nesse estudo são procedentes de empresas locais atuantes em serviços de pavimentação rodoviária. Foram confeccionados corpos de prova com diferentes teores de ligante a fim de se determinar o teor ótimo de ligante de projeto, posteriormente foram feitas novas misturas utilizando o teor ótimo de ligante com e sem adição de DOPE e em seguida submeteu-se tais misturas a ensaio de resistência à tração por compressão diametral, ensaio Cântabro e ensaio de dano por umidade induzida. Todos os resultados foram comparados as exigências das normas citadas. Dessa forma concluiu-se que a utilização de DOPE é uma solução necessária a misturas asfálticas produzidas com agregados com baixa adesividade ao ligante, melhorando, principalmente, sua resistência a tração.

Palavras-chave: Adesividade. DOPE. Melhorador de adesividade. Mistura asfáltica. Pavimentação.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the use of DOPE as an additive in CAUQ type asphalt mixtures on roads in the state of Maranhão, which has used aggregates with unsatisfactory adhesiveness, questioning the reliability of the coatings executed. Initially, we sought to base the study through a bibliographical survey on the different aspects of pavement, types and classification of pavements, asphalt and aggregates. Laboratory tests were then carried out to characterize and classify the materials using widely recognized standards and test methods. The materials used in this study come from local companies engaged in road paving services. Test bodies with different binder contents were made in order to determine the optimum design binder content, further blends were then made using the optimum binder content with and without addition of DOPE and then subjected to assay mixtures tensile strength by diametrical compression, Cântabro test and induced moisture damage test. All the results were compared to the requirements of the cited standards. In this way it was concluded that the use of DOPE is a solution required to asphalt mixtures produced with aggregates with low adhesiveness to the binder, mainly improving its tensile strength.

Keywords: Adhesiveness. DOPE. Adhesion improver. Asphalt mix. Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de camadas e tensões solicitantes de um pavimento.	16
Figura 2 - Classificação dos revestimentos.	19
Figura 3 - Exemplo de várias frações de agregados e fíler que compõem um concreto asfáltico.	20
Figura 4 - Classificação dos agregados.	22
Figura 5 - Representação de curvas granulométricas.	23
Figura 6 - Curvas granulométricas para concreto asfáltico.	24
Figura 7 - Classificação do CAP quanto à penetração em alguns países do mundo.	26
Figura 8 - Fatores intervenientes nas características de adesividade.	28
Figura 9 - Agregados utilizados no estudo.	31
Figura 10 - DOPE utilizado no estudo.	32
Figura 11 - Sequência de peneiras utilizadas.	34
Figura 12 - (a) Amostra utilizada; (b) Amostra imersa em água.	35
Figura 13 - Amostra sobre pano absorvente.	35
Figura 14 - Pesagem hidrostática do agregado.	36
Figura 15 - Amostra ensaiada.	37
Figura 16 - Máquina "Los Angeles" utilizada para realização do ensaio.	38
Figura 17 - Medição das dimensões dos grãos de agregado.	40
Figura 18 - (a) Preparação da mistura; (b) Agregado envolvido pelo ligante; (c) Material recoberto com água destilada.	41
Figura 19 - Separação do material para confecção dos corpos de prova.	42
Figura 20 - Compactador Marshall Elétrico utilizado na compactação dos corpos de prova.	43
Figura 21 – (a) Amostra de areia durante ensaio; (b) Amostra de pó de brita durante ensaio.	45
Figura 22 - (a) amostra de areia sendo aquecida; (b) amostra de pó de brita sendo aquecida.	46
Figura 23 - Frações de agregado utilizado durante o ensaio de angularidade.	47
Figura 24 - Ensaio de angularidade em execução.	48
Figura 25 - Frasco Le Chatelier com amostra durante ensaio.	49

Figura 26 - Ensaio de ponto de amolecimento em execução.....	50
Figura 27 - Ensaio de penetração em execução.	52
Figura 28 - (a) Viscosímetro Saybolt-Furol; (b) Frasco sendo preenchido com ligante durante ensaio.....	53
Figura 29 - Termômetro medindo temperatura de compactação da mistura.....	54
Figura 30 - Desmolde de corpo de prova.	55
Figura 31 - Medição da altura do corpo de prova.....	55
Figura 32 - Corpos de prova no banho-maria a 60 °C.....	56
Figura 33 - (a) Corpo de prova no molde para ensaio de resistência à tração por compressão diametral; (b) Prensa Marshall utilizada durante o ensaio. ..	59
Figura 34 - (a) Corpo de prova, antes do ensaio Cântabro; (b) Corpo de prova, após ensaio Cântabro.	60
Figura 35 - Bomba de vácuo utilizada durante o ensaio.	62
Figura 36 – (a) Corpo de prova embalado em filme plástico; (b) Corpo de prova embalado por um filme plástico dentro de um saco plástico impermeável com 10 ml de água destilada.....	63
Figura 37 – Amostras de agregado após ensaio de adesividade.....	70
Figura 38 – Amostra de agregado, com 0,5% de DOPE adicionado ao ligante, após ensaio de adesividade.....	71
Figura 39 – Amostras, com 1,5% de DOPE adicionado ao ligante, após ensaio de adesividade.	71
Figura 40 – Amostras, contendo 1% de DOPE adicionado ao ligante, após ensaio de adesividade.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria dos agregados graúdos.	65
Tabela 2 - Granulometria dos agregados miúdos.	65
Tabela 3 - Granulometria do fíler.....	66
Tabela 4 - Enquadramento granulométrico da mistura utilizada.	67
Tabela 5 - Resultados de densidade e absorção dos agregados.....	68
Tabela 6 – Resultado de resistência a abrasão.	68
Tabela 7 – Resultados do ensaio de equivalente de areia.....	69
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de angularidade.....	69
Tabela 9 – Cálculo do IDML para misturas sem adição de DOPE.....	72
Tabela 10 – Cálculo do IDML para misturas com adição de DOPE.....	73
Tabela 11 – Resultados dos ensaios realizados com CAP.....	74
Tabela 12 – Faixas de temperatura utilizadas na dosagem Marshall.....	75
Tabela 13 – Parâmetros volumétricos da mistura	75
Tabela 14 – Estabilidade dos corpos de prova.....	78
Tabela 15 – Teor ótimo de ligante.....	79
Tabela 16 – Resultado da resistência a tração das misturas.....	80
Tabela 17 – Resultado do desgaste a abrasão.....	81
Tabela 18 – Resultado da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova que sofreram condicionamento.	82
Tabela 19 – Resultado da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova que não sofreram condicionamento.	82
Tabela 20 – Razão de resistência à tração retida das misturas.....	83
Tabela 21 – Densidade real do agregado graúdo.....	90
Tabela 22 – Densidade real da areia.....	90
Tabela 23 – Densidade real do pó de brita.....	90
Tabela 24 – Densidade real do fíler.....	90
Tabela 25 - Dimensões dos 100 primeiros grãos utilizados na definição do índice de forma.....	91
Tabela 26 - Dimensões dos 100 últimos grãos utilizados na definição do índice de forma.....	92
Tabela 27 - Dimensões e densidade aparente para mistura com 5% de CAP.....	93

Tabela 28 - Dimensões e densidade aparente para mistura com 5,5% de CAP.....	93
Tabela 29 - Dimensões e densidade aparente para mistura com 6% de CAP.....	94
Tabela 30 - Dimensões e densidade aparente para mistura com 6,5% de CAP.....	94
Tabela 31 - Dimensões e densidade aparente para mistura com 7% de CAP.....	95
Tabela 32 - Dimensões, massa seca, massa saturada e volume dos corpos de prova que sofreram condicionamento.	96
Tabela 33 - Dimensões dos corpos de prova que não sofreram condicionamento. ...	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica dos agregados.....	66
Gráfico 2 - Curva granulométrica da mistura.....	67
Gráfico 3 – Determinação das temperaturas médias de compactação e do ligante para confeção de corpos de prova.....	74
Gráfico 4 – Densidade aparente da mistura.....	76
Gráfico 5 – Densidade máxima teórica da mistura.....	76
Gráfico 6 – Volume de vazios da mistura.....	77
Gráfico 7 – Volume do agregado mineral da mistura.....	77
Gráfico 8 – Relação betume/vazios da mistura.....	78
Gráfico 9 – Método de definição do teor de projeto.....	79
Gráfico 10 – Resistência a tração das misturas.....	80
Gráfico 11 – Desgaste a abrasão das misturas.....	81

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa.....	14
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Pavimento Rodoviário.....	16
2.1.1 Tipos de Pavimento.....	18
2.2 Revestimentos Asfálticos.....	18
2.2.1 Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ)	20
2.3 Adesividade em Misturas Asfálticas	26
2.3.1 Melhoradores de Adesividade	28
2.3.2 DOPEs	29
3 METODOLOGIA	30
3.1 Materiais utilizados	30
3.1.1 Agregados Graúdos	31
3.1.2 Agregados Miúdos	31
3.1.3 Fíler	32
3.1.4 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	32
3.1.5 DOPE	32
3.2 Ensaios Laboratoriais	33
3.2.1 Ensaios com Agregados.....	33
3.2.2 Ensaios com Cimento Asfáltico de Petróleo	49
3.2.3 Ensaios com as misturas asfálticas.....	53
4 RESULTADOS E ANÁLISES	65
4.1 Análise granulométrica.....	65
4.2 Absorção e densidade	67
4.3 Abrasão “Los Angeles”	68

4.4 Índice de forma.....	68
4.5 Equivalente de areia.....	69
4.6 Angularidade	69
4.7 Adesividade	70
4.8 Índice de degradação de rochas após compactação marshall, com ligante.....	72
4.9 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)	73
4.10 Dosagem Marshall.....	75
4.10.1 Propriedades volumétricas	75
4.10.2 Estabilidade.....	78
4.10.3 Teor de projeto de ligante asfáltico	79
4.11 Resistência a tração por compressão diametral	80
4.12 Desgaste Cântabro.....	81
4.13 Dano por umidade induzida	82
5 CONCLUSÃO	84
APÊNDICE A	90
APÊNDICE B	91
APÊNDICE C	93
APÊNDICE D	96

1 INTRODUÇÃO

A camada de revestimento de uma estrutura flexível consiste de uma mistura de agregados minerais e material betuminoso, sobreposta à camada de base. Ela deve ser projetada para resistir às forças abrasivas do tráfego, reduzir a penetração de água superficial no pavimento, proporcionar uma superfície resistente ao deslizamento dos veículos e proporcionar um rolamento suave e uniforme ao tráfego (PINTO; PREUSSLER, 2001).

Segundo Bernucci et al. (2006), na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes. As propriedades que os agregados contém influenciam diretamente na qualidade da mistura asfáltica. Agregados hidrófilos, ou seja, nos quais o efeito da água separa a película de ligante asfáltico da sua superfície, podem ser inaceitáveis para uso em misturas asfálticas, por exemplo.

Diante dos desafios encontrados constantemente na engenharia, técnicas de melhoramento das propriedades dos materiais se tornam uma válvula de escape em situações onde a variedade de opções não existe. O DOPE deve ser utilizado quando se deseja utilizar agregados que apresentam falta de adesividade, o que é uma situação constante no estado do Maranhão. Neste trabalho, buscou-se reunir dados e informações com o propósito de entender qual a real contribuição que o aditivo DOPE pode fornecer na construção de estradas de melhor qualidade e durabilidade.

Dentro deste contexto, neste estudo é feito uma comparação entre as características de uma mistura asfáltica utilizando um agregado que não apresenta boa adesividade ao ligante asfáltico, e outra mistura onde se utiliza o mesmo agregado da anterior, porém adicionando o DOPE.

Os resultados dos estudos mostraram que a utilização de DOPE melhora significativamente as características da mistura, principalmente em relação a resistência a tração.

1.1 Justificativa

O setor de transporte está diretamente vinculado ao progresso de uma nação, proporcionando acessibilidade e mobilidade entre pessoas e mercadorias, evidenciando o seu grau de importância na economia, viabilizando o progresso nos diversos setores de um país. Sem um sistema de transportes de qualidade, é inviável o desenvolvimento econômico, pois o escoamento de sua produção se torna precário, minando a sua competitividade no mercado internacional (COLAVITE; KONISHI, 2015).

De acordo com dados da Confederação Nacional de Transportes (2016), o modal rodoviário é o maior responsável pelo transporte de cargas no Brasil, deslocando mais da metade da produção do país, além de ser a principal alternativa para a movimentação de pessoas. Isso nos mostra que a qualidade das construções e manutenções das rodovias nacionais é essencial para a força da produção brasileira.

Segundo uma pesquisa divulgada em 2016 pela CNT, 48,3% da extensão pesquisada apresenta algum tipo de problema no pavimento e 69,3% da extensão pesquisada apresenta algum tipo de problema na superfície do pavimento. Novas técnicas que buscam atribuir maior qualidade as rodovias brasileiras são fundamentais.

Essa pesquisa visa colaborar com o estudo da aplicação do DOPE nas misturas asfálticas no estado do Maranhão, analisando as características dos materiais e realizando um estudo de propriedades mecânicas das misturas.

De forma geral, o estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com a adição de DOPE torna possível uma análise de benefícios, que podem ou não existir, na construção de estradas de maior qualidade e durabilidade. Além disso, possibilita a utilização de agregados que não atenderiam aos requisitos para uso, se misturados ao ligante sem a utilização do aditivo melhorador de adesividade.

Consequentemente, o trabalho contribuirá com os conhecimentos acerca do tema, tendo em vista que a bibliografia específica envolvendo a sua utilização em nossa região ainda é escassa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a utilização do DOPE como aditivo em misturas asfálticas tipo CAUQ em agregados utilizados no Maranhão.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar e avaliar materiais utilizados para a pesquisa;
- Comparar as propriedades entre a mistura asfáltica comum e a com utilização de DOPE.

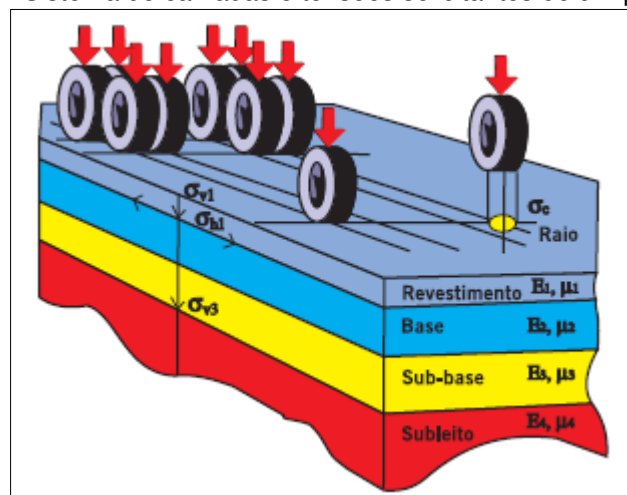
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Pavimento Rodoviário

Pavimento rodoviário, utilizado na construção de rodovias, estradas, ruas, aeroportos, entre outros, é uma estrutura construída sobre a terraplenagem, composta por camadas finitas, que possuem como fundação o subleito (Figura 1). Esse tipo de obra é destinada, técnica e economicamente, a resistir aos esforços do tráfego e clima e a melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança (SENÇO, 2007).

Como bem nos assegura Balbo (2007), pode-se dizer que o pavimento é composto por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados. Neste contexto, é adequada para atender estrutural e operacionalmente o tráfego. O mais importante, contudo, é constatar que essa estrutura é feita para receber e transmitir esforços de forma que diminua as pressões sobre as camadas inferiores. Não é exagero afirmar que esses conceitos são aspectos gerais devido à complexidade da estrutura.

Figura 1 - Sistema de camadas e tensões solicitantes de um pavimento.



Fonte: Albernaz (1997, apud Bernucci et al, 2006, p.10).

As camadas finitas que compõem o pavimento possuem funções diferentes, tendo como variáveis os materiais utilizados e as espessuras de cada uma delas. Além disso o comportamento da estrutura depende do tráfego a que é submetida, do tipo de subleito ao qual está assentada e da interação entre as camadas (BERNUCCI et al. 2006).

De acordo com Balbo (2007), de forma simplificada, as funções das camadas do pavimento são:

- **Revestimento:** Camada superior do pavimento, deve receber, diretamente, as cargas impostas ao pavimento sem sofrer grandes deformações, desagregação e/ou descompactação, além disso devem ser impermeáveis, em regra geral. Podem ser compostas por materiais como: blocos pré-moldados de concreto, placas de concreto, misturas asfálticas em geral, entre outros;
- **Base e Sub-base:** Localizadas logo após o revestimento, tem como principal função aliviar os esforços transmitidos as camadas inferiores. Geralmente a base se torna muito espessa, assim, como uma medida econômica, é dividida em base e sub-base, esta composta por material de menor qualidade. São compostas por materiais como: brita graduada simples, solo estabilizado naturalmente, solo estabilizado quimicamente, entre outros;
- **Reforço de Subleito:** Camada localizada acima do subleito, atendendo parcialmente as suas funções. Se faz necessária quando o subleito é composto por solo de baixa resistência aos esforços, sendo uma opção mais viável economicamente em comparação a utilização de camadas mais espessas de base e/ou sub-base. É composto por solo de maior qualidade em relação ao encontrado no subleito;
- **Subleito:** É o terreno de fundação do pavimento. Os esforços recebidos na sua superfície são aliviados na sua profundidade, é necessário entender que como é um caso de semi-espaço infinito, apenas a camada próxima da superfície é considerada subleito, pois com o aumento da profundidade os esforços se tornam inexpressivos. Condiciona todas as outras camadas do pavimento a partir de sua resistência. É composto pelo solo característico do local, que deve ser consolidado e compactado.

2.1.1 Tipos de Pavimento

Conforme o DNIT (2006), os pavimentos são classificados em rígidos, flexíveis e semirrígidos.

Pavimentos flexíveis são revestidos por misturas asfálticas e em suas camadas possuem material granular. Todas as suas camadas sofrem deformações elásticas, assim, as cargas se distribuem de forma equivalente pelo pavimento. Geralmente são formados pelas camadas: revestimento, base, sub-base e reforço do subleito. A espessura de cada camada varia de acordo com o tipo de tráfego, resistência do subleito e material utilizado, podendo até não haver a necessidade de utilização de alguma camada, quando há a possibilidade de utilização de um material de boa resistência na base, tornando a sub-base dispensável, por exemplo (BERNUCCI et al., 2006).

Pavimentos rígidos são revestidos por placas de concreto que podem ser ou não armadas. Neste tipo de pavimento, o revestimento absorve praticamente todos os esforços solicitantes, devido a sua alta rigidez. O reforço do subleito, geralmente, não é utilizado e utiliza-se apenas uma camada granular composta por materiais semelhantes aos utilizados em sub-bases de pavimentos flexíveis (BERNUCCI et al., 2006).

Pavimentos semirrígidos são revestidos por misturas asfálticas e se diferenciam dos pavimentos flexíveis por possuírem uma base cimentada por algum aglutinante cimentício, como cimento, cal, entre outros, tornando o pavimento mais resistente (DNIT, 2006).

2.2 Revestimentos Asfálticos

O revestimento é a camada do pavimento que recebe diretamente os esforços oriundos do tráfego e das ações climáticas e os transmite de forma atenuada as camadas seguintes. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das ruas, se trata uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garanta os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem,

resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local (BERNUCCI et al., 2006).

