

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

KAMILLA SOUZA GOMES

RENATO LEITE MARTINS DA SILVA

**ESTUDO DE DOSAGEM PARA DEFINIÇÃO DO TRAÇO DO
CBUQ FAIXA C IDEAL COM MATERIAIS DA REGIÃO DE
ANÁPOLIS-GOIÁS**

ANÁPOLIS / GO

2018

KAMILLA SOUZA GOMES
RENATO LEITE MARTINS DA SILVA

**ESTUDO DE DOSAGEM PARA DEFINIÇÃO DO TRAÇO DO
CBUQ FAIXA C IDEAL COM MATERIAIS DA REGIÃO DE
ANÁPOLIS-GOIÁS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

ORIENTADORA: ISA LORENA SILVA BARBOSA

ANÁPOLIS / GO: 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

GOMES, KAMILLA SOUZA/ SILVA, RENATO LEITE MARTINS

Estudo de Dosagem para Definição do Traço do CBUQ Faixa C Ideal com Materiais da Região de Anápolis-Goiás

77P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2018).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

- | | |
|------------------------|--------------------|
| 1. Concreto Betuminoso | 2. Traço |
| 3. Pavimentação | 4. Ensaios |
| I. ENC/UNI | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GOMES, Kamilla Souza; SILVA, Renato Leite Martins da. Estudo de dosagem para definição do traço do CBUQ faixa C ideal com materiais da região de Anápolis-Goiás. Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 77p. 2018.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Kamilla Souza Gomes

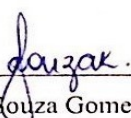
Renato Leite Martins da Silva

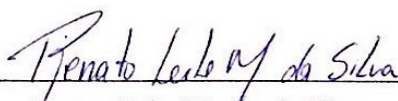
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo de dosagem para definição do traço do CBUQ faixa C ideal com materiais da região de Anápolis-Goiás.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2018

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.


Kamilla Souza Gomes
E-mail: kamilla.souza.gomes@gmail.com



Renato Leite Martins da Silva
E-mail: renatoleite97@hotmail.com

KAMILLA SOUZA GOMES
RENATO LEITE MARTINS DA SILVA


**ESTUDO DE DOSAGEM PARA DEFINIÇÃO DO TRAÇO DO
CBUQ FAIXA C IDEAL COM MATERIAIS DA REGIÃO DE
ANÁPOLIS-GOIÁS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

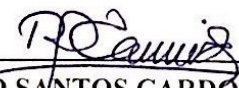
APROVADO POR:



ISA LORENA SILVA BARBOSA, Mestra (UniEvangélica)
(ORIENTADORA)



LUCAS GABRIEL CORRÊA VARGAS, Mestre (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)



ROGÉRIO SANTOS CARDOSO, Mestre (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: ANÁPOLIS/GO, 26 de novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada seria possível. Agradeço pela força concedida e por ser O motivo pelo qual nunca me deixei abater com os desafios desta caminhada, renovando sempre minhas forças para continuar.

Agradeço ainda a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa conquista, seja me apoiando ou me incentivando a lutar por essa honra.

Kamilla Souza Gomes

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado à glória de chegar até aqui e sempre ter me abençoado durante as minhas conquistas.

Agradeço a minha mãe Katia Leite e ao meu irmão Rafael Leite. Agradeço ao meu pai Aurelio Martins da Silva (SHESHELL) (in memoriam), que infelizmente não pôde estar presente neste momento tão feliz da minha vida, mas que não poderia deixar de dedicar a ele, pois se hoje estou aqui, devo muitas coisas a ele e aos seus ensinamentos e valores passados. Obrigado por tudo! Saudades eternas!

Agradeço a minha parceira de trabalho por toda a sua paciência e responsabilidade para a realização deste trabalho.

Agradeço a minha orientadora Isa Lorena Barbosa, que com muito carinho e dedicação foi possível aumentar meu nível de conhecimento e esclarecer todas as duvidas referente ao ramo.

Agradeço os funcionários da empresa Objetivo Serviços Asfálticos onde foi possível ser desenvolvida a pesquisa e sempre me ajudaram. Obrigado!

Agradeço aos meus amigos.

Renato Leite Martins da Silva

RESUMO

A presente pesquisa objetivou mostrar que para obter-se um concreto betuminoso de qualidade e que apresente as características dentro das tolerâncias do projeto de mistura, foi necessário realizar ensaios, levando em consideração as diretrizes do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. A metodologia utilizada neste trabalho foi através de análises teóricas e experimentais, estudo de caso e dosagem da mistura asfáltica pelo método Marshall, ensaio mais utilizado no Brasil. Os objetivos específicos foram os melhores desempenhos de cada material individualmente e, propriamente dito, dentro da mistura para formação do CBUQ faixa C. Como resultado obteve-se que o teor de ligante determinado pela dosagem e descrito para o projeto e a graduação do agregado já predefinida a partir da faixa granulométrica da faixa C, atendeu as primícias das normas vigentes brasileiras, como também estavam dentro dos critérios/limites máximos e mínimos, além de terem sido eficazes para atender todas as exigências de um pavimento de qualidade: suportar alto tráfego e variações de cargas, resistirem às intempéries, garantir segurança aos usuários e ter boas condições de rolamento.

PALAVRAS-CHAVE:

Concreto Betuminoso. Traço. Pavimentação. Ensaios.

ABSTRACT

The present study objected to show that in order to obtain a quality bituminous concrete that presents the characteristics within the tolerances of the mixing project, it was necessary to carry out tests, taking into account the guidelines of the National Department of Infrastructure and Transport. The methodology used in this work was through theoretical and experimental analyzes; the case study was carried out with the dosage of the asphalt mixture by the Marshall method, one of the most used tests in Brazil. The specific objectives of the work are the best performances of each material individually and properly within the blend for the formation of the Concrete Bituminous - C track. As a result, the binder content determined by the dosage is expected to be described by design and graduation of the large aggregate already predefined, starting from the granulometric range of the C range, must meet the first principles of the current Brazilian standards, as being within the criteria \ maximum and minimum limits, as well as being effective to meet all the requirements of a quality floor: withstand high traffic and load variations, weather resistance, user safety and good rolling conditions.

KEYWORDS:

Concrete Bituminous. Trace. Paving. Essay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Esquema de estrutura de um pavimento flexível	17
Figura 2 – Esquema de estrutura de um pavimento rígido	18
Figura 3 – Tipos de revestimento	19
Figura 4– Corpo de Prova Faixa B segundo DNIT	22
Figura 5– Corpo de Prova Faixa C segundo DNIT	22
Figura 6 – Equipamento Completo.....	31
Figura 7 – Viscosímetro <i>Saybolt-Furol</i>	34
Figura 8 – Pilhas de pó de micaxisto gerada do processo de lavagem.....	46
Figura 9 – Pilhas de pedra de granito	46
Figura 10 – Análise por peneiramento	47
Figura 11– Exemplo de pavimento que sofre de fadiga.....	50
Figura 12– Exemplo de relatório do fornecedor.....	50
Figura 13 – Aditivo dope comercializado em Goiás	51
Figura 14 – Amostra submetida ao ensaio de abrasão.....	54
Figura 15 – Amostra após o ensaio de abrasão	54
Figura 16 – Amostra de agregado após peneiração	57
Figura 17– Gráfico da curva granulométrica da Brita 0.....	58
Figura 18 – Gráfico curva granulométrica Brita 1	59
Figura 19 – Gráfico curva granulométrica Pó de Brita	60
Figura 20 – Amostras durante ensaio	60
Figura 21– Aparelho para determinação do ponto de fulgor e combustão e vaso Cleveland ..	62
Figura 22 – Temperatura x Viscosidade.....	63
Figura 23 – Curva granulométrica da dosagem.....	56
Figura 24 – Misturas para montagem dos CPs.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Parâmetros para camadas de rolamento e camada binder	21
Quadro 2– Tipos de rochas comumente usados para na pavimentação no país	45
Quadro 3– Resultado ensaio Los Angeles	54
Quadro 4– Resultado ensaio índice de forma.....	55
Quadro 5– Resultado ensaios com CAP	62
Quadro 6 – Temperatura x Viscosidade	63

LISTA DE TABELA

Tabela 1– Porcentagem em massa para cada faixa granulométrica do DNIT.....	20
Tabela 2– Vazios do agregado mineral.	23
Tabela 3– Graduação para Ensaio	25
Tabela 4– Carga Abrasiva	26
Tabela 5– Determinação da graduação do material após análise granulométrica.....	28
Tabela 6– Determinação do solo quanto ao equivalente de areia.....	32
Tabela 7– Massa mínima, por amostra de ensaio.....	32
Tabela 8– Dimensões nominais das peneiras utilizadas segundo o DNER-ME 035/95	48
Tabela 9– Ensaio de Durabilidade do Agregado	4
Tabela 10– Planilha de Granulometria Brita 0	57
Tabela 11 – Planilha de Granulometria Brita 1	58
Tabela 12– Planilha de Granulometria Pó de Brita	59
Tabela 13– Resultado equivalente de areia	61
Tabela 14– Traço calculado.....	4
Tabela 15 – Traços com variação de CAP	66
Tabela 16 – Ensaio de Estabilidade, Fluência e Tração.	58
Tabela 17 – Ensaio final	69
Tabela 18 – Dosagem Ideal	70

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CP	Corpo de Prova
cp	Centipoise
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ES	Especificação de Serviço
ME	Método de Ensaio
NBR	Norma Brasileira
PRO	Procedimentos
SSF	Segundos <i>SAYBOLT-Furol</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS.....	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
1.3	METODOLOGIA	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	CONCRETO BETUMINOSO.....	17
2.1	TIPOS DE PAVIMENTO.....	17
2.1.1	Revestimentos Flexíveis	17
2.1.2	Revestimentos Rígidos	18
2.1.3	Semirrígido	19
2.2	TIPOS DE CIMENTO ASFÁLTICO	19
2.3	FAIXAS DO CONCRETO BETUMINOSO	20
2.4	ENSAIOS-NORMAS	23
2.4.1	Maquinário para execução da obra.....	23
2.4.2	Coleta das amostras	24
2.4.3	Ensaio de Abrasão Los Angeles	24
2.4.4	Ensaio de Durabilidade pela ação de Sulfato de Sódio e Magnésio.....	26
2.4.5	Ensaio do Índice de Forma.....	27
2.4.5.1	Método de Ensaio 086 – Determinação do Índice de Forma (DNIT, 1994)....	27
2.4.5.2	NBR 7809 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro (ABNT, 2006)	29
2.4.6	Adesividade ao ligante betuminoso.....	30
2.4.7	Equivalente de areia.....	30
2.4.8	Granulometria	32
2.4.9	Ensaio de impurezas orgânicas	33
2.4.10	Viscosidade.....	33
2.4.11	Determinação do Ponto de Amolecimento	35
2.4.12	Determinação do Ponto de Penetração.....	35
2.4.13	Ponto de fulgor e de combustão	36
2.4.14	Ensaio Marshall.....	37

2.4.15	Tração por compressão diametral	40
2.4.16	Densidade	40
2.4.17	Porcentagem de Betume	42
2.5	VARIAÇÕES NA DOSAGEM DO CBUQ	42
2.6	MATERIAIS DA REGIÃO DE Anápolis	43
2.6.1	Agregados	43
2.6.2	CAP	49
2.6.3	Filer	52
3	ESTUDO DE CASO	53
3.1	PROCEDÊNCIA DOS MATERIAIS	53
3.2	PROCESSO EXPERIMENTAL	53
3.2.1	Ensaio Abrasão Los Angeles	53
3.2.2	Índice de forma	55
3.2.3	Ensaio de Durabilidade pela ação de sulfato de sódio	55
3.2.4	Granulometria	57
3.2.5	Equivalente de Areia	60
3.2.6	Determinação de Impurezas Orgânicas	61
3.2.7	Adesividade e Ligante Betuminoso	61
3.2.8	Viscosidade, Ponto de Amolecimento, Ponto de Penetração, Pontos de Fulgor e de Combustão	62
3.3	CÁLCULO DA DOSAGEM	63
3.3.1	Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall, Tração por Compressão Diametral e Porcentagem de Betume	67
3.4	TRAÇO FINAL	70
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71

REFERÊNCIAS

1 INTRODUÇÃO

Pavimento é uma estrutura constituída por camadas, em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são colocados em contato, resultando em uma camada final tanto quanto possível impermeável, que receberá diretamente a ação do rolamento de veículos e que deverá oferecer segurança e resistência ao desgaste, conforme especifica o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT, 2006a).

Ainda no Manual de Pavimentação, o revestimento é determinado para cada rodovia de acordo com o “N”, número equivalente de operações do eixo simples padrão e, de acordo com os parâmetros de tráfego usado no dimensionamento, para rodovias com o número N maior que 5×10^6 , é recomendado o uso de revestimento de concreto betuminoso. Definir o tipo ideal de pavimento para vias públicas requer estudo específico de cada obra. O projeto deve considerar características como intensidade de tráfego, propriedades geotécnicas da região e a interface com o sistema de drenagem superficial.

O concreto asfáltico pode ser definido na Especificação de Serviço 031 – Pavimentos Flexíveis: Concreto Asfático (DNIT, 2006b) como uma mistura executada a quente, com equipamentos adequados, constituída de material agregado, material de enchimento e cimento asfáltico, que sempre será espalhada e compactada a quente. Para que este concreto possa ser utilizado em obra deve apresentar por parte do fabricante, certificados de resultados de análise dos ensaios de caracterização que assegurem a qualidade da massa asfáltica.

Portanto, esses procedimentos experimentais e um estudo da dosagem da mistura asfáltica são fundamentais para se atingir os melhores desempenhos de cada material individualmente e, propriamente dito, dentro da mistura. As quantidades pré-definidas de ligante e a graduação do agregado devem ser eficazes para atender todas as exigências de um pavimento de qualidade conforme as diretrizes do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. Para as dosagens, o processo mais utilizado no Brasil é o método Marshall - norma ME 043 (DNIT, 1995), que consiste em determinar a princípio qual a graduação dos agregados são adequados às faixas especificadas pelo DNIT e logo em seguida determina o teor ótimo de ligante asfáltico, que ao compor a mistura, satisfaz aos requisitos do projeto de mistura. Diante disso, espera-se encontrar o traço de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) ideal para as matérias-primas disponíveis na região da cidade de Anápolis.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em tempos de inovações tecnológicas, buscar uma melhoria na execução de atividades no ramo da construção civil é de amplo destaque. O revestimento asfáltico é formado pela mistura de materiais pétreos, material ligante e derivado do petróleo que devem ser processados de forma correta a fim de fornecer impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, comodidade e segurança ao usuário, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previsto para o local, ou seja, a melhor mistura possível, utilizando a máxima capacidade dos materiais individualmente e sua eficiência na composição da massa asfáltica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

A pesquisa teve como objetivo geral estudar a dosagem para determinação do traço ideal para revestimento asfáltico betuminoso tipo flexível na faixa C, fazendo o uso de materiais disponíveis na região de Anápolis-Goiás.

1.2.2 Objetivos específicos

Analisar os componentes da massa asfáltica e suas propriedades físico-químicas e obter o melhor desempenho de cada, individualmente e dentro da mistura asfáltica.

Realizar os ensaios para determinação da dosagem e qualidade do concreto betuminoso, dos agregados e do ligante.

