

**UNIEVANGÉLICA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DIEGO HOLANDA DOS SANTOS  
VINÍCIUS FERNANDES FERREIRA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS  
NA ESTABILIDADE DO CONCRETO BETUMINOSO  
UTILIZADO PARA REVESTIMENTO ASFÁLTICO**

**ANÁPOLIS / GO**

**2018**

**DIEGO HOLANDA DOS SANTOS  
VINÍCIUS FERNANDES FERREIRA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS  
NA ESTABILIDADE DO CONCRETO BETUMINOSO  
UTILIZADO PARA REVESTIMENTO ASFÁLTICO**

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

**ORIENTADORA: ISA LORENA SILVA BARBOSA**

**ANÁPOLIS / GO: 2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, DIEGO HOLANDA DOS/ FERREIRA, VINÍCIUS FERNANDES

Análise da influência dos agregados graúdos na estabilidade do concreto betuminoso utilizado para revestimento asfáltico

64, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2018).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. CBUQ

3. CAP

I. ENC/UNI

2. Agregados Graúdos

4. Asfalto

II. Título (Série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, Diego Holanda dos; FERREIRA, Vinícius Fernandes. Análise da influência dos agregados graúdos na estabilidade do concreto betuminoso utilizado para revestimento asfáltico. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 64p. 2018.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Diego Holanda dos Santos

Vinícius Fernandes Ferreira

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Análise da influência dos agregados graúdos na estabilidade do concreto betuminoso utilizado para revestimento asfáltico.


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.

  
Diego Holanda dos Santos

E-mail: [diegohsbio@gmail.com](mailto:diegohsbio@gmail.com)

  
Vinícius Fernandes Ferreira

E-mail: [vinicius\\_ff1@hotmail.com](mailto:vinicius_ff1@hotmail.com)

**DIEGO HOLANDA DOS SANTOS  
VINÍCIUS FERNANDES FERREIRA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NA ESTABILIDADE  
DO CONCRETO BETUMINOSO UTILIZADO PARA REVESTIMENTO  
ASFÁLTICO**

**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)**



\_\_\_\_\_  
**ROGÉRIO SANTOS CARDOSO, Mestre (UniEvangélica)  
(EXAMINADOR INTERNO)**



\_\_\_\_\_  
**LUCAS GABRIEL CORRÊA VARGAS, Mestre (UniEvangélica)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

**DATA: ANÁPOLIS/GO, 26 de NOVEMBRO de 2018**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao apoio e compreensão da minha companheira de vida Kelly Cristina, por toda a paciência que teve nesse longo período de 5 anos, pela força que sempre me deu e por seu amor incontestável.

Agradeço ao meu companheiro de trabalho Vinícius Fernandes pela camaradagem e compreensão da minha rotina de trabalhos.

Agradeço à nossa orientadora Isa Lorena pelos conselhos e paciência com nosso tempo de trabalho diferenciado (rs).

Agradeço ainda as empresas que nos apoiaram, Laboratório Carlos Campos, Objetivo Serviços Asfálticos na pessoa do Wemerson e Pedreira Anápolis, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Por fim, agradeço ao companheirismo e coleguismo de todos amigos de sala de aula, em especial ao membros do Boteco do tio Luiz (kkkk).

Diego Holanda dos Santos

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, saúde e sabedoria que me possibilitaram desenvolver este trabalho.

Aos meus pais, pelo incentivo em todos os momentos difíceis. Sou muito grato a vocês e espero nunca decepcionar nas suas expectativas. Incluo ainda meus irmãos que também me ajudaram muito nessa caminhada.

Agradeço muito a minha orientadora Isa Lorena, que sempre esteve pronta para me ajudar e incentivar. Sei que devemos ter deixado ela um pouco preocupada, mas espero ter alcançado o que ela esperava. Ao meu parceiro nesse trabalho Diego Holanda, o meu muitíssimo obrigado por entrar nesse projeto junto comigo, e me ajudar a realiza-lo.

Ainda agradeço a todos os funcionários do Carlos Campos e principalmente os da Objetivo – Serviços Asfálticos, que me ajudaram a realizar este trabalho sem pestanejar e com muita paciência, obrigado pelos ensinamentos e conselhos de cada um de vocês.

Incluo ainda meus colegas de curso Andressa Abdallah, Diego Holanda, Gabriela Karine, Luiz Gustavo, Samuel Gomes e Thales Alves, que durante esses anos juntos passaram a ser além de amigos uma segunda família, alegrando cada aula chata e apoiando uns aos outros nessa difícil e longa jornada que é se formar em engenharia civil.

Vinícius Fernandes Ferreira

## **RESUMO**

Estudou-se a influência dos agregados graúdos na estabilidade do concreto betuminoso ideal para revestimento asfáltico. Após a definição do traço ideal com os materiais utilizados, foram dosadas mais duas misturas, variando-se a quantidade de brita para mais e para menos, afim de que fosse feita a análise da influência do agregado graúdo sobre as características mecânicas do CBUQ. Foi realizada a caracterização de todos os materiais individualmente para conseguir realizar os cálculos da dosagem ideal. A composição do concreto betuminoso satisfaz os valores de tolerância a respeito da granulometria ME-083 (DNER, 1998c), e os ensaios com a mistura foram: índice de vazios, relação betume/vazios e estabilidade mínima (Kgf), todos segundo a norma ME-043 (DNER, 1995) e resistência à tração por compressão diametral estática a 25° C segundo a ME-136 (DNIT, 2010b). Todos os ensaios observaram os parâmetros para CBUQ de camada de revestimento (Faixa C) e que se englobam no chamado ensaios Marshall. Com os três valores dos ensaios de desempenho, foi possível comparar os resultados de resistência e fluência de cada traço analisado, possibilitado estabelecer paralelo da composição granulométrica dos traços com o melhor resultado nos ensaios.

### **PALAVRAS-CHAVE:**

Dosagem; CBUQ; Agregado graúdo.

## **ABSTRACT**

It presents the influence of the large aggregates on the stability of the bituminous concrete ideal for asphalt coating. After defining the ideal trace with the materials used, two more blends were dosed, keeping the amount of sand and CAP fixed, and varying the quantity of crushed stone for more and less so that it could be made an analysis of the large aggregate on the mechanical characteristics of the CBUQ. The characterization of all the materials was performed individually to be able to perform the calculations of the ideal dosage. With the three values of the creep test, it was graphically possible to analyze a curve that indicates the evolution of the resistance of the CBUQ with the increase and decrease of the proportion of the large aggregate. The composition of bituminous concrete met the tolerance values for the grain size ME-083 (DNER, 1998c), and the tests with the mixture were voids ratio, bitumen/voids ratio and minimum stability, all according to the norm ME-043 (DNER, 1995) and tensile strength by static diametric compression at 25 ° C according to ME-136 (DNIT, 2010b). All the assays observed the parameters for coating layer CBUQ (Track C), which are encompassed in the so-called Marshall tests. Bituminous materials, if thrown into the environment, are extremely harmful because they make it impossible to recover the area. In addition, the lack of maintenance of the highways increases the fuel consumption by its users, which consequently increases the pollution of the environment and worsens the greenhouse effect by the emission of carbon gas (UOL, 2012). Brazil spends over R\$ 10 million in the recovery and maintenance of highways per year (in some years, the value is much higher); the product used that increases the amount spent is the CBUQ C range.

### **KEYWORDS:**

Dosage; CBUQ; Large aggregate.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do Pavimento .....	21
Figura 2 - Classificação dos Revestimentos .....	23
Figura 3 - Exemplos de aplicação de microrrevestimento asfáltico em rodovia de tráfego pesado como restauração funcional .....	25
Figura 4 - Exemplo de aplicação de microrrevestimento asfáltico .....	26
Figura 5 - Esquema de tratamentos superficiais .....	29
Figura 6 - Pedreira Anápolis.....	34

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Faixas Granulométricas da Norma DNIT 035/2005 – ES .....	27
Quadro 2 - Consumo Teórico de Materiais .....	27
Quadro 3 - Consumo Teórico de Materiais no TSS .....	29
Quadro 4 - Consumo Teórico de Materiais no TSD.....	30
Quadro 5 - Consumo Teórico de Materiais no TST .....	30
Quadro 6 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego. ....	31
Quadro 7 - Espessura mínima do revestimento betuminoso. ....	32
Quadro 8 - Dimensões nominais das peneiras utilizadas segundo o ME-035 (DNER,1995)	353
Quadro 9 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) .....	35
Quadro 10 - Graduação para ensaio .....	38
Quadro 11 - Carga Abrasiva.....	39
Quadro 12 - Ensaio de abrasão "Los Angeles".....	48
Quadro 13 - Análise granulométrica Brita 1 .....	49
Quadro 14 - Análise granulométrica Brita 0 .....	49
Quadro 15 - Análise granulométrica Pó de Brita .....	50
Quadro 16 - Ensaio de equivalência de areia .....	50
Quadro 17 - Resultado do ensaio de determinação da densidade e absorção dos agregados gráudos .....	51
Quadro 18 - Resultado do ensaio de determinação da densidade agregados miúdo .....	52
Quadro 19 - Ensaio de Caracterização do CAP .....	52
Quadro 20 - Granulometria Traço Ideal .....	53
Quadro 21 – Granulometria do traço Faixa Grossa.....	54
Quadro 22 - Granulometria do traço Faixa Fina.....	55
Quadro 23 - Ensaio de Extração de Betume (%CAP).....	56
Quadro 24 - Tração por compressão diametral .....	56
Quadro 25 - Ensaio Marshall Faixa Ideal.....	57
Quadro 26 - Ensaio Marshall Faixa Fina.....	58
Quadro 27 - Ensaio Marshall Faixa Grossa.....	58

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva Granulométrica Traço Ideal .....	53
Gráfico 2 - Curva Granulométrica Faixa Grossa.....	54
Gráfico 3 - Curva granulométrica da Faixa Fina.....	55
Gráfico 4 - Comparação dos Resultados de Tração por Compressão Diametral .....	59
Gráfico 5 - Comparação dos Resultados da Estabilidade Marshall.....	60
Gráfico 6 - Comparação dos Resultados da Fluência Marshall.....	61

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - .....	39
Equação 2 - .....	41
Equação 3 - .....	41
Equação 4 - .....	43
Equação 5 - .....	44
Equação 6 - .....	44
Equação 7 - .....	46
Equação 8 - .....	46
Equação 9 - .....	46
Equação 10 - .....	46
Equação 11 - .....	46
Equação 12 - .....	47
Equação 13 - .....	47
Equação 14 - .....	47

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
MRAF	Micro Revestimento a Frio
RPBC	Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão
SNV	Sistema Nacional de Viação
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSS	Tratamento Superficial Simples
TST	Tratamento Superficial Triplo
VPD	Veículos/dia
VPH	Veículos/hora