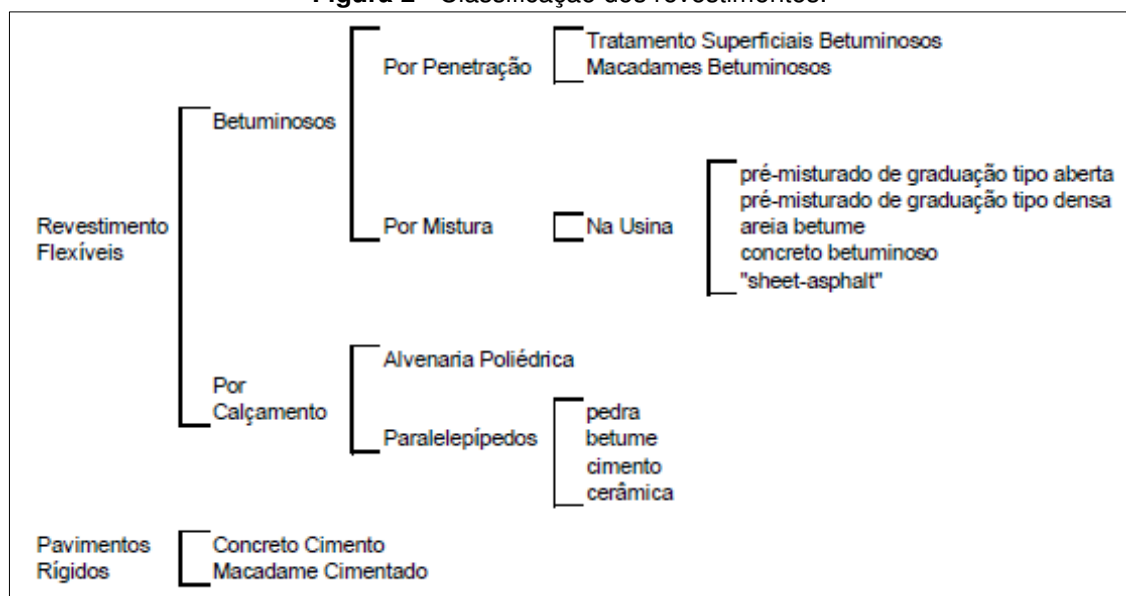
A associação do material betuminoso e dos agregados pode se dar de duas maneiras principais, por penetração e por mistura.

Segundo o DNIT (2006), quando por penetração, pode ser invertida ou direta. Na penetração invertida, primeiro é aplicado o material betuminoso e em seguida acontece o espalhamento e compactação dos agregados, além disso, de acordo com o número de camadas é caracterizado como tratamento superficial simples, duplo ou triplo. Na penetração direta, primeiramente espalha-se e compacta-se os agregados e em seguida é aplicado o material betuminoso.

Ainda de acordo com o DNIT (2006), no revestimento asfáltico por mistura, a compactação ocorre após a mistura entre o ligante betuminoso e os agregados. Podem ser pré-misturados a frio, quando os materiais utilizados são espalhados na pista a temperatura ambiente, ou pré-misturados a quente, quando o ligante e os agregados são misturados e espalhados ainda quentes.

A Figura 2 mostra as classificações dos revestimentos utilizados na pavimentação. Neste trabalho o estudo é voltado a revestimentos flexíveis betuminosos, por mistura em usina, de graduação densa, tipo CAUQ, que está melhor detalhado no item a seguir.

Figura 2 - Classificação dos revestimentos.



Fonte: DNIT (2006, p. 98).

2.2.1 Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ)

O concreto asfáltico é a mistura asfáltica usinada a quente mais utilizada no Brasil. Se trata de um revestimento muito resistente em todos os aspectos, quando composto pelos materiais adequados em dosagem ideal. Esse tipo de mistura é muito sensível ao teor de CAP utilizado, se preparado com uma quantidade elevada pode diminuir excessivamente os vazios da mistura, causando, por fluência, deformações significativas no revestimento, se preparada com baixa quantidade, diminui a resistência a tração, podendo causar trincas e diminuir sua vida útil (BERNUCCI et al., 2006).

O CAUQ é um material utilizado na construção de revestimentos de pavimento obtido a partir da mistura e homogeneização de agregados minerais, em geral bem graduados, de material fino de enchimento (fíler) (Figura 3), e de cimento asfáltico de petróleo (CAP). É elaborada a quente, em usina misturadora, contínua ou descontínua, de grande, médio ou pequeno porte (BALBO, 2007).

Figura 3 - Exemplo de várias frações de agregados e fíler que compõem um concreto asfáltico.



Fonte: Bernucci et al. (2006, p. 160).

De acordo com Castro (2015), concreto asfáltico é uma mistura de agregado denso com asfalto, de alta qualidade. Usualmente o asfalto empregado é um CAP e a mistura se realiza a quente, isto é, há necessidade de aquecer o agregado para que se tenha massa térmica para manter o asfalto com consistência suficiente nas operações de mistura, transporte, espalhamento e compactação. Como todo concreto, ele apresenta alta resistência à compressão e baixa deformabilidade.

Segundo Senço (2007), a mistura é feita em usina, com rigoroso controle de granulometria, teor de betume, temperaturas do agregado e do betume, transporte, aplicação e compressão.

O DNIT, por meio da norma 031/2006 - ES, define concreto asfáltico como uma mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (fíler) se necessário e cimento asfáltico, espalhada e compactada a quente.

2.2.1.1 Materiais utilizados na execução do concreto asfáltico

Os revestimentos asfálticos são compostos basicamente por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. Quando executadas e aplicadas de forma apropriada, devem originar estruturas duráveis em sua vida de serviço. A qualidade e dosagem apropriada desses materiais estão intimamente ligadas aos problemas relacionados à deformação permanente e outros defeitos que podem ser atribuídos ao revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2006).

Segundo Schuh (2016), o desempenho da mistura final é sensibilizado pelas propriedades particulares dos materiais asfálticos e pétreos que compõem o concreto asfáltico.

2.2.1.1.1 Agregados e Fíler

Os agregados são materiais inertes, granulares, sem forma e dimensões definidas, com propriedades adequadas a constituir misturas ou camadas para utilização em obras da construção civil. Nas misturas ou camadas as quais fazem parte, os agregados representam a maior quantidade do volume, comparando aos demais componentes. No caso de misturas betuminosas esse volume é superior a três quartos do volume total (SENÇO, 2007).

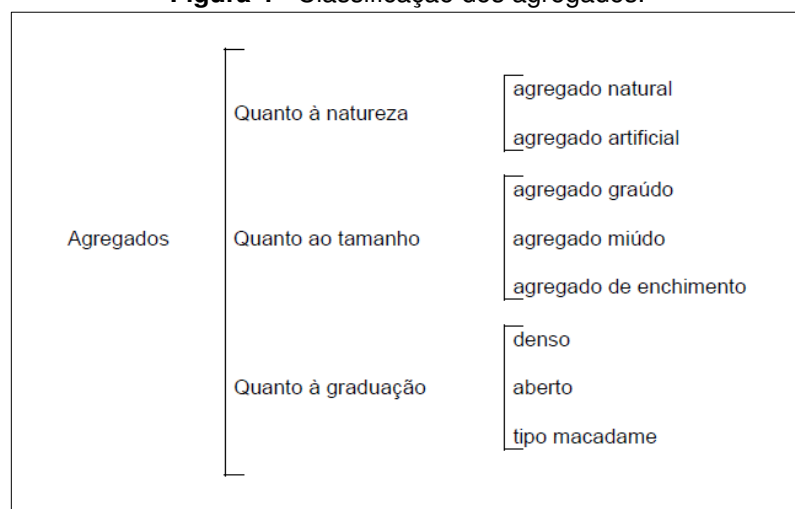
Agregados podem ser entendidos como conjunto de grãos minerais, dentro de um determinado limite de dimensões, naturais ou artificiais, britados ou não, utilizados em diversas áreas da construção civil. Na pavimentação, devem possuir diversas propriedades, quanto a seu desempenho, para atender os requisitos

necessários, como durabilidade, resistência, adesividade ao ligante, entre outros (BALBO, 2007).

Segundo Bernucci et al. (2006), agregado é um termo técnico para areias, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural ou em seu estado processado, e deve-se considerar também os agregados artificiais. O agregado escolhido para determinada utilização deve possuir propriedades de modo a suportar as tensões na superfície e interior do pavimento. O desempenho das partículas de agregados depende de como são produzidas, mantidas unidas, e das condições nas quais vão atuar.

De acordo com o DNIT (2006), os agregados podem ser classificados segundo a natureza, tamanho e distribuição dos grãos, conforme apresenta-se na Figura 4.

Figura 4 - Classificação dos agregados.



Fonte: DNIT (2006, p.78).

Quanto a natureza:

- Naturais: Constituídos de grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo ou produzidos por britagem;
- Artificiais: Os grãos são produtos ou subprodutos de processo industrial por transformação química ou física do material.

Quanto ao tamanho:

- Graúdo: Material retido na peneira nº 10 (2,0 mm);
- Miúdo: Material que passa na peneira nº 10 (2,0 mm) e fica retido na peneira nº 200 (0,075 mm);

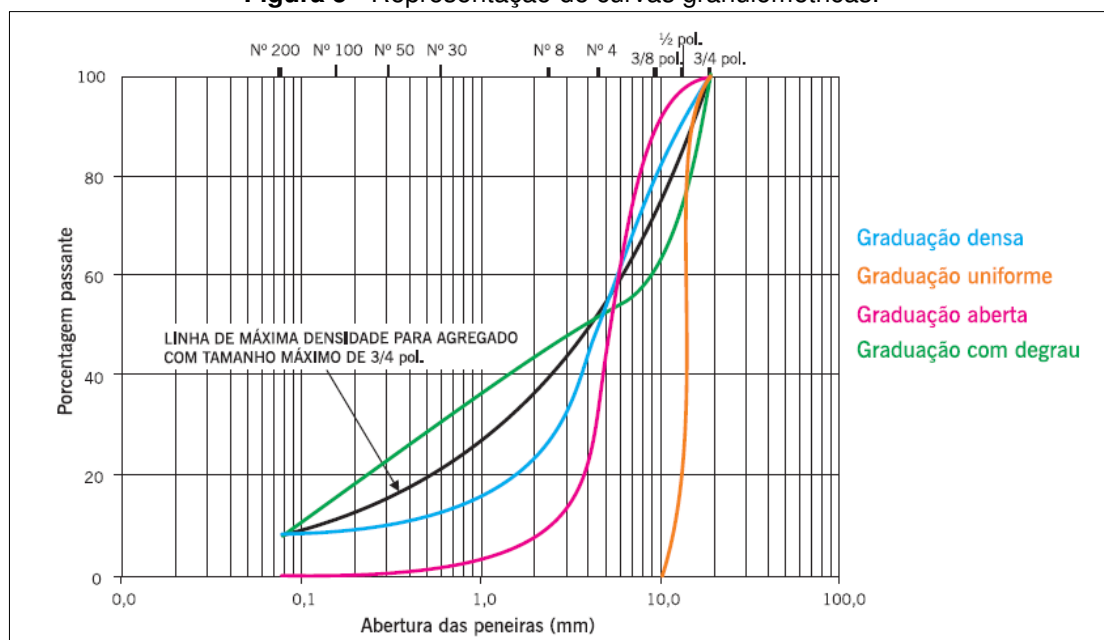
- Material de enchimento: Material que passa pelo menos 65% na peneira nº 200 (0,075 mm).

Quanto à distribuição dos grãos:

- Graduação densa: Apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores;
- Graduação aberta: Apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino insuficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores;
- Tipo macadame: Composto por partículas de um único tamanho, possui granulometria uniforme.

A Figura 5 apresenta as curvas granulométricas dos materiais, de acordo com o tipo de graduação.

Figura 5 - Representação de curvas granulométricas.



Fonte: Bernucci et al. (2006, p. 123).

A função dos agregados é formar uma estrutura capaz de suportar todos os esforços à compressão, através do contato grão a grão. O atrito interno das partículas (atrito e entrosamento) fornece uma parcela da resistência ao cisalhamento (CASTRO, 2015).

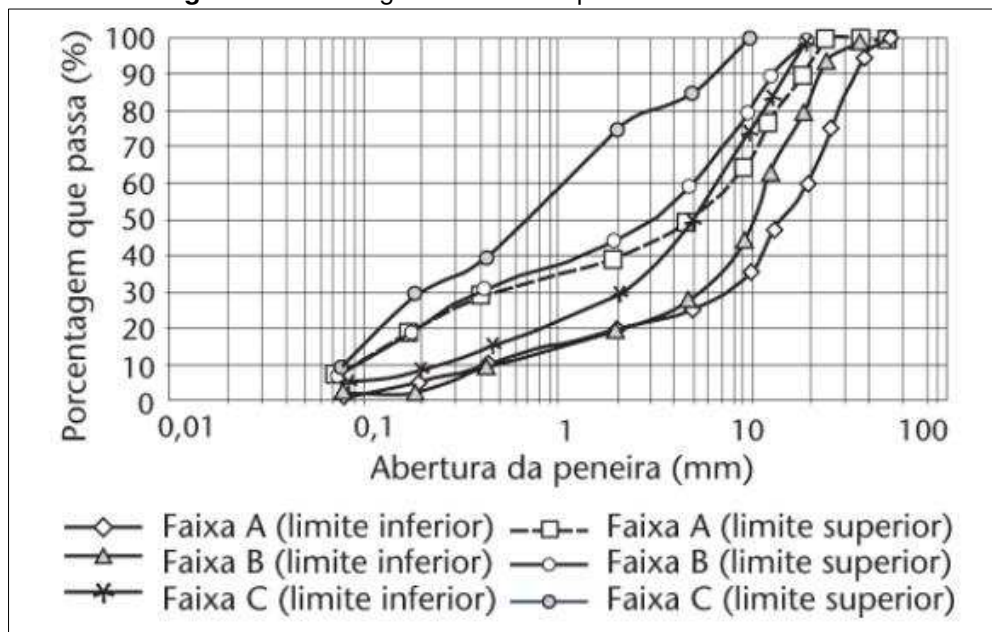
Nascimento (2011) destaca que existe uma grande variedade de agregados passíveis de utilização em revestimentos asfálticos, porém para uma

melhor performance é necessário conhecer as características do material, como: composição mineralógica, composição química, granulometria, grau de alteração, tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

Conforme Bernucci et al. (2006), a escolha dos agregados é feita em laboratório, através de uma série de ensaios utilizados para a predição do seu comportamento posterior quando em serviço.

O concreto asfáltico se trata de uma mistura densa, graças a utilização de partículas com graduação bem-graduada (Figura 6). Por consequência possui baixa quantidade de vazios, entre 2% e 4%. Assim, o uso de fíler tem um papel importante na mistura, por trabalhar como um material de enchimento, importante para manter a mistura densa. Além disso, os fíleres aumentam a viscosidade do CAP, o que gera incremento no ponto de amolecimento, na estabilidade, no módulo de resiliência e na resistência da mistura, evidentemente até um dado limite de consumo do material na mistura asfáltica (BALBO, 2007).

Figura 6 - Curvas granulométricas para concreto asfáltico.



Fonte: DNER (apud Balbo, 2007, p. 159)

2.2.1.1.2 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O asfalto utilizado na pavimentação é um ligante betuminoso que é produzido a partir da destilação do petróleo, tendo como propriedades ser adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo, no entanto, sua baixa reatividade não evita o envelhecimento precoce causado pela oxidação lenta no contato com o ar e água. No Brasil é utilizada o termo CAP para nomear esse material semissólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas (BERNUCCI et al., 2006).

O CAP possui grande quantidade de betume, por isso são muitas vezes designados também por betumes. Apresentam cor negra ou marrom muito escuro, são muito viscosos e agem como ligantes de consistência sólida a semissólida em temperaturas ambientes (ASPHALT INSTITUTE, 1983 apud BALBO, 2007).

De acordo com Balbo (2007), o CAP possui geralmente boa aderência aos agregados, propriedades impermeabilizantes, flexibilidade, relativa durabilidade e grande resistência à maior parte dos ácidos, sais e álcalis, além de ser insolúvel em água. Sofre oxidação quando exposto à radiação solar, às águas ácidas ou sulfatadas, às ações de óleos, graxas, lubrificantes e combustíveis.

Segundo Nascimento (2011), o CAP é dúctil suportando deformações plásticas significativas antes da ruptura total do material, entretanto durante determinados esforços ocorrem microfissuras que levam progressivamente à ruptura do ligante.

Bernucci et al. (2006) afirma que a composição química do cimento asfáltico de petróleo tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas. Os CAPs são formados por 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes.

O asfalto, quando usado na quantidade correta, desenvolve alta coesão, dando à mistura condições de resistir a elevados esforços de tração. Se o asfalto for usado em excesso, passa a ter um efeito de lubrificante, prejudicando as qualidades do concreto asfáltico (CASTRO, 2016).

Granich (2010) mostra que existe atualmente 6 tipos de ligantes asfálticos no Brasil, porém, todos provenientes de CAP. São eles: CAP – Cimento asfáltico de

petróleo; ADP – Asfaltos diluídos; EAP – Emulsões asfálticas; AMP ou AMB – Asfaltos modificados por polímeros ou por borracha de pneus; AR e ARE – Asfaltos rejuvenescedores; Asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial.

Como apresenta Balbo (2007), no Brasil os cimentos asfálticos de petróleo são classificados com base na sua consistência, a partir do ensaio de penetração (Figura 7), que fornece uma medida em decímetros de milímetro da penetração no CAP de uma agulha padronizada, sob condições determinadas.

O DNIT a partir da norma 095/2006 - EM afirma que os cimentos asfálticos de petróleo, conforme sua procedência, são classificados como: CAP-30/45, CAP-50/70, CAP-85/100 e CAP-150/200.

Figura 7 - Classificação do CAP quanto à penetração em alguns países do mundo.

País	TIPOS DE CAP QUANTO À PENETRAÇÃO		
	DUROS	MÉDIOS	MOLES
Brasil	CAP 30/45	CAP 50/70, CAP 85/100	CAP 150/200
França	CAP 20/30	CAP 40/50, CAP 60/70, CAP 80/100	CAP 180/220
EUA	CAP 40/50	CAP 60/70, CAP 85/100	CAP 120–150 CAP 200–300

Fonte: Balbo (2007, p.174).

2.3 Adesividade em Misturas Asfálticas

A adesividade pode ser entendida como a capacidade do agregado de ser envolvido por uma película asfáltica sem posterior descolamento. Essa característica está relacionada com a acidez do agregado, levando em consideração que rochas básicas possuem, geralmente, melhor adesividade. Muitas vezes faz-se necessário o uso de "dope" para a correção da acidez do agregado e melhoria da adesividade do ligante ao agregado (BALBO, 2007).

Conforme Bock (2009), a adesividade em misturas asfálticas pode ser entendida como a propriedade que garante a união entre o cimento asfáltico e o agregado sob a ação do tráfego e da água. É importante que os materiais envolvidos na mistura asfáltica possuam uma boa interação quando colocados em contato. Um dos resultados de uma boa interação entre os componentes da mistura é a obtenção de adesividade entre ligante e agregado, essa característica responde por boa parte da qualidade da mistura asfáltica.

Gonçalves (2014) atenta para a importância da adesividade do agregado ao ligante asfáltico para o comportamento mecânico da mistura asfáltica. O descolamento da película de ligante asfáltico junto ao material pétreo pode tornar este agregado impróprio como material de infraestrutura por inutilizar a coesão da mistura. Esse efeito ocorre porque a água separa essas duas parcelas, material pétreo e asfalto.

De acordo com Specht et al. (2005 apud Bock, 2009), em uma mistura asfáltica, a perda de adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados pode ser associada a perda de adesão e perda de coesão. A perda de adesão está ligada à entrada de água entre o ligante e o agregado, gerando descolamento do filme asfáltico da superfície do agregado. A perda de coesão está ligada à redução de rigidez do cimento asfáltico e ao enfraquecimento das ligações entre ligante e agregado.