Definir através de ensaio, as características da massa asfáltica, a porcentagem de betume necessária e determinar, pelo Método Marshall, estabilidade e resistência.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada é baseada nos ensaios práticos de laboratório com foco em realizar os seguintes ensaios para cada componente da mistura individualmente conforme indicam a ES 031 – Pavimentos Flexíveis: Concreto Asfáltico (DNIT, 2006b), Bernucci et.al. (2006) e Pinto (2018), para Concreto Betuminoso Usinado a Quente:

Ensaaios com os materiais pétreos:

- DNER – ME 35/1998: Agregados – Determinação da Abrasão " Los Angeles";
- DNER – ME 89/1994: Agregados – Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio e Magnésio;
- Índice de Forma:
 - DNER – ME 86/1994: Determinação do Índice de Forma;
 - ABNT NBR 7809/2006 – Agregado graúdo: Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro;
- DNER – ME 78/1994: Adesividade e Ligante Betuminoso;
- DNER – ME 54/1979: Equivalente de Areia;
- DNER – ME 83/1998: Análise Granulométrica;
- DNER – ME 55/1995: Determinação de Impurezas Orgânicas;

Ensaaios com o CAP:

- Viscosidade:
 - DNER – ME 04/1994: ABNT NBR 14950/2003 – Materiais betuminosos – Determinação da Viscosidade Saybolt Furol;
 - ABNT NBR 15184/2004: Materiais betuminosos – Determinação da Viscosidade em Temperaturas Elevadas Usando um Viscosímetro Rotacional;
- DNIT – ME 131/2010: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola;
- DNIT – ME 155/2010: Material asfáltico – Determinação da penetração;
- DNER – ME 148/1994: ABNT NBR 11341/2008 – Derivados do Petróleo - Determinação dos Pontos de Fulgor e Combustão em Vaso Aberto Cleveland;

Após definir as porcentagens de cada material, serão dosados três traços de massa asfáltica, com variação da porcentagem de betume, em três corpos de prova, e assim serão executados os ensaios:

- DNER – ME 43/1995: Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall;
- DNIT – ME 136/2018: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral;
- DNER – ME 117/1994: Mistura betuminosa – Determinação da densidade aparente;
- DNER – ME 53/1994: Porcentagem de Betume;

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para uma melhor apresentação e compreensão, dividiu-se o trabalho em quatro capítulos. A seguir são apresentados os principais tópicos de cada um deles:

Capítulo 1: Introdução: Informa a importância da pavimentação e as normas a serem seguidas para a melhor execução. Também indica as justificativas pertinentes do tema escolhido, demarcando e enunciando os objetivos, a metodologia e as normas empregadas.

Capítulo 2: Referencial Teórico: Expõe o órgão regulamentador e as normas utilizadas. Encontram-se informações quanto aos tipos de pavimentos, as faixas granulométricas existentes, os ensaios, parâmetros e normas a serem estudadas para análise da faixa escolhida e os materiais a serem empregados.

Capítulo 3: Estudo de caso: Exemplifica a realização os ensaios, apresentação e análise dos resultados, menciona e justifica os materiais utilizados e as tabelas dos traços realizados na pesquisa.

Capítulo 4: Manifesta as considerações finais, comenta os resultados e a importância do estudo da dosagem.

2 CONCRETO BETUMINOSO

2.1 TIPOS DE PAVIMENTO

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada que receberá toda a sobrecarga dos veículos e ação climática diretamente (BERNUCCI et.al., 2006). O revestimento é definido em cada rodovia de acordo com o “N”, número equivalente de operações do eixo simples padrão durante um período da contagem do tráfego de cada rodovia e para rodovias com o número N maior que 5×10^6 , o Manual de Pavimentação do DNIT recomenda que seja adotado o revestimento de **concreto betuminoso**.

Conforme o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006a) e Bernucci et.al. (2006) existem as seguintes classificações de pavimento:

2.1.1 Revestimentos Flexíveis

É aquele pavimento em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, recebe e distribui a carga em parcelas equivalentes entre as suas camadas. Um exemplo típico é o pavimento composto por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso e revestida por uma camada asfáltica. O pavimento flexível apresenta maior facilidade de manutenção e implantação, por isso é uma opção interessante para obras que visam menores custos de execução. A Figura 1 demonstra um esquema de estrutura de um pavimento flexível.

Figura 1– Esquema de estrutura de um pavimento flexível



Fonte: Araújo, 2008.

Os revestimentos flexíveis podem ser divididos em duas categorias: betuminosos ou calçamento.

Os revestimentos flexíveis **betuminosos** são a combinação de agregados e compostos betuminosos e são obtidos através do processo de penetração, que pode ser invertida ou direta, ou por processo de mistura, onde o agregado é envolvido com o material betuminoso, antes da compressão.

Já os revestimentos flexíveis por **calçamento** têm a sua a sua execução restrita a pátios de estacionamento, vias urbanas e alguns acessos viários.

Pinto (2018) cita que pavimentos flexíveis construídos com concreto asfáltico, recebem o nome de:

- Camada de rolamento ou revestimento (capa);
- Camada de ligação (*binder*);
- Camada de nivelamento;
- Camada de base.

2.1.2 Revestimentos Rígidos

É o revestimento que possui uma alta rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, recebe e absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Um exemplo típico dessa classificação é o pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland. O concreto é composto de uma mistura rica de cimento Portland, areia, agregado graúdo e água, distribuídos em uma camada adensada. Essa camada funcionará como revestimento e base do pavimento. A Figura 2 demonstra um esquema de estrutura de um pavimento rígido.

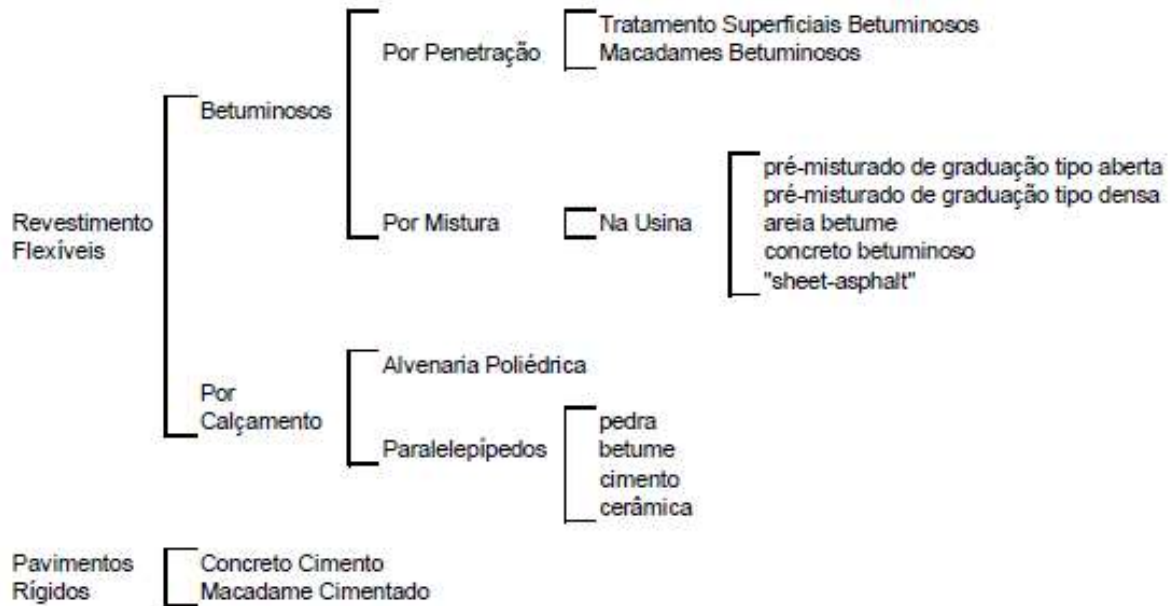
Figura 2 – Esquema de estrutura de um pavimento rígido



Fonte: Araújo, 2008.

Desta forma, os revestimentos podem ser agrupados de acordo com a Figura 3:

Figura 3 – Tipos de revestimento



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

O manual de pavimentação acrescenta ainda uma terceira classificação:

2.1.3 Semirrígido

Este tipo de pavimento caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como, por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica. Resumindo, é um pavimento que agrega e uni os dois tipos de revestimentos citados anteriormente.

2.2 TIPOS DE CIMENTO ASFÁLTICO

De acordo com a Especificação de Serviço – 031 (DNIT, 2006b) para revestimentos flexíveis podem ser empregados os seguintes tipos de cimento asfáltico de petróleo: CAP-30/45, CAP-50/70 e CAP-85/100.

Pinto diz que o CAP 85/100 foi muito utilizado no passado e nos últimos anos vem sendo substituído pelo CAP 50/70 e pelo CAP 30/45, uma vez que estes atendem melhor as condições brasileiras (PINTO, 2018. reimpr). Estudos com o CAP 30/45 indicam algumas características que o fazem ser mais indicado para o uso na região Centro-Oeste. Uma das principais características é alto ponto de amolecimento de 55,5 até 60,5°C, devido às altas

temperaturas durante quase que todo período do ano, e este fator favorece a vida útil do pavimento. Já o CAP 50/70 possui características quanto ao ponto de amolecimento de 49,5 a 55°C e seu o ponto de penetração está em torno de 79% da penetração original do material, sendo também bastante utilizado no estado de Goiás (SANTOS, 2017).

2.3 FAIXAS DO CONCRETO BETUMINOSO

O projeto da mistura do concreto asfáltico inicia com o conhecimento e determinação de uma granulometria de agregados que atenda requisitos de tolerância no que diz respeito ao Método de Ensaio 083 (DNIT, 1998).

No Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, essa condição da composição granulométrica é definida em faixas A, B e C nas especificações gerais para obras rodoviárias, conforme a Tabela 1:

Tabela 1– Porcentagem em massa para cada faixa granulométrica do DNIT

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

Fonte: ES 031 (DNIT, 2006b).

A Especificação de Serviço 031 – Pavimentos Flexíveis: Concreto Asfático (DNIT, 2006b) sugere que deve ser utilizada a faixa, cujo diâmetro máximo é inferior a 2/3 da espessura da camada, levando sempre em consideração a segurança do usuário, para a camada de revestimento. A especificação de serviço ainda indica que as misturas devem atender também os valores limites para as características apresentadas no Quadro 1:

Quadro 1– Parâmetros para camadas de rolamento e camada binder

Características	Método de Ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade mínima (Kgf – 75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, Mpa	DNER-ME 136	0,65	0,65

Fonte: ES 031 (DNIT, 2006b).

Através da Tabela 1, do Quadro 1 e das Figuras 4 e 5, é possível identificar que a faixa C possui uma menor quantidade de vazios em relação a faixa B, que é consideravelmente mais grossa e o agregado tem uma maior graduação. Sendo assim, é possível afirmar que as camadas e faixas de A para C vão diminuindo a quantidades de vazios e conseqüentemente aumenta-se a sua resistência. Portanto a faixa C é mais resistente que as demais.

Figura 4 – Corpo de Prova Faixa B segundo DNIT



Fonte: Próprios autores, 2018.

Figura 5– Corpo de Prova Faixa C segundo DNIT



Fonte: Próprios autores, 2018.

O revestimento ideal, ou seja, com o melhor desempenho é aquele em que há o melhor entendimento de seus constituintes reagindo juntos: agregados de diferentes graduações são mantidos unidos por um ligante asfáltico, havendo limites de vazios para os agregados que são preenchidos pelo ligante. Os valores de vazios mínimos são dados conforme a Tabela 2:

Tabela 2– Vazios do agregado mineral.

Tamanho Nominal Máximo do Agregado		VAM Mínimo %
#	mm	
1 ½”	38,1	13
1”	25,4	14
¾”	19,1	15
½”	12,7	16
3/8”	9,5	18

Fonte: ES 031 (DNIT, 2006b).

2.4 ENSAIOS-NORMAS

Para determinação da dosagem de CBUQ a ser fabricado, por exemplo, camada de rolamento ou camada binder, e o recebimento da massa asfáltica produzida na obra é necessário submeter todos os materiais que serão utilizados a testes tecnológicos e emitir relatórios que atestem a qualidade e as características adequadas. No Brasil atualmente, seguem-se os parâmetros dos métodos de ensaio e procedimentos disponibilizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, já que este departamento é responsável pela parametrização e fiscalização das estradas de tráfego.

A seguir serão apresentados as diretrizes aplicadas no traço de asfalto e seus componentes, conforme indicados pelo DNIT:

2.4.1 Maquinário para execução da obra

Os equipamentos a serem utilizados para realização dos trabalhos variam em função da localidade para instalações da obra conforme ao que foi especificado no início do projeto. Porém para a realização da mistura, conforme cita a Especificação de Serviço 031 (DNIT, 2006b), depende-se de certos equipamentos como:

- Depósito para ligante asfáltico: Onde o ligante asfáltico deve ser aquecido à temperatura que está especificada na norma ES 031 (DNIT, 2006b).
- Silos para os agregados: Possui a função de estocar e separar, as frações dos agregados adequadamente. Esses silos possuem dispositivos que auxiliam na descarga dos materiais durante a dosagem.

- Usina para misturas asfálticas: Equipado com uma unidade que separa os seus agregados, a usina deve dispor de um misturador capaz de produzir uma mistura uniforme com um termômetro com escala de 90° a 210 °C, também deve estar equipada com um pirômetro elétrico para que seja registrada a temperatura dos agregados. Para que a usina seja operada necessita-se de uma cabine de comando e quadros de força, onde a operação de pesagem do ligante asfáltico e dos agregados seja feito de forma instantânea e acumulativa por meio de registros.

Para realização do transporte da mistura para o local da obra utilizam-se caminhões basculantes. Para que o transporte desta mistura seja feita de forma eficiente, os caminhões devem possuir caçambas metálicas limpas, lisas, robustas e ligeiramente lubrificadas com soluções que evitam a aderência da chapa com a mistura.

2.4.2 Coleta das amostras

Quanto à coleta das amostras para os agregados, esta se dá conforme a norma de Procedimento 120 (DNIT, 1997), onde para o agregado gráudo será empregada uma amostra de 50 kg e para agregado miúdo uma amostra de 20 kg, utilizados para os ensaios de caracterização como granulometria, Los Angeles, índice de forma, massa específica e equivalente de areia.

2.4.3 Ensaio de Abrasão Los Angeles

A resistência ao desgaste está inteiramente ligada à ação do tráfego (PINTO, 2018. reimp) e é avaliada pelo método de ensaio 035, Abrasão " Los Angeles" de agregados (DNIT, 1998).

É importante verificar também a norma NBR 12948 - Materiais para concreto betuminoso usinado a quente (ABNT,1993), que apresenta algumas características quanto ao resultado do ensaio de abrasão. Segundo a norma, é permitido a utilização do agregado que obtiver um desgaste de até 40%. O mesmo parâmetro é acrescentado na Especificação de Serviço 147 – Pavimentação Asfáltica: Tratamento Superficial Duplo (DNIT,2012), onde os agregados da mistura também só são aceitos nessa porcentagem. Já na ES 031– Pavimentos Flexíveis: Concreto Asfático (DNIT, 2006b), é permitida a utilização com um desgaste de até 50%.

Quanto à execução do ensaio, procede-se da seguinte forma: O agregado utilizado pode ser a pedra britada, o pedrisco ou o pedregulho. A massa da amostra deve acompanhar a graduação determinada pela Tabela 3 e recomenda-se que seja utilizada a mesma granulometria que será aplicada na obra.

Tabela 3– Graduação para Ensaio

Peneiras Abertura em mm		Amostra – massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	60	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	38	-	-	-	-	5000 ± 50	5000 ± 50	-
38	25	1250 ± 25	-	-	-	-	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	-	-	-	-	-	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000 ± 10	-	-	-
Massas totais (g)		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: ME 035, Abrasão " Los Angeles" de agregados (DNIT, 1998).