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	17
1.2 OBJETIVOS .....	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 METODOLOGIA .....	18
<b>2. CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE .....</b>	<b>20</b>
2.1 HISTÓRICO .....	20
2.2 DEFINIÇÃO .....	21
2.2.1 Pavimento.....	21
2.2.2 Revestimento Flexível.....	22
2.2.2.1 Revestimentos por Mistura.....	23
2.3 ASPECTOS COMPARATIVOS .....	24
2.3.1 Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) ou Concreto Asfáltico (CA).....	24
2.3.2 Micro revestimento à frio (MRAF).....	24
2.3.2.1 Materiais.....	26
2.3.3 Tratamento Superficial .....	28
2.3.3.1 Tratamento Superficial Simples .....	29
2.3.3.2 Tratamento Superficial Duplo .....	29
2.3.3.3 Tratamento Superficial Triplo .....	30
2.3.4 Comparativo .....	30
<b>2.4 MATERIAIS.....</b>	<b>32</b>
2.4.1 Agregados.....	32
2.4.2 Ligante asfáltico (CAP).....	34
<b>2.5 MÉTODOS DE ENSAIO .....</b>	<b>35</b>
2.5.1 Materiais utilizados .....	35
2.5.2 Ensaio do Ponto de Penetração .....	36
2.5.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento .....	36
2.5.4 Viscosidade Brookfield .....	36
2.5.5 Ensaio de ponto de fulgor.....	37
2.5.6 Ensaio de abrasão “Los Angeles” .....	37

2.5.7	Ensaio de análise granulométrica .....	39
2.5.8	Ensaio de equivalente de areia .....	40
2.5.9	Ensaio de índice de forma .....	41
2.5.10	Ensaio de adesividade ao ligante betuminoso .....	42
2.5.11	Ensaio de densidade e absorção do agregado graúdo.....	42
2.5.12	Ensaio de densidade do agregado miúdo .....	43
2.5.13	Ensaio de tração por compressão diametral .....	44
2.5.14	Ensaio de compressão Marshall .....	45
<b>3.</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>48</b>
3.1	ENSAIO DE ABRASÃO “LOS ANGELES” .....	48
3.2	ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	49
3.3	ENSAIO DE EQUIVALENTE DE AREIA .....	50
3.5	ENSAIO DE ADESIVIDADE DO LIGANTE BETUMINOSO .....	51
3.6	ENSAIO DE DENSIDADE E ABSORÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO .....	51
3.7	ENSAIO DE DENSIDADE DO AGREGADO MIÚDO .....	51
3.8	ENSAIOS DE VISCOSIDADE BROOKFIELD, PONTO DE AMOLECIMENTO, PONTO DE PENETRAÇÃO E PONTO DE FULGOR.....	52
3.9	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS TRAÇOS .....	52
3.9.1	Traço ideal.....	53
3.10	COMPOSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	56
3.11	ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	56
3.12	ENSAIO MARSHALL .....	57
3.12.1	Traço Faixa Ideal.....	57
3.12.2	Traço Faixa Fina.....	57
3.12.3	Traço Faixa Grossa.....	58
<b>4.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>59</b>
4.1	ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	59
4.2	ENSAIOS MARSHALL.....	60
4.2.1	Estabilidade Marshall .....	60
4.2.2	Fluência Marshall .....	60
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>62</b>

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com a pesquisa da Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2017), o transporte rodoviário no Brasil é a principal alternativa para movimentação de cargas e pessoas, contribuindo significativamente para o desenvolvimento socioeconômico nacional. Com uma participação de mais de 61% na matriz de transporte de cargas e de 95% na de passageiros, a infraestrutura rodoviária é também a principal responsável pela integração de todo o sistema de transporte no país. Porém, segundo o Sistema Nacional de Viação - SNV, a malha rodoviária nacional compreende 212.866 km de rodovias pavimentadas, contrapondo-se a 1.365.426 km de rodovias não pavimentadas.

Desse montante de rodovias pavimentadas, 50% da extensão total das rodovias apresentam algum tipo de problema no pavimento, tendo sido avaliadas da seguinte forma: 34% como Regular, 13,2% como Ruim e 2,8% como Péssimo (CNT, 2017). Essa condição aumenta o custo operacional do transporte rodoviário de cargas em média 24,9%, devido à redução da durabilidade dos componentes veiculares e ao aumento do tempo de viagem e do consumo desnecessário de combustível. Em 2016, o uso excedente de combustível, somente em decorrência da má condição do pavimento, foi estimado em quase 775 milhões de litros de diesel, o que gera para o transportador uma despesa adicional de R\$ 2,34 bilhões. Nessas condições, os veículos ainda são obrigados a trafegar em velocidade mais baixa, o que pode facilitar ações de roubos de cargas e assaltos a passageiros (CNT, 2017b).

Segundo Bernucci et al (2010), os pavimentos são estruturas compostas constituídas de múltiplas camadas, tendo como camada mais externa o revestimento, este sendo o responsável por receber a carga dos veículos e sofrer a ação das intempéries ambientais. Assim, devem ser o mais resistente possível aos esforços dinâmicos e variáveis do contato dos pneus com o revestimento e ser impermeáveis.

Segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006c) revestimento é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorar a comodidade e segurança e resistir ao desgaste. 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 de acordo com os parâmetros de tráfego usado no dimensionamento. Para rodovias com o número N maior que  $5 \times 10^6$ , o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) recomenda que seja adotado o revestimento de concreto betuminoso.



Praticamente todas as rodovias que possuem uma quantidade de tráfego mais elevada necessitam de manutenções de seu revestimento com grande periodicidade. Em 2012, foram gastos R\$ 18,7 bilhões e em 2013 foram gastos R\$ 12,7 bilhões de reais na manutenção das rodovias. Além do elevado gasto nas manutenções, a má conservação das rodovias aumenta a quantidade de combustível gastos. Uma pesquisa realizada em 2013 pela CNT indicou um gasto de R\$ 1,39 bilhão de reais, agravando-se a situação pela emissão de gás carbônico (principal gás do efeito estufa) na atmosfera. Com a quantidade de combustível gasto chega-se a lançar 1,77 megatonelada desse gás em um ano, informa a pesquisa.

Diante deste déficit de estradas pavimentadas no país e sua relevância socioeconômica, fica clara a necessidade de estudos sobre a composição dos revestimentos das pavimentações, em especial para este trabalho o estudo do Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ), visando ao melhor aproveitamento de materiais (agregado graúdo), maior economia, durabilidade e desenvolvimento do conhecimento técnico.

Após a realização de todos os ensaios, os resultados possibilitarão propor a influência do agregado graúdo sobre o CBUQ, fornecerão parâmetros para determinação dos agregados utilizados em dosagem de concreto betuminoso, bem como ajudarão a definir as melhores proporções de acordo com cada necessidade de projeto proposto. Assim, essa pesquisa poderá ser utilizada como parâmetro para o meio técnico, auxiliando nas definições das dosagens de CBUQ que visem à maior economia, qualidade e benefícios ao meio ambiente.

Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios da Objetivo Serviços Asfálticos e no laboratório Carlos Campos em Goiânia.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo referente aos asfaltos decorre de muito tempo. Construído e aprimorado desde a antiguidade, ele passou a fazer parte e andar em compasso com a economia. Com as necessidades impostas pelo capitalismo crescente, o asfalto se tornou um dos materiais mais usados no século XX. Desta forma, surge a necessidade de melhorar as suas principais propriedades mecânicas, térmicas, entre outras, que influenciam em uma parcela considerável na durabilidade de uma pista em si (SOARES, 2008).

A produção do CBUQ possui um elevado custo para produção e execução em qualquer local do país que seja aplicado. Assim, a relevância deste trabalho decorre da necessidade da melhoria da pavimentação asfáltica de forma econômica, considerando-se que Anápolis tem se

tornado um dos maiores pólos econômicos do país, acarretando um maior desgaste rodoviário pelo intenso fluxo crescente de mercadorias. Com a carência de estudos relevantes na área de pavimentação, em especial na região de Anápolis, que não possui nenhum laboratório de testes de material pétreo nas universidades, torna-se necessário definir características das melhores dosagens que possam ser utilizadas.

Objetiva-se oferecer parâmetros para os orçamentistas calcularem seus próprios custos de acordo com variáveis de cada projeto e diante de parâmetros melhor definidos de cada rodovia, visando a maior economia, eficácia e menor impacto ambiental no dimensionamento dos itens mais onerosos da construção de uma rodovia, por fim auxiliando o meio técnico e acadêmico da Engenharia Civil.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

A pesquisa tem como objetivo geral analisar a influência dos agregados graúdos na estabilidade do concreto betuminoso ideal para revestimento asfáltico.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Visar a maior economia, eficácia e menor impacto ambiental com a dosagem adequada do concreto betuminoso.

Análise teórica dos componentes usados, suas propriedades físicas e químicas.

Verificar a influência na composição do CBUQ de acordo com a variável do agregado graúdo na dosagem.

Abranger nova linha de pesquisa para a região de Goiás, auxiliando assim o meio acadêmico e técnico.

## 1.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada na pesquisa foi o estudo laboral de CBUQ com análise dos resultados dos ensaios. Serão dosados três traços de CBUQ em três corpos-de-prova para cada traço (mistura), e em todos os traços serão fixados os seguintes componentes: agregado miúdo,

material de enchimento fíler e ligante asfáltico. O ligante utilizado será o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 e o agregado miúdo será a pó de pedra que apresente valor igual ou superior que 55% no ensaio de equivalente de areia.

Os ensaios necessários do agregado graúdo de acordo com as instruções da norma ES-031 (DNIT, 2006b) são: desgaste Los Angeles igual ou inferior a 40% conforme a ME-035 (DNER, 1998), admitindo-se excepcionalmente agregados com valores maiores, no caso de terem apresentado comprovadamente desempenho satisfatório em utilização anterior; índice de forma superior a 0,5 conforme a ME-086 (DNER, 1994b); adesividade ao ligante betuminoso com índice satisfatório de acordo com a ME-078 (DNER, 1994); densidade e absorção de acordo com a ME-081 (DNER, 1998b). Para a caracterização do agregado miúdo e material de enchimento são necessários os seguintes ensaios: equivalente de areia da norma ME-054 (DNER, 1997); densidade real e aparente, conforme a ME-084 (DNER, 1995b). Será adotado o mesmo agregado graúdo nos três traços do CBUQ, entretanto, será quantificado em três porções distintas para possibilitar a análise da influência deste na composição do concreto betuminoso e na fluência final.

Com os três valores do ensaio de fluência será possível analisar de forma gráfica uma curva que indique a evolução da resistência do CBUQ com o aumento e diminuição da proporção do agregado graúdo.

A composição do concreto betuminoso deverá satisfazer os valores de tolerância a respeito da granulometria ME-083 (DNER, 1998c). Os ensaios com a mistura serão: índice de vazios, relação betume/vazios e estabilidade mínima (KGF), todos segundo a norma ME-043 (DNER, 1995), e resistência à tração por compressão diametral estática a 25° C segundo a ME-136 (DNIT, 2010b). Todos observam os parâmetros para CBUQ de camada de revestimento (Faixa C) e que se englobam no chamado ensaios Marshall.

A UniEvangélica não possui laboratório de concreto betuminoso. Por isso a dosagem e parte dos ensaios foram realizados em parceria com empresa Objetivo Serviços Asfálticos. Os demais ensaios foram realizados no laboratório da empresa Carlos Campos em Goiânia. Foi utilizado para cálculos e geração de gráficos o software Excel.