Segundo Anitelli (2013), a ruptura da película adesiva ocorre por haver um plano de ruptura interfacial, completo ou parcial, entre agregado e asfalto, como recobrimento incompleto do agregado pelo asfalto ou por presença de umidade na superfície do agregado.

A perda de adesão também pode ocorrer se o agregado estiver contaminado com pó na sua superfície, além disso a composição química, estrutura mineralógica e as características físicas do agregado (textura superficial, forma e porosidade) têm uma importante influência no comportamento adesivo (ASPHALT INSTITUTE, 1987 apud PEREIRA, 2012).

Misturas asfálticas que apresentam problemas de adesividade do ligante ao agregado, provavelmente resultarão em uma camada frágil à desagregação e ao descolamento de partículas. Consequentemente, poderá ocorrer a penetração de água na mistura asfáltica, atingindo camadas inferiores do pavimento, comprometendo toda a sua estrutura (BUNDY, 2009 apud SCHUH, 2016).

A Figura 8 apresenta alguns fatores intervenientes nas características de adesividade.

Figura 8 - Fatores intervenientes nas características de adesividade.

<i>Fator</i>	<i>Característica Desejável</i>
1. Agregados	
a) textura superficial	áspero
b) porosidade	depende do tamanho do poro
c) mineralogia	agregados básicos são mais resistentes
d) cobertura do agregado por pó	limpo
e) umidade superficial	seco
f) composição química superficial	capaz de formar pontes de hidrogênio
g) filler mineral	aumenta a viscosidade do ligante
2. Cimento Asfáltico	
a) viscosidade	alta
b) química	nitrogênio e fenóis
c) espessura filme	alta
3. Tipo de Mistura	
a) vazios	muito baixo ou muito alto
b) granulometria	muito aberta ou muito densa
c) teor de ligante	alto
4. Condições Climáticas	
a) temperatura	quente
b) precipitações durante construção	nenhuma
c) precipitações após construção	mínima
d) ciclos de gelo/degelo	mínimo
5. Tráfego	
a) volume de tráfego	baixo tráfego

Fonte: Hicks (1991, apud Bock, 2009, p. 38).

2.3.1 Melhoradores de Adesividade

Com o objetivo de diminuir ou eliminar os danos causados pela utilização de materiais com baixa adesividade na composição de misturas asfálticas, os melhoradores de adesividade são incorporados às misturas.

Bock (2009) lista algumas formas de melhoramento de adesividade de misturas asfálticas, são elas:

- **Ligantes Modificados:** adição de determinados tipos de polímeros ao ligante, tornando-o mais estável a temperaturas elevadas, apresentando maior ponto de amolecimento, maior resistência ao envelhecimento, alta adesividade e coesão e maior elasticidade e resistência à deformação permanente;

- Cal Hidratada: é um agente que melhora o desempenho de misturas asfálticas de várias maneiras, podendo melhorar a adesividade ligante-agregado, reduzir a formação de afundamentos de trilhas de roda, reduzir o trincamento e o envelhecimento (oxidação) da camada asfáltica. Ao mesmo tempo em que age sobre o agregado, a cal também reage com as partículas polarizadas do ligante asfáltico (Hicks e Scholz, 2001 apud Bock, 2009);
- DOPE: agente melhorador de adesividade compostos por aditivos químicos que atuam na interface asfalto/agregado, aumentando consideravelmente o poder de aderência entre ambos (ABEDA, 2017).

Neste trabalho, focaremos nas características dos dopes e na sua influência em misturas asfálticas.

2.3.2 DOPEs

Os DOPEs são agentes melhoradores de adesividade que são adicionados aos CAPs. O grupo químico de alta polaridade do final da molécula de dope se liga à superfície do agregado e a parte não polar do hidrocarboneto chamada surfactante se liga ao asfalto, agindo como uma ponte de ligação entre o agregado e asfalto (OMENO; ANTOSCZEZEM JUNIOR, 2004).

De acordo com Bock (2009, p. 45):

A adição do dope (composto com cabeça polar positiva) no cimento asfáltico melhora a adesão entre o ligante e o agregado ácido (com preponderância absoluta de cargas negativas). Esse aumento da adesão se dá através da forte atração entre os dois componentes de polaridades opostas e da consequente formação de ligações químicas iônicas e pontes de hidrogênio.

Segundo Granich (2010), a importância da utilização do dope se dá principalmente na presença de agregados que possuem grande quantidade de cargas negativas (ácidos), pois os dopes são compostos de cabeça polar positiva e dessa forma proporcionam a formação de ligações químicas iônicas e pontes de hidrogênio entre agregado e ligante, melhorando assim a adesão destes componentes.

3 METODOLOGIA

De acordo com Rampazzo (2005), a pesquisa é uma atividade voltada a resolução de problemas, permitindo desta forma a descoberta de novos fatos ou dados, soluções ou leis.

A pesquisa realizada neste trabalho é do tipo experimental, com o objetivo de esclarecer os efeitos do DOPE em misturas asfálticas do tipo CAUQ, através de ensaios técnicos realizados em laboratório. Além disso, foi realizada um levantamento bibliográfico na busca de informações a respeito de temas relevantes ao trabalho.

A pesquisa contemplou a dosagem em laboratório, através da metodologia Marshall, de acordo com a faixa B do DNER para a composição granulométrica dos agregados com ligante asfáltico convencional (CAP 50/70) e com ligante CAP 50/70 com adição de DOPE.

O estudo contempla ainda a verificação e análise do comportamento mecânico (Resistência à Tração), de propriedades de adesividade (Metodologia Lottman) e de coesão/adesão (Metodologia Cântabro).

Após a determinação dos parâmetros de dosagem Marshall, tendo-se determinado o teor de ligante de projeto, foram moldados os corpos de prova para execução dos ensaios citados.

3.1 Materiais utilizados

Para a realização de deste estudo foram utilizados materiais disponíveis na região e que são comumente utilizados em obras de pavimentação no estado do Maranhão. Os agregados foram adquiridos junto a empresas com experiência no setor de pavimentação em São Luís – MA e o CAP foi adquirido junto a usina da Prefeitura de São Luís, procedente da Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (LUBNOR), localizada em Fortaleza - Ceará.

A mistura asfáltica utilizada neste estudo foi o CAUQ, uma mistura comumente empregada em obras de pavimentação no Maranhão.

3.1.1 Agregados Graúdos

Os agregados graúdos utilizados no estudo foram a brita 1 e a brita 0, ambos de origem granítica. Para esse material foram realizados os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica;
- Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo;
- Determinação da abrasão “Los Angeles”;
- Índice de forma;
- Adesividade a ligante betuminoso;
- Determinação do índice de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante - ID_{ML} .

3.1.2 Agregados Miúdos

Os agregados miúdos utilizados no estudo foram o pó de brita, de origem granítica, e a areia. Para esse material foram realizados os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica;
- Equivalente de areia;
- Determinação da densidade real;
- Angularidade.

A Figura 9 apresenta imagens das amostras de todos os agregados, graúdos e miúdos, utilizados nesse estudo.

Figura 9 - Agregados utilizados no estudo.



Fonte: O autor (2017).

3.1.3 Fíler

Neste estudo, o material utilizado como fíler foi o cimento Portland, adquirido em um depósito de materiais de construção localizado próximo a UEMA. Os ensaios realizados para esse material foram:

- Análise granulométrica;
- Determinação da massa específica real.

3.1.4 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

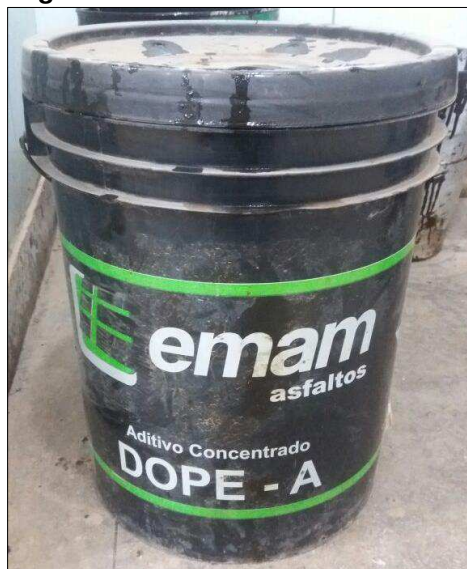
O CAP utilizado no estudo foi do tipo 50/70. Para esse material foram realizados os seguintes ensaios:

- Determinação do ponto de amolecimento;
- Determinação de penetração;
- Determinação da viscosidade Saybolt-Furol.

3.1.5 DOPE

O DOPE utilizado neste estudo foi o Aditivo Concentrado DOPE – A (Figura 10), produzido pela Emam Asfaltos.

Figura 10 - DOPE utilizado no estudo.



Fonte: O autor (2017).

3.2 Ensaaios Laboratoriais

Os ensaios realizados na caracterização dos materiais anteriormente citados foram realizados no laboratório de solos e pavimentação (LSP) da Universidade Estadual do Maranhão.

Os ensaios foram realizados pelo autor do trabalho com auxílio do técnico do laboratório.

Cada ensaio foi realizado com no mínimo duas amostras para a obtenção dos resultados a partir da média.

3.2.1 Ensaaios com Agregados

3.2.1.1 Análise Granulométrica

Segundo Chiossi (2013), o objetivo da granulometria é determinar as dimensões dos grãos e a porcentagem do peso total representada em vários intervalos de tamanho.

Bernucci et al. (2006) afirma que em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia em propriedades importantes como rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, entre outros.

Os ensaios de análise granulométrica foram feitos de acordo com o que é especificado na norma rodoviária DNER-ME 083/98. As peneiras utilizadas foram as de 1", 3/4", 3/8", 4, 10, 40, 80 e 200 da série de peneiras ASTM (Figura 11), buscando caracterizar o material para enquadramento em composição de mistura na faixa B, de acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES.

O peneiramento foi realizado de forma manual, e em seguida, o material retido em cada peneira foi pesado. O procedimento foi realizado para todos os agregados.

Somando-se a porcentagem retida na peneira com as porcentagens retidas nas peneiras de maior abertura, obtém-se a porcentagem acumulada de cada peneira. A porcentagem passante é obtida subtraindo de cem por cento a porcentagem acumulada.

Figura 11 - Sequência de peneiras utilizadas.



Fonte: O autor (2017).

3.2.1.2 Determinação da absorção e da massa específica real de agregado graúdo

Segundo Bernucci et al. (2006), a massa específica é determinada dividindo - se a massa seca pelo volume aparente do agregado que inclui o volume de agregado sólido mais o volume dos poros superficiais contendo água, ou seja, considera-se o material como um todo, sem descontar os vazios.

De acordo com Senço (2007), afirma que a absorção se refere a porção de água que pode preencher os vazios superficiais de um agregado.

Bernucci et al. (2006) afirma que um agregado poroso, além de água, irá também absorver ligante asfáltico, consumindo parte do ligante necessário para dar coesão a uma mistura asfáltica. Para compensar esse fato, deve-se incorporar à mistura asfáltica uma quantidade adicional de ligante.

Para a obtenção da absorção e densidade aparente do agregado graúdo, seguiu-se o que é especificado na norma rodoviária DNER-ME 081/98.

A amostra de três quilogramas (Figura 12a) foi lavada sobre a peneira 4,8 mm e seca em estufa à 105 °C durante vinte e quatro horas, depois foi resfriada ao ar por duas horas. Em seguida foi imersa em água durante vinte e quatro horas (Figura 12b).

Figura 12 - (a) Amostra utilizada; (b) Amostra imersa em água.



Fonte: O autor (2017).

Após o período de imersão a amostra foi colocada sobre um pano absorvente (Figura 13) até que as películas visíveis de água fossem eliminadas, em seguida pesou-se a amostra para determinação da massa na condição saturada superfície seca.

Figura 13 - Amostra sobre pano absorvente.



Fonte: O autor (2017).

Em seguida a amostra foi pesada hidrostáticamente (Figura 14) em um conjunto composto por uma balança, uma balde com água, uma cesta e uma haste metálica. A balança foi tarada com o balde com água e com a cesta vazia, para que mostre apenas o peso da amostra submersa.

Figura 14 - Pesagem hidrostática do agregado.



Fonte: O autor (2017).

Depois da pesagem hidrostática a amostra foi seca em estufa a 105°C e resfriada ao ar durante duas horas, em sequência foi pesada para obtenção da massa seca.

A densidade real é calculada pela equação 1:

$$Dr = \frac{M_s}{V} \quad (1)$$

A absorção é obtida pela equação 2:

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

- a = absorção do agregado, em porcentagem;
- Dr = densidade real, em g/cm³;
- M_h = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca, em g;
- M_s = massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em g;
- V = volume dos agregados, determinado pelo método da balança hidrostática em cm³.

3.2.1.3 Determinação da abrasão “Los Angeles”

Segundo Bernucci et al. (2006), durante o processo de tráfego, manuseio e execução de revestimentos asfálticos, os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão. Eles devem apresentar resistência a quebras, degradação e desintegração, em especial os localizados próximos ou na superfície do pavimento.

De acordo com Senço (2007), este é o ensaio mais aceito para determinar a resistência de agregados aos esforços oriundos das cargas do tráfego, por apresentar boa correlação entre as previsões baseadas nos ensaios e o comportamento dos agregados na pista.

O ensaio comumente utilizado para medir a resistência à abrasão é o ensaio de abrasão Los Angeles. Nesse ensaio uma amostra de agregado de cerca de 5.000g é submetida a 500 ou 1.000 revoluções no interior do cilindro de um equipamento padronizado. Um número variado de esferas de aço, conforme a granulometria da amostra, é adicionado no cilindro, induzindo impactos nas partículas durante as suas revoluções. O resultado é avaliado pela redução de massa dos agregados retidos na peneira de nº 12 (1,7mm) em relação à massa inicial da amostra especificada (BERNUCCI et al, 2006, p. 134).

O ensaio foi realizado de acordo a norma rodoviária DNER-ME 035/98. A amostra utilizada no ensaio se enquadrava na graduação B indicada na norma. Assim foi formada por cinco quilogramas de agregados retidos nas peneiras com abertura de 12,5 mm e 9,5 mm (Figura 15). A carga abrasiva foi de 11 esferas com massa determinada em norma.

Figura 15 - Amostra ensaiada.



Fonte: O autor (2017).

O material foi colocado dentro da máquina “Los Angeles” (Figura 16) juntamente com a carga abrasiva. Em seguida são realizadas 500 rotações a uma velocidade de aproximadamente 33 rpm. Em seguida o material foi retirado do tambor e separado das esferas.

Figura 16 - Máquina "Los Angeles" utilizada para realização do ensaio.



Fonte: O autor (2017).

Posteriormente o agregado foi lavado na peneira com abertura de 1,7 mm e seco em estufa a 105 °C durante três horas. O material foi retirado da estufa, e determinou-se a massa da amostra lavada e seca, depois de resfriado.

A abrasão “Los Angeles” do agregado é determinada pela equação 3:

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

Onde:

- A_n = abrasão “Los Angeles” da graduação n, com aproximação de 1%;
- n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhido no ensaio;
- m_n = massa total seca, colocada na máquina;
- m'_n = massa da amostra lavada e seca, após ensaio.

3.2.1.4 Índice de forma

A forma externa dos agregados é fator importante a definir suas propriedades e comportamento sob a ação do tráfego. Um grão cúbico ou esférico se comporta melhor em relação a um grão alongado ou chato (SENÇO, 2007).

“A forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade” (BERNUCCI et al., 2006, p. 141).

Neste estudo, o índice de forma das partículas foi determinado de acordo com a norma NBR 7809:2005.

A amostra foi preparada por peneiramento, de forma a dividi-la em frações. As frações passantes na peneira com abertura de malha de 9,5 mm e aquelas cujas porcentagens, em massa, retidas foram de 5% ou menos foram desprezadas.

Para a realização do ensaio são necessários 200 grãos de agregado, a quantidade de grãos referente a cada fração utilizada, é definido pela equação 4:

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (4)$$

Onde:

- 200: Número de grãos necessários para a realização do ensaio;
- N_i = Número de grãos a serem medidos na fração i ;
- F_i = Porcentagem de massa retida individual na fração i .

Com um paquímetro (Figura 17), foram medidos o comprimento e a espessura dos grãos do agregado. O comprimento é a maior dimensão possível de ser medida e a espessura é a menor distância possível.

Figura 17 - Medição das dimensões dos grãos de agregado.



Fonte: O autor (2017).

O índice de forma é calculado pela média da relação “c/e” de todos os grãos ensaiados, onde “c” é o comprimento do grão e “e” a espessura.

3.2.1.5 Adesividade a ligante betuminoso

Como já foi citado anteriormente os agregados graúdos utilizados neste estudo são de origem granítica, Bernucci et al. (2006) afirma que agregados silicosos, como o quartzito e alguns granitos, são exemplos de agregados que requerem atenção quanto à sua adesividade ao ligante asfáltico.

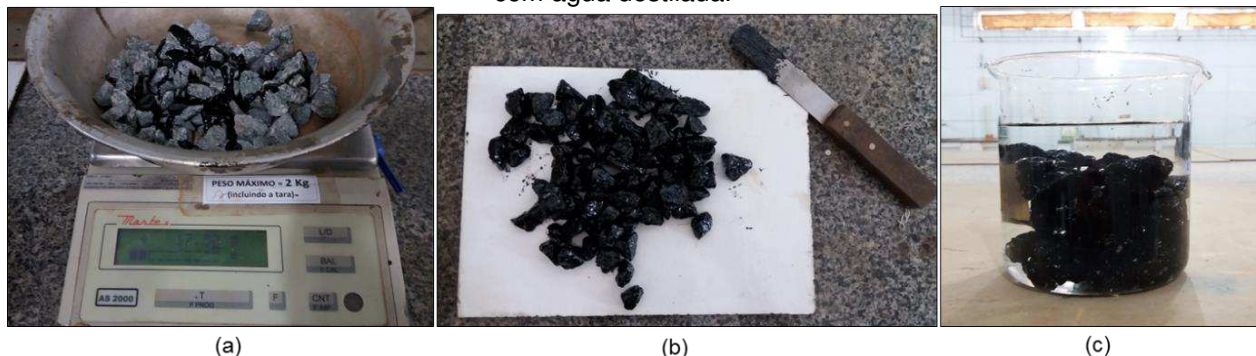
Um dos fatores que podem tornar o agregado inaceitável para uso em misturas asfálticas é o descolamento da película de ligante do agregado. Balbo (2007) atenta que os testes de adesividade procuram verificar o descolamento do filme asfáltico após o envolvimento e resfriamento dos agregados.

O ensaio de adesividade foi feito de acordo com a norma rodoviária DNER-ME 078/94.

O procedimento iniciou-se como a separação da amostra que foi de 500 gramas de material (Figura 18a) passante na peneira de 19 mm e retido na de 12,7 mm. Em seguida foi lavada, colocada dentro d’água destilada por 1 minuto e seca em estufa a 120°C durante 2 horas.

Posteriormente o ligante asfáltico foi aquecido a 120 °C e o agregado a 100 °C. Colocou-se 17,5 gramas de ligante sobre o agregado e com uma espátula procedeu-se o completo envolvimento do agregado com o ligante.

Figura 18 - (a) Preparação da mistura; (b) Agregado envolvido pelo ligante; (c) Material recoberto com água destilada.



Fonte: O autor (2017).

O material foi colocado sobre uma superfície lisa (Figura 18b) a fim de resfriá-lo e em seguida colocado em um Becker e totalmente recoberto com água destilada (Figura 18c). O Becker foi colocado em estufa a 40 °C durante 3 dias.