Quanto ao procedimento: Após fixar a granulometria (faixa do DNIT), o material é lavado e seco em estufa, com a temperatura em torno de 105°C e permanece na estufa até atingir peso constante. Depois de seco é peneirado e dividido em porções conforme as amostras passadas na peneira para fornecer a graduação do material, afim de definir a

quantidade e o peso das esferas. Então é determinada a massa seca das porções (mn) antes do ensaio. A carga abrasiva deve ser aplicada conforme a Tabela 4:

Tabela 4– Carga Abrasiva

Graduação	Numero de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15
E	12	5000 ± 25
F	12	5000 ± 25
G	12	5000 ± 25

Fonte: ME 035, Abrasão "Los Angeles" de agregados (DNIT, 1998).

Em seguida deve-se verificar a limpeza do tambor, girar as amostras com as esferas (carga abrasiva) com velocidade de 30 a 33 RPM até completar 500 rotações, retirar todo o material do tambor e armazenar as esferas separadamente. As esferas devem ser limpas com escova. A amostra então deve ser passada na peneira de 1,7 mm, ser lavada e seca a temperatura em torno de 105°C, por 3 horas. Verifica-se a massa da amostra lavada e seca (Mn).

Quanto aos resultados: A abrasão é determinada pela fórmula:

$$An = \frac{mn - Mn}{Mn} * 100 \quad (1)$$

Onde:

An = Abrasão “Los Angeles” (com aproximação de 1%);

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G);

mn = massa seca da amostra antes do ensaio;

Mn = massa seca da amostra após o ensaio.

2.4.4 Ensaio de Durabilidade pela ação de Sulfato de Sódio e Magnésio

A durabilidade do agregado está associada ao intemperismo, sendo avaliado pelo Método de Ensaio 089 – Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de

Sódio e Magnésio (DNIT, 1994) onde o agregado é submetido e resiste ao ataque de uma solução padronizada de sulfato de sódio ou de magnésio. Deve ser realizado sempre que se trabalhar com agregados de basalto e, em geral, de rochas ígneas (PINTO, 2018. reimp).

Para a realização deste ensaio, deve ser preparada uma solução de sulfato de sódio ou de sulfato de magnésio, dissolvendo-se uma quantidade de sal de forma que a uma temperatura de 25°C e 30°C seja possível assegurar tanto a saturação quanto a presença de excesso de cristais. Durante a preparação, as soluções devem ser agitadas vigorosamente, em intervalos frequentes até o momento do uso. A mesma deve descansar por 48h, a uma temperatura de 21°C. Já quanto à amostra de agregado, esta deve ser separada em porções de 3000g conforme a granulometria (passante nas peneiras 9,5 mm e 4,8 mm). Todas as amostras devem ser lavadas e secas, até a constância de peso a 105°C.

Durante o ensaio, a amostra deve ser imersa na solução por um período de aproximadamente 18 horas, e o receptáculo da amostragem é coberto para evitar a evaporação e contaminação. Ao completar o tempo, deve ser retirada toda a solução e a amostra é seca em estufa a 105°C. Esse ciclo é repetido quantas vezes se entender necessário. Após finalizar os ciclos, a amostra é lavada com uma solução de cloreto de bário e em seguida em água corrente. Deve ser avaliada, para os resultados, a porcentagem em peso de cada fração que passe na peneira que foi anteriormente retida e quantas e como foram afetadas as partículas maiores de 19 mm, e observar se houve quebra, fendilhamento, laminagem ou desintegração.

2.4.5 Ensaio do Índice de Forma

A finalidade desse ensaio é medir a forma do grão. É possível determinar o índice de forma tanto pelo Método de Ensaio 086 (DNIT, 1994), quanto pelo Método Paquímetro – NBR 7809 (ABNT, 2006).

Quando o resultado é igual a 1, diz-se que o agregado é de ótima cubicidade; quando for igual a 0, ele é classificado como lamelar (achatado ou alongado). Os agregados caracterizados como lamelares são facilmente quebrados pela aplicação das cargas de tráfego, acelerando a criação de buracos na pista da rodovia (PINTO, 2018 reimp.).

2.4.5.1 Método de Ensaio 086 – Determinação do Índice de Forma (DNIT, 1994)

No Método de Ensaio 086 – Determinação do Índice de Forma (DNIT, 1994) os agregados são passados por crivos redutores e geralmente tem resultados que variam de zero a

um. Este método tem o objetivo de determinar o quanto os eixos multidirecionais compostos pelos agregados podem variar. Para os efeitos deste ensaio adota-se o valor do diâmetro do menor crivo com abertura circular determinada pela graduação escolhida.

Procede-se o ensaio da seguinte forma: Analisar a granulometria do material para se conhecer em qual das graduações se enquadra e selecionar as frações de quantidades que será utilizada, por peneiras com os crivos de abertura circular, conforme a Tabela 5.

Tabela 5– Determinação da graduação do material após análise granulométrica

Graduação	Crivos de abertura circular (mm)		Pesos das frações (g)	Crivos redutores correspondentes (mm)	
	Passando	Retido		Crivo I	Crivo II
A	76	63,5	3000	38	25
	63,5	50	3000	32	21
	50	38	3000	25	17
	38	32	3000	19	12,7
B	32	25	2000	16	10,5
	25	19	2000	12,7	8,5
	19	16	2000	9,5	6,3
C	19	16	2000	9,5	6,3
	16	12,7	2000	8	5,3
	12,7	9,5	2000	6,3	4,2
D	12,7	9,5	1000	6,3	4,2
	9,5	6,3	1000	4,8	3,2

Fonte: ME 086 – Determinação do Índice de Forma (DNIT, 1994).

Quanto à realização do ensaio, para cada fração devem ser separadas as partículas retidas no crivo redutor e é anotado o peso do material que passar no primeiro crivo redutor. Este processo deve ser repetido em todas as frações composta pela graduação adotada. A cada fração analisada com relação a seu peso inicial, têm-se as porcentagens retidas em cada crivo redutor. Assim, os agregados são passados por crivos redutores e é calculado um índice de forma (f), que varia de 0 a 1,0. O índice de forma é calculado pela seguinte expressão:

$$f = \frac{P1+0,5*P2}{100n} \quad (2)$$

Onde:

f = índice de forma;

$P1$ = soma das percentagens retidas nos crivos I, de todas as frações que compõem a graduação;

$P2$ = soma das percentagens retidas nos crivos II, de todas as frações que compõem a graduação;

n = número de frações (ou de tamanhos diretrizes) que compõem a graduação escolhida.

2.4.5.2 NBR 7809 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro (ABNT, 2006)

O índice de forma obtido pela utilização do paquímetro é realizado para agregados graúdos com dimensão maior que 9,5 mm. Para a realização deste ensaio é utilizado um paquímetro com resolução de 0,1 mm, devidamente aferido, uma estufa capaz de estabelecer sua temperatura entre $(105 \pm 5^\circ\text{C})$ e peneiras de ensaio das séries normal e intermediária. A preparação da amostra dá-se pela secagem na estufa e análise granulométrica, de forma que divida a amostragem em frações e seja desprezado todo o material passante na peneira de 9,5 mm e também aqueles que possuem massa inferior a 5% do que foi retido.

Quanto ao procedimento experimental, cada fração obtida deve ser quantizada até o número de grãos obtidos, dado pela seguinte equação:

$$Ni = \frac{200}{\sum_{i=1}^n Fi} \quad (3)$$

Onde:

200 = Número de grãos a serem analisados;

Ni = Número de grãos a serem medidos na fração i ;

Fi = Porcentagem de massa retida na fração i ;

Após o cálculo de todas as frações, com o auxílio de um paquímetro, é necessário aferir o comprimento e espessura de cada um dos grãos. Para obtenção dos resultados deve-se calcular o índice de forma através da média ponderada da relação entre comprimento e espessura (c/e) de todos os grãos da fração.

2.4.6 Adesividade ao ligante betuminoso

Ao aumentar consideravelmente o teor de ligante betuminoso, atinge-se um crescimento da resistência coesiva, até que as partículas estejam totalmente recobertas. Entretanto não é necessário acrescentar os ligantes de forma indevida, pois, após determinado momento estes acréscimos não produzirão variações consideráveis na resistência (PINTO, 2018. reimp). A norma regulamentadora é a ME 078 (DNIT, 1994) - Adesividade e Ligante Betuminoso e o ensaio ocorre da seguinte forma: a amostra de agregado com massa de 500 g é lavada e imersa em água destilada por 1 minuto e logo após descansa em estufa por 2 horas com temperatura em torno de 120°C. O ligante betuminoso também deve estar nessa temperatura, caso seja cimento asfáltico. Para de fato realizar o ensaio, a amostra deve estar a 100°C e é envolvida pelo ligante betuminoso por uma espátula que após secar/curar é colocada em um vidro, imersa em água destilada e descansa por 72h a 40°C. O resultado é aceitável caso não haja nenhum descolamento da película betuminosa no tempo de descanso.

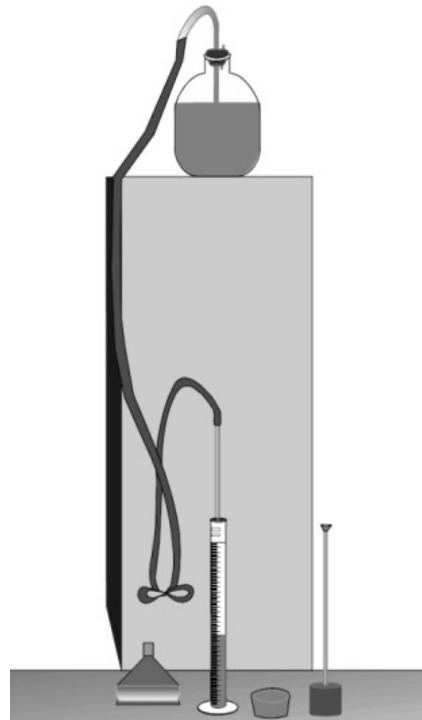
2.4.7 Equivalente de areia

A norma ME 054 (DNIT, 1979) que trata do equivalente de areia tem por finalidade determinar a presença de finos plásticos nos agregados miúdos. Esses finos provocam retração e inchamentos nas misturas betuminosas (BERNUCCI, et. al. 2006).

O ensaio procede-se da seguinte forma: A amostra é obtida através do material que passa na peneira de 4,8mm, que é umidecida antes do peneiramento e deve ser unida com o agregado graúdo que apresenta finos aderentes.

Seguindo as especificações do procedimento, após ser acionado o sifão através de um pequeno tubo, a pinça aberta é assoprada no topo do garrafão, onde a solução está contida e verifica-se o escoamento durante o fechamento da pinça conforme a Figura 6:

Figura 6 – Equipamento Completo



Fonte: DNIT, 1997.

Então, deve-se transferir a solução de trabalho para proveta, até que o menisco de 10 cm seja atingido e com o auxílio de um funil, e deve-se transferir também o conteúdo de um recipiente de medida cheio de amostra preparada e rasada na superfície;

Após o período de 10 minutos, a proveta é tampada com a rolha de borracha e agitada vigorosamente, num movimento alternado, horizontalmente. Executam-se 90 ciclos em aproximadamente 30 segundos, então é retirada a rolha e introduzido o tubo lavador e repousado por 20 minutos sem perturbação;

Após período de 20 minutos, é determinado o nível superior da suspensão argilosa, efetuando a leitura com precisão de 2 mm; Então o pistão é introduzido cuidadosamente na proveta até assentar completamente na areia. Gira-se a haste ligeiramente, sem empurrá-la para baixo, até que um dos parafusos de ajustagem torne-se visível, fixando-o à haste, por meio de um parafuso nele existente. Determina-se o nível do centro de um dos parafusos de ajustagem e adota-o como leitura correspondente ao nível superior da areia. Este nível pode ser determinado medindo-se a distância entre o topo do disco que se apoia na boca da proveta e a base inferior do peso cilíndrico, e subtraindo-se desta, a mesma distância, medida quando a sapata está assentada no fundo da proveta. Com os dados obtidos, calcula-se o equivalente de areia da seguinte forma:

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \times 100 \quad (4)$$

O resultado do ensaio é apresentado na forma de média aritmética de três repetições do ensaio com a mesma amostra, onde deve ser observada a Tabela 6:

Tabela 6 – Determinação do solo quanto ao equivalente de areia

Equivalente de Areia	Classificação
E.A > 30	Solo satisfatório
E.A < 20	Solo ruim
20 > E.A > 30	Recorrer aos ensaios clássicos de caracterização

Fonte: ME 054 – Equivalente de areia (DNIT, 1997).

2.4.8 Granulometria

A granulometria do agregado é uma das características mais importantes no estudo de dosagem do concreto betuminoso, pois asseguram estabilidade aos pavimentos, em consequência do maior atrito interno obtido pelo ajustamento das partículas, entre variadas graduações: da mais graúda até a mais fina. A norma ME 083 (DNIT, 1998) - Análise Granulométrica realiza-se através da seguinte metodologia: A amostra é dividida em porções conforme a Tabela 7:

Tabela 7– Massa mínima, por amostra de ensaio.

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
Agregados miúdos:	
4,8	1
Agregados graúdos:	
9,5	5
19,0	7
25,0	10
38,00	15
50,00	20

Fonte: ME 083 – Análise Granulométrica (DNIT, 1998).

Em seguida são levadas à estufa e secas com temperatura em torno de 110°C e são esfriadas em temperatura ambiente para se determinar a massa total. Em seguida, passam por peneiramento mecânico ou manual e é pesado, considerando o material pulverulento e o que tenha ficado preso nas malhas, o material retido em cada peneira.

Para os resultados são calculadas: porcentagem de material passando em cada peneira e porcentagem acumulada de material seco em cada peneira. Por fim, é possível determinar o módulo de finura e a classificação o agregado.

2.4.9 Ensaio de impurezas orgânicas

Matérias de composição orgânica podem interferir no desempenho da massa asfáltica. O Método de Ensaio 055 (DNIT, 1995) - Determinação de Impurezas Orgânicas determina a estimativa da quantidade de compostos orgânicos presentes no agregado miúdo que será utilizado na argamassa asfáltica. Para a realização deste ensaio deve-se colher uma amostra com cerca de 200g de areia. O experimento procede-se da seguinte forma: colocar em um frasco elenmeyer 200g de areia seca ao ar e adicionar 100 ml de solução de hidróxido de sódio e então agitar rigorosamente o frasco até que o ar seja completamente removido, deixando-o em repouso por 24 horas. Em outro frasco elenmeyer colocar 100 ml de solução preparada (3 ml da solução de ácido tânico a 2% com 97 ml da solução de hidróxido de sódio a 3%), agitar e deixar em repouso por 24 horas, e então filtrar cada uma das soluções recolhendo cada uma delas em um tubo Nessler.

Após o procedimento avaliar o índice de cor, se a solução apresentar cor mais escura que a solução padrão, existe a possibilidade de a areia ser portadora de compostos orgânicos nocivos, e para se conseguir um melhor resultado, orienta-se realizar ensaios posteriores para a aprovação ou rejeição da areia utilizada.

2.4.10 Viscosidade

O ensaio de viscosidade tem como objetivo medir a consistência dos materiais betuminosos em estado líquido. Definindo a relação entre a viscosidade e temperatura é possível, em laboratório e em campo, quantificar de forma prática as temperaturas adequadas para a mistura, espalhamento e compactação da massa asfáltica. As curvas de temperatura × viscosidades são de extrema importância para que não ocorra o aquecimento inadequado do ligante, evitando desperdícios e acidentes (PINTO, 2018 reimp.).