## 2. CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE

### 2.1 HISTÓRICO

Pinto (2012) apresenta breve histórico da pavimentação com material betuminoso no Brasil, pontuando seu início a partir da década de 50 com a instalação da primeira refinaria de petróleo aprovada por lei pelo então presidente Getúlio Vargas em 1953, a Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão/SP (RPBC). Com a construção da RPBC, foi criada uma unidade de refino de petróleo para obtenção de asfalto (CAP), podendo definir essa data como o marco que iniciou efetivamente a construção de estradas e ruas revestidas com material betuminoso no Brasil.

Anteriormente, as poucas rodovias pavimentadas com material betuminoso eram construídas com asfalto importado do tipo natural, ou do refino do petróleo fabricado em países onde já haviam refinarias instaladas. Seu uso, no entanto, era bastante limitado devido à dificuldade da logística e do manuseio, uma vez que as técnicas usadas então eram a Macadame Betuminoso e o Tratamento Superficial.

Com a oferta de CAP, produzido pela RPBC a partir de 1956 e transportado a granel em carretas tanque, tem início uma nova fase da pavimentação a partir da técnica do CBUQ. Em contrapartida, o mercado passou a demandar equipamentos tanto para o processamento quanto para sua aplicação. As primeiras usinas foram importadas do Reino Unido entre os anos de 1956 e 1957. Somente em 1959 o mercado brasileiro respondeu e fabricou a primeira usina de CBUQ, situada em Caxias do Sul-RS. O CBUQ, a partir dessa data, passou a ter a hegemonia nas técnicas de pavimentação do País.

A partir de meados dos anos 60 até o início dos anos 90 não houve muitas mudanças nesse setor, pois os órgãos públicos não se interessavam pela inserção de novas técnicas já consagradas no exterior e nem na área de pesquisas referentes à pavimentação.

Foi somente a partir dos anos 90, com as privatizações, que as empresas que ganharam as concessões de atuar na área passaram a desenvolver novas técnicas e priorizar os custos. Tais empresas, assim como os distribuidores de asfalto, investiram amplamente em pesquisas para modificação dos asfaltos brasileiros para que apresentassem as características específicas com relação ao padrão internacional.

De acordo com Silva (2011), o Brasil apresentou um atraso em relação a outros países no desenvolvimento da malha pavimentada. Entretanto, mesmo com a baixa quantidade de

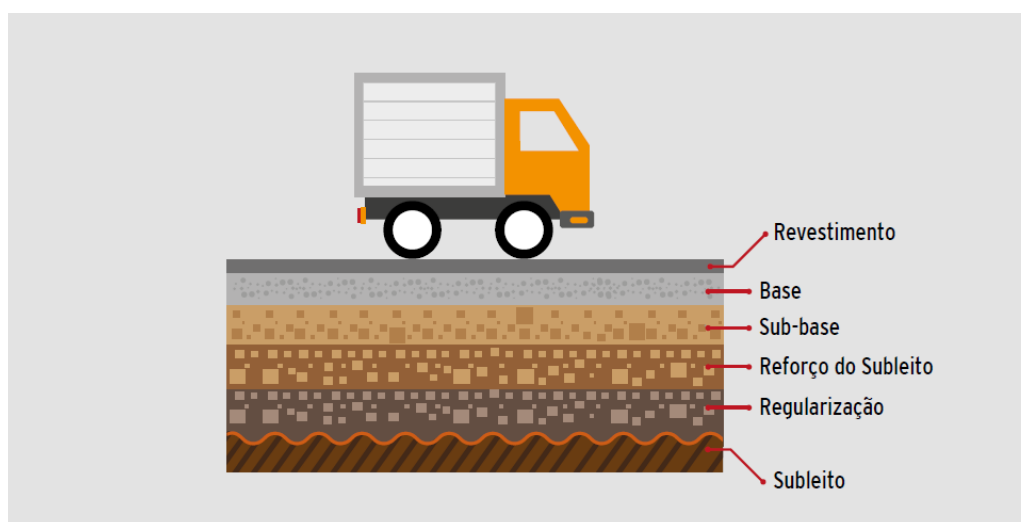
rodovias pavimentadas, o país tem mostrado um crescimento médio de 3 a 6% no tráfego de veículos nas estradas, dependendo da região. Atualmente o governo federal tem se preocupado com o desenvolvimento da infraestrutura de transportes do país: houve amplo investimento em obras de implantação, duplicação e manutenção da malha rodoviária federal, proporcionando a melhoria do transporte rodoviário brasileiro.

## 2.2 DEFINIÇÃO

### 2.2.1 Pavimento

Pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas (Figura 1), assentado sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito. O pavimento, por injunções de ordem técnico-econômicas, é uma estrutura de camadas em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são colocadas em contato, resultando daí um elevado grau de complexidade no que tange ao cálculo de tensões e deformações e atuantes nas mesmas resultantes das cargas impostas pelo tráfego (DNIT, 2006c).

Figura 1 – Estrutura do Pavimento



Fonte: CNT, 2017b.

De acordo com a Pesquisa CNT de rodovias (CNT, 2017), cada uma das camadas que compõem o pavimento possui uma função específica, a saber:

- O revestimento é destinado a resistir às ações do tráfego; deve ser impermeável a fim de evitar que a penetração da água da chuva atinja as demais camadas subjacentes; e deve ser confortável para melhor atender às condições de rolamento e oferecer segurança ao usuário. O revestimento é a única camada perceptível ao usuário da via.

- A base é a camada que possui a finalidade de resistir às ações do tráfego de maneira a aliviar as tensões no revestimento e distribuí-las para as camadas inferiores.

- A sub-base é a camada complementar à base, quando, por qualquer circunstância, não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito.

- O reforço do subleito é a camada executada sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, utilizada quando se torna necessário reduzir espessuras elevadas da camada de sub-base, originadas pela baixa capacidade de suporte do subleito.

- A camada de regularização possui espessura variável, podendo deixar de existir em alguns trechos, e possui a função de corrigir falhas da camada final de terraplenagem ou de um leito antigo de estrada de terra.

- O subleito é o terreno da fundação do pavimento ou o terreno original, portanto não é considerado uma camada.

Segundo o Manual da Pavimentação (DNIT, 2006c), de uma forma geral, os pavimentos são classificados em flexíveis, semi-rígidos e rígidos:

- Flexível: aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Exemplo: CBUQ.

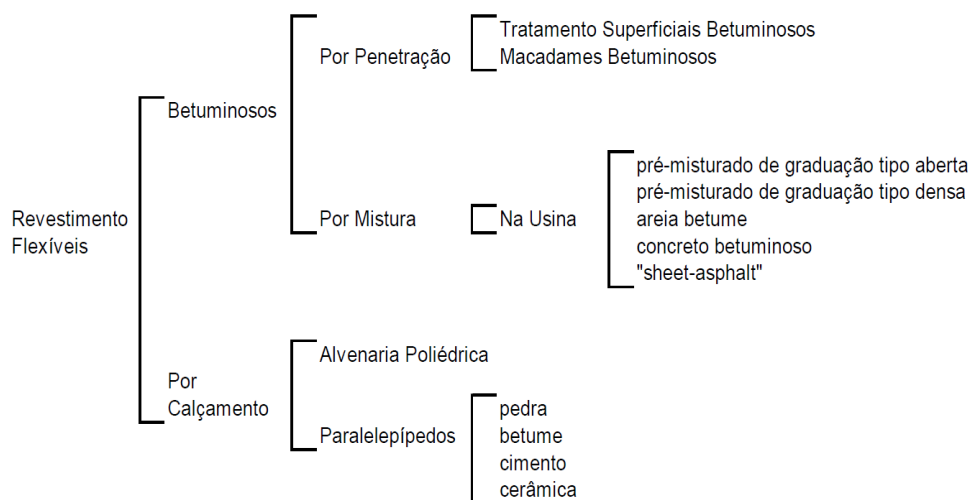
- Semi-Rígido: caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.

- Rígido: aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

### **2.2.2 Revestimento Flexível**

Os revestimentos flexíveis (Figura 2) podem, por sua vez, ser subdivididos em betuminosos e por calçamento, sendo os revestimentos betuminosos constituídos por associação de agregados e materiais betuminosos (DNIT, 2006c).

**Figura 2 - Classificação dos Revestimentos**



Fonte: Adaptado de DNIT, 2006c.

### 2.2.2.1 Revestimentos por Mistura

Nos revestimentos betuminosos por mistura, o agregado é pré-envolvido com o material betuminoso, antes da compressão. Além disso, podem ser classificados como Pré-misturados à frio (quando os tipos de agregados e de ligantes utilizados permitem que o espalhamento seja feito à temperatura ambiente) e Pré-misturados à quente (quando o ligante e o agregado são misturados e espalhados na pista ainda quentes).

A designação CBUQ ou Concreto Asfáltico (CA) tem sido reservada para pré-misturados à quente de graduação densa, em que são feitas rigorosas exigências quanto a equipamentos de construção e índices tecnológicos (DNIT, 2006b).

Segundo a norma ES-031 (DNIT, 2006b), concreto asfáltico, também denominado Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ), é a mistura executada à quente, em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (fíler) se necessário e cimento asfáltico, espalhada e compactada à quente. Pode ser empregado como revestimento, camada de ligação (binder), base, regularização ou reforço do pavimento. Os materiais constituintes do concreto asfáltico são: agregados graúdo, agregado miúdo, material de enchimento fíler e ligante asfáltico, os quais devem satisfazer às Normas pertinentes, e às Especificações aprovadas pelo DNIT:

- Cimento asfáltico: podem ser empregados os seguintes tipos de cimento asfáltico de petróleo: CAP-30/45; CAP-50/70 e CAP-85/100.

- Agregado graúdo: o agregado graúdo pode ser pedra britada, escória, seixo rolado preferencialmente britado ou outro material indicado nas Especificações Complementares.
- Agregado miúdo: o agregado miúdo pode ser areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos ou outro material 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 ou superior a 55%.
- Material de enchimento (fíler): quando da aplicação deve estar seco e isento de grumos, e deve ser constituído por materiais minerais finamente divididos, tais como cimento Portland, cal extinta, pós-calcários, cinza volante, etc.; de acordo com a EM-367 (DNER, 1997b).

## 2.3 ASPECTOS COMPARATIVOS

### 2.3.1 Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) ou Concreto Asfáltico (CA)

O CBUQ é um revestimento flexível, resultante da mistura à quente em usina própria. Possui características específicas compostas de agregado mineral de granulometria graduada, material de enchimento (fíler), se necessário, e ligante betuminoso, dosado, espalhado e comprimido à quente. A mistura deve ser feita com controle rigoroso de granulometria, teor de betume, temperaturas do agregado, transporte, estabilidade, aplicação e compressão. Por isso, é o serviço de mais apurado controle dentre os que compõem as etapas de pavimentação.

### 2.3.2 Micro revestimento à frio (MRAF)

Essa técnica de revestimento surgiu na década de 70 na Europa e posteriormente disseminou-se nos EUA. Pode ser considerada uma evolução de outras técnicas já consagradas de aplicação à frio por ser composta por um sistema muito similar ao da lama asfáltica. No entanto, necessita de materiais, equipamentos e controles de desempenho e qualidades mais rígidos, com um emprego mais amplo. No Brasil, a primeira experiência fiscalizada pelo DNIT foi na rodovia Presidente Dutra/BR 116 (REIS et al, 2010).