A análise do resultado é feita visualmente, onde é notada satisfatória quando não houver deslocamento da película betuminosa, ao fim dos 3 dias. Neste estudo, analisou-se o resultado ao fim de 3 dias e colocou-se o Becker novamente na estufa por mais 3 dias, com o objetivo de obter uma melhor análise do material.

A partir deste ensaio, foi notada a adesividade insatisfatória do material, surgindo assim a oportunidade do estudo desenvolvido, focado na utilização do aditivo DOPE na mistura.

Com o objetivo de se determinar o teor ótimo de aditivo a ser adicionado ao ligante, o ensaio foi realizado oito vezes. Duas vezes sem a utilização de aditivo melhorador de adesividade, duas vezes com 1,5% de DOPE sobre a massa total de ligante asfáltico, duas vezes com 1% de DOPE e duas vezes com 0,5% de DOPE.

3.2.1.6 Determinação do índice de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante - ID_{ML}

Assim como o de abrasão “Los Angeles”, este ensaio busca determinar a degradação mecânica e medir a alteração provocada no material.

O ensaio foi realizado com base na norma rodoviária DNER-ME 401/99.

Foram misturados quantidades equivalentes de brita 1, brita 0 e pó de brita, até que se tivesse uma mistura homogênea desses materiais. Então fez-se o

peneiramento desse material seguindo a sequência de peneiras mencionadas em norma e o material retido nas peneiras foi separado, nas quantidades indicadas pela norma, para confecção dos corpos de prova (Figura 19).

Figura 19 - Separação do material para confecção dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2017).

Os corpos de prova foram formados por aproximadamente 1200 gramas de agregado e 60 gramas de CAP. As temperaturas utilizadas no ensaio foram definidas a partir do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol, como determina a norma.

A mistura foi colocada no molde e acomodada com 15 golpes de espátula ao redor e 10 no centro da massa. Em seguida, foi golpeada, para compactação, 50 vezes em cada face (Figura 20). Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados.

Figura 20 - Compactador Marshall Elétrico utilizado na compactação dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2017).

Após o desmolde, nos corpos de prova com ligante, o CAP foi extraído no equipamento “Rotarex” com a utilização de gasolina.

O índice de degradação após compactação Marshall é definido peneirando-se a mistura de agregados resultantes do ensaio, basicamente o resultado corresponde a diferença média da granulometria após compactação e a granulometria original.

O índice de degradação é obtido pela equação 5.

$$ID = \frac{\sum D}{6} \quad (5)$$

Onde:

- ID = índice de degradação;
- D = diferença entre a média da granulometria após compactação e a granulometria original.

O ensaio foi realizado com 4 corpos de prova, 2 com ligante e 2 utilizando 1% de DOPE adicionado ao ligante.

3.2.1.7 Equivalente de Areia

“Equivalente de areia é a relação entre a altura do nível superior da areia e o nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo numa proveta de dimensões especificadas e nas condições estabelecidas no ensaio” (SENÇO, 2007, p.91).

Ainda de acordo com Senço (2007), o ensaio de equivalente de areia procura determinar a pureza de um solo em relação à porcentagem de argila que ele contém.

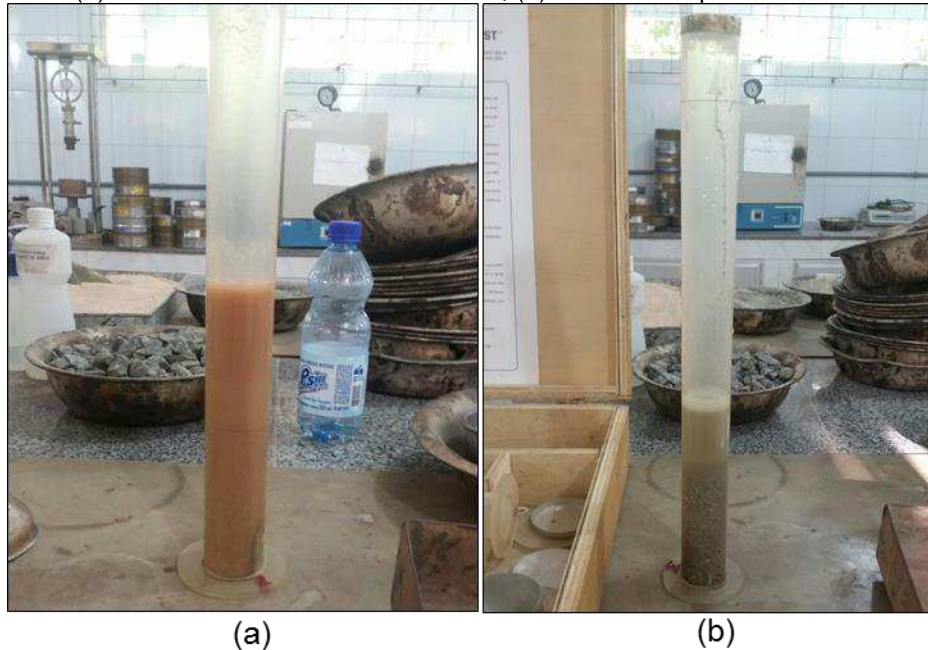
O ensaio foi realizado com base na norma rodoviária DNER-ME 054/98, onde a amostra utilizada no ensaio deve passar na peneira nº 4 (abertura de 4,8 mm).

Primeiramente, sifona-se a solução de trabalho para a proveta, até o traço de referência a 10 centímetros da base. Em seguida, coloca-se na proveta, com auxílio de um funil, a quantidade de amostra necessária para encher a cápsula medida. Bate-se várias vezes no fundo da proveta firmemente com a mão a fim de deslocar as bolhas de ar e ajudar a molhar a amostra. Deixa-se a amostra descansar por 10 minutos.

Após os 10 minutos, tapa-se a proveta com a rolha própria e agita-se a mesma em um movimento alternado, segurando-a horizontalmente. Posteriormente retira-se a rolha, coloca-se a proveta em cima do balcão e lava-se as paredes da proveta com um tubo lavador, até que o líquido esteja no traço de referência superior da proveta (Figura 21). Deixa-se a amostra descansar por 20 minutos.

Após os 20 minutos, mede-se, a partir da base da proveta, o nível superior da argila em suspensão. Em seguida, introduz-se o pistão na proveta até assentar completamente a areia. Gira-se a hasta, sem empurrá-la pra baixo, até que um dos parafusos de ajustagem se torne visível, mede-se, então, a altura da camada de areia sedimentada.

Figura 21 – (a) Amostra de areia durante ensaio; (b) Amostra de pó de brita durante ensaio.



Fonte: O autor (2017).

Calcula-se o equivalente de areia pela equação 6:

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \times 100 \quad (6)$$

3.2.1.8 Agregado miúdo – determinação da densidade real

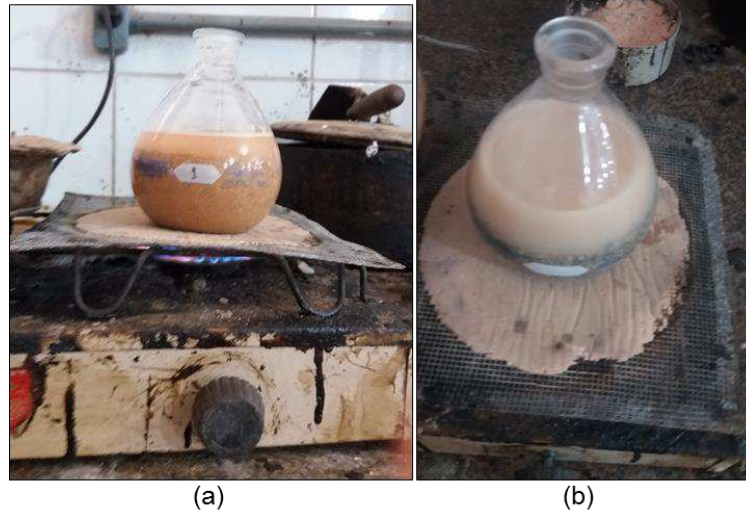
Segundo Senço (2007), a massa específica dos grãos deve ser entendida como a massa por unidade de volume apenas da parte sólida, excluindo-se todos os vazios.

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma rodoviária DNER-ME 084/95. Bernucci et al. (2006) atenta que pelo método DNER a possível absorção das partículas não é determinada, pois a condição de superfície saturada seca não é fácil de ser observada visualmente como no agregado graúdo.

A amostra utilizada no ensaio foi 500 gramas de material passante na peneira de 4,8 mm e retida na de 0,075 mm. Em seguida pesa-se o picnômetro vazio e com a amostra.

A seguir, foi colocada água destilada no recipiente até o cobrimento da amostra. O picnômetro com o conteúdo é aquecido (Figura 22) até a fervura por 15 minutos e em seguida esfriado em banho d'água.

Figura 22 - (a) amostra de areia sendo aquecida; (b) amostra de pó de brita sendo aquecida.



Fonte: O autor (2017).

Completo-se o volume vazio restante no picnômetro com água destilada até seu traço de referência e o mesmo foi pesado.

Por fim, todo o material foi retirado do picnômetro e em seu lugar adicionou-se água destilada até o traço de referência e pesou-se novamente.

Este ensaio foi realizado duas vezes com amostra de areia e duas vezes com amostra de pó de brita.

A densidade do agregado miúdo é definida pela equação 7:

$$D_{25} = \frac{b - a}{(d - a) - (c - b)} \quad (7)$$

Onde:

- D_{25} = densidade real do agregado miúdo, a 25/25 °C;
- a = massa do picnômetro vazio e seco, em gramas;
- b = massa do picnômetro mais amostra, em grams;
- c = massa do picnômetro mais amostra mais água, em gramas;
- d = massa do picnômetro cheio de água, em gramas.

3.2.1.9 Angularidade de agregado miúdo

A angularidade do agregado miúdo garante o atrito entre as partículas, o que assegura a resistência à deformação permanente. É definida como a percentagem de vazios de ar presentes em agregados em uma condição de estado solto (BERNUCCI et al., 2006).

O ensaio foi realizado como descreve Ericeira (2017), com base no método A da norma ASTM C 1252/03.

Primeiramente pesou-se o cilindro com a placa de vidro. Em seguida, o cilindro é cheio com água destilada e coberto com a placa de vidro, este conjunto é pesado para a determinação do volume do cilindro.

A amostra do ensaio é composta por frações de agregados miúdos retidas nas peneiras indicadas na norma, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Frações de agregado utilizado durante o ensaio de angularidade.

Fração individual	Massa (g)
Nº8 - Nº16	44
Nº16 - Nº30	57
Nº30 - Nº50	72
Nº50 - Nº100	17

Fonte: Ericeira (2017), com base em ASTM C 1252/03.

As frações devem ser misturadas para o ensaio. O cilindro é centralizado no equipamento, o funil é posicionado no suporte e tapado com a placa de auxílio do equipamento.

O ensaio consiste em colocar a amostra do agregado no funil e desbloquear a passagem, permitindo que o material caia no recipiente cilíndrico. O excesso de material é retirado com a placa, de forma a rasar o recipiente (figura 24). São dadas pequenas batidas no cilindro para a compactação do material, de forma a evitar perda de material durante o manuseio.

Figura 24 - Ensaio de angularidade em execução.



Fonte: O autor (2017).

Em seguida, o cilindro é limpo externamente e pesado.

O ensaio foi realizado para amostras de areia e de pó de brita, sendo feitos três vezes para cada tipo de amostra.

O resultado do ensaio é definido pela equação 8:

$$U(\%) = \frac{V - (W - c)/D_r}{V} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

- U = Angularidade do agregado miúdo, em porcentagem;
- V = Volume do cilindro, em centímetros cúbicos;
- W = Massa do cilindro mais amostra, em gramas;
- c = Peso do cilindro, em gramas;
- Dr = Densidade real do material ensaiado, em gramas por centímetros cúbicos.

3.2.1.10 Determinação da massa específica real do fíler

A massa específica do fíler foi determinada segundo a norma rodoviária DNER-ME 085/94.

Primeiramente, colocou-se querosene no frasco Le Chatelier em quantidade tal que o nível superior ficasse entre as graduações 0 e 1 ml. Em seguida, adicionou-se 60 gramas de fíler ao frasco (Figura 25).

Posteriormente, colocou-se o frasco em uma posição inclinada e foram realizados, suavemente, movimentos giratórios, a fim de expulsar o ar contido no material.

A seguir, se fez a leitura final marcada no frasco. A diferença entre as leituras inicial e final representa o volume do líquido deslocado pelo material ensaiado.

Figura 25 - Frasco Le Chatelier com amostra durante ensaio.



Fonte: O autor (2017).

A massa específica real é calculada pela equação 9:

$$\mu = \frac{\text{massa do material}}{\text{volume do líquido deslocado}} \quad (9)$$

Onde:

- μ = Massa específica real.

3.2.2 Ensaio com Cimento Asfáltico de Petróleo

3.2.2.1 Determinação do ponto de amolecimento (método anel e bola)

“O ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento” (BERNUCCI et al., 2006, p.48).

De acordo com Senço (2007), o objetivo do ensaio é determinar a temperatura em que os asfaltos se tornam fluidos.

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento especificado na norma DNIT 131/2010.

Iniciou-se com o aquecimento do ligante até que se tornasse suficientemente fluido, em seguida colocou-se o material dentro de dois anéis metálicos, com cuidado pois a superfície do ligante deve ficar um pouco acima da altura das bordas do anel. Após o resfriamento, utilizou-se uma espátula quente para alisar a superfície, deixando na mesma altura das bordas do anel.

Posteriormente, os anéis foram colocados no suporte metálico, em seguida as guias das esferas foram postas sobre os anéis e finalmente as esferas foram colocadas no centro dos anéis.

Todo esse conjunto foi então posto dentro de um béquer com água e aquecido até que as esferas metálicas atingissem a placa inferior do suporte metálico (Figura 26).

Figura 26 - Ensaio de ponto de amolecimento em execução.



Fonte: O autor (2017).

O resultado do ensaio é dado pela média das temperaturas que cada esfera atingiu a placa inferior do suporte metálico.

3.2.2.2 Determinação da penetração

Segundo Bernucci et al. (2007), a penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25°C. A consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha.

Senço (2007), afirma que este ensaio tem por objetivo determinar ou controlar a consistência do material betuminoso.

Como lembra Balbo (2007), o ensaio de penetração é utilizado para fins classificatórios dos CAPs. No Brasil, por exemplo, os cimentos asfálticos de petróleo são classificados em 30/45, 50/70, 85/100 e 150/200, a partir da consistência definida a partir do ensaio de penetração.

Para a realização do ensaio, tomou-se como base a norma DNIT 155/2010.

Primeiramente aqueceu-se o ligante até torná-lo liquefeito e então colocou-se o material dentro do recipiente metálico. O recipiente foi deixado em repouso para resfriamento durante 90 minutos, passado esse tempo a amostra foi colocada em banho-maria a uma temperatura de 25°C por mais 90 minutos.

Em seguida a amostra foi colocada sob a agulha do penetrômetro de modo que a ponta apenas toca-se a superfície da amostra, depois liberou-se o peso de 100 gramas pelo período de 5 segundos e então anotou-se a variação marcada no leitor do penetrômetro (Figura 27). O procedimento foi feito três vezes, buscando sempre posicionar a agulha em pontos distantes entre si e da borda em pelo menos 1 centímetro.

Figura 27 - Ensaio de penetração em execução.



Fonte: O autor (2017).

Este ensaio foi realizado três vezes. Para encontrar o resultado do ensaio foi feita uma média para os valores encontrados para as três amostras.

3.2.2.3 Determinação da viscosidade Saybolt-Furol

Segundo Bernucci et al. (2006), a viscosidade do ligante asfáltico é essencial na determinação da consistência adequada que ele deve apresentar quando da mistura com os agregados e quando de sua aplicação no campo. Para isso é necessário se obter, para cada ligante asfáltico, uma curva de viscosidade com a temperatura que permita escolher a faixa de temperatura adequada para as diversas utilizações.

De acordo com Senço (2007), o objetivo principal desse ensaio é determinar o estado de fluidez dos asfaltos nas temperaturas em que usualmente são trabalhados nos diversos serviços.

Para a realização do ensaio, tomou-se como base a norma rodoviária DNER 001/04.

Foram inicialmente determinadas três temperaturas 135°C, 149°C e 177°C. Aqueceu-se as amostras 10°C acima de cada temperatura e então despejou-se o material dentro da abertura do aparelho (Figura 28a), em seguida abriu-se o orifício na parte inferior do aparelho e cronometrou-se o tempo, em segundos, para que um

frasco de 60 ml fosse preenchido (Figura 28b). O tempo, em segundos, de enchimento do frasco é chamado de Segundo Saybolt-Furol (SSF).

Figura 28 - (a) Viscosímetro Saybolt-Furol; (b) Frasco sendo preenchido com ligante durante ensaio.



Fonte: O autor (2017).

As temperaturas foram escolhidos de modo a serem utilizadas na determinação do gráfico que relaciona a viscosidade com a temperatura, usado para saber as temperaturas em que os agregados e o ligante serão utilizados para a confecção de corpos de prova para a caracterização da mistura asfáltica pelo método Marshall.

3.2.3 Ensaios com as misturas asfálticas

3.2.3.1 Dosagem Marshall

A dosagem de uma mistura asfáltica é um processo que tem como objetivo final formar um material que ofereça condições mecânicas adequadas para suportar cargas que solicitam um dado pavimento. O método Marshall consiste na aferição de algumas propriedades de misturas, fixando-se a sua distribuição granulométrica e variando-se o teor de betume nos corpos de prova (BALBO, 2007).

A dosagem Marshall foi utilizada na determinação do teor ótimo de ligante utilizado na confecção dos corpos de prova que seriam usados no decorrer do estudo.

Os procedimentos seguidos durante a execução do ensaio foram indicados pela norma rodoviária DNER-ME 043/95. A partir das informações fornecidas pelos ensaios com agregados, determinou-se as massas específicas reais e os enquadrar na faixa granulométrica de acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES.

A partir da escolha da faixa granulométrica, fez-se o cálculo das proporções em peso de cada agregado para os teores de ligante conforme com os limites da faixa escolhida. Os teores de CAP variaram de 5% a 7%, sendo que para cada um dos teores foram confeccionados 3 corpos de prova.

As temperaturas de agregados, ligante e de compactação utilizadas durante o ensaio foram 170 °C, 160 °C e 145 °C (Figura 29), respectivamente, determinadas a partir do ensaio de Saybolt–Furol.

Figura 29 - Termômetro medindo temperatura de compactação da mistura.



Fonte: O autor (2017).

Na realização da compactação, o ligante foi misturado aos agregados por um período de 2 a 3 minutos, em seguida a mistura foi colocada em um molde metálico de compactação, onde, com auxílio de um soquete, recebe 75 golpes em cada face. O desmolde (Figura 30) foi realizado 24 horas após a compactação.

Figura 30 - Desmolde de corpo de prova.



Fonte: O autor (2017).

Após o desmolde, foram medidas 4 alturas e 3 diâmetros (Figura 31), e pesou-se a seco e hidrostáticamente os corpos de prova. Em seguida, foram colocados em banho-maria a 60 °C durante 30 a 40 minutos (Figura 32). Após este período, por meio de uma prensa Marshall, determinou-se a estabilidade dos corpos de prova.

Figura 31 - Medição da altura do corpo de prova.



Fonte: O autor (2017).

Figura 32 - Corpos de prova no banho-maria a 60 °C.



Fonte: O autor (2017).