Conforme a ES 031 (DNIT, 2006b), a viscosidade pode ser obtida pelo Método de Ensaio 004 (DNIT, 1994) que recomenda, preferencialmente, que seja medida nas temperaturas de 121°C, 135°C, 149°C, 163°C, 177°C, 204°C e 232°C e que a viscosidade estudada seja observada de 85 a 95 segundos, com a temperatura do ligante entre 107°C e 177°C. A ME 004 ainda determina que sejam utilizadas as referências da norma NBR 14950 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol (ABNT, 2003).

O ensaio da norma é dividido em dois procedimentos, onde no procedimento **A** a temperatura analisada varia de 21°C e 99° C e no procedimento **B** a temperatura varia de 120° C e 240°C. Procede-se ainda de forma simples e rápida e é medido em segundos onde o asfalto flui no orifício (Furol), nas temperaturas descritas na norma, preenchendo um frasco de 60 cm³ (viscosímetro).

A Figura 7, demonstra o aparelho utilizado no ensaio Saybolt-Furol:

Figura 7 – Viscosímetro Saybolt-Furol



Fonte: Próprios autores, 2018.

Em consulta a Especificação de Material 095- Cimentos asfálticos de petróleo (DNIT, 2006c), esta indica que também é possível obter a viscosidade através de um viscosímetro rotacional, como por exemplo, o aparelho Brookfield. O viscosímetro Brookfield, por ser de fácil manuseio e por determinar a viscosidade com certa rapidez, é bastante utilizado para asfaltos diluídos e cimentos asfálticos (PINTO, 2018. reimp). A NBR 15184 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um

viscosímetro rotacional (ABNT, 2004) dispõe que a viscosidade do asfalto é medida pela resistência relativa à rotação, correspondente ao torque que é aplicado a uma haste imersa em uma pequena amostra de asfalto que está contida em um recipiente termostaticamente controlado. A viscosidade do asfalto é indicada em pascal/segundo, milipascal/segundo ou centipoise, e é necessário especificar o torque e a velocidade.

2.4.11 Determinação do Ponto de Amolecimento

De acordo com a ME 131 (DNIT, 2010), para que seja determinado o ponto de amolecimento dos materiais asfálticos na faixa de 30°C a 157°C, utiliza-se a aparelhagem anel e bola. Esse ensaio tem por definição o uso de uma bola de aço, com dimensão e peso especificados por norma, no centro de uma amostra do material que está condicionado, dentro de um anel também padronizado. O conjunto que envolve o anel e a bola é colocado dentro de um recipiente com água para um banho. Essa água é aquecida a uma taxa de temperatura controlada que gira em torno de 5°C/min.

Quando ocorre o deslocamento da amostra de asfalto juntamente com a bola para o fundo da placa, devido ao amolecimento do asfalto e ao peso que a bola possui, é anotada a temperatura em que se encontra o material nesse exato momento para que se tenha a medida do ponto de amolecimento e esse mesmo teste é feito com duas amostras do material. Caso a temperatura em que ocorreu o amolecimento e o deslocamento para as duas amostras possuir diferença maior que 2°C, o ensaio é refeito (GARCIA, 2016).

2.4.12 Determinação do Ponto de Penetração

A penetração do CAP é determinada pela distância que uma agulha penetra verticalmente em uma amostra de cimento asfáltico. Quanto maior for a penetração, mais “mole” será o cimento asfáltico

O ensaio é regido pela norma ME 155 - Determinação da penetração do material asfáltico (DNIT, 2010), onde é determinada e avaliada a consistência do asfalto, que é a resistência a fluir dependendo da temperatura (estado de fluidez). Para a execução deste ensaio são necessários, um recipiente de penetração, um penetrômetro, agulhas, cuba de transferência, cronômetro graduado e termômetros de imersão total. O experimento procede-se pela medida da penetração da agulha (100 g) no recipiente de penetração após 5 segundos a

25°C. O resultado é obtido pela penetração em décimos de milímetro e deve ser a média obtida de no mínimo três determinações.

2.4.13 Ponto de fulgor e de combustão

Uma característica do material betuminoso é determinada pelo Método de Ensaio 148 (DNIT, 1994) realizado com base na NBR 11341: Derivados do Petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland (ABNT, 2008). Esta metodologia de ensaio ocorre com um considerável de aumento de temperatura e é utilizado para materiais viscosos com ponto de fulgor igual ou maior do que 79°C. Também é realizado para se obter o ponto de combustão, que é definido como uma temperatura acima da temperatura do ponto de fulgor.

O ensaio se inicia pelo enchimento da cuba de ensaio com 70 ml de amostra e colocação da mesma no centro do aquecedor. Caso aconteça de o líquido escorrer pelo externo da cuba, a mesma deve ser retirada, lavada, seca e o ensaio é iniciado novamente, por questões de segurança. Toda e qualquer espuma ou bolha de ar na superfície deve ser desfeita ou removida sem alterar o nível da amostra.

Seguindo com o ensaio, primeiramente deve-se aquecer a amostra de forma constante de 14-17°C/min. Quando a temperatura da amostra estiver a 56°C abaixo do ponto de fulgor esperado deve-se diminuir a temperatura para que a taxa de aumento nos últimos 28°C antes do ponto de fulgor seja em torno de 5-6°C/min. Quando a temperatura chegar ao ponto de 28°C antes do ponto de fulgor esperado deve-se passar a chama de ensaio através do centro da cuba em ângulo reto com movimentos contínuos e suavemente, de forma que se aplique em linha reta ou ao longo de uma circunferência de um círculo com raio mínimo de 150 mm (± 1). O centro da chama de ensaio é movido em apenas uma direção e na próxima aplicação da chama, deve ser passada na direção oposta à da aplicação anterior. O tempo consumido na passagem da chama pela cuba em cada caso deve ser de $1,0 \pm 0,1$ s,

Considera-se que o ponto de fulgor é a menor temperatura do líquido em que uma chama larga aparece e se propaga acima da superfície da amostra e se esvai rapidamente. Deve se observar que o surgimento de um halo azulado não é o ponto de fulgor verdadeiro e deve ser ignorado. O ponto de fulgor deve ser corrigido, caso a pressão barométrica ambiente do laboratório no momento do ensaio for diferente de 101,3 Kpa, pela equação:

$$\text{Ponto de fulgor} = C + 0,25 * (101,3 - k) \quad (5)$$

Onde:

C é o ponto de fulgor obtido, em °C;

k é a pressão barométrica ambiente, em Kpa.

Para determinar o ponto de combustão, a amostra deve continuar sendo aquecida e continuar a passagem da chama, até que a amostra entre em combustão e sustente a queima por aproximadamente 05 segundos. Nesse exato momento registra-se a temperatura da amostra como o ponto desejado.

2.4.14 Ensaio Marshall

O Método de Ensaio 043 (DNIT, 1995) Ensaio Marshall é um dos ensaios mais utilizados no Brasil no meio rodoviário e tem como finalidade indicar a qualidade e a resistência, além de ser executada para a determinação da dosagem de concreto betuminoso usinado a quente. Inicialmente o ensaio permite conhecimento da granulometria e posteriormente será determinado o teor de ligante, a fim de atingir os requisitos do projeto de mistura. O ensaio procede-se da seguinte forma conforme Bernucci et.al.(2006):

Primeiramente faz-se a seleção da faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com os limites das normativas do DNIT e faz-se a escolha da composição dos agregados de forma a enquadrar a sua mistura, ou seja, é escolhido o percentual em massa de cada agregado para formar a mistura. Em seguida, faz-se a determinação das massas específicas reais do cimento asfáltico de petróleo e dos agregados disponíveis.

Então escolhe-se as temperaturas de mistura e de compactação, a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante. A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser equivalente para que a sua viscosidade esteja entre 75 e 150 SSF (Segundos *Saybolt-Furol*). A temperatura do ligante não deve ser inferior a 107 °C e nem superior a 177° C, e a temperatura dos agregados devem ser de 10 a 15°C acima da temperatura definida para o ligante sem ultrapassar 177°C. A temperatura de compactação deve ser equivalente para que o ligante apresente viscosidade na faixa de 125 a 155 SSF;

Em seguida é possível determinar e adotar os teores de asfalto para os diferentes grupos de CP a serem moldados, e cada grupo deve ter no mínimo três CPs: é sugerido um teor de asfalto em % para o 1º grupo e os outros grupos terão o teor de asfalto acima (sugestão: T+0,5% e T+1%) e abaixo (sugestão: T-0, 5% e T-1%).

A montagem dos corpos de prova se dá nas seguintes etapas: adição de asfalto aos agregados, homogeneização, colocação da mistura no molde, compactação da mistura e extração do CP. Após o resfriamento e desmoldagem dos CPs, verifica-se as dimensões do mesmo (diâmetro e altura) e é determinada a sua massa seca (MS) e submersa em água (MSsub). Com esses valores obtém-se a massa específica aparente (GMB) e em comparativo com a massa específica teórica (DMT) é possível obter as relações de volume típicas da dosagem. A partir do teor de asfalto do grupo dos CPs, em questão (%A) ajusta-se o percentual em massa de cada agregado, ou seja:

$$\%n = \%n \cdot x(100\% - \%a) \quad (6)$$

Onde:

$\%n$ é o percentual da massa do agregado 'n' na mistura asfáltica.

Com base em $\%n, \%a$ e nas massas específicas reais constituintes, obtém-se a DMT correspondente ao teor de asfalto considerável (% a), usando-se a equação:

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f}} \quad (7)$$

Aonde:

$\%a$ = percentagem de asfalto;

$\%Ag, \%Am$ e $\%f$ = percentagem do agregado graúdo, agregado miúdo e filer, respectivamente;

G_a, G_{Ag}, G_{Am} e G_f = massas específicas reais do asfalto, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do filer;

O cálculo dos parâmetros de dosagem para cada corpo de prova é dado através da equação 8:

$$V = Ms - MSub \quad (8)$$

A massa específica aparente da mistura é obtida pela equação 9:

$$Gmb = \frac{Ms}{V} \quad (9)$$

Os valores volumétricos a seguir devem ser sempre calculados com valores de GMB médio, de três corpos de prova:

Calcula-se o **volume de vazios**, através da equação 10:

$$Vv = \frac{DMT - Gmb}{DMT} \quad (10)$$

Calcula-se a porcentagem em **massa dos agregados** pela equação 11:

$$\sum \%n = 100 - \%a \quad (11)$$

Os **vazios do agregado** mineral são obtidos pela equação:

$$VAM = 100 - (Gmb * \sum \frac{\%n}{Gsb}) \quad (12)$$

E por fim, a relação **betume/vazios** é dada por:

$$RBV = 100 * (\frac{VAM - Vv}{VAM}) \quad (13)$$

Após as medidas volumétricas, os CPs são imersos em banho-maria a 60°C em torno de 30 a 40 minutos. Cada CP deve ser retirado e colocado rapidamente dentro do molde de compressão, então se determina por meio da prensa Marshall, os seguintes fatores mecânicos:

Estabilidade (N): definida pela carga máxima a qual o CP resiste antes da ruptura, como um deslocamento ou rompimento de agregado de modo a causar diminuição da carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante de 0,8 mm/s;

Fluência (mm): É o deslocamento na vertical apresentado pelo CP correspondente a aplicação da carga máxima.

Teor de ligante asfáltico: Determinado fazendo o uso de dos parâmetros volumétricos Vv e RBV .

2.4.15 Tração por compressão diametral

O processo para determinação da resistência à tração por compressão diametral está submetido à norma ME 136 (DNIT, 2018), onde é possível determinar a resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de misturas asfálticas, através do método de compressão diametral.

Para a execução deste ensaio são necessários uma prensa mecânica com sensibilidade igual ou inferior a 19,60 N, uma estufa, um sistema de refrigeração e um paquímetro. Para a preparação da amostra, deve ser moldado um corpo-de-prova de forma cilíndrica, com altura entre 3,50 cm e diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm. Então deve-se medir a altura e o diâmetro do corpo-de-prova, colocá-lo na estufa por 2 (duas) horas, e em seguida, colocar o CP na prensa mecânica aplicando-se a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação de 0,8 0,1 mm/s, até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical e anota-se o valor da carga de ruptura.

Com o valor obtido é calculada a resistência à tração do corpo-de-prova rompido através da equação:

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi DH} \quad (14)$$

Onde:

r – resistência à tração, em kgf/cm²;

F – carga de ruptura, em kgf;

D – diâmetro de corpo-de-prova, em cm;

H – altura do corpo-de-prova, em cm.

2.4.16 Densidade

Uma parcela do material betuminoso penetra nos poros do agregado e outra o envolve (BERNUCCI et. al. 2006). A finalidade principal da determinação das densidades é o cálculo de densidades teóricas de misturas betuminosas. A norma ME 117: Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente (DNIT, 1994) estabelece a densidade de corpos de prova moldados em laboratório. Para a realização deste ensaio deve-se observar a porcentagem de vazios, pois para os CPs com até 7%, pesa-se o corpo de prova ao ar e imerso em água. Já

para os CPs com porcentagem de vazios de 7% a 10%, pesa-se o corpo de prova ao ar, aplica-se parafina fluidificada com um pincel, e pesa-se novamente o corpo de prova parafinado ao ar e imerso na água. Os corpos de prova com porcentagem de vazios superior a 10%, o CP é pesado ao ar, envolvido totalmente em fita adesiva, determinado o peso da fita adesiva, então é aplicada parafina fluidificada ao CP adesivado, por fim, é pesado o corpo de prova com parafina e adesivo ao ar e imerso na água e anota-se a densidade da fita adesiva. Após recolher os dados, calcula-se a densidade aparente do corpo de prova através das seguintes expressões:

No caso de CP com 7% de vazios calcula-se:

$$d = \frac{Par}{Par - Pi} \quad (15)$$

Para CP com 7% a 10% de vazios, calcula-se conforme a equação 16:

$$d = \frac{Par}{Pp - Pi - \frac{Pp - Par}{dp}} \quad (16)$$

E nos corpos de prova com mais de 10% de vazios:

$$d = \frac{Par}{P3 - P4 - \frac{P2}{df} - \frac{P3 - P1}{dp}} \quad (17)$$

Onde:

d = Densidade aparente do CP;

Par = Peso do CP, determinada ao ar;

Pi = Peso do CP imerso em água;

Pp = Peso do CP recoberto com parafina, ao ar;

Ppi = Peso do CP recoberto com parafina, imerso em água;

dp = Densidade aparente da parafina empregada;

P1 = Peso do CP com fita adesiva;

P2 = Peso da fita adesiva;

P3 = Peso do CP, com fita adesiva e recoberto com parafina;

P4 = Peso do CP com fita adesiva recoberto com parafina imerso em água;

df = Densidade aparente da fita adesiva;

Os resultados obtidos devem corresponder a dois ou mais corpos de prova.

2.4.17 Porcentagem de Betume

A norma ME 053 (DNIT, 1994) Porcentagem de Betume indica a porcentagem de vazios do agregado que é preenchida pelo asfalto. O ensaio resulta da seguinte forma: A mistura betuminosa deverá descansar por 1 hora em temperatura de 120°C e logo após será desmanchada para obter-se uma amostra com cerca de 1 kg. Então é colocada em um prato, coberto com um filtro de papel e depositado dentro do centrifugador e este é tampado seguramente. Será colocado então 150 ml de solvente no prato e a amostra é deixada para descansar por 15 minutos, então se ativa o dispositivo centrifugador. A velocidade é aumentada de forma crescente até que a solução de betume venha a diluir-se. Quando a primeira porção de solvente acabar, o aparelho é parado e acrescenta-se uma nova porção. Este procedimento deve ser repetido até o solvente começar a sair claro. Quanto esta situação for atingida, toda a amostra deverá ser guardada na estufa até atingir peso constante. Depois de seco a amostra será pesada novamente e assim é obtido o valor do peso de betume extraído. A porcentagem de betume é dada por:

$$P = \frac{\text{Massa inicial} - \text{Massa final}}{\text{Peso total da amostra}} * 100 \quad (18)$$

Nota: Para ligantes asfálticos, deverá ser utilizado como solvente o tetracloreto de carbono.