Segundo Bernucci et al (2010), pode-se definir o microrrevestimento como uma mistura à frio processada em usina móvel especial, de agregados minerais, material de



enchimento (filer), água, emulsão asfáltica modificada por polímeros e eventualmente adição de aditivos, como fibras, que devem ser espalhados sobre uma superfície. Ainda de acordo com o autor, uma das grandes vantagens do microrrevestimento com emulsão asfáltica é que a emulsão é preparada de forma a permitir uma mistura aos agregados de forma lenta, e logo após, sua ruptura é rápida permitindo uma ágil liberação do tráfego.

Segundo Reis et al (2010), a principal aplicação do MRAF é a manutenção preventiva e durabilidade dos pavimentos que necessitam da adequação nas condições de aderência pneu-pavimento. É também utilizado como camada de revestimento final de pavimentos flexíveis ou rígidos, mas estes não devem apresentar problemas nas suas camadas subjacentes, pois o mesmo, após sua aplicação, tem ganho estrutural mínimo ou praticamente inexistente. Dessa forma, não há função de corrigir problemas estruturais. Caso haja ondulações, buracos ou outros é necessária a correção ideal prévia. As figuras 3 e 4 mostram exemplos da aplicação, antes, durante e depois do microrrevestimento como camada de manutenção de pavimento em uso.

**Figura 3 - Exemplos de aplicação de microrrevestimento asfáltico em rodovia de tráfego pesado como restauração funcional.**



Fonte: Bernucci et al, 2010.

**Figura 4 - Exemplo de aplicação de microrrevestimento asfáltico**



Fonte: Bernucci et al, 2010.

### 2.3.2.1 Materiais

Assim como em todos os outros processos, a qualidade dos agregados são de extrema importância. Para Reis (2010), a qualidade do agregado mineral na produção do microrrevestimento é de extrema importância na mistura, tanto para a aderência pneu-pavimento como na drenagem superficial.

Os materiais de enchimento ou fíler, como o cimento Portland ou cal hidratada, além de preencherem os vazios, melhoram a coesão da massa asfáltica aplicada. Sobre o fíler mineral é importante ressaltar que o mesmo minimiza a segregação dos agregados devido ao acréscimo da consistência da mistura asfáltica e acelera o processo de cura pelo ganho de velocidade da liberação da água e, como resultado, sua coesão.

A emulsão asfáltica é composta por características específicas variando para cada tipo de via, clima e tráfego. A emulsão asfáltica modificada por polímeros confere ao MRAF características como menor suscetibilidade térmica, melhores propriedades adesivas ao substrato e na selagem de rachaduras e maior resistência ao desgaste e ao envelhecimento da mistura asfáltica. O Quadro 1 exemplifica as faixas granulométricas que podem ser empregadas no microrrevestimento, segundo a norma DNIT-ES 035/2005 .

**Quadro 1 - Faixas Granulométricas da Norma DNIT 035/2005 – ES**

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA MISTURA DE AGREGADOS					
PENEIRA DE MALHA QUADRADA		PORCENTAGEM PASSANDO EM PESO			TOLERÂNCIA DA CURVA DE PROJETO (%)
PENEIRAS		FAIXA I	FAIXA II	FAIXA III	
NOME	ABERTURA, mm				
1/2	12,5	-	-	100	-
3/8	9,5	100	100	85 - 100	±5
nº 4	4,75	90-100	70-90	60-87	±5
nº 8	2,36	65-90	45-70	40-60	±5
nº 16	1,18	45-70	28-50	28-45	±5
nº 30	0,60	30-50	19-34	19-34	±5
nº 50	0,33	18-30	12-25	14-25	±5
nº 100	0,15	10-21	7-18	8-17	±5
nº 200	0,075	5-15	5-15	4-8	±3
Asfalto residual	% em peso do agregado	7,5-13,5	6,5-12,0	5,5-7,5	±2
Filer	% em peso do agregado	0-3	0-3	0-3	±0,3
Polímero	% em peso do asfalto residual	3 mín.	3 mín.	3 mín.	-
Taxa de aplicação	kg/m <sup>2</sup>	5-11	8-16	15-30	-
Espessura (mm)	-	4-15	6-20	12-37	-
Utilização		Áreas urbanas Aeroportos	Rodovias de tráfego pesado Trilhas de roda	Regularização de rodovias e Rodovias de tráfego pesado	-

Fonte: ABEDA, 2010.

O Quadro 2 refere-se ao consumo de materiais para microrrevestimento, tem como referência as espessuras previamente definidas sobre pavimentos perfeitamente lisos e uniformes.

**Quadro 2 - Consumo Teórico de Materiais**

FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DNIT 035/2005 – ES	I	II	III
Espessura acabada, mm	4 a 15	6 a 20	12 a 37
Mistura seca de agregados, kg/m <sup>2</sup>	5 a 19	8 a 16	15 a 30
Emulsão asfáltica com polímeros, kg/m <sup>2</sup>	0,5 a 1,5	0,9 a 2,0	1,5 a 3,0

Fonte: ABEDA, 2010.

### 2.3.3 Tratamento Superficial

De acordo com Bühler (2003), uma das primeiras aplicações de tratamento superficial ocorreu em 1840 na avenida Champs-Élysées em Paris. Por isso, essa técnica é uma das mais antigas da história da pavimentação. Trata-se de uma técnica de baixo custo de implantação e execução, tendo sido muito empregada ao longo dos anos nas rodovias brasileiras.

De acordo com Bernucci et al (2010), os exemplos de tratamentos superficiais baseiam-se na utilização de ligantes asfálticos e agregados sem nenhuma mistura anterior na pista, seguido de compactação que promove o recobrimento parcial e a adesão entre agregados e ligantes. Ainda segundo o autor diferem-se o tratamento superficial em dois tipos, sendo o de penetração direta aquele em que a pintura asfáltica é feita sobre a camada de agregado em que deverá atuar como ligante. A penetração neste caso se dá pelo efeito da gravidade e pela compressão dos rolos compressores e do tráfego posteriormente. E o tratamento superficial de penetração invertida é caracterizado pela aspersão de pintura asfáltica sob a camada de agregado em que deve atuar, já neste segundo caso o asfalto deverá subir pelos vazios pela compressão dos rolos e pelo eventual tráfego.

Funções primordiais do tratamento superficial:

- Proporcionar uma camada de rolamento de pequena espessura, mas de alta resistência ao desgaste.
- Impermeabilizar o pavimento e proteger a infraestrutura.
- Obter uma camada antiderrapante.
- Proporcionar um revestimento de alta flexibilidade que possa acompanhar deformações grandes da infraestrutura.

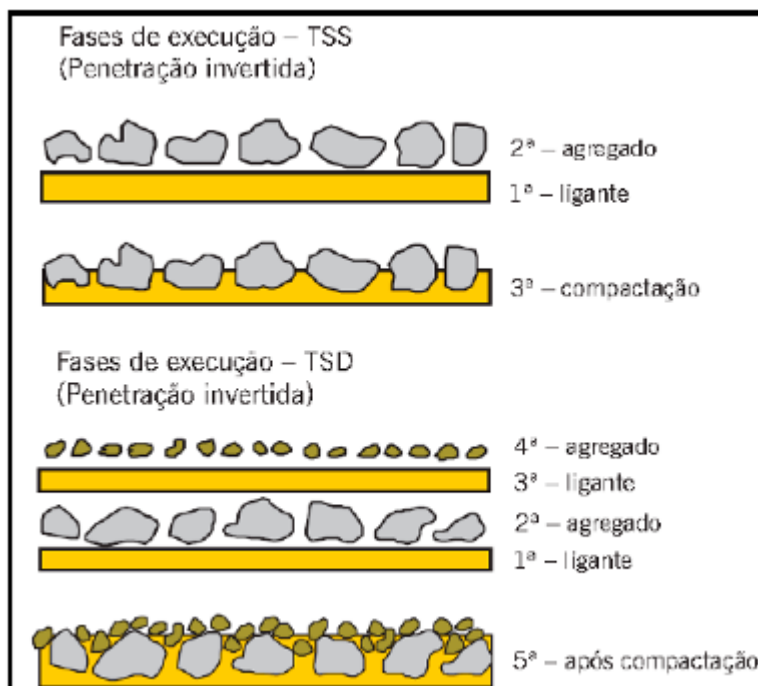
Porém, por conta dessa fina camada, o tratamento superficial não corrige irregularidades na camada de rolamento e não tem considerável influência na resistência do pavimento.

De acordo com o número de camadas sucessivas de ligantes e agregados, os tratamentos superficiais podem ser:

- TSS: tratamento superficial simples;
- TSD: tratamento superficial duplo;
- TST: tratamento superficial triplo.

A imagem a seguir (Figura 5) mostra esquematicamente esses três tipos de revestimentos.

**Figura 5 - Esquema de tratamentos superficiais**



Fonte: Nascimento, 2004 apud Bernucci et al, 2010.

### 2.3.3.1 Tratamento Superficial Simples

O Tratamento Superficial Simples (TSS), como já diz o nome, se dá quando o tratamento é constituído por uma única aplicação asfáltica e posteriormente coberta por uma única camada de agregado (Senço, 2001).

O Quadro 3 apresenta um consumo teórico de materiais para os tratamentos simples:

**Quadro 3 - Consumo Teórico de Materiais no TSS**

TIPO DE MATERIAL	TRATAMENTO SIMPLES (l/m <sup>2</sup> ) (1)	TRATAMENTO SIMPLES COM BANHO DILUÍDO (l/m <sup>2</sup> ) (1)
Pedrisco ¼" ou 3/8"	5 a 6	5 a 6
Emulsão asfáltica, RR-2C (2)	1,00 a 1,20	1,40

(1) Considerando, em média, o peso específico da emulsão asfáltica 1,0 kg/l.

(2) Dependendo do projeto poderá ser empregada emulsão asfáltica elastomérica (RR2C-E).

Fonte: ABEDA, 2010.

### 2.3.3.2 Tratamento Superficial Duplo

O Tratamento Superficial Duplo (TSD) trata-se da aplicação de uma dupla camada de material betuminoso cada uma seguida da cobertura de agregados, sendo a primeira camada de

agregados graúdos e a segunda se agregados miúdos, ambas com operação de compressão e acabamento (Senço, 2001).

O Quadro 4 apresenta um consumo teórico de materiais para os tratamentos duplo:

**Quadro 4 - Consumo Teórico de Materiais no TSD**

TIPO DE MATERIAL	TRATAMENTO DUPLO (l/m <sup>2</sup> ) (1)	TRATAMENTO DUPLO COM BANHO DILUÍDO (l/m <sup>2</sup> ) (1)	TRATAMENTO DUPLO COM CAPA SELANTE (l/m <sup>2</sup> ) (1)
Pedra 1/2" ou 5/8" ou 3/4"	9 a 14	9 a 14	9 a 14
Pedrisco 1/4" ou 3/8"	5 a 6	5 a 6	5 a 6
Pó de pedra ou areia	-	-	5 a 6
Emulsão asfáltica, RR-2C (2)	2,00 a 2,20	2,7 a 2,9	3,0 a 3,2

(1) Considerando, em média, o peso específico da emulsão asfáltica 1,0 kg/l.