De acordo com Balbo (2007), estabilidade é a força vertical máxima aplicada que leva a amostra (comprimida lateralmente) à ruptura, medida em quilos.

Para a determinação da estabilidade Marshall, se faz necessário, primeiramente, definir o fator de correção em função da altura do corpo de prova, esse fator é definido pela equação 10:

$$f = 937,23 \times h^{-1,64} \quad (10)$$

Onde:

- f = fator;
- h = altura do corpo de prova, em mm;

A estabilidade é definida pela equação 11:

$$E = L \times f \times F \quad (11)$$

Onde:

- E = estabilidade Marshall, em Kgf;
- L = leitura da prensa Marshall;
- f = fator de correção em função da altura dos corpos de prova;
- F = fator de correção da prensa; o fator para a prensa utilizada no estudo é 1.

Alguns índices físicos da amostra compactada são empregados na dosagem Marshall, são eles: densidade aparente do corpo de prova, porcentagem de vazios, e a relação betume-vazios.

O cálculo destes índices é feito a partir das seguintes expressões:

a) Densidade máxima teórica:

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%cap}{\delta_{real, cap}} + \frac{\%b1}{\delta_{real, b1}} + \frac{\%b0}{\delta_{real, b0}} + \frac{\%pó}{\delta_{real, pó}} + \frac{\%f}{\delta_{real, f}}} \quad (12)$$

Onde:

- DMT = densidade máxima teórica da mistura compactada, adimensional;
- %cap, %b1, %b0, %pó, %f = porcentagem de CAP, brita 1, brita 0, pó de brita, e fíler em relação a massa total do corpo de prova;
- $\delta_{real, cap}$; $\delta_{real, b1}$; $\delta_{real, b0}$; $\delta_{real, pó}$; $\delta_{real, f}$ = massa específica real do cap, brita 1, brita 0, pó de brita e fíler, em g/cm³.

b) Massa específica aparente da mistura

$$\gamma_{ap} = \frac{M_t}{V_t} \quad (13)$$

Onde:

- γ_{ap} = Densidade aparente da mistura compactada, em g/cm³;
- M_t = Massa do corpo de prova, em gramas;
- V_t = Volume total do corpo de prova, determinado pelo método da balança hidrostática, em cm³.

c) Volume de vazios:

$$V_v = \frac{DMT - \gamma_{ap}}{DMT} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

- V_v = Volume de vazios, em porcentagem;
- DMT = Densidade máxima teórica, adimensional;
- γ_{ap} = Densidade aparente, em g/cm³.

d) Vazios com betume:

$$VCB = \frac{\gamma_{ap} \times \%cap}{\delta_{real, cap}} \quad (15)$$

Onde:

- VCB = volume com betume, em porcentagem;
- γ_{ap} = massa específica aparente do corpo de prova, em g/cm³;
- %cap = porcentagem de CAP à massa total do corpo de prova;
- $\delta_{real, cap}$ = massa específica real do cap, em g/cm³.

e) Vazios do agregado mineral:

$$VAM = V_v + VCB \quad (16)$$

Onde:

- VAM = vazios do agregado mineral, em porcentagem;
- V_v = volume de vazios, em porcentagem;
- VCB = volume com betume, em porcentagem.

f) Relação betume/vazio:

$$RBV = \left(\frac{VAM - V_v}{VAM} \right) \times 100 \quad (17)$$

Onde:

- RBV = relação betume/vazio, em porcentagem;
- VAM = vazios do agregado mineral, em porcentagem;
- V_v = volume de vazios, em porcentagem.

3.2.3.2 Resistência a tração por compressão diametral

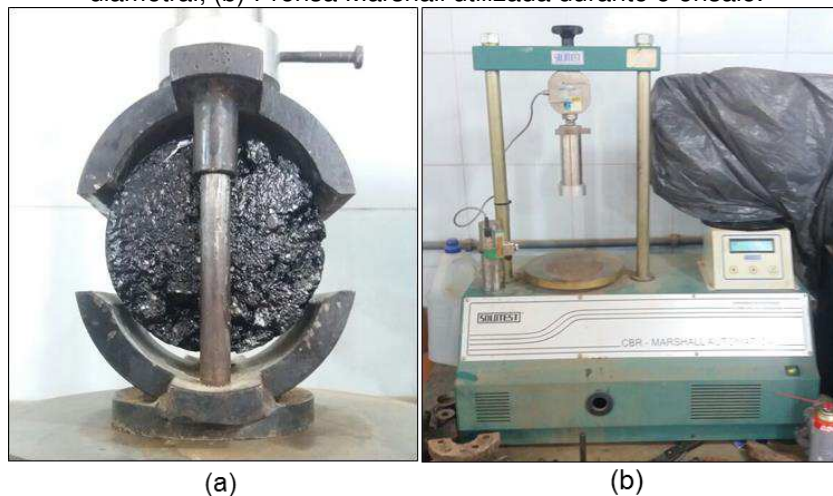
A resistência a tração por compressão diametral foi definida de acordo com os procedimentos descritos na norma DNIT 136/2010 - ME.

Os corpos de prova foram confeccionados da mesma forma que os utilizados na dosagem Marshall, foram feitos 6 corpos de prova, sendo 3 com adição de DOPE ao ligante e 3 com CAP 50/70. Foram medidas, também, seguindo o mesmo

procedimento, 4 alturas e 3 diâmetros paralelos dos corpos de prova, onde os valores da altura e diâmetro são a média desses valores, respectivamente

Os corpos de prova foram deixados em repouso a uma temperatura de 25 °C durante 2 horas, e em seguida foram encaixados em um molde metálico com frisos (Figura 33a), e colocados na prensa Marshall (Figura 33b), para ser determinada a carga de ruptura.

Figura 33 - (a) Corpo de prova no molde para ensaio de resistência à tração por compressão diametral; (b) Prensa Marshall utilizada durante o ensaio.



Fonte: O autor (2017).

A resistência a tração por compressão diametral é definida pela equação 18:

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (18)$$

Onde:

- σ_R = resistência à tração, em Mpa;
- F = carga de ruptura, N;
- D = diâmetro do corpo de prova, em cm;
- H = altura do corpo de prova, em cm.

3.2.3.3 Ensaio Cântabro

De acordo com Santana (1993, apud Bernucci et al., 2008), o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento

é denominado desgaste. O ensaio usualmente realizado para determinação de resistência à desagregação é o ensaio Cântabro

O ensaio foi realizado a partir da metodologia descrita na norma rodoviária DNER-ME 383/99.

Os corpos de prova foram confeccionados da mesma forma que os utilizados na dosagem Marshall, onde foram feitos 6 corpos de prova, sendo 3 com adição de DOPE ao ligante e 3 apenas com CAP 50/70.

Os corpos de prova são pesados e colocados no tambor da Máquina Los Angeles, semelhante ao utilizado no ensaio de determinação da abrasão “Los Angeles” de agregado graúdo. O tambor é fechado e são realizadas 300 revoluções do tambor, a uma velocidade de 30 a 33 rpm (Figura 34). Em seguida o corpo de prova é pesado novamente.

Figura 34 - (a) Corpo de prova, antes do ensaio Cântabro; (b) Corpo de prova, após ensaio Cântabro.



Fonte: O autor (2017).

O desgaste da mistura betuminosa é determinado pela equação 19:

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100 \quad (19)$$

Onde:

- A = desgaste da mistura betuminosa, com aproximação de 1%, em porcentagem;
- P = peso do corpo de prova, antes do ensaio;
- P' = peso do corpo de prova, depois do ensaio.

3.2.3.4 Ensaio de dano por umidade induzida

De acordo com Bernucci et al. (2006), a avaliação do dano nas misturas asfálticas causado pela umidade é de grande importância, uma vez que afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. O dano por umidade evidencia os possíveis problemas de adesividade agregado-ligante asfáltico.

Para a execução do ensaio, foram moldados 12 corpos de prova, em 6 adicionou-se DOPE ao ligante e nos outros não houve adição.

Durante a execução dos corpos de prova, diminuiu-se os golpes de compactação a fim de aumentar o volume de vazios, que, segundo a norma NBR 15617, deve ser de $7 \pm 1\%$.

Inicia-se o ensaio com o cálculo da porcentagem de vazios com ar de cada um dos doze corpos de prova confeccionados, como foi feito após dosagem Marshall, verificando se essa porcentagem está no intervalo de $7\% \pm 1\%$. Em seguida, determinou-se a massa seca ao ar, mediu-se 4 alturas e 4 diâmetros dos corpos de prova.

Para 3 corpos de prova de cada mistura, calculou-se o volume de vazios de ar, em centímetros cúbicos, definido pela equação 20.

$$V_a = \frac{V_{ar} \times V}{100} \quad (20)$$

Onde:

- V_a = volume de vazios com ar, expresso em centímetros cúbicos, em cm^3 ;
- V_{ar} = volume de vazios com ar, em porcentagem;
- V = volume do corpo de prova, em cm^3 .

Os mesmos 3 corpos de prova foram submergidos dentro de um recipiente com água destilada e aplicou-se uma pressão a vácuo (Figura 35) durante 10 minutos. Interrompeu-se a aplicação de vácuo, deixando o corpo de prova dentro do recipiente com água por mais 10 minutos. Em seguida, os corpos de prova foram retirados da água e determinou-se a massa dos mesmos após condicionamento.

Figura 35 - Bomba de vácuo utilizada durante o ensaio.



Fonte: O autor (2017).

Por conseguinte, foi calculado o volume de água absorvido e o grau de saturação para cada corpo de prova. O volume de água absorvido é encontrado através da equação 21.

$$J = \frac{B - A}{0,99707} \quad (21)$$

Onde:

- J = volume de água absorvido, em cm³;
- B = massa do corpo de prova, após aplicação de vácuo, em gramas;
- A = massa do corpo de prova, seco ao ar, em gramas;
- 0,99707 = massa específica da água a 25°C, em g/cm³.

O grau de saturação é calculado pela equação 22.

$$S = \frac{100 J}{V_a} \quad (22)$$

Onde:

- S = grau de saturação, em %.

Após a saturação, o corpo de prova foi embalado em filme plástico (Figura 36a) e colocado dentro de um saco plástico impermeável com 10 ml de água (Figura 36b). O saco plástico foi lacrado, para não permitir entrada ou saída de água. O saco plástico, contendo o corpo de prova e a água, foi levado a um freezer a uma temperatura de $-18,0 \pm 3,0$ °C, por um tempo de 16 horas.

Figura 36 – (a) Corpo de prova embalado em filme plástico; (b) Corpo de prova embalado por um filme plástico dentro de um saco plástico impermeável com 10 ml de água destilada.



Fonte: O autor (2017).

Decorrido o período de resfriamento, o conjunto foi levado para um banho de água a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. O saco plástico e o filme plástico foram removidos, para liberação do corpo de prova ainda dentro do banho, assim que possível sua retirada sem danificar o corpo de prova, então, o corpo de prova foi mantido no banho por 24 horas.

Após 24 horas, o corpo de prova foi retirado do banho a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e levado imediatamente à submersão em um banho de água a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 2 horas. Após o condicionamento determinou-se a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova. Os outros corpos de prova (sem condicionamento) também foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

O dano por umidade induzida é definido como a razão entre a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova condicionados e não condicionados, denominada razão de resistência a tração retida na mistura asfáltica, que é definida pela equação 23:

$$\text{RRT} = \frac{\text{RT}_c}{\text{RT}} \times 100\% \quad (23)$$

Onde:

- RRT = razão de resistência a tração;
- RT_c = resistência à tração por compressão diametral do primeiro conjunto, que sofreu condicionamento;

- RT = resistência à tração por compressão diametral do segundo conjunto, que não sofreu condicionamento.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados durante o estudo para que sejam possíveis as conclusões a respeito do tema proposto.

4.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica dos agregados graúdos, miúdos e fíler estão detalhadas nas Tabelas 1, 2 e 3 respectivamente. No Gráfico 1 apresenta-se a curva granulométrica dos agregados.

Tabela 1 - Granulometria dos agregados graúdos.

Peneira	Ø Abertura (mm)	Brita 1		Brita 0	
		% Acumulada	% Passante	% Acumulada	% Passante
3/4"	19,00	2,16%	97,84%	1,04%	98,96%
3/8"	9,50	97,09%	2,91%	19,06%	80,94%
4	4,75	99,97%	0,03%	89,67%	10,33%
10	2,00	100,00%	0,00%	98,39%	1,61%
40	0,425	100,00%	0,00%	98,99%	1,01%
80	0,180	100,00%	0,00%	99,43%	0,57%
200	0,075	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
FUNDO	0,00	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%

Fonte: O autor (2017).

Tabela 2 - Granulometria dos agregados miúdos.

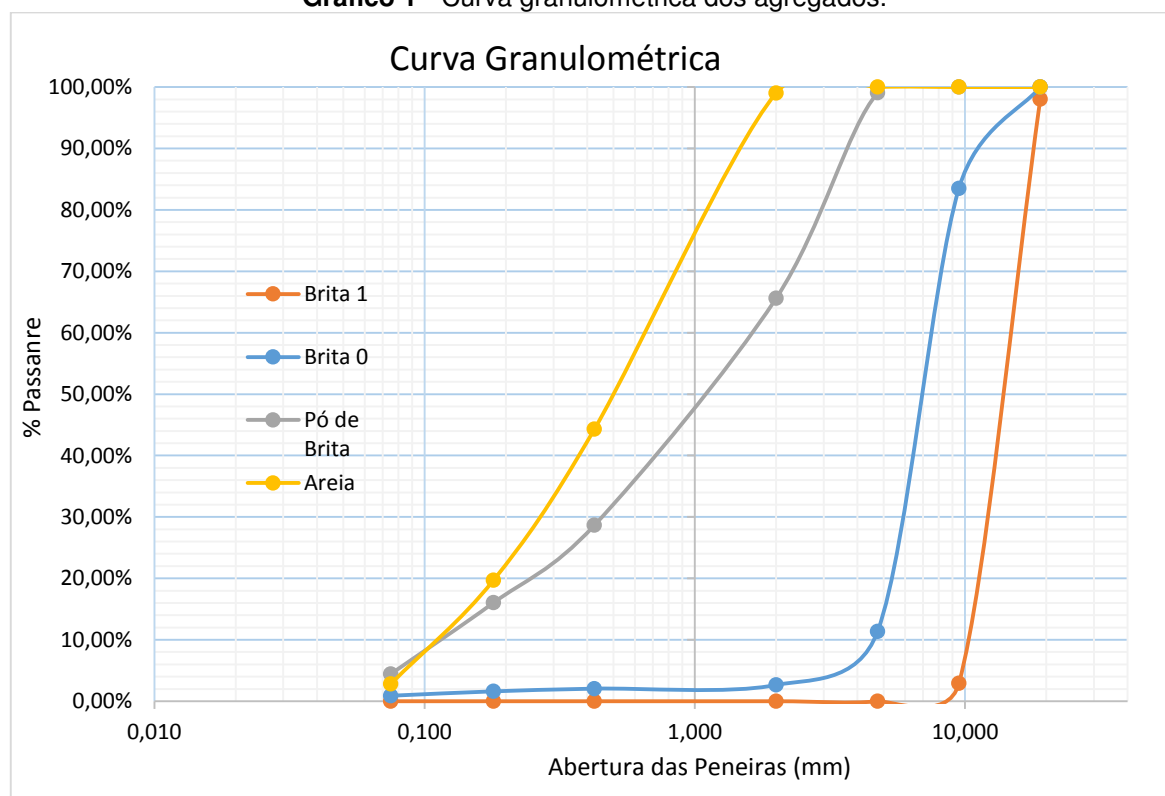
Peneira	Ø Abertura (mm)	Pó de Brita		Areia	
		% Acumulada	% Passante	% Acumulada	% Passante
3/4"	19,00	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3/8"	9,50	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%
4	4,75	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%
10	2,00	0,95%	99,05%	0,97%	99,03%
40	0,425	34,41%	65,59%	55,72%	44,28%
80	0,180	71,36%	28,64%	80,29%	19,71%
200	0,075	83,96%	16,04%	97,18%	2,82%
FUNDO	0,00	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%

Fonte: O autor (2017).

Tabela 3 - Granulometria do fíler.

Peneira	Ø Abertura (mm)	Fíler		
		% Retida	% Acumulada	% Passante
3/4"	19,00	0,00%	0,00%	100,00%
3/8"	9,50	0,00%	0,00%	100,00%
4	4,75	0,00%	0,00%	100,00%
10	2,00	0,00%	0,00%	100,00%
40	0,425	0,00%	0,00%	100,00%
80	0,180	0,00%	0,00%	100,00%
200	0,075	14,85%	14,85%	85,15%
FUNDO	0,00	85,15%	100,00%	0,00%

Fonte: O autor (2017).

Gráfico 1 - Curva granulométrica dos agregados.

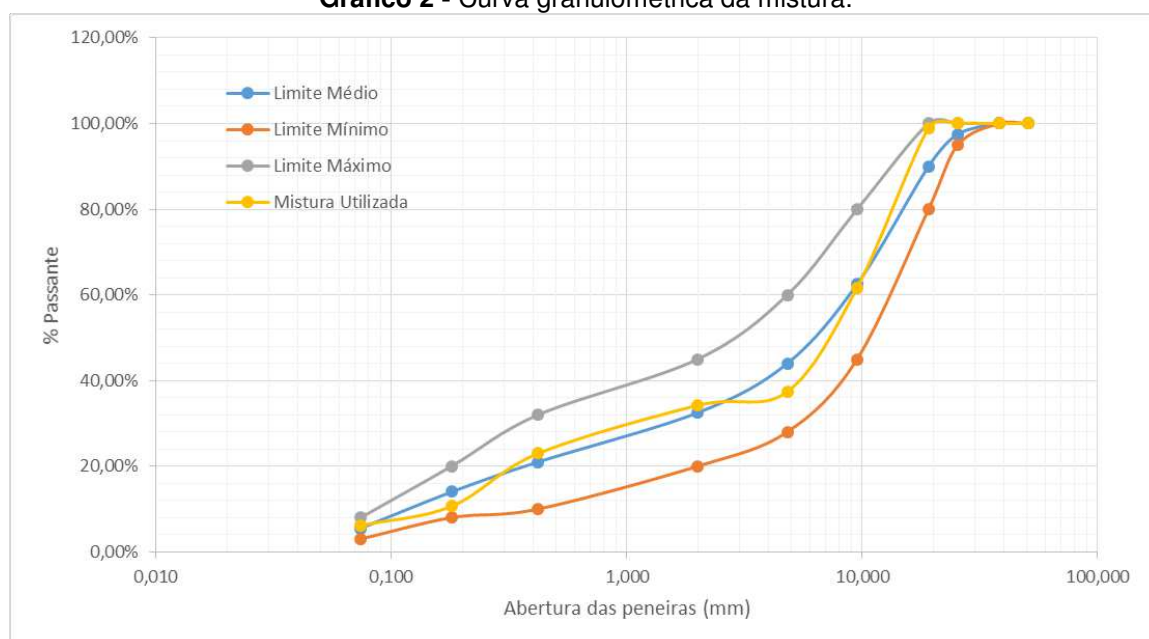
Fonte: O autor (2017).

O enquadramento granulométrico foi realizado para definir a porcentagem de cada material na mistura. A composição da mistura foi executada conforme os limites previstos na norma DNIT 031/2006 – ES para a faixa B. O traço utilizado e a curva granulométrica da mistura, são apresentados a seguir na Tabela 4 e Gráfico 2, respectivamente.

Tabela 4 - Enquadramento granulométrico da mistura utilizada.