2.5 VARIAÇÕES NA DOSAGEM DO CBUQ

Conforme citam Bernucci et.al. (2006) e Pinto (2018), no Brasil, utiliza-se a aparelhagem Marshall para formular o projeto dos concretos asfálticos, sendo este o método mais comum para dosagem. Dentro deste ensaio é possível, diversificar a porcentagem de cimento asfáltico na mistura e assim determinar um teor ótimo.

Além das porcentagens de CAP, um estudo dos agregados permite que sejam variados quanto a sua origem e quanto a sua porcentagem também. Há uma grande variedade de agregados que podem ser utilizados para concreto, porém é necessário levar em consideração

além das características de resistência, também a localização das pedreiras, tendo em vista os custos adicionais de transporte.

As quantidades dos materiais para CBUQ faixa C ainda podem variar de acordo com cada material, conforme cita Bernucci et.al. (2006):

- Brita = 55 a 80%;
- Areia = 12 a 36%;
- Fíler = 3%;
- Cimento Asfáltico de Petróleo (ligante) = 5 a 5,5%.

Entretanto, é importante ressaltar que essas variações serão sempre em função da granulometria do material. Deve-se observar as faixas e os limites e, através do ensaio Marshall, obter a porcentagem de CAP ideal para aquela mistura.

2.6 MATERIAIS DA REGIÃO DE ANÁPOLIS

As diretrizes brasileiras enfatizam o controle tecnológico na execução de revestimentos betuminosos. O controle da qualidade da massa betuminosa depende da uniformidade dos componentes e para um melhor resultado do estudo, é necessário que os agregados tenham origem na mesma fonte, ou seja, de uma mesma pedreira e o areal um mesmo local (PINTO, 2018. reimp).

2.6.1 Agregados

Conforme é destacado em Bernucci et.al (2006) os agregados que podem ser utilizados na produção de concreto betuminoso, são classificados quanto a sua natureza, tamanho e distribuição de grãos.

Quanto a sua natureza, os agregados podem ser diferenciados como naturais, artificiais e reciclados. Os que se classificam como naturais são aqueles provenientes de escavações, dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. Em resumo, esses agregados naturais podem ser empregados no processo de pavimentação da forma que são encontrados na natureza. Os agregados naturais que são obtidos através de rochas naturais são diferenciados em quatro grupos:

Rochas ígneas são aquelas em que no seu processo de solidificação de um estado líquido apresentam textura e modo de ocorrência, granulação e composição químicas muito variáveis.

Rochas sedimentares são formadas por sedimentos causados pelo intemperismo e erosões de rochas preexistentes, que são transportados pela chuva ou ventos.

Rocha metamórfica é composto por rochas ígneas e sedimentares que sofrem aquecimento, pressão ou atividade química.

Areias ou pedregulhos agregados derivados de rochas naturais.

Estes agregados naturais possuem composições variáveis quanto aos seus minerais. Durante a preparação dos ensaios de emulsões asfálticas ME 006 (DNIT, 1994) é possível fazer uma análise petrográfica para matérias que serão aplicados na preparação de misturas asfálticas. Essa análise petrográfica, pode ser realizada a partir de uma análise visual das partículas individuais dos agregados, pode-se medir a quantidade relativa dos tipos de rochas e minerais. Para rochas que serão utilizadas como fontes para agregados a fim de serem utilizadas na pavimentação devem ser submetidas uma análise petrográfica mais detalhada, como a de lamina delgada, onde uma amostra de rocha é cortada por uma serra adiamantada ou laser, montada em uma lamina de vidro e polida com pó abrasivo até a espessura de a amostra ser de apenas 0,03mm. Quando esta amostra é colocada entre dois filtros polarizantes é possível determinar suas propriedades ópticas dos minerais de uma rocha onde ajuda a revelar a origem e evolução da rocha original. No Quadro 2 são apresentados os principais tipos de rochas utilizados como agregados.

Quadro 2– Tipos de rochas comumente usados para na pavimentação no país

Denominação Petrológica	Descrição
Andesito	Variedade de diorito vulcânico, de granulação fina.
Basalto	Rocha básica de granulação fina, usualmente vulcânica.
Conglomerado	Rocha constituída de blocos arredondados ligados.
Diorito	Rocha plutônica intermediária, constituída de plagioclásio com hornblenda, augita e biótica.
Gabro	Rocha plutônica básica de granulação grossa, constituída de plagioclásio cálcico e piroxênio, algumas vezes com olvina.
Gnaisse	Rocha riscada, produzida por condição metamórfica intensa.
Granito	Rocha plutônica ácida, constituída principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo.
Calcário	Rocha sedimentar, constituída principalmente de carbonato de cálcio.
Quartzito	Rocha metamórfica ou sedimentar constituída quase que totalmente por grãos de quartzo.
Riolito	Rocha ácida, de granulação fina, usualmente vulcânica.
Silenito	Rocha plutônica intermediária, constituída de feldspatos alcalinos com plagioclásios, hornblenda, biotita e augita.
Traquito	Variedade de sienito de granulação fina, usualmente vulcânico.

Fonte: Bernucci, 2006.

Na região de Anápolis é utilizado como agregado o micaxisto, que é uma rocha metamórfica que apresenta xistosidade acentuada. No processo de beneficiamento da rocha e do agregado ocorre a lavagem da brita originando o pó de micaxisto disposto em pilhas, antes de serem utilizados durante a produção do CBUQ (Figura 8). O pó de micaxisto é utilizado na composição da mistura asfáltica em forma de material de enchimento.

Figura 8 – Pilhas de pó de micaxisto gerada do processo de lavagem.



Fonte: Araújo, 2008.

Outro tipo de rocha muito utilizada em Anápolis e região, é da família granito que pertence à classe das rochas ígneas; esta classificação possui granulação grossa e esfriamento lento. A Figura 9 mostra pilhas de granito que ficam estocados na Pedreira Anápolis.

Figura 9 – Pilhas de pedra de granito



Fonte: Próprios autores, 2018.

Os agregados a serem utilizados podem ser classificados também quanto ao tamanho, para uso em misturas asfálticas:

Graúdo: é o material com dimensões maiores que 2,0mm, ou seja, é o material que fica retido na peneira N° 10. Os agregados do tipo graúdos mais conhecidos são as britas, cascalhos e seixos.

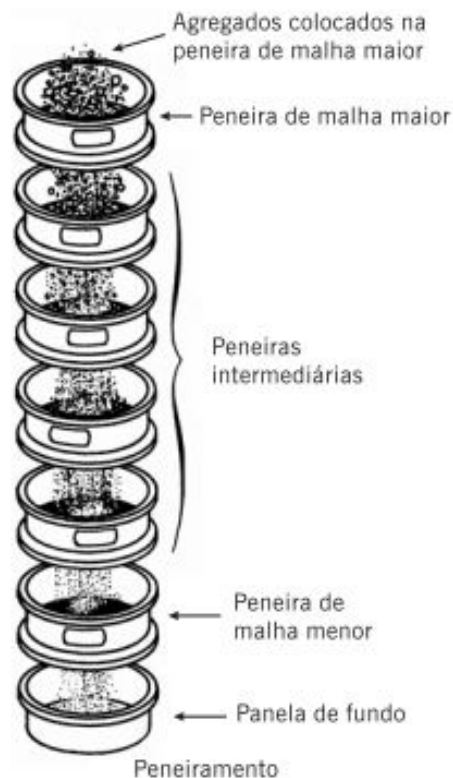
Miúdo: é o material que fica retido na peneira de N° 200. Os agregados desse tipo mais conhecidos são a areia e o pó de brita.

Filler: é um material de enchimento como a cal hidratada e o cimento Portland.

Quanto à distribuição dos grãos, esta é uma das principais características que influí efetivamente nos revestimentos asfálticos. Interfere diretamente nas principais propriedades como rigidez, durabilidade, estabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga, permeabilidade, resistência à deformação permanente e ao dano por umidade induzida, e pode ser determinada através da distribuição granulométrica das misturas asfálticas.

Através de uma análise por peneiramento é possível determinar a distribuição granulométrica. A Figura 10 demonstra um exemplo de peneiras que é utilizado durante o processo de análise granulométrica e a Tabela 8 indica as dimensões destas peneiras.

Figura 10– Análise por peneiramento



Fonte: Bernnuci, 2008.

Tabela 8 – Dimensões nominais das peneiras utilizadas segundo o DNER-ME 035/95

Vão da peneira		Abertura da peneira	
Padrão	Número	Milímetros	Polegadas
75,0mm	-	75,0	3,0
50,0mm	-	50,0	2,0
37,5mm	-	37,5	1,5
25,0mm	-	25,0	1,0
19,0mm	-	19,0	0,75
9,5mm	-	9,5	0,375
4,75mm	4	4,75	0,187
2,36mm	8	2,36	0,0937
2,00mm	10	2,00	0,0789
1,18mm	16	1,18	0,0469
600 μ m	30	0,600	0,0234
425 μ m	40	0,425	0,0168
300 μ m	50	0,300	0,0117
150 μ m	100	0,150	0,0059
75 μ m	200	0,075	0,0029

Fonte: Bernucci, 2006.

Após o processo de peneiramento é possível determinar a distribuição granulométrica dos agregados auxiliando na distinção de tipos de misturas asfálticas, abaixo são denominadas as mais importantes graduações:

- O agregado determinado como **bem graduado** apresenta distribuição granulométrica contínua;
- O agregado determinado como **aberto** apresenta análise granulométrica contínua, mas com um número elevado de vazios;
- O agregado determinado como **uniforme**, apresenta partículas com tamanhos em uma faixa estreita;
- O agregado determinado como **descontínuo**, apresenta pequena fração de agregados com tamanhos intermediários que são muito sensíveis à segregação e devem ser adequadamente trabalhados em misturas asfálticas.

Já para o areal, é comum em misturas asfálticas, utilizar-se preferencialmente areia de leito de rio, devido a sua disponibilidade. Porém, também é comercializado o pó de pedra que está substituindo a areia de leito, pois apresenta boa qualidade, sem danos ao meio ambiente (BERNUCCI et.al., 2006). Quanto ao agregado miúdo, observa-se pela Especificação de Serviço 031 que:

O agregado miúdo pode ser areia, pó de pedra ou mistura de ambos os outros materiais indicado nas Especificações Complementares. Suas partículas individuais devem ser resistentes, estando livres de torrões de argila e de substâncias nocivas. Deve apresentar equivalente de areia igual o superior a 55% (DNIT, 2006b. p 04).

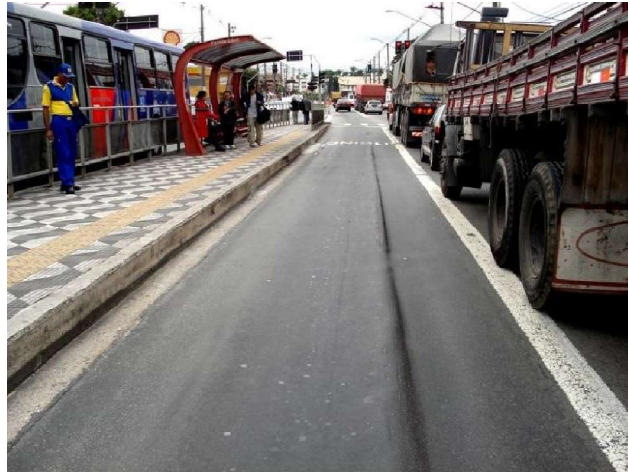
2.6.2 CAP

Atualmente, o principal ligante utilizado na pavimentação é o CAP (Cimento asfáltico de petróleo) que apresenta propriedades como:

No Brasil utiliza-se a denominação CAP para designar esse produto semissólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas [...]. A característica de termoviscoelasticidade desse material manifesta-se no comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo e a intensidade de carregamento, e à temperatura de serviço [...]. O cap é um material quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno e em bissulfeto de carbono (BERNUCCI et. al, 2006. p 26).

As características do cimento asfáltico de petróleo, estão associadas a sua resistência à temperatura, pois ela é definida pelo seu ponto de fluidez. A flexibilidade é outra característica que deve ser levada em consideração durante a escolha do CAP ideal, pois é ela que dá ao pavimento o aspecto técnico de absorção de cargas que é aplicado nas estruturas. Na região Centro-Oeste, onde a temperatura é cerca de 25° C, o CAP mais indicado é o tipo 30/45 que garante evitar fissuras na via (BERNUCCI et.al., 2006). A Figura 11 mostra exatamente como o asfalto sofre quando não é utilizado um CAP com baixo índice de flexibilidade, sofrendo assim a fadiga.

Figura 11– Exemplo de pavimento que sofre de fadiga.



Fonte: Departamento Estadual de Rodagem, 2008.

Quando o CAP é recebido no local da produção de massa asfáltica, ele deve estar acompanhado de um relatório emitido pelo fornecedor, indicando as principais características, pois este relatório serve para controle de qualidade. A Figura 12 apresenta um exemplo de relatório emitido para o CAP tipo 30/45 recebido na empresa Objetivo – Serviços Asfálticos:

Figura 12– Exemplo de relatório do fornecedor

BR PETROBRAS		Nº 1828-18 G		
CERTIFICADO DE ENSAIO				
Produto: Cimento asfáltico 30/45				Código: 71J
Local de Amostragem		TQ 250116D		Laboratório
Data e hora Amostragem		22/09/2018 09:30		Endereço
Data e Hora Recebimento		22/09/2018 10:16		Telefone
Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D5	30 a 45	30	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D 36	52 min	54,6	grau C
Viscosidade Brookfiel 135GC-SP21 20RPM	D4402	374 min	463	cp
Viscosidade Brookfiel 150GC-SP21	D4402	203 min	226	cp
Viscosidade Brookfiel 170GC-SP21	D4402	76 a 285	80	cp
RTFOT - Penetração Retida	D5	60 min	67	%
RTFOT - Aumento do ponto de amolecimento	D36	8 max	5,6	grau C
RTFOT - Ductilidade a 25GC	D113	10 min	>150	cm
RTFOT - Variação em % massa	D2872	0,5 max	-0,096	%
Ductilidade a 25GC	D113	60 min	>150	cm
Solubilidade no Tricloroetileno	D2042	99,5 min	99,9	% massa
Ponto de Fulgor	D92	235 min	358	grau C
Índice de suscetibilidade térmica	X018	- 1,5 a 0,7	-1,2	N/A
Densidade relativa a 20/4 graus celsius	D70	Anotar(1)	1,009	N/A
Aquecimento a 177 GC	X215	NESP (2)	NESP	N/A
<p>Notas:</p> <p>(1) Ensaio não faz parte da especificação, informação para fins de faturamento.</p> <p>(2) NESP= Não espuma</p> <p>Este certificado foi gerado eletronicamente e assinado digitalmente pelo responsável.</p>				

Fonte: Objetivo – Serviços Asfálticos, 2018.