(2) Dependendo do projeto poderá ser empregada emulsão asfáltica elastomérica (RR2C-E).

Fonte: ABEDA, 2010.

### 2.3.3.3 Tratamento Superficial Triplo

O revestimento para o Tratamento Superficial Triplo (TST) é composto pela aplicação de três camadas de ligante asfáltico e de três camadas de agregados de granulometria decrescente de baixo para cima (Senço, 2001).

O Quadro 5 apresenta um consumo teórico de materiais para os tratamentos triplo:

**Quadro 5 - Consumo Teórico de Materiais no TST**

TIPO DE MATERIAL	TRATAMENTO TRIPLO (l/m <sup>2</sup> ) (1)	TRATAMENTO TRIPLO COM BANHO DILUÍDO (l/m <sup>2</sup> ) (1)	TRATAMENTO TRIPLO COM SELANTE (l/m <sup>2</sup> ) (1)
Pedra 1"	16 a 18	16 a 18	16 a 18
Pedrisco 1/2" ou 5/8" ou 3/4"	9 a 14	9 a 14	9 a 14
Pedrisco 1/4" ou 3/8"	5 a 6	5 a 6	5 a 6
Pó de pedra ou areia	-	-	5 a 6
Emulsão asfáltica, RR-2C (2)	3,4 a 3,7	4,1 a 4,4	4,4 a 4,7

(1) Considerando, em média, o peso específico da emulsão asfáltica 1,0 kg/l.

(2) Dependendo do projeto poderá ser empregada emulsão asfáltica elastomérica (RR2C-E).

Fonte: ABEDA, 2010.

### 2.3.4 Comparativo

Segundo o Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2006d), define-se o Fluxo de Tráfego como a quantidade de veículos que passam por um via em uma determinada unidade

de tempo. Esse quantitativo é mostrado normalmente em veículos/dia (vpd) ou veículos/hora (vph).

Segundo PMSP (2004), as vias urbanas serão classificadas para fins de dimensionamento (Quadro 6), conforme os seguintes tipos:

- Tráfego Leve;
- Tráfego Médio;
- Tráfego Meio Pesado;
- Tráfego Pesado;
- Tráfego Muito Pesado.

**Quadro 6 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego.**

Função predominante	Tráfego previsto	Vida de projeto	Volume inicial faixa mais carregada		Equivalente / Veículo	N	N característico
			Veículo leve	Caminhão/ Ônibus			
Via local	LEVE	10	100 a 400	4 a 20	1,5	$2,70 \times 10^4$ a $1,40 \times 10^5$	105
Via local e coletora	MÉDIO	10	401 a 1500	21 a 100	1,5	$1,40 \times 10^5$ a $6,80 \times 10^5$	$5 \times 10^5$
Vias Coletoras e Estruturais	MEIO PESADO	10	1501 a 5000	101a 300	2,3	$1,4 \times 10^5$ a $3,1 \times 10^5$	$2 \times 10^5$
	PESADO	12	5001 a 10000	301 a 1000	5,9	$1,0 \times 10^7$ a $3,3 \times 10^7$	$2 \times 10^7$
	MUITO PESADO	12	> 10000	1001 a 2000	5,9	$3,3 \times 10^7$ a $6,7 \times 10^7$	$5 \times 10^7$
Faixa Exclusiva de Ônibus	VOLUME MÉDIO	12		< 500		$3 \times 10^{5(1)}$	107
	VOLUME PESADO	12		> 500		$5 \times 10^7$	$5 \times 10^7$

Fonte: PMSP, 2004.

O comparativo feito entre os tipos de pavimentos relaciona a sua utilização quanto às necessidades de cada via (Quadro 7), para que, devido à solicitação de carga pelo volume de tráfego da pista, a mesma traga as melhores condições de conforto e segurança aos usuários que nela trafegam.

**Quadro 7 - Espessura mínima do revestimento betuminoso.**

<b>N</b>	<b>Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso</b>
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: DNIT, 2006d.

Desta forma, conclui-se que o pavimento destinado à cada necessidade varia de acordo com um índice caracterizado por um número “N”, para que se determine um melhor tipo de pavimento a ser instalado, evitando assim desperdício na utilização de uma camada mais espessa com uso maior de agregados e outros, pois dependendo da situação não há necessidade desta, quando por exemplo o fluxo de veículos no local é baixo. O mesmo se dá ao contrário, na utilização de camadas mais finas ou tipo de pavimentação diferente, mesmo havendo a necessidade de um outro tipo de pavimentação pela quantidade do fluxo de tráfego.

## 2.4 MATERIAIS

### 2.4.1 Agregados

Todos os revestimentos asfálticos constituem-se de associações de ligantes asfálticos, de agregados e, em alguns casos, de produtos complementares. Essas associações, quando executadas e aplicadas apropriadamente, devem originar estruturas duráveis em sua vida de serviço. Para que isso ocorra, deve-se conhecer e selecionar as propriedades que os agregados devem conter (Bernucci et al, 2010).

A norma NBR-9935 (ABNT, 2011) traz uma série de definições terminológicas para os agregados:

- Quanto à natureza; os agregados podem ser diferenciados como naturais, artificiais e reciclados. Os naturais são aqueles que podem ser utilizados tal e qual encontrados



na natureza e/ou submetido a algum processo de britagem ou classificação. Os artificiais são aqueles submetidos a algum tipo de alteração mineralógica.

- Quanto às dimensões tem-se 3 grupos: Agregado graúdo no qual os seus grãos passam pela peneira 3” e ficam retidos na peneira N° 4. Os Agregados miúdos são aqueles no qual os seus grãos passam pela peneira N° 4 e ficam retidos na peneira N° 200. Por sua vez definido também como material de enchimento o Fíler é o material passante na peneira N° 200 e retido no Fundo. O Quadro 8 exemplifica a graduação das peneiras de granulometria.

**Quadro 8 – Dimensões nominais das peneiras utilizadas segundo a ME-035 (DNER, 1995)**

Vão da peneira		Abertura da peneira	
Padrão	Número	Milímetros	Polegadas
75,0mm	-	75	3
50,0mm	-	50	2
37,5mm	-	37,5	1,5
25,0mm	-	25	1
19,0mm	-	19	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	0,0789
1,18mm	16	1,18	0,0469
600µm	30	0,6	0,0234
425µm	40	0,425	0,0168
300µm	50	0,3	0,0117
150µm	100	0,15	0,0059
75µm	200	0,075	0,0029

Fonte: Bernucci et al, 2010.

O tipo de rocha encontrada nessa jazida da Pedreira Anápolis pertence a família do granito, classe de rochas ígneas, que possuem granulação grossa e esfriamento lento. A Figura 6 mostra a jazida da pedreira de onde foi retirado o material para estudo.

**Figura 6 - Pedreira Anápolis**

Fonte: Próprios autores, 2018.

#### **2.4.2 Ligante asfáltico (CAP)**

Segundo Abeda (2010), cerca de 98% de todo asfalto no mundo é obtido através do processo de destilação do petróleo. De toda a produção brasileira, um total de 95% é utilizado para a pavimentação, sendo esses comumente denominados de cimentos asfálticos de petróleo (CAPs), de modo a distinguir dos asfaltos utilizados para outros fins que não sejam a pavimentação.

Os CAPs possuem propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, e também resistência à ação de grande maioria de materiais inorgânicos, o que confere a ele características para o seu alto desempenho como matéria-prima da engenharia na construção e manutenção rodoviária.

Esse material tem suas especificações segundo a norma EM-095 (DNIT, 2006). Há quatro tipos de CAPs no mercado brasileiro, sendo classificados por penetração: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200, configurando esses os produtos básicos para a produção de outros materiais asfálticos (Quadro 9).

**Quadro 9 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP)**

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 - 45	50 - 70	85 - 100	150 - 200	NBR 6576	D 5	ME 003/99
	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol	s					NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135 °C, mín		192	141	110	80			
a 150 °C, mín		90	50	43	36			
a 177 °C		40 - 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60			
OU								
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín		374	274	214	155			
a 150 °C, SP 21, mín.		203	112	97	81			
a 177 °C, SP 21		76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114			
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							D 2872	
Varição em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: EM-95 (DNIT, 2006).

## 2.5 MÉTODOS DE ENSAIO

### 2.5.1 Materiais utilizados

Todos os agregados utilizados na pesquisa são provenientes da coleta do material produzido pela Pedreira Anápolis, conforme a norma PRO-120 - Coleta de amostras de agregados (DNER, 1997c). Foram utilizados cerca de 60 kg de agregados, sendo classificados como Brita 0, Brita 1 e Pó de pedra. O concreto asfáltico de petróleo foi disponibilizado pela empresa Objetivo – Serviços Asfálticos, sendo este o CAP 50/70, fornecido de acordo com a disponibilidade da empresa.

### **2.5.2 Ensaio do Ponto de Penetração**

A norma ME 155 - Determinação da Penetração do material asfáltico (DNIT, 2010c), mostra que o ensaio de penetração é determinado pela profundidade, em décimos de milímetros, que a agulha de massa padronizada (100g) penetra em uma amostra de CAP, durante 5 segundos, à temperatura de 25°C, sendo feitas três medidas individuais para cada amostra. Para a execução do ensaio, são utilizados um recipiente de penetração de dimensões conforme a norma, um penetrômetro, agulhas, cuba de transferência, cronometro graduado em 0,1s e termômetro de imersão total. O resultado da penetração é obtido por meio da média das três penetrações, cujos valores não devem se afastar entre si mais do que o especificado em norma.

### **2.5.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento**

O ensaio realizado é regido pela norma ME 131- Determinação do ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola (DNIT, 2010), no qual deve ser determinado o ponto de amolecimento do cimento asfáltico entre 30°C e 157°C, sendo utilizada aparelhagem de Anel e Bola. Os equipamentos utilizados no ensaio são: anéis de latão, guias das bolas, bolas de aço, suporte de latão, béquer de vidro, termômetro de vidro, bico de Bunsen ou aquecedor elétrico, espátula metálica e placa de latão para moldagem do material nos anéis.

Para a realização do ensaio a bola de aço é colocada no centro da amostra de asfalto que está dentro dos anéis metálicos de latão. Todo o conjunto é colocado sobre o suporte de latão dentro do béquer com um banho de água. Todo esse conjunto é aquecido e quando o asfalto amolecer e não suportar o peso da bola, ela se desloca em direção ao fundo do béquer. A temperatura é marcada no instante em que mistura amolecida toca o fundo. Como o teste é feito sempre com duas amostras (uma ao lado da outra), se a diferença no ponto de amolecimento entre as duas for maior que 2°C, o ensaio deve ser refeito.

### **2.5.4 Viscosidade Brookfield**

A norma na qual é descrito o ensaio é a NBR-15184 – Determinação da viscosidade (ABNT, 2005b) em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional, como por exemplo o Brookfield Thermocel, Haake, entre outros.

Para a realização do ensaio é necessário um viscosímetro, que no presente trabalho foi utilizado no modelo Brookfield, sendo este um viscosímetro rotacional capaz de determinar o

torque necessário para girar a uma velocidade constante, quando imerso em uma amostra à temperatura de ensaio. Utiliza-se também uma haste, conforme especificações da norma, recipiente térmico com temperatura controlada, câmara de amostra, termômetro e uma balança.