#	Abertura (mm)	% que passa								
		B1	B0	Pó de Brita	Areia	Filer	Mín	Máx	Ideal	Mistura
2"	50,800	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1 1/2"	38,100	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25,400	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	95,00%	100,00%	97,50%	100,00%
3/4"	19,100	97,84%	98,96%	100,00%	100,00%	100,00%	80,00%	100,00%	90,00%	98,94%
3/8"	9,500	2,91%	80,94%	100,00%	100,00%	100,00%	45,00%	80,00%	62,50%	61,67%
Nº 4	4,800	0,03%	10,33%	100,00%	100,00%	100,00%	28,00%	60,00%	44,00%	37,42%
Nº 10	2,000	0,00%	1,61%	99,05%	99,03%	100,00%	20,00%	45,00%	32,50%	34,22%
Nº 40	0,420	0,00%	1,01%	65,59%	44,28%	100,00%	10,00%	32,00%	21,00%	22,98%
Nº 80	0,180	0,00%	0,57%	28,64%	19,71%	100,00%	8,00%	20,00%	14,00%	10,64%
Nº 200	0,074	0,00%	0,00%	16,04%	2,82%	85,15%	3,00%	8,00%	5,50%	6,14%
Porcentagem de Agregados na Mistura		33,00%	33,00%	33,00%	0,00%	1,00%				

Fonte: O autor (2017).

Gráfico 2 - Curva granulométrica da mistura.

Fonte: O autor (2017).

4.2 Absorção e densidade

A partir da média dos resultados dos ensaios de determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo, ensaio de determinação da densidade de agregado miúdo e ensaio de determinação da massa específica do fíler, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de densidade e absorção dos agregados.

Material	Propriedade	Método	Resultado
Agregado Graúdo	Absorção	DNER-ME 081/98	0,31%
	Densidade Real	DNER-ME 081/98	2,797 g/cm ³
Pó de Brita	Absorção	-	-
	Densidade Real	DNER-ME 084/95	2,711 g/cm ³
Areia	Absorção	-	-
	Densidade Real	DNER-ME 084/95	2,588 g/cm ³
Fíler	Absorção	-	-
	Densidade Real	DNER-ME 085/94	2,993 g/cm ³

Fonte: O autor (2017).

Os cálculos dos resultados presentes na tabela 5 estão detalhados no apêndice A.

4.3 Abrasão “Los Angeles”

O resultado obtido pelo ensaio de abrasão “Los Angeles” está expresso na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultado de resistência a abrasão.

Material	Graduação	Peso antes do ensaio (g)	Peso após o ensaio (g)	Resistência a abrasão
Brita granítica	B	4994,2	4443,0	11,04%

Fonte: O autor (2017).

De acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES, o desgaste Los Angeles deve ser igual ou inferior a 50%. Assim, concluímos que o agregado utilizado no estudo satisfaz a exigência da norma.

4.4 Índice de forma

A partir do ensaio de índice de forma, a relação entre comprimento e espessura foi de 2,18. De acordo com a norma NBR 7211:2005, o índice de forma, quando calculado pela norma NBR 7809:2006, não deve ser superior a 3. Assim, concluímos que o agregado graúdo utilizado está dentro dos padrões da norma. Agregados graúdos que possuem como característica a forma cúbica são preferíveis, quando comparados aos de forma lamelar, para utilização na pavimentação.

No apêndice B, estão expostas as dimensões dos grãos de agregado utilizados durante este ensaio.

4.5 Equivalente de areia

Os resultados obtidos para equivalente de areia, obtidos a partir das médias aritméticas simples dos valores de cada ensaio, para pó de brita e areia estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de equivalente de areia.

Material	Amostra	Leitura do topo da areia (cm)	Leitura do topo da argila (cm)	Equivalente de areia (%)	Média (%)
Pó de brita	1	9,5	15,65	60,7	64,6
	2	10,05	15,05	66,78	
	3	9,45	14,25	66,32	
Areia	1	10	13,7	72,99	70,95
	2	10,1	14,4	70,14	
	3	9,9	14,2	69,72	

Fonte: O autor (2017).

A norma do DNIT 031/2006 estipula um valor mínimo de 55% para o equivalente de areia, com o objetivo que os materiais estejam livres de torrões de argila e de substâncias nocivas. Concluímos que tanto a areia quanto o pó de brita apresentaram bons resultados para o ensaio de equivalente de areia.

4.6 Angularidade

A partir dos resultados obtidos pelo ensaio de angularidade, foram conseguidos os valores presentes na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de angularidade.

Material	Amostra	Densidade real (g/cm ³)	FAA (%)	Média (%)
Areia	1	2,588	39,01	38,45
	2		37,81	
	3		38,54	
Pó de brita	1	2,711	44,44	45,63
	2		46,08	
	3		46,38	

Fonte: O autor (2017).

De acordo com a norma ASTM C 1252-03, o agregado miúdo, para ser considerado adequado para utilização, deve ter um FAA de no mínimo 40%. A partir dos resultados expostos na tabela 8, concluímos que apenas o pó de brita apresentou uma angularidade do agregado fino adequada. Por isso, o pó de brita foi o agregado miúdo utilizado na dosagem dos corpos de prova utilizados neste estudo.

4.7 Adesividade

De acordo com a norma rodoviária DNER-ME 078/94, o resultado do ensaio de adesividade é notado satisfatório quando não houver nenhum deslocamento da película betuminosa, ao fim de 72 horas, e não satisfatório quando houver total ou parcial deslocamento da película nesse mesmo tempo.

Após análise tátil visual da amostra concluiu-se que a adesividade para o agregado graúdo analisado foi insatisfatória (Figura 37), uma vez que ocorreu o desprendimento parcial da película de ligante.

Figura 37 – Amostras de agregado após ensaio de adesividade.



Fonte: O autor (2017).

Também foram realizados ensaios com a utilização de aditivo melhorador de adesividade DOPE, com as porcentagens de aditivo estabelecidas em 0,5%, 1% e 1,5%. Utilizando-se 0,5% de DOPE, o resultado foi insatisfatório (Figura 38), permanecendo com desprendimento parcial do ligante.

Figura 38 – Amostra de agregado, com 0,5% de DOPE adicionado ao ligante, após ensaio de adesividade.



Fonte: O autor (2017).

Os resultados das amostras contendo 1,5% (Figura 39) e 1% (Figura 40) de DOPE adicionado ao ligante foram satisfatórias, assim foi preferida a utilização da menor porcentagem como ter ótimo de aditivo ao ligante, sendo utilizada nos ensaios realizados com misturas contendo DOPE.

Figura 39 – Amostras, com 1,5% de DOPE adicionado ao ligante, após ensaio de adesividade.



Fonte: O autor (2017).

Figura 40 – Amostras, contendo 1% de DOPE adicionado ao ligante, após ensaio de adesividade.



Fonte: O autor (2017).

4.8 Índice de degradação de rochas após compactação marshall, com ligante

O resultado do ensaio IDML, que simula a degradação do agregado durante a mistura, transporte e compactação de misturas asfálticas, é mostrado nas tabelas 9 e 10. Na Tabela 9 está o resultado para o ensaio feito sem adição de DOPE ao ligante e na Tabela 10 está o resultado para o ensaio com adição de DOPE.

Tabela 9 – Cálculo do IDML para misturas sem adição de DOPE.

Peneiras	Granulometria original	% Passando nas peneiras			
		Granulometria após compactação			
		AM 1	AM 2	MÉDIA	D
19 mm	85%	92,07%	91,98%	92,02%	7,02%
9,5 mm	65%	64,85%	64,57%	64,71%	-0,29%
Nº 4	50%	50,66%	50,15%	50,41%	0,41%
Nº 10	35%	36,70%	35,92%	36,31%	1,31%
Nº 40	20%	22,08%	21,54%	21,81%	1,81%
Nº 200	5%	11,28%	10,76%	11,02%	6,02%
$\Sigma D =$					16,28%
$\Sigma D/6 = 2,71\%$					

Fonte: O autor (2017), com base na DNER–ME 401/99.

Tabela 10 – Cálculo do IDML para misturas com adição de DOPE.

Peneiras	% Passando nas peneiras				
	Granulometria original	Granulometria após compactação			
		AM 1	AM 2	MÉDIA	D
19 mm	85%	92,25%	92,09%	92,17%	7,17%
9,5 mm	65%	64,01%	64,43%	64,22%	-0,78%
Nº 4	50%	49,99%	50,10%	50,04%	0,04%
Nº 10	35%	35,48%	35,60%	35,54%	0,54%
Nº 40	20%	21,04%	20,80%	20,92%	0,92%
Nº 200	5%	10,51%	10,38%	10,45%	5,45%
$\Sigma D =$					13,34%
$\Sigma D/6 = 2,22\%$					

Fonte: O autor (2017), com base na DNER–ME 401/99.

De acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES, os valores de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante, para rochas destinadas ao uso do CAUQ devem ser inferiores a 5%. Assim, ambas as misturas apresentaram valores aceitáveis. A utilização de DOPE não alterou significativamente os resultados quando comparados aos obtidos sem aditivo. Os resultados deste ensaio e do ensaio de abrasão “Los Angeles” mostram que o agregado utilizado neste estudo apresenta resistência satisfatória às possíveis quebras, degradações, e desintegrações que podem ocorrer durante o processo de manuseio e execução de revestimentos asfálticos e, também, durante a ação do tráfego.

4.9 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

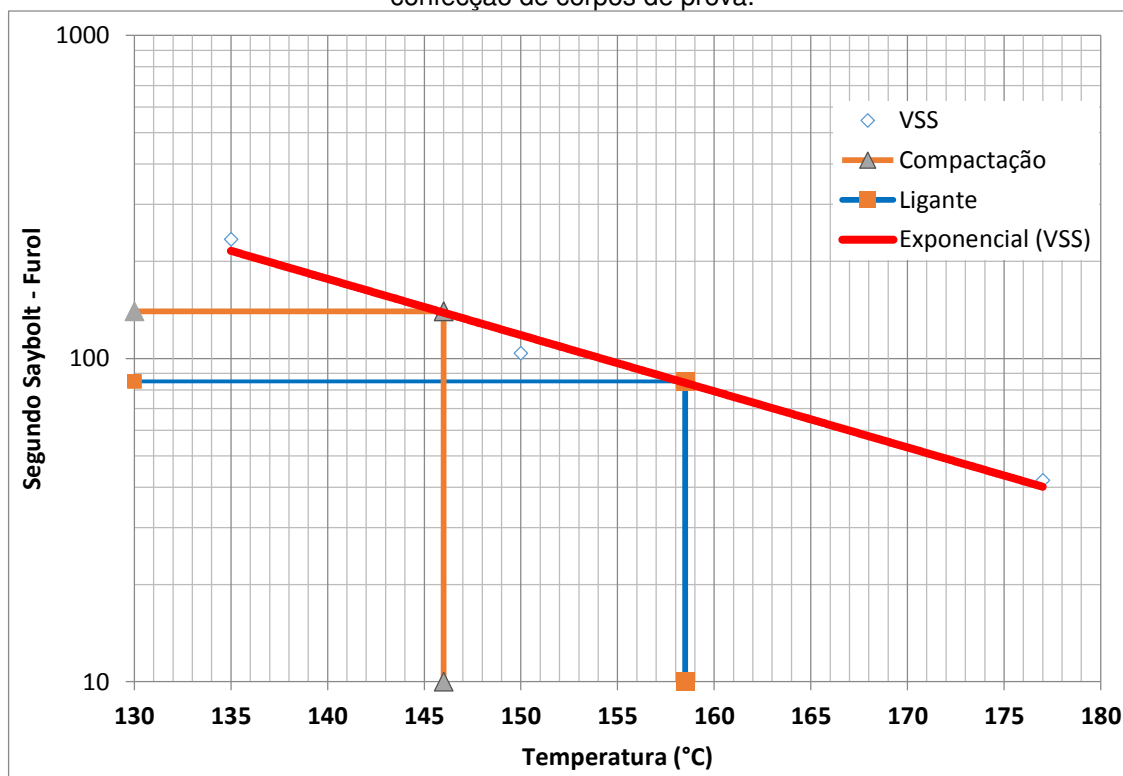
Os resultados obtidos para o CAP 50/70 utilizado no estudo estão detalhados na Tabela 11. Como parâmetro utilizou-se às exigências contidas na 19ª Resolução da Agência Nacional de Petróleo (ANP) – Especificação de Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP).

Tabela 11 – Resultados dos ensaios realizados com CAP.

Característica	Método	Unidade	Especificação ANP Nº 19 (CAP 50-70)	Resultados
Penetração (100g, 5s, 25 °C)	DNIT 155/2010	0,01 mm	50-70	53,75
Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010	°C	Mín. 46	53,62
	a 135 °C		Mín. 141	234
Viscosidade Saybolt-Furol	a 150 °C	SSF	Mín 50	104
	a 177 °C		Entre 30 e 150	42

Fonte: O autor (2017).

A partir dos resultados encontrados após o ensaio de viscosidade Saybolt-Furol, determinou-se as temperaturas de compactação e do ligante (Gráfico 3), que, de acordo com a norma rodoviária DNER 043/95, devem ser referentes a viscosidade de 140 ± 15 SSF e 85 ± 10 SSF, respectivamente. A Tabela 12 apresenta as faixas de temperatura utilizadas durante a dosagem Marshall.

Gráfico 3 – Determinação das temperaturas médias de compactação e do ligante para confecção de corpos de prova.

Fonte: O autor (2017).

Tabela 12 – Faixas de temperatura utilizadas na dosagem Marshall

Material	Temperatura (°C)
CAP	156 a 161
Agregados	171 a 176
Compactação da mistura	144 a 148

Fonte: O autor (2017).

4.10 Dosagem Marshall

4.10.1 Propriedades volumétricas

Os resultados dos parâmetros volumétricos, utilizadas na determinação do teor ótimo de ligante a ser utilizado na mistura, são apresentados na tabela 13.

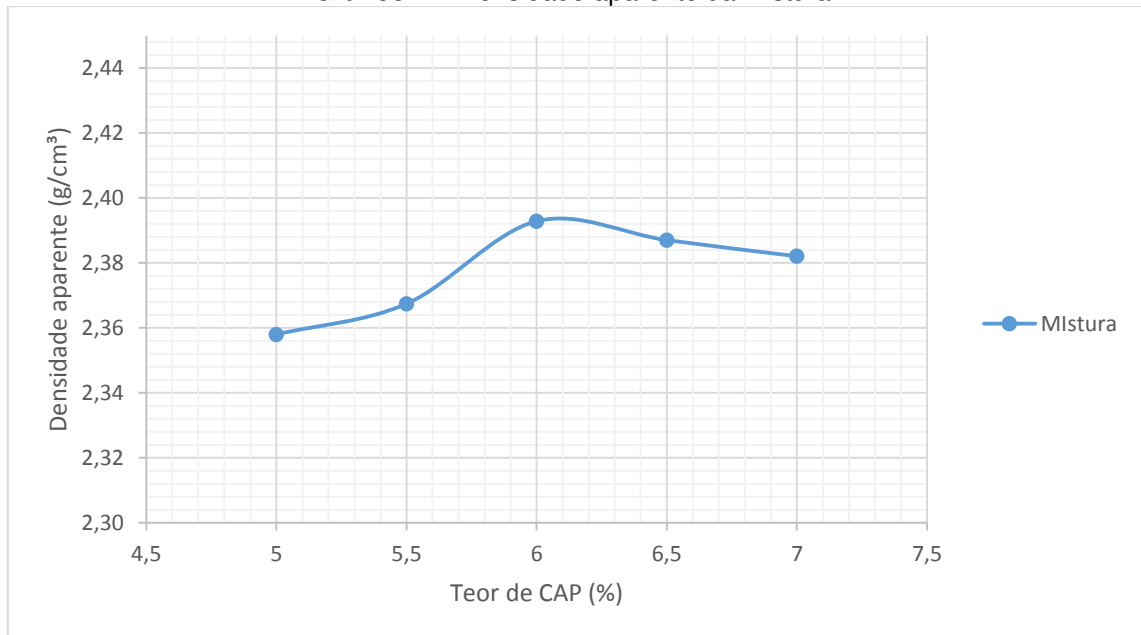
Tabela 13 – Parâmetros volumétricos da mistura

% Asfalto	Densidade Aparente (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
5	2,358	2,552	7,53	11,44	18,97	60,3
5,5	2,367	2,531	6,44	12,64	19,08	66,25
6	2,390	2,511	4,78	13,92	18,7	74,44
6,5	2,387	2,493	4,13	15,06	19,19	78,48
7	2,382	2,472	3,56	16,19	19,75	81,97

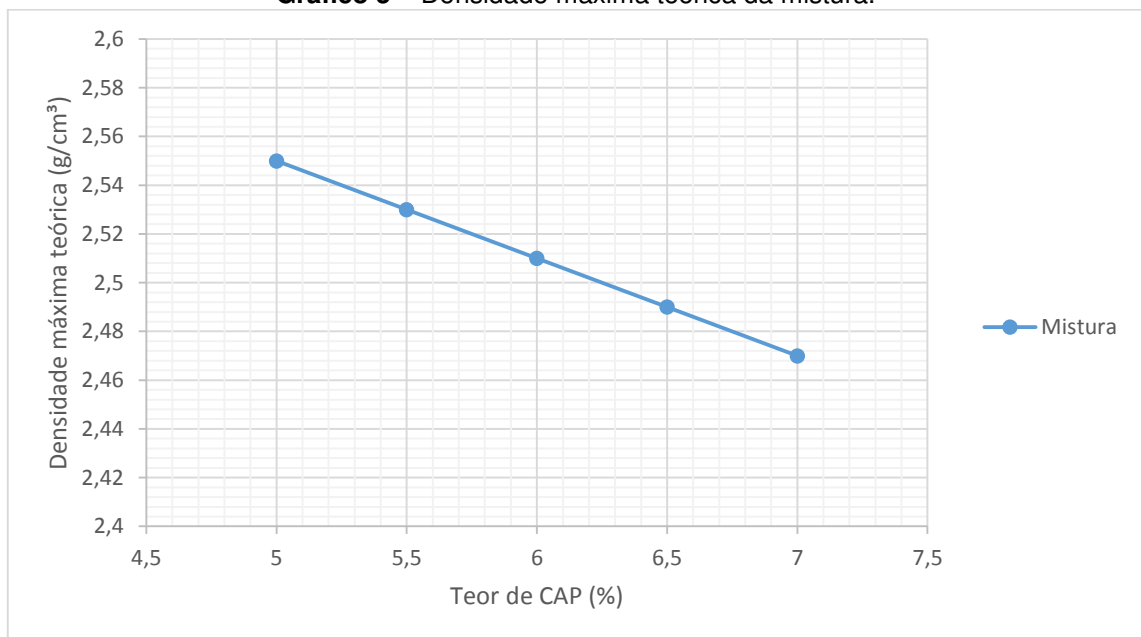
Fonte: O autor (2017).

De acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES, a porcentagem de vazios do corpo de prova, feito de acordo com a norma rodoviária DNER-ME 043/95, deve ser de 3% a 5%. Assim, apenas os corpos de prova que possuem 6%, 6,5% e 7% de asfalto estão dentro dos limites. Esta norma também impõe limites a relação betume/vazios e aos vazios do agregado mineral, que são de 75% a 82% e de no mínimo 15%, respectivamente. Levando em consideração a relação betume/vazios, apenas os corpos de prova com 6,5% e 7% de ligante atendem aos limites. Todos os corpos de prova atendem ao limite de vazios do agregado mineral.