Em alguns casos, é necessário o acréscimo de aditivos para melhorar a funcionalidade do CAP, como a adesividade, uma das características fundamentais para um bom desempenho da camada de asfalto. A adesividade pode ser corrigida com o uso do dope, por exemplo, um dos aditivos mais utilizados devido à sua eficiência e facilidade de aplicação, por ser um produto líquido ou pastoso, à base de aminas terciárias e quaternárias, facilmente misturável no cimento asfáltico (PINTO, 2018. reimp). O engenheiro Omeno acrescenta que:

O grupo químico de alta polaridade do final da molécula do dope se liga à superfície do agregado e a parte não polar do hidrocarboneto chamada surfactante se liga ao asfalto, deste modo os dopes agem como uma ponte de ligação entre o agregado e asfalto. (OMENO; ANTOSCZEZEM JUNIOR, 2005. p 06).

O dope é adicionado ao CAP em pequenas quantidades. Geralmente são adicionados na proporção de 0,5% para 99,5% de CAP, em peso, e deve ser cuidadosamente aplicado, uma vez que pode não agregar nenhum benefício à mistura caso não seja bem homogeneizado ou aplicado uma quantidade muito inferior à necessária. Um tipo de dope encontrado na região de Anápolis é o *Hycling Beta*, conforme Figura 13:

Figura 13 – Aditivo dope comercializado em Goiás



Fonte: Próprios autores, 2018.

2.6.3 Filer

Pinto (2018) explica que o material de enchimento, pode ser composto tanto por pó de calcário, materiais minerais finamente divididos, tais como cimento Portland, cal extinta, quanto qualquer outro material que satisfaça os seguintes pré-requisitos: não deve possuir torrões de argila; Precisa ser inerte em relação aos demais componentes da mistura; Deve ser uniforme e deve passar no mínimo 65% na peneira nº 200 (0,075 mm). Ainda em relação ao uso do filer, diz que:

Muitas controvérsias vêm sendo levantadas quanto à execução do concreto asfáltico sem filer comercial. Por definição o filer é qualquer material que satisfaça aos condicionantes anteriormente citados. Portanto, é pacífico que, se a mistura de agregados satisfizer à curva granulométrica especificada, a adoção do filer comercial teve bom desempenho em serviço. O controle do projeto deve ser feito com o maior rigor possível. (PINTO, 2018. Reimp. p 149).

Assim, dado as informações a respeito dos componentes da mistura, são realizadas as verificações pertinentes para definição da melhor mistura possível com os materiais disponíveis na cidade de Anápolis-GO e região.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 PROCEDÊNCIA DOS MATERIAIS

Os ensaios foram executados com materiais obtidos dentro das recomendações do DNIT, para composição de mistura Marshall para concreto asfáltico camada de rolamento, conforme diretrizes preconizadas pela norma ES 031 – Especificação de Serviço (DNIT, 2006b).

Em conformidade com a norma PRO 120 – Coleta de amostras de agregados (DNIT,1997) utilizou-se 50 kg de amostra de agregado graúdo, classificados como brita 0 e brita 1 da pedra de granito. Por motivos de disponibilidade de materiais, o pó de brita foi utilizado como fíler (amostra de 20 kg). As britas 0 e 1 foram disponibilizadas pela Pedreira Anápolis com mina localizada no próprio município. Depois de tomadas as quantidades requeridas conforme a norma, as amostras foram levadas ao laboratório e, após serem submetidas a um quarteamento, cada amostra foi reduzida para o tamanho apropriado aos ensaios específicos.

O Cimento Asfáltico de Petróleo foi cedido pela empresa **Objetivo – Serviços Asfálticos**, também sediada no município de Anápolis e obteve-se acesso ao laboratório da própria empresa para realizar os ensaios necessários. O CAP utilizado é do tipo 50/70, fornecido conforme a disponibilidade da empresa e a análise de desempenho do tipo 50/70 na região, conforme citado no capítulo 2. O CAP possui o aditivo *Hycling Beta –DOPE* em sua composição que influencia no desempenho da adesividade e conseqüentemente na sua durabilidade, uma vez que os materiais pétreos disponibilizados na região possuem, conforme os resultados dos ensaios, baixa adesividade e, portanto, apresentam um melhor desempenho com esse polímero.

3.2 PROCESSO EXPERIMENTAL

3.2.1 Ensaio Abrasão Los Angeles

Realizou-se de acordo com a referência normativa ME 035- Ensaio de abrasão "Los Angeles" (DNIT, 1998) e executado sem anormalidades. Com uma amostra de 5000 g procedeu-se dois ensaios e seus resultados apresentam, conforme o Quadro 3, um desgaste final em relação à massa total, de:

Quadro 3 – Resultado ensaio Los Angeles

Desgaste em relação à massa total	Agregado Graúdo	Ensaio	Origem
23,0 %	Graduação B	Ensaio 1	Pedreira Anápolis
24,9 %		Ensaio 2	

Fonte: Próprios autores, 2018.

Conforme a NBR 12948 – Ensaio de Abrasão Los Angeles (ABNT,1993), o índice de desgaste por abrasão deve ser inferior a 40% em massa do material para uso em Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). O índice obtido também atende ao disposto na ES 031 (DNIT, 2006b). A Figura 14 apresenta a amostra antes do ensaio e a Figura 15, logo após o ensaio:

Figura 14 – Amostra submetida ao ensaio de abrasão

Fonte: Próprios autores, 2018.

Figura 15 – Amostra após o ensaio de abrasão

Fonte: Próprios autores, 2018.

3.2.2 Índice de forma

Procedeu-se conforme a NBR 7809 – Índice de forma determinado pelo método do paquímetro (ABNT,2006) respeitando os parâmetros e sem anormalidades. O resultado encontrado para amostra ensaiada é indicada no Quadro 4:

Quadro 4– Resultado ensaio índice de forma

Índice de forma	Classificação da forma	Origem
0,64	Cúbica	Pedreira Anápolis

Fonte: Próprios autores, 2018.

Esse valor foi calculado pela média ponderada das relações entre comprimento e espessura de todos os grãos medidos. Atende ao disposto no item 5.1, da ES 031 (DNIT, 2006b), item Materiais.

3.2.3 Ensaio de Durabilidade pela ação de sulfato de sódio

O agregado foi ensaiado em 05 (cinco) ciclos com solução de sulfato de sódio. O resultado é determinado pela média dos resultados encontrados e a sequência de 01 ciclo foi em torno de 16 a 18 horas, imerso na solução a 21°C e repousado de 4 a 6 horas em estufa a 110°C até a constância de peso. A Tabela 9 apresenta os resultados:

Tabela 9– Ensaio de Durabilidade do Agregado

Pedreira:		Anápolis			Brita 1					
Tipo de Rocha:		Granito								
Material Retido					%Retida Graduação Original	5 ciclos em solução de sulfato de sódio				
Peso ante o ensaio						Peneiras utilizadas depois do ensaio	Peso depois do ensaio	Diferença	% de pedra	
Fração	Sub fração	Peso mínimo	Peso						Direta	Ponderada
			Individual	Acumulado						
1 1/2	1 1/2" - 1	1000 ± 50	0,0	-	-	-	-	-	-	-
3/4"	1" - 3/4"	500 ± 30	0,0	0,0	0,0	5/8"	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	3/4" - 1/2"	670 ± 10	553,6	-	-	-	-	-	-	-
3/8"	1/2" - 3/8"	330 ± 5	450,0	1003,6	97,5	5/16"	985,4	18,2	1,8	1,77
nº 4	3/8" - nº 4	300 ± 5	26,0	26,0	2,5	nº 5	20,6	5,4	20,8	0,52
Totais				1029,6	100,0	-	1006,0	23,6	2,3	2,29
DURABILIDADE APÓS 5 CICLOS EM SOLUÇÃO DE SULFATO DE SÓDIO =							2,29%			
Pedreira:		Anápolis			Pó de Brita					
Tipo de Rocha:		Granito								
Ensaio de Durabilidade de Agregado Miúdo										
Material Retido					%Retida Graduação Original	5 ciclos em solução de sulfato de sódio				
Peso ante o ensaio						Peneiras utilizadas depois do ensaio	Peso depois do ensaio	Diferença	% de pedra	
Fração	Sub fração	Peso mínimo	Peso (g)						Direta	Ponderada
3/8" - nº 4	3/8" - nº 4	100	-		0,00	nº 4	-	-	0,0	0,0
nº 8	nº 4 - nº 8	100	650,3		42,38	nº 8	645,8	4,5	0,7	0,3
nº 16	nº 8 - nº 16	100	456,3		29,74	nº 16	450	6,3	1,4	0,4
nº 30	nº 16 - nº 30	100	315,2		20,54	nº 30	313,2	2,0	0,6	0,1
nº 50	nº 30 - nº 50	100	112,5		7,33	nº 50	100,7	11,9	10,5	0,8
Totais		500	1534,3		100,0	-	1509,7	24,6	1,6	1,6
DURABILIDADE APÓS 5 CICLOS EM SOLUÇÃO DE SULFATO DE SÓDIO =							1,60%			
Resultado					1,95%		ESP.: < 12,0 %			

Fonte: Próprios autores, 2018.

3.2.4 Granulometria

Os ensaios de análise granulométrica foram orientados pela norma ME 83 (DNIT,1998). A Figura 16 apresenta a amostra de Brita 0 após a peneiração:

Figura 16 – Amostra de agregado após peneiração



Fonte: Próprios autores, 2018.

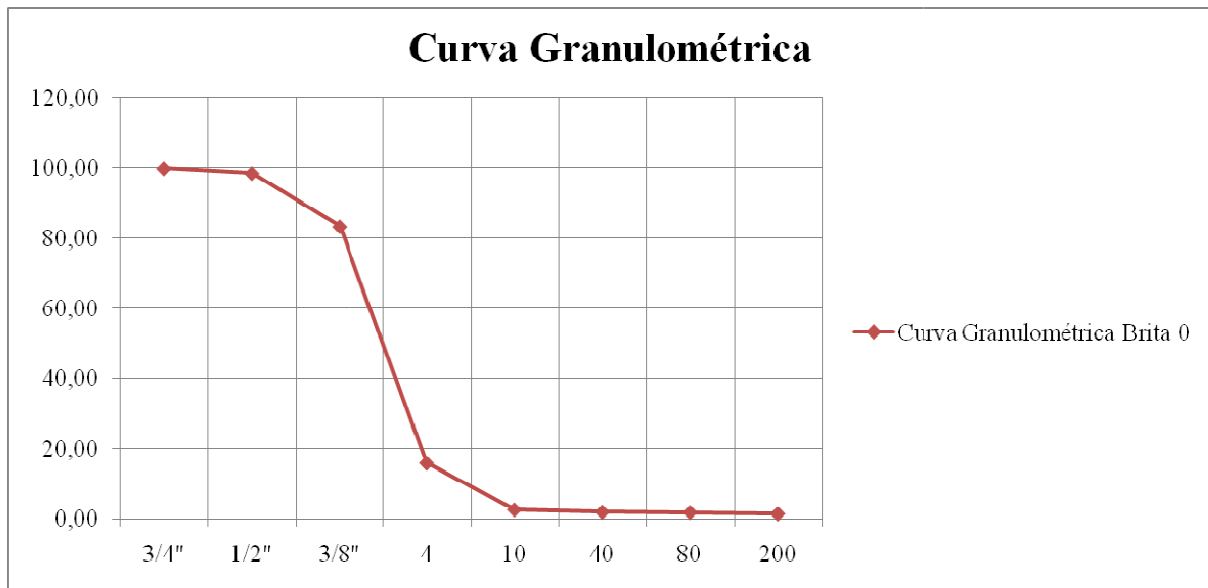
Analisando as Tabelas 10, 11 e 12, apresenta-se os resultados das britas 0 e 1 e do pó de brita e os gráficos da curva granulométrica (Figuras 17, 18 e 19, respectivamente):

Tabela 10– Planilha de Granulometria Brita 0

Agregado Graúdo – Brita 0								
Granulometria								
1º Ensaio				2º Ensaio				Média peso passando
Peso da amostra (g)			%	Peso da amostra (g)			%	
Peneira	Retido	Passando		Peneiras	Retido	Passando		
1"				1"				
3/4"	0,00	1193,27	100,00	3/4"	0,00	1090,12	100	100,00
1/2"	15,30	1177,97	98,72	1/2"	16,48	1073,64	98,49	98,61
3/8"	191,70	1001,57	83,93	3/8"	186,32	903,8	82,91	83,42
4	1003,89	189,38	15,87	4	917,12	173	15,87	15,87
10	1163,32	29,95	2,51	10	1061,88	28,24	2,59	2,55
40	1170,96	22,31	1,87	40	1069,08	21,04	1,93	1,90
80	1171,67	21,60	1,81	80	1070,60	19,52	1,79	1,80
200	1176,68	16,59	1,39	200	1074,74	15,38	1,41	1,40
Fundo	1193,08			Fundo	1090,00			

Fonte: Próprios autores, 2018.

Figura 17 – Gráfico da curva granulométrica da Brita 0



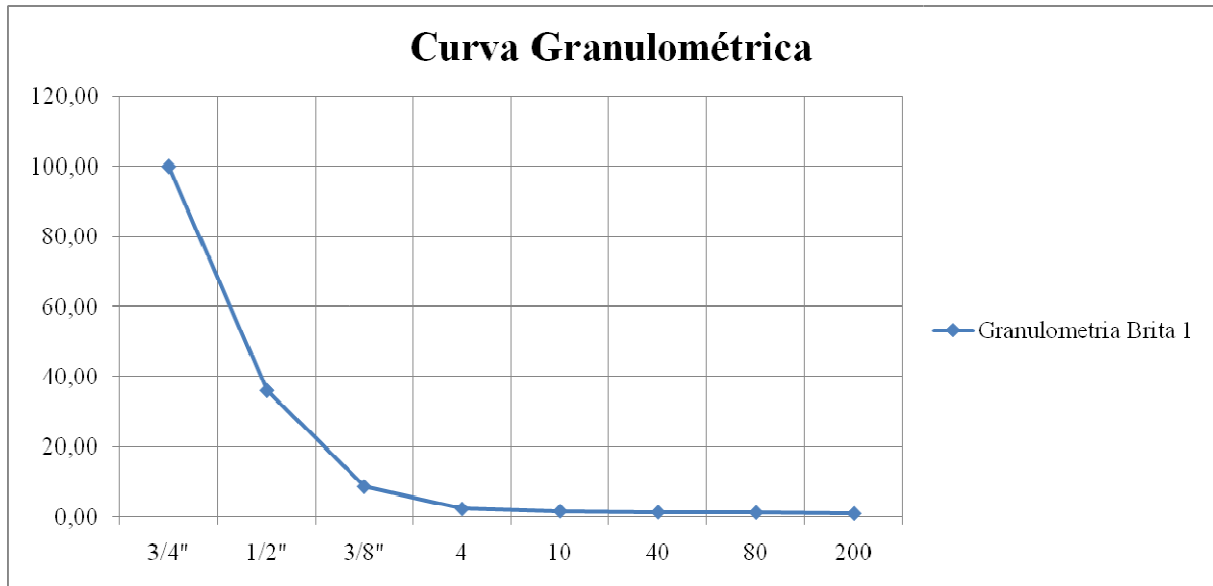
Fonte: Próprios autores, 2018.