O procedimento inicia-se ao acoplar a câmara, com a haste já imersa na amostra, ao viscosímetro e dar início ao processo de rotação do mesmo, mantendo a velocidade e a amostra em equilíbrio e observando a temperatura para não haver desvios maiores que 1 °C durante o procedimento. Analisa-se a viscosidade e o torque em intervalos de 1 minuto, salvo os aparelhos que executam essa análise automaticamente.

No resultado de viscosidade, deve-se conter a velocidade utilizada, sendo esta expressa em rotações por minuto (rpm) e a viscosidade expressa em graus Celsius ou centipoise.

#### **2.5.5 Ensaio de ponto de fulgor**

Para Bernucci (2001), o ponto de fulgor é um ensaio que tem como principal característica estar ligado à segurança do manuseio, transporte e estocagem do CAP. A NBR-11341 - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vasos abertos Cleveland (ABNT, 2015), diz que para a realização do ensaio são necessários os seguintes equipamentos: uma cuba de ensaio, uma placa de aquecimento, um aplicador de chama de ensaio, um aquecedor e os suportes descritos nos anexos da norma, e um termômetro.

São adicionados aproximadamente 70ml da amostra na cuba de ensaio, sendo aquecido pela placa de aquecimento, seguindo orientações da norma. Passa-se a chama sobre a cuba, pois o ponto de fulgor é a menor temperatura onde a amostra inicia o processo de liberação de gases inflamáveis. Sendo assim, nessa temperatura, a chama sobre a cuba causa a ignição do processo de combustão da amostra. O resultado consiste em anotar a temperatura na qual a amostra iniciou o processo de queima.

#### **2.5.6 Ensaio de abrasão “Los Angeles”**

O ensaio é feito segundo as normas da ME-035 - Determinação da abrasão “Los Angeles” (DNER, 1998) e NBR NM-51 (ABNT, 2001). Tem como principal objetivo calcular o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles”, junto com uma carga abrasiva, sujeito a uma quantidade de voltas desta máquina à velocidade constante de 30 rpm a 33 rpm. Seu resultado é expresso pela porcentagem do material, em peso, que passa após

o ensaio pela peneira de 1,7 mm. Quanto à aparelhagem do ensaio, procede-se da seguinte forma: uma balança para 20 kg, sensível a 1g, carga abrasiva, estufa, máquina “Los Angeles” e peneiras de malha quadrada.

Para a graduação da amostra indica-se que esta deve ter granulometria semelhante à usada na obra, porém poderá ser executada de acordo com os interessados. Esta amostra deve ser graduada dentre uma dessas graduações A, B, C, D, E, F e G, e deve ter massa de acordo com o Quadro 10.

**Quadro 10 - 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 (DNIT, 1998).

Na preparação das amostras para o ensaio deve-se lavar todo o material recebido e secar até verificar constância de peso. Após, peneira-se e quarteia-se o agregado nas diferentes porções nas diferentes peneiras, para oferecer a graduação escolhida na amostra, e determina-

se as massas das porções da graduação escolhida segundo as especificações da Tabela 2 da referida norma.

A carga abrasiva e quantidade utilizada no ensaio é também determinada de acordo com a graduação escolhida, seguindo as especificações do Quadro 11.

**Quadro 11 - Carga Abrasiva**

Graduação	Número 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 (DNIT, 1998).

Quanto aos resultados: A abrasão é determinada pela fórmula:

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

Na qual:

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.

### 2.5.7 Ensaio de análise granulométrica

O ensaio descrito pela norma ME-083 – Análise Granulométrica (DNER, 1998c) tem por seu principal objetivo descrever o procedimento para a análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos a partir do peneiramento. Para a realização do ensaio, a coleta das amostras deve seguir as normas prescritas na PRO-120 (DNER, 1997c). Essas mesmas amostras devem ser secas em estufa e depois de esfriar em temperatura ambiente, devem ser pesadas. No

procedimento manual de peneiramento, inicia-se pela peneira de maior abertura seguida das demais dessa série (ordem decrescente), e após a agitação delas as massas retidas em cada uma das peneiras são utilizadas para os cálculos de obtenção dos resultados.

O número de peneiras e suas aberturas são determinadas de acordo com o tipo de material final na qual será utilizado esse agregado, seguindo as normas do DNIT. O resultado é obtido através de um cálculo simples para a determinação da porcentagem de material retido ou mesmo passante em cada peneira, em relação à quantidade total no início do processo.

### **2.5.8 Ensaio de equivalente de areia**

A norma ME-054 – Equivalente de areia (DNER, 1997) descreve os requisitos para determinação do equivalente de areia de solos ou agregados miúdos, levando em consideração a relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa, em uma proveta. Na realização do ensaio são necessários os equipamentos: peneira N° 4, proveta cilíndrica e um pistão constituído por uma haste metálica de 46 cm e tendo na base uma sapata cônica de 25,4mm de diâmetro, e uma solução obtida a partir da mistura de alguns componentes que devem seguir rigorosamente a dosagem segundo a norma.

Para o ensaio peneira-se a amostra, e utiliza 110 g do material passante na peneira N° 4. Após encher a proveta com a solução até o traço de referência de 10 cm, acrescentar a amostra de 110 g, devendo-se bater no fundo da proveta para retirar as bolhas de ar e ajudar a molhar a mistura, e a seguir deixar a proveta por 10 minutos em repouso.

Findos os 10 minutos de repouso tapa-se a proveta com uma rolha e agita-se a proveta em movimentos horizontais, executa-se 90 ciclos em aproximadamente 30 segundos. Ao retirar a rolha, enche-se a proveta com a solução, até o traço de referência de 38 cm da base, e então deixar a proveta por 20 minutos em repouso.

Após esse tempo de repouso determinar a altura do nível superior da suspensão argilosa, medindo com uma precisão máxima de 2mm. Então, introduzir o pistão na proveta até que esteja completamente assentado e logo após realizar uma nova leitura do nível superior da suspensão argilosa.



O resultado é obtido a partir do cálculo:

$$EA = \frac{\text{Altura da 1ª leitura}}{\text{Altura da 2ª leitura}} \times 100 \quad (2)$$

Dessa forma, o resultado é determinado a partir de uma média de três determinações, e expresso em porcentagem.

### 2.5.9 Ensaio de índice de forma

A realização do ensaio é regida pela NBR 7809 – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro (ABNT, 2006), que tem por objetivo determinar o índice de forma de agregados graúdos com dimensões características maiores que 9,5mm. Para a realização deste ensaio foi utilizado um paquímetro com resolução de 0,1mm 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.

Para a preparação da amostra, deve-se fazer a redução da amostragem dos agregados através de um quarteador, secá-la na estufa e analisá-la granulometricamente, dividindo em frações e desprezando todo o material passante na peneira de 9,5mm e também aqueles que possuem massa inferior a 5% do que foi retido. Quanto ao procedimento experimental, cada fração obtida foi quantizada até o número de grãos obtidos, dado pela seguinte equação:

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

Na qual:

200 = é o número de grãos a serem analisados;

$Ni$  = é o número de grãos a serem medidos na fração  $i$ ;

$Fi$  = é a porcentagem de massa retida na fração  $i$ ;

Após o cálculo de todas as frações e separadas as 200 amostras, com o auxílio de um paquímetro, aferir o comprimento e espessura de cada um dos grãos, lembrando-se sempre que o comprimento será a maior medida em qualquer direção do grão, e a espessura, a menor distância possível entre planos paralelos entre si em qualquer direção do grão. Para obtenção

dos resultados deve-se calcular o índice de forma através da média das relações entre comprimento e espessura ( $c/e$ ) de todos os grãos da fração, dividida pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica.

#### **2.5.10 Ensaio de adesividade ao ligante betuminoso**

A norma regulamentadora é a ME-078 - Adesividade e Ligante Betuminoso (DNER, 1994). Procedese o ensaio da seguinte forma: a amostra de agregado com massa de 500g será lavada e imersa em água destilada por 1 minuto e logo após descansará em estufa por 2 horas com temperatura em torno de 120°C. O ligante betuminoso também deverá estar nessa temperatura, caso seja cimento asfáltico. Para de fato realizar o ensaio a amostra deverá estar a 100°C e será envolvida pelo ligante betuminoso por uma espátula e após secar/curar será colocado em um vidro, imersa em água destilada e descansará por 72h a 40°C. O resultado será aceitável caso não haja nenhum descolamento da película betuminosa no tempo de descanso.

#### **2.5.11 Ensaio de densidade e absorção do agregado graúdo**

A descrição do ensaio é feito pela ME-081 – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo (DNER, 1998b). Para a realização do ensaio são necessários: uma balança, de resolução mínima de 1 g, e que contenha dispositivo para pesagem hidrostática, recipiente para armazenar material, tanque com água, estufa e peneiras de 2,0 mm a 4,75 mm de abertura.

A amostra deve ser coletada de acordo com a PRO-120 (DNER, 1997c) e quarteada para redução da amostra. Deve ser feito o peneiramento e todo o material passante na peneira 4,75mm deve ser descartado. Para o ensaio, a amostra deve ser lavada e seca em estufa, até manter constância de massa. Pesa-se o agregado e anota-se o valor obtido ( $M_s$ ). Logo após, é necessário imergir o agregado em água, e depois de algum tempo imerso, retirar todo o material e espalhá-lo sobre um pano, secando até que não haja mais películas de água visíveis. Feito isso, deve-se pesar esse agregado e anotar o valor obtido ( $M_h$ ). Utilizando a balança hidrostática, calcula-se o peso do material imerso no tanque de água, anotando o valor obtido ( $L$ ).

Os cálculos para a densidade e a absorção são descritos pelas seguintes fórmulas:

$$Dap = \frac{Ms}{Mh-L} \quad (4)$$

$$a = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Nas quais:

Dap = densidade aparente

Ms = massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em g;

Mh = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca, em g;

L = leitura na balança do agregado submerso, em g;

a = absorção do agregado, em percentagem.

### 2.5.12 Ensaio de densidade do agregado miúdo

A norma ME-084 – Determinação da densidade real do agregado miúdo (DNER, 1995b), fixa o procedimento através da relação da massa de determinado volume de amostra para massa de igual volume de água. Para o ensaio serão necessários um picnômetro, peneiras de malha quadrada de N° 4 a N° 200, balança, estufa, termômetro, cápsula de porcelana com capacidade de 500 ml e bico de gás ou outra fonte de calor.

Após ser feita a coleta do material, quarteia-se o mesmo até obter cerca de 1000g. Dessa amostra separada é feito o peneiramento para que se utilize 500g do material retido entre essas peneiras, sendo necessário secar o material em estufa até manter massa constante.

Na realização do ensaio é feita a pesagem do picnômetro (a), vazio, seco e rigorosamente limpo. Ao colocar-se a amostra cuidadosamente dentro do picnômetro é feita uma nova pesagem (b), inserindo-se a água até que esta cubra a amostra de agregado e aqueça o conteúdo até a fervura por pelo menos 15 minutos. Após, esfriar em banho de água a 25°C. Completa-se o picnômetro com água até seu traço de referência e é feita uma nova pesagem (c). Retira-se toda a amostra de dentro do picnômetro, preenche-se este com água até o seu traço de referência e o pesa (d).