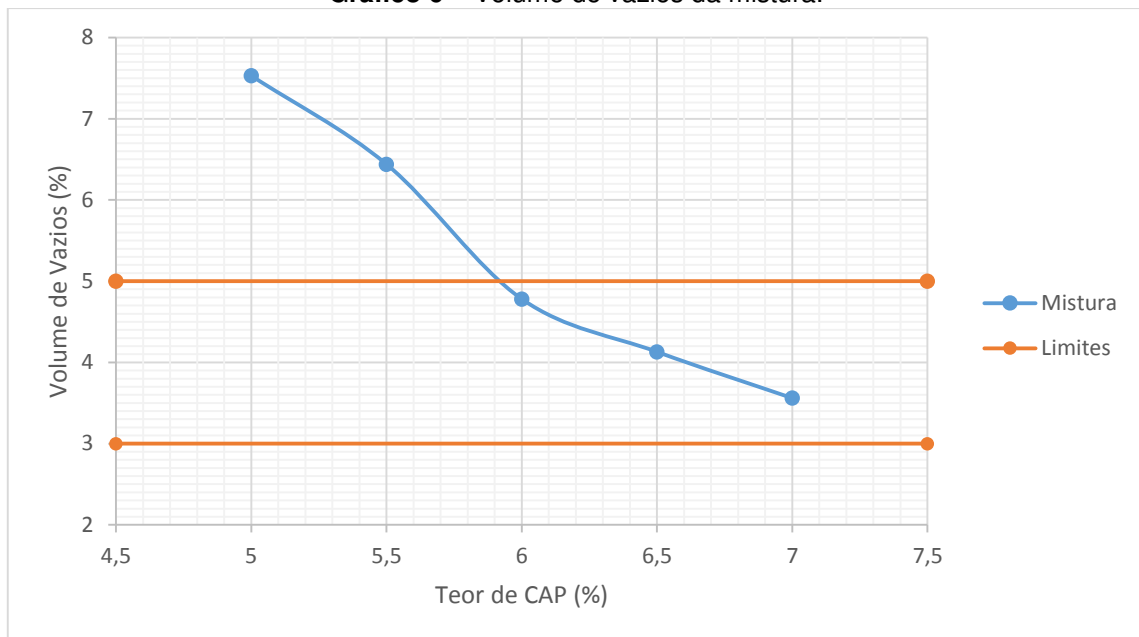
Os Gráficos 4, 5, 6, 7 e 8 apresentam as curvas de densidade aparente, densidade máxima teórica, volume de vazios, volume do agregado mineral e relação betume/vazios, respectivamente.

Gráfico 4 – Densidade aparente da mistura.

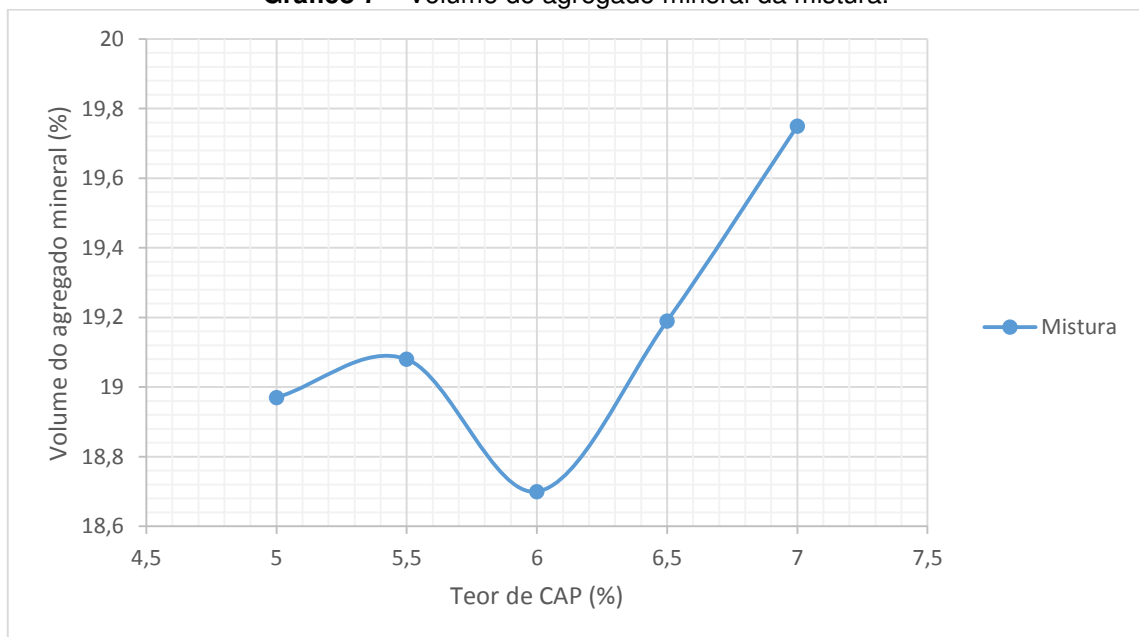
Fonte: O autor (2017).

Gráfico 5 – Densidade máxima teórica da mistura.

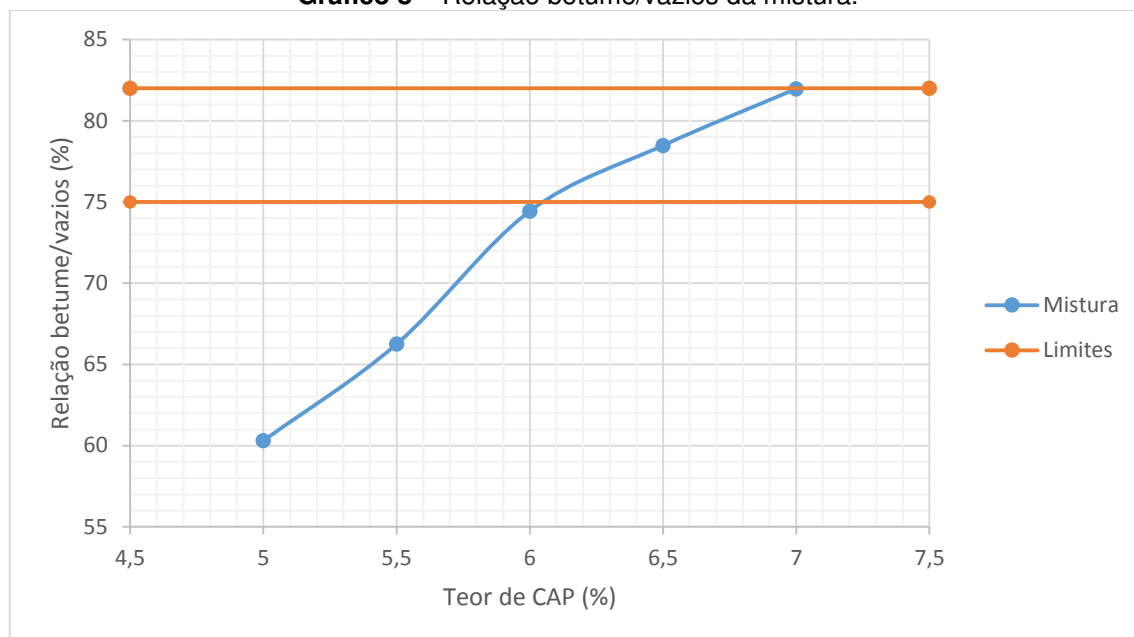
Fonte: O autor (2017).

Gráfico 6 – Volume de vazios da mistura.

Fonte: O autor (2017).

Gráfico 7 – Volume do agregado mineral da mistura.

Fonte: O autor (2017).

Gráfico 8 – Relação betume/vazios da mistura.

Fonte: O autor (2017)

No apêndice C, estão expostas as dimensões e a densidade aparente de cada corpo de prova utilizado neste ensaio.

4.10.2 Estabilidade

As estabilidades dos corpos de prova estão mostradas na Tabela 14.

Tabela 14 – Estabilidade dos corpos de prova.

% asf.	Carga média (Kgf)	Correção	Estabilidade (kgf)
5	333	0,95	316,4
5,5	293	0,89	260,8
6	232	0,91	211,1
6,5	262	0,96	251,5
7	252	1,01	254,5

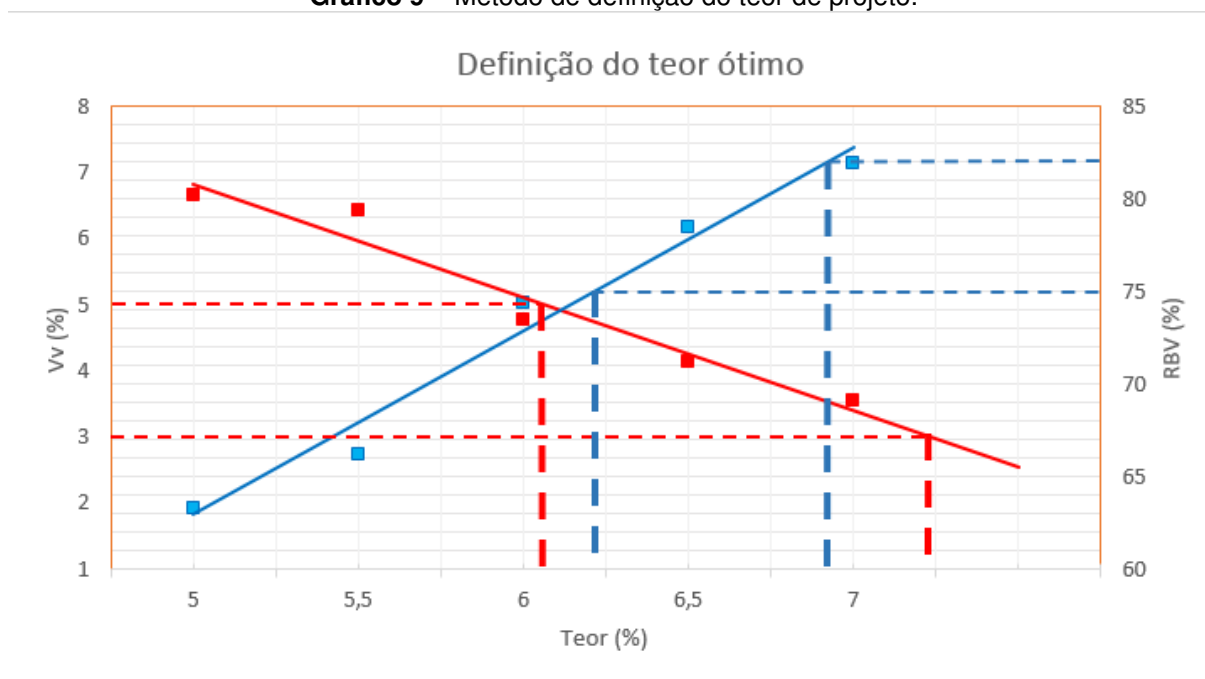
Fonte: O autor (2017).

Os resultados para estabilidade não devem ser considerados na análise das características da mistura, devido a possíveis problemas com o equipamento utilizado durante o ensaio. De acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES, a estabilidade mínima, para corpos de prova feitos pelo método DNER-ME 043, é de 500 kgf. Os corpos de prova não atingiram o mínimo estabelecido por norma, possivelmente por erros com a aparelhagem utilizada, como já foi mencionado.

4.10.3 Teor de projeto de ligante asfáltico

Para a determinação do teor ótimo de ligante empregado no projeto da mistura asfáltica, foram usados os parâmetros de volume de vazios e a relação betume por vazios. Com os cinco valores médios de Vv e RBV obtidos nos grupos de corpos-de-prova traça-se um gráfico do teor de asfalto (no eixo “x”) versus Vv (no eixo “y1”) e RBV (no eixo “y2”). O gráfico contém os limites específicos das duas variáveis, assim a partir da interseção das linhas de tendência do Vv e do RBV com os limites respectivos de cada um destes parâmetros, foram determinados quatro teores de CAP. O teor ótimo foi selecionado tomando a média dos dois teores centrais. O Gráfico 9 e a Tabela 15 apresentam o método utilizado e a determinação do teor ótimo, respectivamente.

Gráfico 9 – Método de definição do teor de projeto.



Fonte: O autor (2017).

Tabela 15 – Teor ótimo de ligante.

Teor 2	Teor 3	Média
6,21%	6,93%	6,57%

Fonte: O autor (2017).

4.11 Resistência a tração por compressão diametral

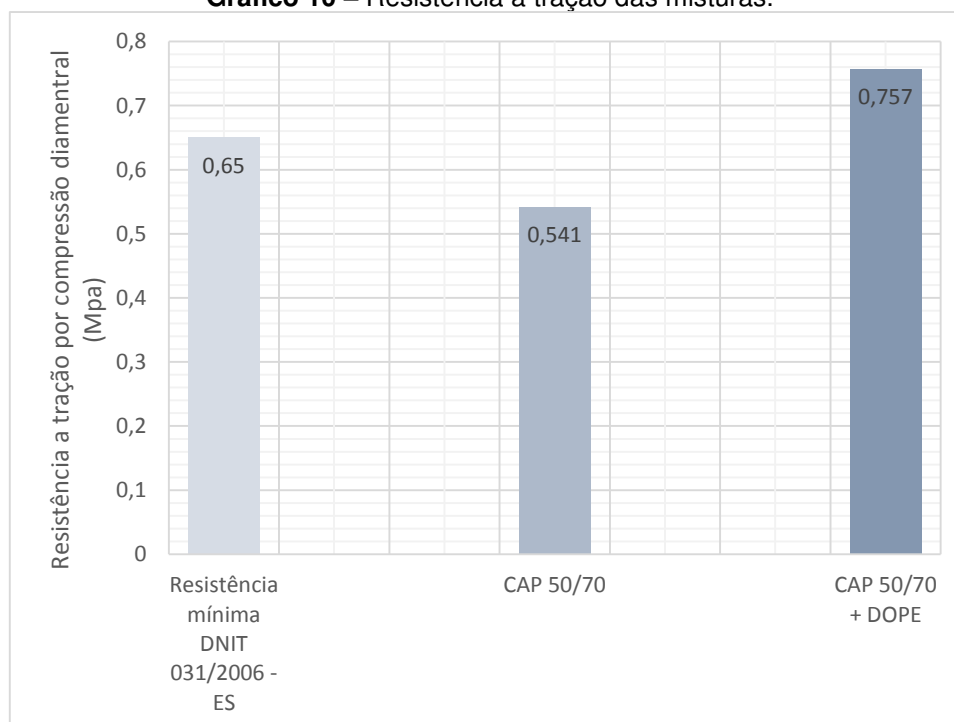
A Tabela 16 e o Gráfico 10 apresentam os valores de resistência à tração por compressão diametral das duas misturas asfálticas estudadas, a temperatura de 25°C. Pode-se detectar que a mistura que contém DOPE adicionado ao ligante foi a que obteve maior resistência a tração em comparação com a mistura sem aditivo. O ganho em percentual da mistura com DOPE foi de aproximadamente 40% sobre a mistura sem DOPE. A mistura sem aditivo não apresenta valores que atendam ao mínimo exigido em norma, ao contrário da mistura com aditivo.

Tabela 16 – Resultado da resistência a tração das misturas.

Ligante	CP	Diâmetro médio (cm)	Altura média (cm)	Leitura na prensa (kgf)	RT (Mpa)	RT Média (Mpa)
CAP 50/70	1	102,05	64,9	573	0,562	0,541
	2	100,63	66,12	587	0,565	
	3	101,39	65,97	514	0,496	
CAP 50/70 + DOPE	4	100,84	64,47	812	0,802	0,757
	5	101,34	65,75	706	0,684	
	6	101,21	64,42	796	0,787	

Fonte: O autor (2017).

Gráfico 10 – Resistência a tração das misturas.



Fonte: O autor (2017).

Nota-se uma relação direta entre a adesividade do ligante ao agregado e a resistência a tração da mistura. A utilização do aditivo melhorador de adesividade permitiu que a mistura estudada atendesse aos requisitos presentes em norma.

4.12 Desgaste Cântabro

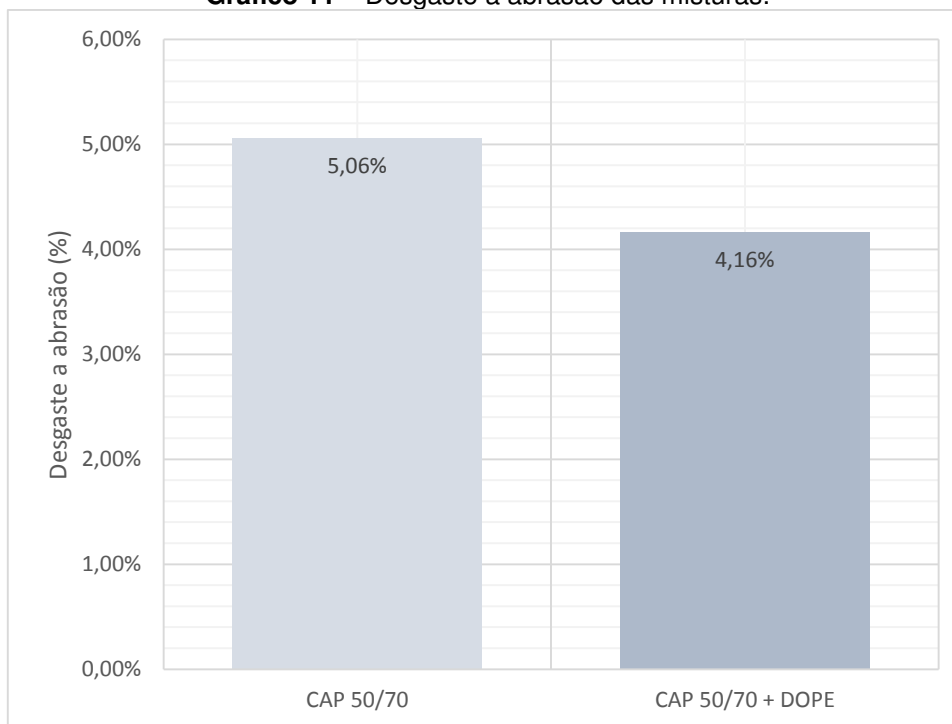
O resultado do ensaio Cântabro, que mostra desgaste por abrasão da misturas da mistura, é mostrado na Tabela 17 e no Gráfico 11.

Tabela 17 – Resultado do desgaste a abrasão.

Ligante	CP	Peso do corpo de prova, antes do ensaio (g)	Peso do corpo de prova, após o ensaio (g)	Desgaste da mistura betuminosa (%)	Desgaste Médio (%)
CAP 50/70	1	1182,5	1124,2	4,93%	5,06%
	2	1190,6	1127,9	5,27%	
	3	1173,1	1114,6	4,99%	
CAP 50/70 + DOPE	4	1179,4	1131,1	4,10%	4,16%
	5	1190,2	1142,3	4,02%	
	6	1183,8	1132,1	4,37%	

Fonte: O autor (2017).

Gráfico 11 – Desgaste a abrasão das misturas.



Fonte: O autor (2017).

A mistura que contém DOPE adicionado ao ligante apresentou um desgaste a abrasão menor, se comparado a mistura sem adição de melhorador de adesividade. De acordo com o DNER (1999, apud Bernucci et al., 2006), o desgaste máximo admitido é de 25% para misturas asfálticas, assim ambas as misturas obtiveram valores satisfatórios.

4.13 Dano por umidade induzida

O resultado do ensaio de dano por umidade induzida, é mostrado nas tabelas 18, 19 e 20.

Tabela 18 – Resultado da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova que sofreram condicionamento.