Tabela 11 – Planilha de Granulometria Brita 1

Agregado Graúdo - Brita 1								
Granulometria								
1º Ensaio				2º Ensaio				Média peso passando
Peso da amostra (g)			%Passando	Peso da amostra (g)			%Passando	
Peneiras	Retido	Passando		Peneiras	Retido	Passando		
1"				1"				
3/4"	0,00	1025,15	100,00	3/4"	0,00	1074,93	100,00	100,00
1/2"	656,71	368,44	35,94	1/2"	687,51	387,42	36,04	35,99
3/8"	938,11	87,04	8,49	3/8"	983,02	91,91	8,55	8,52
4	1002,08	23,07	2,25	4	1050,31	24,62	2,29	2,27
10	1008,54	16,61	1,62	10	1062,69	17,62	1,64	1,63
40	1009,48	15,67	1,53	40	1061,90	12,24	1,14	1,34
80	1012,10	13,05	1,27	80	1063,50	13,03	1,21	1,24
200	1016,81	8,34	0,81	200	1074,93	11,43	1,06	0,94
Fundo	1025,00			Fundo	1090,00			

Fonte: Próprios autores, 2018.

Figura 18 – Gráfico curva granulométrica Brita 1



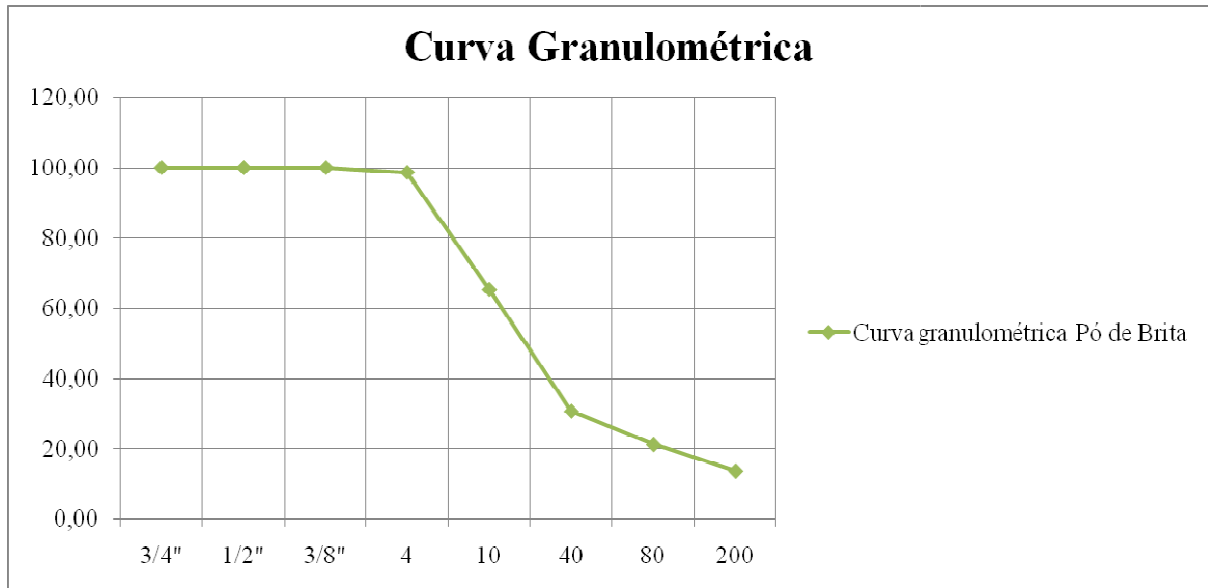
Fonte: Próprios autores, 2018.

Tabela 12 – Planilha de Granulometria Pó de Brita

Agregado Miúdo - Pó de Brita								
Granulometria								
1º Ensaio				2º Ensaio				Média peso passando
Peso da amostra (g)			%	Peso da amostra (g)			%	
Peneiras	Retido	Passando		Peneiras	Retido	Passando		
1"				1"				
3/4"	0,00	1069,41	100,00	3/4"	0,00	1041,34	100,00	100,00
1/2"	0,00	1069,41	100,00	1/2"	0,00	1041,34	100,00	100,00
3/8"	0,00	1069,41	100,00	3/8"	0,00	1041,34	100,00	100,00
4	15,72	1053,69	98,53	4	13,22	1028,12	98,73	100,00
10	374,40	695,01	64,99	10	357,92	683,42	65,63	98,63
40	741,20	328,21	30,69	40	721,12	320,22	30,75	65,31
80	843,01	226,40	21,17	80	820,46	220,88	21,21	30,72
200	923,64	145,77	13,63	200	898,98	142,36	13,67	21,19
Fundo	1069,40			Fundo	1041,34			13,65

Fonte: Próprios autores, 2018.

Figura 19– Gráfico curva granulométrica Pó de Brita



Fonte: Próprios autores, 2018.

3.2.5 Equivalente de Areia

O equivalente de areia foi obtido, seguindo o Método de Ensaio 054 (DNIT, 1979), através da média da porcentagem das três provetas ensaiadas. Este ensaio não deve ser realizado apenas com o agregado miúdo de areia, sendo necessário realizá-lo também com o pó de brita. A Figura 20 apresenta a amostra durante o ensaio:

Figura 20– Amostras durante ensaio



Fonte: Próprios autores, 2018.

Os resultados da amostra de pó de brita foram dispostos na Tabela 13:

Tabela 13– Resultado equivalente de areia

Local de Coleta	Amostra	Proveta	Leitura		Equivalente de areia	
			Topo da argila (H1)	Topo da areia (H2)	$\frac{H2}{H1} \times 100$	Média (%)
Pedreira	Pó de brita	1	15,4	10,6	68,8	68,8
Anápolis -		2	14,7	10,1	68,7	
Britador		3	15,5	10,7	69,0	

Fonte: Próprios autores, 2018.

O resultado atende ao indicado na ES 031 (DNIT, 2006b), uma vez que o equivalente de areia deve ser igual ou superior a 55%.

3.2.6 Determinação de Impurezas Orgânicas

Como nas misturas betuminosas a quente, os agregados serão aquecidos a elevadas temperaturas, em torno de 160 °C, o material orgânico será queimado e não causará danos a mistura (PINTO, 2018. reimp). Considerando também o fato de ter-se optado por trabalhar com o pó de brita de granito, que não possui contato com material orgânico considerável em sua produção, não houve necessidade da execução deste ensaio.

3.2.7 Adesividade e Ligante Betuminoso

Como o ligante é cimento asfáltico de petróleo, foi necessário aquecer o agregado a 100°C. O resultado do ensaio de adesividade é totalmente visual. Amostras submetidas ao ensaio sem o adicional de Dope foram consideradas insatisfatórias. A amostra de brita, retida na peneira de ½, submetida ao ensaio com o cimento asfáltico de petróleo 50/70, com o aditivo de DOPE, teve um resultado visual **satisfatório** após 72h de repouso imerso em água destilada, em estufa a 40°C. A proporção de Dope aplicado no CAP foi de 0,1%.

Os ensaios já realizados na empresa Objetivo- Serviços Asfálticos verificaram que essa proporção é a ideal para o agregado da região, e foi obtido por tentativas anteriores.

3.2.8 Viscosidade, Ponto de Amolecimento, Ponto de Penetração, Pontos de Fulgor e de Combustão

Os ensaios com o CAP devem ser realizados com extremo cuidado, haja vista que ele só possui trabalhabilidade em altas temperaturas. O Quadro 5 apresenta os resultados obtidos com os ensaios e a Figura 21 apresenta a aparelhagem utilizada e a amostra durante o ensaio de ponto de fulgor:

Quadro 5– Resultado ensaios com CAP

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração a 20° C, 5s, 100g	ME 155/10	50 a 70	55	mm
Ponto de amolecimento	ME 131/10	Mínimo 46	50,4	°C
Viscosidade Brookfiel a 135°C 20 RPM	NBR 15184	Mínimo 274	323	cp
Viscosidade Brookfiel 150°C 50 RPM	NBR 15184	Mínimo 112	164	cp
Viscosidade Brookfiel 177°C 100 RPM	NBR 15184	Mínimo 57	61	cp
Ponto de Fulgor	ME 148/94	Mínimo 235	320	°C
Espuma	ES 031/06	Não deve espumar	Não	Sim ou Não
Índice de suscetibilidade térmica	Cálculo	(-1,5) à (+0,7)	-0,87	N/A

Fonte: Próprios autores, 2018.

Figura 21– Aparelho para determinação do ponto de fulgor e combustão e vaso Cleveland



Fonte: Próprios autores, 2018.

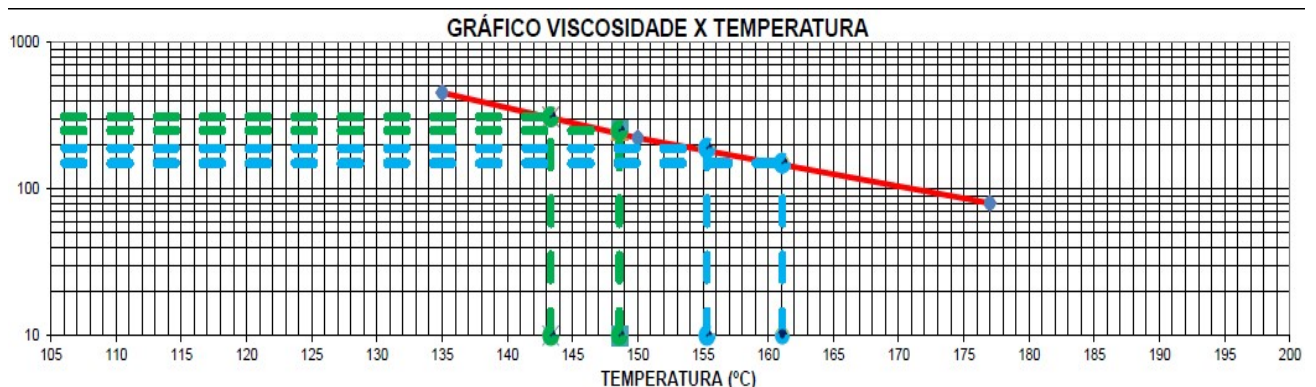
O Quadro 6 juntamente com a Figura 21, apresentam os dados de temperatura versus viscosidade, dados que são utilizados na determinação da temperatura do ligante:

Quadro 6 – Temperatura x Viscosidade

Viscosidade Brookfiel	Temperaturas (° C)		Viscosidade (cp)
Mistura	Temperatura Mínima	148	-
	Temperatura Ótima	151	-
	Temperatura Máxima	154	323
Compactação	Temperatura Mínima	135,2	164
	Temperatura Ótima	137,9	61
	Temperatura Máxima	140,6	-
Agregados	Mínima, Média e Máxima	140,6	165,6

Fonte: Próprios autores, 2018.

Figura 22 – Temperatura x Viscosidade



Fonte: Próprios autores, 2018.

3.3 CÁLCULO DA DOSAGEM

Dado o adicional positivo de aceitação dos componentes pelos ensaios executados, prossegue-se com a definição da dosagem inserindo os dados de granulometria conforme a Tabela 14, para verificação dos limites da faixa escolhida. A determinação das porcentagens a serem utilizadas, é obtida através de tentativas para alcançar o mais próximo da média dos limites da faixa. Por exemplo, quanto mais baixa a curva da granulometria estiver, mais “grosso” o agregado e a mistura estarão e, só será aceitável se permanecer dentro dos limites do DNIT.

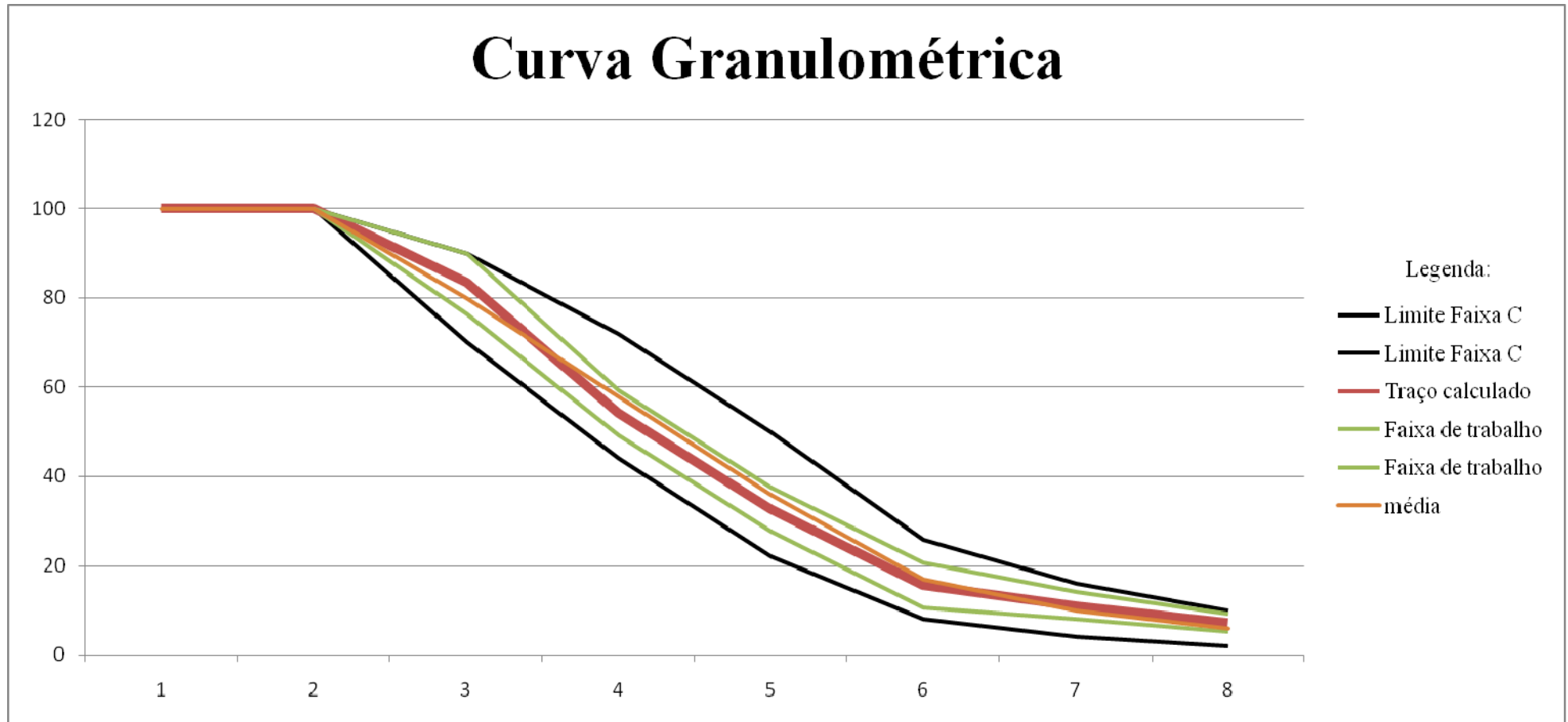
Assim, na Tabela 14 apresenta-se a média das granulometrias e o traço mais próximo possível da curva média do DNIT, considerada a curva do traço ideal:

Tabela 14– Traço calculado

Cálculo do traço - CBUQ											
Peneiras		Pó de Brita	Brita 0	Brita 1	Faixa de trabalho		Traço	Faixa média	Faixa C DNIT		Tolerância
ABNT(mm)	ASTM				48%	42%			10%	-	
25,4	1"	100,00	100,00	100,00	100,0	100,0	100,0	100	100	100	-
19,1	3/4	100,00	100,00	100,00	100,0	100,0	100,0	100	100	100	7
12,7	1/2	100,00	98,60	36,00	86,0	100,0	93,0	90	80	100	7
9,5	3/8"	100,00	82,40	8,50	76,5	90,0	83,5	80	70	90	7
4,8	4	98,60	15,90	2,30	49,2	59,2	54,2	58	44	72	5
2	10	65,30	2,60	1,60	27,6	37,6	32,6	36	22	50	5
0,42	40	30,70	1,90	1,30	10,7	20,7	15,7	17	8	26	5
0,18	80	21,20	1,80	1,20	8,1	14,1	11,1	10	4	16	3
0,074	200	13,65	1,40	0,90	5,2	9,2	7,2	6	2	10	2
Fundo		Desprezado									

Fonte: Próprios autores, 2018.