O cálculo da densidade real do agregado é obtido através da fórmula:

$$D = \frac{b-a}{(d-a)-(c-b)} \quad (5)$$

em que:

D = densidade real do agregado miúdo

a = massa do picnômetro vazio e seco, em g;

b = massa do picnômetro mais amostra, em g;

c = massa do picnômetro mais amostra mais água, em g;

d = massa do picnômetro cheio de água, em g.

O resultado, encontrado com a fórmula acima, é a média de duas determinações em número adimensional.

### 2.5.13 Ensaio de tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração por compressão diametral é regida pela norma ME-136 (DNIT, 2010b), na qual é possível determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas através de métodos de compressão diametral. Para a execução do ensaio são necessários uma prensa mecânica com sensibilidade igual ou inferior a 19,60N, 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 3,50cm e diâmetro de  $10 \pm 0,2$  cm. Então, deve-se medir a altura e o diâmetro do corpo de prova e colocá-lo na estufa por 2 (duas) horas. Em seguida, coloca-se o CP na prensa mecânica aplicando-se a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação de 0,8 a 0,1mm/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:

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi DH} \quad (6)$$

Na qual:

r – resistência à tração, em kgf/cm<sup>2</sup> ;

F – carga de ruptura, em kgf;

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

H – altura do corpo-de-prova, em cm.

#### **2.5.14 Ensaio de compressão Marshall**

A ME-043 - Ensaio Marshall (DNER, 1995) tem como finalidade determinar a estabilidade e a fluência de misturas betuminosas, além de ser executada para a determinação do traço de concreto betuminoso usinado à 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 (2006):

Primeiramente, faz-se a seleção da faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com os limites das normativas do DNIT, e, após, 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, determina-se as massas específicas reais do cimento asfáltico de petróleo e dos agregados disponíveis.

Então, devem ser escolhidas 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 150SSF (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 deve 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 155SSF.

Adota-se então 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 porcentagem para o primeiro grupo e os outros grupos terão o teor de asfalto acima (sugestão: T+0,5% e T+1,0%) e abaixo (sugestão: T-0,5% e T-1,0%).

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, extração do CP e medida das dimensões do corpo de prova. 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,  $\%n = \%n * x(100\% - \%a)$ , onde %n é o percentual da massa do agregado 'n' na mistura asfáltica.

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

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{Ga} + \frac{\%Ag}{GAg} + \frac{\%Am}{GAm} + \frac{\%f}{Gf}} \quad (7)$$

Onde:

%a = percentagem de asfalto;

%Ag, %Ame %f = percentagem do agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, respectivamente;

Ga, Gag, Gam e Gf = massas específicas reais do asfalto, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do fíler;

O cálculo dos parâmetros de dosagem para cada corpo, de acordo com as expressões:

- Volume dos CPs:  $V = Ms - MSub$  (8)

- A massa específica aparente da mistura:  $Gmb = \frac{Ms}{V}$  (9)

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

- Volume de vazios:  $Vv = \frac{DMT - Gmb}{DMT}$  (10)

- Porcentagem em massa dos agregados:  $\sum \% n = 100 - \%a$  (11)

- Vazios do agregado mineral:  $VAM = 100 - \left(\frac{Gmb * \sum \%n}{Gsb}\right)$  (12)

- Relação betume/vazios:  $RBV = 100 * \left(\frac{VAM - Vv}{VAM}\right)$  (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, e então se determina por meio da prensa Marshall os seguintes fatores mecânicos:

**Estabilidade:** sendo ela a resistência máxima à compressão radial apresentada pelo corpo de prova. A sua leitura na prensa é feita através de um defletômetro, sendo anotada como “estabilidade lida”. Porém, esse valor deverá ser corrigido em função da espessura do corpo de prova ensaiado.

Tendo a expressão do fator de correção:

$$f = 927,23 * h^{-1,64} \quad (14)$$

Onde:

f = fator;

h = espessura do corpo de prova.

Assim obtendo o valor do resultado da estabilidade Marshall em N(kgf).

**Fluência:** deformação total apresentada em milímetros (mm) pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima. A sua leitura é feita simultaneamente ao da estabilidade através de um medidor de fluência ou por um defletômetro, sendo feita uma leitura antes de se aplicar a carga e uma logo após o fim da compressão.

### 3. ESTUDO DE CASO

O presente trabalho teve como objeto de estudo a avaliação da influência dos agregados graúdos nas características do Cimento Betuminoso Usinado à Quente, realizado em parceria com a Objetivo Asfaltos, Laboratório Carlos Campos e Pedreira Anápolis. Numerosos testes foram realizados a fim garantir-se que todos os insumos utilizados para a produção do revestimento asfáltico fossem dentro dos padrões exigidos para a Faixa “C” do DNIT, bem como das demais normas complementares.

#### 3.1 ENSAIO DE ABRASÃO “LOS ANGELES”

Segundo Bernucci (2010), os agregados graúdos que compõem as ligas asfálticas devem apresentar elevada resistência ao desgaste sofrido pela ação do tráfego. Sua determinação garante que o material produzido será adequado para sua aplicação. O resultado deverá atender às exigências da norma ES-031 (DNIT, 2006b), em conjunto com a ES-392 (DNER, 1999) que traz no subitem 5.1.3, alínea *a*, que o desgaste deve ser inferior a 40% (salvo exceções especificadas pela norma).

Realizados os ensaios, obteve-se o valor médio de abrasão de 23,9% (Quadro 12), apresentando-se dentro do limite exigido em norma.

**Quadro 12 - Ensaio de abrasão "Los Angeles"**

PENEIRAS		PESO DAS AMOSTRAS PARCIAIS (gramas)						
PASSANDO	RETIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500 ± 50		
2 1/2"	2"					2500 ± 50		
2"	1 1/2"					5000 ± 100	5000 ± 100	
1 1/2"	1"	1250 ± 25					5000 ± 100	5000 ± 100
1"	3/4"	1250 ± 25						5000 ± 100
3/4"	1/2"	1250 ± 25	2500 ± 50					
1/2"	3/8"	1250 ± 25	2500 ± 50					
3/8"	Nº 3			2500 ± 50				
Nº 3	Nº 4			2500 ± 50				
Nº 4	Nº 8				5000 ± 100			
Amostra total (gramas)		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	1000 ± 75	1000 ± 50
Carga abrasiva		12	11	8	6	12	12	12
Número de revoluções		500				1000		

DETERMINAÇÕES	ENSAIO - 1	ENSAIO - 2
Amostra total seca (antes do ensaio)	5.000	5.001
Material retido na peneira nº 12 (depois do ensaio)	3.852	3.755
Abrasão "Los Angeles" (%)	23	24,9
<b>Abrasão (média)</b>	<b>23,9</b>	

Fonte: Próprios autores, 2018.



### 3.2 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Segundo Bernucci et al (2010), a distribuição granulométrica dos agregados é uma característica que influi diretamente no comportamento dos revestimentos asfálticos, afetando propriedades como rigidez, durabilidade, estabilidade, deformação permanente, entre outros. Deste modo foi realizada caracterização granulométrica dos agregados que compõem os corpos de prova em análise: Brita 1 (Quadro 13), Brita 0 (Quadro 14) e Pó de Brita (Quadro 15).

**Quadro 13 - Análise granulométrica Brita 1**

ENSAIO DE GRANULOMETRIA DNER-ME 083/98 (DNIT 031/2006 - ES)							
#	PESO RETIDO	PESO PASSANDO	% PASSANTE	PESO RETIDO	PESO PASSANDO	% PASSANTE	MÉDIA % PASSANTE
1"							
3/4"	0	1025,15	100	0	1074,93	100	100
1/2"	656,71	368	35,94	687,51	387,42	36,04	35,99
3/8"	938,11	87,04	8,49	983,02	91,91	8,55	8,52
4	1002,08	23,07	2,25	1050,31	24,62	2,29	2,27
10	1008,54	16,61	1,62	1057,31	17,62	1,64	1,63
40	1009,48	15,67	1,53	1062,69	12,24	1,14	1,33
80	1012,1	13,05	1,27	1061,9	13,03	1,21	1,24
200	1016,81	8,34	81	1063,5	11,43	1,06	0,94
F.	1025			1074,93			-
TOTAL		1.025,15		TOTAL		1.074,93	

Fonte: Próprios autores, 2018.

**Quadro 14 - Análise granulométrica Brita 0**

ENSAIO DE GRANULOMETRIA DNER-ME 083/98 (DNIT 031/2006 - ES)							
#	PESO RETIDO	PESO PASSANDO	% PASSANTE	PESO RETIDO	PESO PASSANDO	% PASSANTE	MÉDIA % PASSANTE
1"							
3/4"	0	1193,27	100	0	1090,12	100	100
1/2"	15,3	1177,97	98,72	16,48	1073,64	98,49	98,6
3/8"	191,7	1001,57	83,93	186,32	903,8	82,91	83,42
4	1003,89	189,38	15,87	917,12	173	15,87	15,87
10	1163,32	29,95	2,51	1061,88	28,24	2,59	2,55
40	1170,96	22,31	1,87	1069,08	21,04	1,93	1,9
80	1171,67	21,6	1,81	1070,6	19,52	1,79	1,8
200	1176,68	16,59	1,39	1074,74	15,38	1,41	1,4
F.	1193,08			1090			-
TOTAL		1.193,27		TOTAL		1.090,12	

Fonte: Próprios autores, 2018.

Quadro 15 - Análise granulométrica Pó de Brita

ENSAIO DE GRANULOMETRIA DNER-ME 083/98 (DNIT 031/2006 - ES)							
#	PESO RETIDO	PESO PASSANDO	% PASSANTE	PESO RETIDO	PESO PASSANDO	% PASSANTE	MÉDIA % PASSANTE
1"							
3/4"	0	1069,41	100	0	1041,34	100	100
1/2"	0	1069,41	100	0	1041,34	100	100
3/8"	0	1069,41	100	0	1041,34	100	100
4	15,72	1053,69	98,53	13,22	1028,12	98,73	98,63
10	374,4	695,01	64,99	357,92	683,42	65,63	65,61
40	741,2	328,21	30,69	721,12	320,22	30,75	30,72
80	843,01	226,4	21,147	820,46	220,88	21,21	21,19
200	923,64	145,77	13,63	898,98	142,36	13,67	13,65
F.	1069,4			1041,34			-
TOTAL		1.069,41		TOTAL		1.041,34	

Fonte: Próprios autores, 2018.

### 3.3 ENSAIO DE EQUIVALENTE DE AREIA

Alguns agregados utilizados em revestimentos alfaíticos apresentam impurezas que podem torná-los inadequados para sua utilização (Bernucci, 2010). Este ensaio consiste na determinação da qualidade do agregado miúdo, sendo estabelecido pela ES-031 (DNIT, 2006b) que deve apresentar equivalência igual ou superior a 55%.

Realizado o ensaio, obteve-se a equivalência de 68,83% (Quadro 16), estando dentro dos valores exigidos em norma.