Ligante	CP	Volume de vazios com ar (%)	Volume de vazios com ar (cm³)	Volume de água absorvido (cm³)	Grau de saturação (%)	Leitura na prensa (Kgf)	RTc (Mpa)	RTc Médio (Mpa)
CAP 50/70	1	0,08	0,37	23,87	65,30	463,00	0,43	0,58
	2	0,06	0,30	26,18	85,90	676,00	0,62	
	3	0,07	0,32	21,36	67,21	724,00	0,68	
CAP 50/70 + DOPE	4	0,07	0,35	24,77	70,47	275,00	0,26	0,27
	5	0,06	0,30	23,97	79,07	295,00	0,27	
	6	0,07	0,33	21,66	65,39	301,00	0,29	

Fonte: O autor (2017).

Tabela 19 – Resultado da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova que não sofreram condicionamento.

Ligante	CP	Leitura na prensa (Kgf)	RT (Mpa)	RT Médio (Mpa)
CAP 50/70	1	693	0,64	0,68
	2	791	0,73	
	3	709	0,66	
CAP 50/70 + DOPE	4	608	0,57	0,58
	5	582	0,55	
	6	637	0,60	

Fonte: O autor (2017).

Tabela 20 – Razão de resistência à tração retida das misturas.

Ligante	RRT (%)
CAP 50/70	85%
CAP 50/70 + DOPE	48%

Fonte: O autor (2017).

Observa-se que os ensaios de adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso e dano por umidade induzida, não estão diretamente relacionados tendo em vista a divergência de satisfação comparando os dois resultados.

De acordo Bernucci et al. (2008), no caso de misturas contínuas, o valor mínimo de RRT para que a amostra seja aprovada é de 70%. Assim, apenas a mistura que não possuía DOPE adicionado ao ligante obteve resultado mínimo aceitável.

No apêndice D, estão exibidas as dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise de como o aditivo melhorador de adesividade DOPE influencia nas características de uma mistura asfáltica tipo CAUQ, e uma reflexão acerca dos benefícios encontrados ao se trabalhar com esse aditivo.

O trabalho foi iniciado realizando um levantamento teórico sobre os aspectos que envolvia, conceitos básicos acerca de pavimentos, revestimentos asfálticos, classificação de agregados usados para pavimentação, definição de asfalto, mistura asfálticas usinadas a quente e adesividade em misturas asfálticas,

De um modo geral, os materiais utilizados no estudo se mostraram satisfatórios para a pesquisa, porém a areia analisada não atingiu os valores mínimos de angularidade exigidos, por isso não foi adicionada a composição da mistura, sendo substituída pelo pó de brita. Para a caracterização e classificação dos agregados foram realizados os ensaios de granulometria, forma, densidade, absorção, resistência a abrasão, degradação das rochas, adesividade ao ligante, equivalente de areia e angularidade. Em relação ao ligante foram analisadas as propriedades físicas abrangendo viscosidade Saybolt-Furol, penetração e ponto de amolecimento.

A principal função do aditivo DOPE é melhorar a adesividade do agregado ao ligante betuminoso durante a produção da mistura asfáltica. Dessa forma, o ensaio de adesividade foi realizado, pelo método do DNER, para diferentes teores de DOPE adicionados ao ligante. Foi verificado a capacidade do aditivo de melhorar a adesividade com o teor de 1%. Tendo em vista que a falta de adesividade é um parâmetro que pode tornar o agregado inaceitável para uso em misturas asfálticas, o uso de DOPE se mostrou necessário, pois melhorou esta característica do material utilizado no estudo.

A dosagem Marshall foi realizada para os teores de 5%, 5,5%, 6%, 6,5% e 7%, e obteve o teor ótimo de ligante em 6,57%, encontrado por meio da relação entre dois parâmetros volumétricos, volume de vazios e relação betume/vazios. Os corpos de prova foram moldados e tiveram suas propriedades mecânicas avaliadas. Os resultados obtidos para estabilidade não foram satisfatórios, possivelmente por problemas com a aparelhagem utilizada.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência a tração por compressão diametral, especificados em um valor mínimo de 0,65 Mpa, segundo norma, mostraram que a utilização de DOPE é uma solução interessante a misturas com baixa resistência a tração causadas pela adesividade insatisfatória do agregado ao ligante. Levando em conta que, em geral, uma maior resistência a tração é associada a uma maior resistência à fadiga, o uso de DOPE pode melhorar a durabilidade do revestimento asfáltico.

O ensaio Cântabro mostrou resultados mais satisfatórios para misturas asfálticas que continham DOPE adicionado ao ligante, mostrando que o aditivo em estudo influencia de forma positiva na adesão/coesão da mistura asfáltica. Ainda assim, ambas as misturas obtiveram resultados bastante aceitáveis, em relação ao mínimo requerido em norma.

Os resultados obtidos a partir do ensaio de dano por umidade induzida mostraram que apenas a mistura que não possuía DOPE adicionado ao ligante obteve resultado superior a 70%, mínimo aceitável por norma. Assim, observa-se que os ensaios de adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso e dano por umidade induzida, não estão diretamente relacionados, levando em conta a divergência de satisfação entre os dois resultados.

Para trabalhos futuros sugere-se a realização de outros ensaios de caracterização dos materiais e das misturas que não foram realizados neste estudo, entre eles estão os ensaio de sanidade, ensaio de módulo de resiliência, ensaio de envelhecimento e ensaios de caracterização do ligante com adição de DOPE. Além disso, sugere-se para estudos complementares, a realização do ensaio de dano por umidade induzida com a utilização de mais corpos de prova, para fins de comparação com este trabalho e a realização do ensaio de estabilidade com aparelhagem calibrada de forma ideal.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.abeda.org.br/produtos/>>. Acesso em: 11 out. 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 203**: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. Estados Unidos da América, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1252**: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). Pensilvânia. Estados Unidos da América, 2003.

ANITELLI, Andre. **Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS**. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para Engenheiros. 3. Ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BOCK, André Luiz. **Desempenho à fadiga de misturas em concreto asfáltico com diferentes formas de incorporação de cal**. 2009. 88 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº. 19**. Brasília: ANP, 2005.

BRASIL. Confederação Nacional de Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**: relatório gerencial. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2016.

CASTRO, Pery Gonçalves. **Concreto asfáltico para rodovias**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2015. Disponível em: <<http://livrariaedipucrs.pucrs.br/>>. Acesso em: 11 set. 2017.

CHIOSSI, Nivaldo José. **Geologia de engenharia**. 3. Ed. [S.I.]: Oficina de Textos, 2013.

COLAVITE, Alessandro Serrano; KONISHI, Fabio. **A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade**. 2015. 11 p. Artigo – Associação Educacional Dom Bosco, Resende, 2015. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/802267.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 001: Material Asfáltico – determinação do efeito do calor e do ar**. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

_____. **DNER-ME 035: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro, DNER, 1998.

_____. **DNER-ME 043: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, DNER, 1995.

_____. **DNER-ME 054: Equivalente de areia**. Rio de Janeiro, DNER, 1997

_____. **DNER-ME 078: Adesividade a ligante betuminoso**. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

_____. **DNER-ME 081: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado**. Rio de Janeiro, DNER, 1998.

_____. **DNER-ME 083: Agregados – análise granulométrica**. Rio de Janeiro, DNER, 1998.

_____. **DNER-ME 084: agregado miúdo- determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, DNER, 1995.

_____. **DNER-ME 085: Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real**. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

_____. **DNER-ME 383: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro**. Rio de Janeiro, DNER, 1999.

_____. **DNER-ME 401: Agregados – determinação do índice de degradação das rochas após compactação Marshall, com ligante – ID_{ML} e sem ligante – ID_M**. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3. Ed. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 031 – ES.** Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 131 – ME.** Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 136 – ME.** Pavimentação asfáltica – Determinação da resistência a tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 155 – ME.** Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

ERICEIRA, Brena Ribeiro. **Aplicabilidade de fibras de cana-de-açúcar em misturas asfálticas do tipo SMA.** 2017. 106 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2017.

GONÇALVES, Bruno Silva. **Análise de dispersão de resultados do controle de teor de ligante de misturas asfálticas com agregados de baixa absorção a partir do rotarex.** 2014. 98 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

GRANICH, Alex R. **Análise de desempenho de misturas asfálticas com adição de cal: um estudo de caso.** 2010. 62 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2010.

NASCIMENTO, Marias das Vitórias. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas.** 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

OMENO, Wander; ANTOSCZEZEM JUNIOR, José Antonio. **Novos estudos sobre o DOPEs.** 2004. Disponível em: <http://www.grecaasfaltos.com.br/fatos/fatos_01.pdf>. Acesso em: 19 out. 2017.

PEREIRA, Gerson. **Aditivos Orgânicos Melhoradores de Adesividade.** 8. Ed. São Paulo: 2012. Disponível em: <<http://www.sinicesp.com.br/materias/2012/bt08a.htm>>. Acesso em: 21 set. 2017.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **Pavimentação Rodoviária:** Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro: COPIARTE, 2001.

RAMPAZZO, Lino. **Metodologia Científica:** Para alunos dos cursos de graduação e pós-graduação. 3. Ed. São Paulo: Edições Loyola, 2005.

SCHUH, Geovani Henrique. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas com adição de DOPE e cal hidratada para melhoria de adesividade:** estudo de caso. 2016. 108 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) –

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Santa Rosa, 2016.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. Ed. São Paulo: Pini, 2007.

APÊNDICE A – RESULTADOS PARA DENSIDADE REAL

Tabela 21 – Densidade real do agregado graúdo.

Ms (g)	2998,7
V (cm ³)	1072,1
Dr (g/cm ³)	2,797

Fonte: O autor (2017).

Tabela 22 – Densidade real da areia.

Material	a (g)	b (g)	c (g)	d (g)	Densidade real (g/cm ³)
Amostra 1	132,8	636,9	913,9	609,7	2,521
Amostra 2	129,6	624,5	910,4	601,9	2,655

Fonte: O autor(2017).

Tabela 23 – Densidade real do pó de brita.

Material	a (g)	b (g)	c (g)	d (g)	Densidade real (g/cm ³)
Amostra 1	99,6	598,3	933,1	619,9	2,688
Amostra 2	102,2	600,58	938,7	622,5	2,735

Fonte: O autor (2017).

Tabela 24 – Densidade real do fíler.

	Ensaio 1	Ensaio 2
Massa seca (g)	60g	60g
Volume do líquido deslocado (cm ³)	19,7	20,4
Massa específica real (g/cm ³)	3,04	2,941

Fonte: O autor (2017).

APÊNDICE B – DIMENSÕES DOS GRÃO UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FORMA

Tabela 25 - Dimensões dos 100 primeiros grãos utilizados na definição do índice de forma.

Grão	Comprimento	Espessura	Grão	Comprimento	Espessura
1	28,07	9,19	51	27,81	12,13
2	19,82	7,08	52	30,73	9,82
3	25,87	7,4	53	28,76	8,14
4	30,03	7,48	54	27,86	8,09
5	35,53	9,74	55	23,88	10,48
6	24,82	7,27	56	35,85	12,06
7	24,91	8,53	57	24,84	7,97
8	20,53	9,84	58	31,06	8,86
9	23,84	4,58	59	23,99	7,59
10	19,84	10,71	60	21,62	14,94
11	33,88	5,7	61	34,47	6,39
12	28,38	7,93	62	24,57	7,15
13	22,84	8,28	63	24,44	11,72
14	24,51	9	64	25,56	13,61
15	24,67	4,05	65	24,44	12,89
16	20,7	11,12	66	26,62	10,63
17	18,3	6,69	67	33,17	13,51
18	18,8	9,73	68	24,37	11,31
19	24,72	7,48	69	23,3	13,34
20	29,33	7,08	70	28,55	8,62
21	13,51	11,49	71	27,76	13,51
22	29,86	8,56	72	21,58	10,99
23	20,55	8,27	73	22,79	8,09
24	21,92	5,89	74	20,29	12,17
25	23,2	8,55	75	29,16	13,2
26	18,27	6,43	76	25,6	11,19
27	22,6	8,99	77	20,02	14,05
28	19,9	9,47	78	25,42	12,02
29	22,78	6,24	79	21,68	14,68
30	25,31	8,56	80	21,28	13,35
31	18,31	10,82	81	23,71	16,66
32	17,24	8,15	82	20,11	12,06
33	20,04	7,46	83	27,14	9,83
34	27,12	5,78	84	23,67	13,68
35	21,71	5,44	85	22,22	8,38
36	16,34	9,55	86	27,47	10,54
37	23	6,05	87	24,17	5,98
38	18,64	8,07	88	27,51	14,66
39	24,49	4,35	89	27,38	9,34
40	23,72	8,71	90	24,61	7,59
41	20,62	9,04	91	22,02	13,01
42	20,52	8,89	92	23,22	10,59
43	19,68	8,48	93	25,41	7,2
44	19,14	8,08	94	26,04	11,96
45	20,23	8,72	95	27,07	10,71
46	23,01	7,6	96	20,71	7
47	19,82	9,42	97	22,18	15,27
48	28,91	7,59	98	20,55	11,64
49	29,35	5,26	99	27,9	6,13
50	22,33	12,39	100	18,05	11,5

Fonte: O autor (2017).

Tabela 26 - Dimensões dos 100 últimos grãos utilizados na definição do índice de forma.

Grão	Comprimento	Espessura	Grão	Comprimento	Espessura
101	18,51	12,2	151	25,19	11,38
102	19,66	11,64	152	28,37	9,01
103	26,65	12,53	153	19	9,59
104	20,52	13,15	154	14,76	12,64
105	19,44	8,44	155	21,12	11,37
106	17,2	11,1	156	23,06	9,96
107	21,07	13,59	157	20,76	5,6
108	23,76	9,32	158	16,91	7,39
109	25,36	8,44	159	24,48	8,99
110	22,29	14,82	160	18,69	11,49
111	19,46	12,5	161	18,04	10,05
112	18,44	9,56	162	19,67	13,07
113	25,33	13,58	163	22	6,12
114	17,51	11,64	164	44,45	15,93
115	20,88	15,02	165	35,02	14,41
116	24,61	15,37	166	31,13	18,13
117	20,28	9,59	167	29,43	17,64
118	20,94	6,79	168	25,48	14,47
119	17,72	11,77	169	30,27	16,99
120	19,32	11,25	170	23,52	14,53
121	21,77	14,77	171	27,4	18,57
122	29,26	7,9	172	21,37	13,69
123	26,49	8,29	173	30,28	14,39
124	18,34	12,23	174	28,53	13,52
125	25,92	11,08	175	24,83	16,35
126	26,99	14,2	176	24,46	13,61
127	24,58	13,05	177	26,21	11,77
128	23,51	9,26	178	24,86	8,4
129	23,47	10,01	179	24,18	16,81
130	19,45	10,52	180	25	15,75
131	24,5	12,81	181	30,12	14,07
132	19,3	10,15	182	22,22	17,51
133	17,23	9,87	183	22,37	13,5
134	20,55	13,51	184	28,54	18,22
135	16,47	11,56	185	25,86	17,4
136	18,92	9,9	186	27,28	14,13
137	21,77	11,88	187	38,17	16,12
138	20,5	10,33	188	25,29	16,57
139	18,49	7,4	189	32,93	14,02
140	17,7	4,85	190	25,68	16,07
141	22,49	13,37	191	22,51	13,31
142	21,45	9,66	192	31,51	11,21
143	24,3	10,24	193	26,73	15,42
144	19	12,95	194	26,28	15,91
145	19,04	15,28	195	35,88	19,52
146	20,99	6,94	196	27,48	16,1
147	19,57	9,28	197	28,51	18,31
148	24,75	11,14	198	27,82	11,48
149	21,62	12,8	199	25,24	11,66
150	19,96	7,95	200	19,89	16,55

Fonte: O autor (2017).

APÊNDICE C - DIMENSÕES E DENSIDADE APARENTE DOS CORPOS DE PROVA USADOS NA DOSAGEM MARSHALL

Tabela 27 - Dimensões e densidade aparente para mistura com 5% de CAP.

Teor de CAP (%)	Corpo de prova	Altura (mm)	Peso seco (g)	Peso submerso (g)	Massa específica aparente (g/cm ³)
5	1	69,76	1195,5	495,8	2,411
		69,9			
		69,39			
		69,43			
	2	65,74	1183,4	501,2	2,361
		65,9			
		65,61			
		65,44			
	3	65,33	1187,2	504,1	2,355
		66,3			
		65,93			
		65,4			

Fonte: O autor (2017).

Tabela 28 - Dimensões e densidade aparente para mistura com 5,5% de CAP.

Teor de CAP (%)	Corpo de prova	Altura (mm)	Peso seco (g)	Peso submerso (g)	Massa específica aparente (g/cm ³)
5,5	1	68,23	1175,7	500,5	2,349
		68,88			
		68,09			
		68,99			
	2	66,51	1180	492,7	2,395
		66,66			
		66,99			
		66,85			
	3	68,18	1179,4	500,6	2,356
		68,21			
		68,41			
		68,48			

Fonte: O autor (2017).

Tabela 29 - Dimensões e densidade aparente para mistura com 6% de CAP.

Teor de CAP (%)	Corpo de prova	Altura (mm)	Peso seco (g)	Peso submerso (g)	Massa específica aparente (g/cm ³)
6	1	67,84	1172,9	497,4	2,358
		67,05			
		68,21			
		67,42			
	2	65,21	1179,3	491,3	2,400
		64,11			
		64,72			
		65,12			
	3	69,11	1186,8	492	2,412
		68,73			
		67,77			
		69,79			

Fonte: O autor (2017).

Tabela 30 - Dimensões e densidade aparente para mistura com 6,5% de CAP.

Teor de CAP (%)	Corpo de prova	Altura (mm)	Peso seco (g)	Peso submerso (g)	Massa específica aparente (g/cm ³)
6,5	1	64,12	1179,6	490,6	2,404
		64,11			
		65,09			
		64,53			
	2	65,33	1170,1	489,1	2,392
		64,97			
		65,19			
		66,73			
	3	64,18	1174,6	496,7	2,365
		64,2			
		64,93			
		65,21			

Fonte: O autor (2017).

Tabela 31 - Dimensões e densidade aparente para mistura com 7% de CAP.

Teor de CAP (%)	Corpo de prova	Altura (mm)	Peso seco (g)	Peso submerso (g)	Massa específica aparente (g/cm ³)
7	1	65,59	1158,1	499,4	2,319
		65,68			
		65,15			
		64,93			
	2	62,74	1156,9	486,5	2,378
		62,72			
		63,56			
		62,68			
	3	62,85	1157,4	472,8	2,448
		62,85			
		62,25			
		63,63			

Fonte: O autor (2017).

APÊNDICE D - DIMENSÕES, MASSA SECA, MASSA SATURADA E VOLUME DOS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO DE DANO POR UMIDADE INDUZIDA

Tabela 32 - Dimensões, massa seca, massa saturada e volume dos corpos de prova que sofreram condicionamento.

Ligante	CP	Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)	Massa seca (g)	Volume (cm³)	Massa saturada (g)
CAP 50/70	1	102,15	66,85	1112,4	483,3	1136,2
	2	101,85	67,85	1149,2	492	1175,3
	3	101,21	67,21	1117,3	480,5	1138,6
CAP 50/70 + DOPE	4	101,99	66,81	1124,6	486,8	1149,3
	5	102,07	66,95	1172,5	501,2	1196,4
	6	101,69	65,01	1139,1	490,6	1160,7

Fonte: O autor (2017).

Tabela 33 - Dimensões dos corpos de prova que não sofreram condicionamento.

Ligante	CP	Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)
CAP 50/70	1	102,42	67,7
	2	101,29	67,93
	3	102,59	66,47
CAP 50/70 + DOPE	4	102,09	66,33
	5	101,3	66,26
	6	101,42	66,33

Fonte: O autor (2017).