Figura 23 – Curva granulométrica da dosagem



Fonte: Próprios autores, 2018.

Deste modo, os agregados foram passados novamente nas peneiras de abertura 3/8", n° 4, n° 10 e foi contabilizado também o passante na peneira n° 10. Calcula-se a quantidade necessária para montar um CP e a partir da dosagem da tabela, são calculados três traços para três variações de porcentagem de betume, afim de se determinar o teor ótimo para o projeto, ou seja, qual a porcentagem de CAP deve ser aplicada para o melhor desempenho de resistência e tração da massa asfáltica. Conforme o Ensaio Marshall indica, determina-se uma porcentagem inicial e varia-se 0,5% acima e 0,5% abaixo. Então estipulou-se um valor inicial de 5,00%, conforme costume do laboratório. A Tabela 15 indica a quantidade em peso de agregado para um corpo de prova e a Figura 24 as misturas preparadas para aquecimento e mistura com o CAP:

Tabela 15 – Traços com variação de CAP

Passante na peneira	Porcentagem de CAP			
	4,50%	5,00%	5,50%	
3/8"	184,6	183,7	182,7	Valores em gramas
N° 4	339,8	338,6	336,3	
N° 10	248,1	246,8	245,5	
Fundo	37,4	371,4	369,5	
CAP	54	60	66	

Fonte: Próprios autores, 2018.

Figura 24 – Misturas para montagem dos CPs



Fonte: Próprios autores, 2018.

A seguir, os agregados foram aquecidos a uma temperatura média de 160°C, próxima da temperatura do ligante, foi adicionado à quantidade de CAP pré-estabelecida e rapidamente misturado até a completa cobertura dos agregados. Logo após, foram levados aos moldes para compactação. Foi obedecido o parâmetro da norma de 75 golpes. Os dezoito CPs produzidos foram resfriados com água corrente, porém sem contato direto da massa com a água e repousados por um período de 12 horas antes do rompimento.

3.3.1 Ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall, Densidade, Tração por Compressão Diametral e Porcentagem de Betume

A Tabela 16 apresenta os resultados com os nove corpos de prova produzidos para o ensaio Marshall e com mais nove corpos de prova produzidos para o ensaio de tração por compressão diametral. Assim, a partir desses dados, é possível determinar o teor ótimo de CAP para a mistura calculada.

Para produção da camada de revestimento de pavimento flexível deve-se observar os seguintes parâmetros, considerando uma média dos resultados de 03 corpos de prova (PINTO, 2018. reimp):

- Porcentagem de Vazios: 3 % a 5%.
- Relação Betume/Vazios: 75 % a 82 %.
- Estabilidade Marshall: > 500 kgf.
- Fluência: 2,0 mm – 4,6 mm.

Tabela 16 – Ensaio de Estabilidade, Fluência e Tração.

Ensaio com Mistura Betuminosa da Faixa C									
Estabilidade e Fluência Marshall									
Variações de Betume (%)	4,5			5,0			5,5		
Corpos de Prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso ao ar (g)	1200,00	1196,40	1197,00	1199,00	1194,80	1197,10	1193,60	1195,30	1192,70
Peso na água (g)	699,00	696,40	697,50	700,60	697,80	700,00	699,50	700,00	697,90
Peso Específico Aparente (g/cm ³)	2,395			2,407			2,413		
Volume de Vazios (%)	4,63			3,59			2,46		
Vazios do agregado mineral (%)	14,99			15,06			15,33		
Relação Betume/Vazios (%)	88,94			76,97			85,42		
Estabilidade corrigida (kgf)	1476			1429			1429		
Fluência (mm)	3,35			3,89			4,52		
Misturas Asfálticas - Tração por Compressão Diametral									
Variações de Betume (%)	4,5			5,0			5,5		
Corpos de Prova	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Tração por Compressão Diametral (kgf)	1217,00	1251,00	1275,00	1477,00	1429,00	1471,00	1491,00	1513,00	1509,00
Média	1247,66			1459,00			1504,33		

Fonte: Próprios autores, 2018.

A partir dos limites para os vazios e para a relação betume-vazios, é possível determinar o teor de ligante que atende a esses dois condicionantes. Desta forma pode-se considerar que o teor ótimo é de 5,0%. A porcentagem de 4,5% tem resultados fora dos limites e os resultados de 5,0% são consideravelmente bons, haja vista que utilizar a quantidade de 5,5% tornaria a massa asfáltica desnecessariamente mais cara, sem resultados aparentemente melhores que da amostra com dosagem menor, considerando o preço de mercado do CAP.

Portanto, após as definições de teor de betume ideal, é necessário executar novamente os ensaios de rotina para traço: Ensaio de Tração por Compressão Diametral e o Ensaio de Estabilidade Marshall para verificar e obter o resultado final de resistência da massa asfáltica para o traço calculado. Foi necessário moldar mais 06 CPs para obter o resultado final, além de uma porcentagem extra de massa para o ensaio de Porcentagem de Betume ME 053 (DNIT, 1994). A Tabela 17 apresenta os resultados encontrados:

Tabela 17 – Ensaio final

Estabilidade			
Corpos de Prova	1	2	3
Peso ao ar (g)	1197,5	1196,35	1192
Peso na água	699	698,76	697,47
Espessura (cm)	6,30	6,30	6,33
Densidade aparente	2,4	2,4	2,41
Densidade máxima	2,497	2,497	2,497
Porcentagem de Vazios (%)	3,8	3,7	3,5
Vazios cheios com betume (%)	11,8	11,8	11,8
Vazios do agregado mineral	15,6	15,5	15,3
Relação Betume vazios	75,6	76,1	77,1
Estabilidade encontrada (kgf)	1723	1675	1691
Fator de correção	1,06	1,06	1,07
Estabilidade corrigida (kgf)	1822	1777	1812
Fluência (mm)	3,95	3,91	3,88
Tração por Compressão Diametral			
Corpos de Prova	4	5	6
Diâmetro (cm)	10,13	10,13	10,13
Altura (cm)	6,32	6,35	6,35
Tração Diametral (kgf)	1499	1421	1429
Porcentagem de Betume			
Peso da Amostra com Betume (g)	1062,45		
Peso da Amostra sem Betume (g)	1010,06		
Diferença de Peso	52,39 g		
Teor de betume	4,93		
Média de CAP	4,93%		

Fonte: Próprios autores, 2018.

A Especificação de Serviço 031 (DNIT, 2006b) permite que seja variado no máximo 0,3% a porcentagem de CAP calculado e aplicado na produção. Sendo assim, os valores calculados atendem a todas as disposições prescritas em norma.

3.4 TRAÇO FINAL

Depois de finalizados os ensaios e conseqüentemente a apresentação e análise dos resultados, é possível estabelecer o traço ideal a ser enviado para a usina de fabricação de massa asfáltica. Esse dado é passado em porcentagens e será calculado em peso a partir da quantidade a ser produzida. Com os dados apresentados nesse estudo, a dosagem de melhor desempenho teórico seria com o ajuste dos agregados na proporção de 9,50% de Brita 1, 39,90% de Brita 0, o Pó de brita sendo usado como agregado muído e filer seria usado em 45,60% e adicional de CAP de 5,00%, considerando o aditivo de 0,1% de Dope (já acrescido antes da mistura com os demais materiais). A Tabela 18 exemplifica o traço final e ideal calculado:

Tabela 18 – Dosagem Ideal

Composição de traço final		
Agregados	% dos agregados sem CAP	% dos agregados com CAP
Brita 1	10,00%	9,50%
Brita 0	42,00%	39,90%
Pó de Brita	48,00%	45,60%
CAP	-	5,00%

Fonte: Próprios autores, 2018.

É possível ainda, afirmar que este traço de fato pode ser aplicado na prática na produção da usina, desde que sejam utilizados os agregados com a mesma granulometria e o CAP de mesmo tipo, e sua finalidade seja capa de rolamento na faixa C do DNIT.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados apresentados, é possível afirmar que para cada tipo de material a ser utilizado para o investimento de um pavimento de qualidade, haverá um estudo a ser feito, considerando a origem dos materiais e a finalidade da produção. Assim, é apresentado todos os ensaios necessários para uma determinação eficaz de traço de CBUQ. Para os ensaios executados, observa-se a ES 031 norma do Departamento Nacional e Infraestrutura e Trânsito (DNIT, 2006b), que estabelece os limites e parâmetros necessários para avaliação dos resultados.

Os ensaios de caracterização como granulometria, abrasão, de índice de forma foram satisfatórios em relação ao material disponível na região. Apesar de que para o ensaio de adesividade ser bem sucedido houve a necessidade de aplicação do aditivo Dope, observa-se ser uma adição que permite prolongar a vida útil do asfalto (PINTO, 2018. reimp) e apresenta custos menores, considerando os gastos de transporte para execução com outro tipo de rocha. Quanto ao clima da região, o CAP utilizado atende aos padrões da norma e também possui o ponto de amolecimento e penetração condizentes e necessários para aumentar a durabilidade da massa asfáltica (SANTOS, 2017). Deve-se também considerar que os CPs podem sofrer alterações dependendo da forma de compactação (compactação mecânica ou manual) e podem não obter resultados eficientes caso ocorram bruscas variações de temperatura durante o preparo e manuseio dos corpos de prova.

Considerando também que há pouco material como referência para pesquisa, no estudo e análise do CBUQ com diferentes materiais, diferentes faixas granulométricas e sobre as realizações dos ensaios ditados nas normas do DNIT, esta pesquisa busca aumentar o conhecimento na área e contribuir com o meio técnico e acadêmico.

No Brasil, no ano de 2018, ocorreu uma paralisação geral, denominada greve dos caminhoneiros, que resultou na total interrupção de atividades nas estradas de rodagem por aproximadamente 10 dias em todo o país. Isto afetou diretamente o PIB (Produto Interno Bruto) de serviços de transporte (AMORIM, et.al, 2018). Este fato evidencia a dependência da economia do país dos meios rodoviários, por exemplo, para o transporte de bens e o abastecimento de comércios e indústrias. Desta forma, o papel da construção civil é garantir a produção de pavimentos de qualidade, que forneçam estabilidade, durabilidade em relação às intempéries e ao alto tráfego, e acima de tudo segurança ao usuário. Tendo essa justificativa, é competência do profissional da área da engenharia buscar inovações tecnológicas sempre, a

fim de aprimorar os conhecimentos e práticas no ramo da construção civil e como o próprio código de ética do Conselho de Engenharia cita:

A profissão é bem cultural da humanidade construído permanentemente pelos conhecimentos técnicos e científicos e pela criação artística, manifestando-se pela prática tecnológica, colocado a serviço da melhoria da qualidade de vida do homem. (CONFEA, 2015. p28).

Para a realização de futuros experimentos na área de pavimentação, se possível, sugere-se que sejam utilizados materiais de diferentes fontes, afim de que, com uma maior quantidade de materiais e tipos de agregados, seja possível determinar qual tem melhor desempenho e também avaliar os níveis de adesividade, o que pode ter resultados mais satisfatórios nos ensaios.

REFERÊNCIAS

AMORIM, Daniela, et.al. **Greve dos Caminhoneiros Afeta PIB de Serviços de Transportes do 3º Trimestre.** 2018. Disponível em: <<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,greve-dos-caminhoneiros-afeta-pib-de-servicos-de-transporte-do-3-trimestre,70002628007>>. Acesso em: 30 novembro 2018. Ed. O Estado de S.Paulo

ARAUJO, Weliton Eduardo Lima de. **APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA EXTRAÇÃO DE MICAXISTO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.** 2008. 142 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tde/597/1/weliton-eduardo-lima.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14950: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809: AGREGADOS GRAÚDOS - DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FORMA PELO MÉTODO DO PAQUÍMETRO.** Rio de Janeiro, 2005.

BERNUCCI, Lied Bariani et al. **PAVIMENTAÇÃO ASFALTICA: FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS.** 4. Ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2006.

CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA. **CREA: CÓDIGO DE ÉTICA DE ENGENHARIA, AGRONOMIA, DA GEOLOGIA, DA GEOGRAFIA E DA METEOROLOGIA.** 9ª ed. Brasília-df: Créditos, 2014. Disponível em: <http://www.confea.org.br/media/codigo_etica_sistemaconfea_8edicao_2015.pdf>. Acesso em: 11 out. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria de Planejamento e Pesquisa (Org.). **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO.** 3. Ed. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 2006a. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manuald.12.06.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **ES 031: PAVIMENTOS FLEXÍVEIS - CONCRETO ASFÁLTICO - ESPECIFICAÇÃO DE SERVIÇO.** Rio de Janeiro, 2006b. 14 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2018

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **EM 095: CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO - ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAL.**

Rio de Janeiro, 2006c. 6 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dnit095_2006_em.pdf>. Acesso em: 02 out. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME 117/94: MISTURA BETUMINOSA - DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1994. Disponível em: <ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me117-94.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER – ME 86/94 - DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FORMA**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1994. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me086-94.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER – ME 78/94 ADESIVIDADE E LIGANTE BETUMINOSO**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1994. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me078-94.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME 35/98 AGREGADOS-DETERMINAÇÃO DA ABRASÃO " LOS ANGELES"**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1998. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me035-98.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME 43/95 ENSAIO MARSHALL**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1995. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me043-95.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME 54/79- EQUIVALENTE DE AREIA**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1997. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me054-97.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME 53/94 PERCENTAGEM DE BETUME**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1994. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me053-94.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME 55/95 DETERMINAÇÃO DE IMPUREZAS ORGÂNICAS**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1995. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me055-95.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME 89/94 AGREGADOS-AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE PELO EMPREGO DE SOLUÇÕES DE SULFATO DE SÓDIO E MAGNÉSIO**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1998. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me089-94.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME 83/98- ANALISE GRANULOMETRICA.** Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1998. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me083-98.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **ME 06: EMULSÕES ASFÁLTICAS - DETERMINAÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO.** Rio de Janeiro, 2000. 4 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me006-00.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **MATERIAL BETUMINOSO- DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE FULGOR E DE COMBUSTÃO: VASO ABERTO CLEVELAND.** Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1994. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me148-94.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **PROCEDIMENTO PARA COLETA DE AMOSTRAS E AGREGADOS 120: COLETA DE AMOSTRAS DE AGREGADOS.** Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 1997. 5 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dner-pro120-97.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2018. Jun. de 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 147: PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA - TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO COM LIGANTE ASFÁLTICO CONVENCIONAL.** Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit147_2012_es.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2018.

OMENO, Eng. Wander; ANTOSCZEZEM JUNIOR, Eng. José Antônio. **USO DE AGENTES MELHORADORES DE ADESIVIDADE (DOPE' s) E O MEIO AMBIENTE.** Fatos e Asfaltos, Araucária, v. 01, n. 01, p.01-08, 01 set. 2005. Disponível em: <http://www.grecaasfaltos.com.br/fatos/fatos_01.pdf>. Acesso em: 02 out. 2018.

PINTO, Salomão, PINTO, Isaac Eduardo. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA - CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE MATERIAIS E REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS.** 1. Ed. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2018. ; 24 cm.

SANTOS, AM. **COMPARATIVO ENTRE CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO DISPONÍVEIS NO MERCADO.** TCC, Curso de Engenharia Civil, UNIEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 47p. 2016.