Quadro 16 - Ensaio de equivalência de areia

MATERIAL	AMOSTRA	LEITURA		EQUIVALENTE DE AREIA	
		TOPO DA ARGILA (H1)	TOPO DA AREIA (H2)	(H2/H1)*10	MÉDIA
PÓ DE BRITA	1	15,4	10,6	68,8	68,83
	2	14,7	10,1	68,7	
	3	15,5	10,7	69,0	
ESPECIFICAÇÃO DNIT 031/2006 - ES					
RESULTADO ENCONTRADO:				68,83	>55,0%

Fonte: Próprios autores, 2018.

### 3.4 ENSAIO DE ÍNDICE DE FORMA

O ensaio foi realizado na empresa Carlos Campos, localizada em Goiânia, conforme a NBR 7809 (ABNT, 2006), pelo método do paquímetro, respeitando os parâmetros e sem

anormalidades. A NBR 7211 (ABNT, 2005) determina que os agregados graúdos não devem apresentar índice de forma superior a 3,0. Os resultados encontrados para a Brita 1 e Brita 0 foram, respectivamente, **2,30** e **1,80** atendendo aos parâmetros estabelecidos.

### 3.5 ENSAIO DE ADESIVIDADE DO LIGANTE BETUMINOSO

Consiste na observação do possível deslocamento da película betuminosa que recobre os agregados, sendo considerado satisfatório quando não houver nenhum deslocamento da película betuminosa e não satisfatório quando ocorre deslocamento, mesmo que parcial ME-078 (DNER, 1994). Realizado o ensaio observou-se a ausência de deslocamento de betume dos agregados, sendo assim considerado **SATISFATÓRIO**.

### 3.6 ENSAIO DE DENSIDADE E ABSORÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

A densidade real dos grãos da amostra deve ser entendida como a massa por unidade de volume contando-se apenas a parte sólida (Quadro 17), excluindo-se o volume ocupado pelo ar e os vazios em seus poros (Senço, 2001).

**Quadro 17 - Resultado do ensaio de determinação da densidade e absorção dos agregados graúdos**

Determinações dos ensaios		1	2
Peso sat. Superfície seca	A	673	675
Peso sat. Imerso	B	423,6	425,2
Peso seco	C	672	674,5
Densidade real	$D = C/C-B$	2,705	2,706
Densidade aparente	$D = C/A-B$	2,694	2,7
Absorção	$S = A-C/C \times 100$	0,15	0,07
<b>Número de ensaios:</b>		<b>2</b>	
<b>Densidade real da Brita nº 1:</b>		<b>2,705 g/cm<sup>3</sup></b>	
<b>Densidade aparente da Brita nº 1:</b>		<b>2,697 g/cm<sup>3</sup></b>	
<b>Absorção:</b>		<b>0,11%</b>	

Fonte: Próprios autores, 2018.

### 3.7 ENSAIO DE DENSIDADE DO AGREGADO MIÚDO

Os resultados do ensaio seguem os critérios da norma ME-84 (1995b), conforme Quadro 18.

**Quadro 18 - Resultado do ensaio de determinação da densidade agregados miúdo**

Determinação dos ensaios		1	2
Peso do picnômetro	A	133,6	132,1
Peso do picnômetro + amostra	B	333,4	333
Peso do picnômetro + amostra + água	C	759	756,7
Peso do picnômetro + água	D	633	630,2
Densidade encontrada a 19 °C	$D = B-A/(D-A) - (C-B)$	2,724	2,728
Número de ensaios		2	2
Densidade real		2,707	2,7
Número de ensaios:		2	
Densidade real do Pó de pedra		2,704 g/cm <sup>3</sup>	

Fonte: Próprios autores, 2018.

### 3.8 ENSAIOS DE VISCOSIDADE BROOKFIELD, PONTO DE AMOLECIMENTO, PONTO DE PENETRAÇÃO E PONTO DE FULGOR

Os ensaios de viscosidade, ponto de amolecimento, ponto de penetração e ponto de fulgor (Quadro 19) permitem a análise do CAP utilizado na mistura asfáltica e sua comparação com os requisitos estabelecidos na norma EM-095 (DNIT, 2006).

**Quadro 19 - Ensaio de Caracterização do CAP**

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO		OBTIDO	UNIDADE	NORMA DOS RESULTADOS
		MÍNIMO	MÁXIMO			
Viscosidade BROOKFIELD, a 135° C, 20 RPM	NBR 15184	274	-	323	(CP) Centipoise	DNIT 95-EM/2006
Viscosidade BROOKFIELD, a 150° C, 50 RPM	NBR 15184	112	-	164	(CP) Centipoise	DNIT 95-EM/2006
Viscosidade BROOKFIELD, a 177° C, 100 RPM	NBR 15184	57	285	61	(CP) Centipoise	DNIT 95-EM/2006
Ponto de Fulgor	ME - 148/94	235	-	320	°C	DNIT 95-EM/2006
Penetração à 25° C, 5s, 100g	ME - 003/99	50	70	55	mm	DNIT 95-EM/2006
Espuma	ES - 031/06	NÃO DEVE ESPUMAR		NÃO	SIM ou NÃO	-
Ponto de Amolecimento	NBR - 6560	46	-	50,4	°C	DNIT 95-EM/2006

Fonte: Próprios autores, 2018.

### 3.9 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS TRAÇOS

Para a realização deste trabalho foram definidos três traços para análise: faixa fina, faixa ideal e faixa grossa. A composição visa a atender os parâmetros requeridos para o revestimento de rolamento da Faixa “C” ES-031 (DNIT, 2006b), com as tolerâncias permitidas para granulometria estabelecida pela ME-083 (DNER, 1998c).

### 3.9.1 Traço ideal

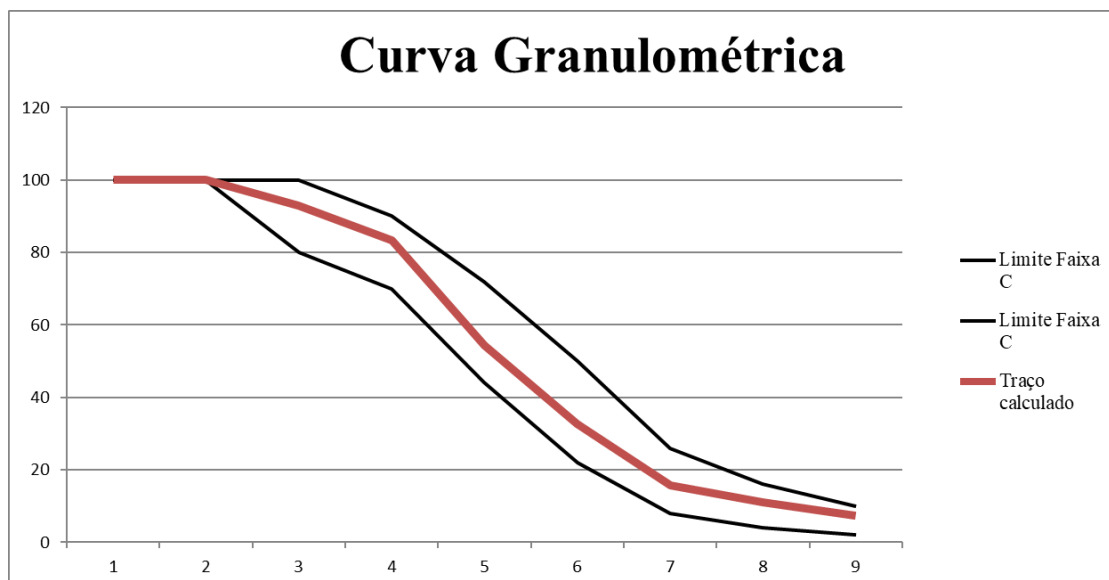
Tomando-se por base a granulometria do item 3.2 montou-se o traço, que, para o estudo em específico, o considerou ideal (Quadro 20) por apresentar curva a mais próxima possível do centro da faixa de trabalho para o CBUQ tipo “C” DNIT (Gráfico 1).

**Quadro 20- Granulometria Traço Ideal**

Peneiras		Pó	brita 0	brita 1	Traço	Faixa C DNIT		Tolerância
ABNT (mm)	ASTM					mínimo	máximo	
25,4	1"	48,0%	42,0%	10%	100,0	100	100	±
19,1	3/4	100,00	100,00	100,00	100,0	100	100	7
12,7	1/2	100,00	98,60	36,00	93,0	80	100	7
9,5	3/8"	100,00	82,40	8,50	83,5	70	90	7
4,8	4	98,60	15,90	2,30	54,2	44	72	5
2	10	65,30	2,60	1,60	32,6	22	50	5
0,42	40	30,70	1,90	1,30	15,7	8	26	5
0,18	80	21,20	1,80	1,20	11,1	4	16	3
0,074	200	13,65	1,40	0,90	7,2	2	10	2
Fundo		Desprezado						

Fonte: Próprios autores, 2018.

**Gráfico 1 - Curva Granulométrica Traço Ideal**



Fonte: Próprios autores, 2018.

### 3.9.2 Traço de faixa grossa

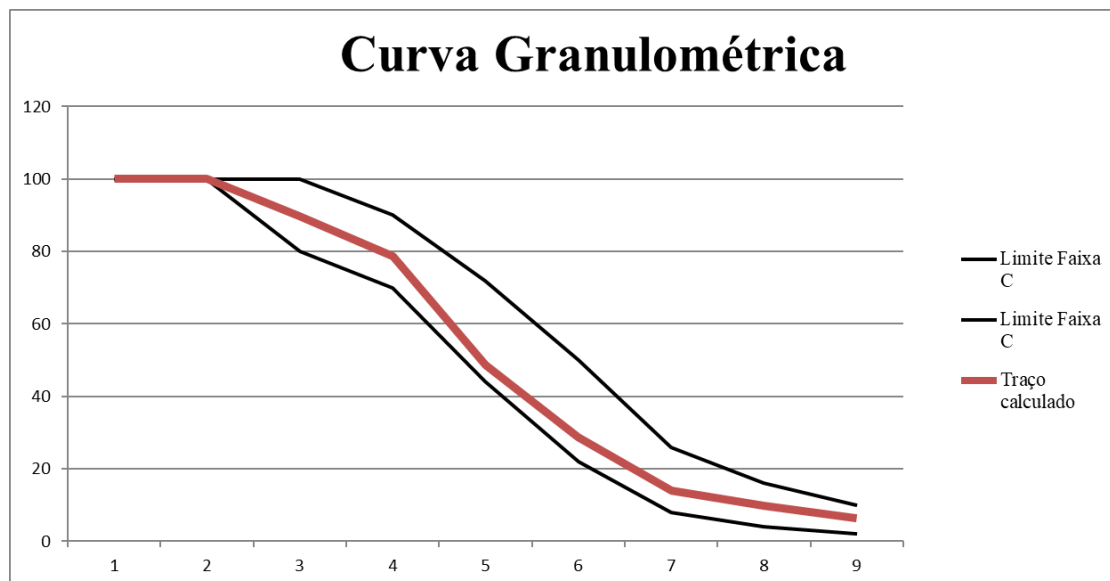
O traço definido como faixa grossa, apesar de se tratar da mesma granulometria adotada (Quadro 21), variando-se a porcentagem de cada agregado obtém-se uma curva bem mais próxima ao limite inferior da faixa tipo “C” DNIT (Gráfico 2). O nome de faixa grossa é dado devido à sua visualização quando é feita a compactação em campo.

Quadro 21– Granulometria do traço Faixa Grossa

Peneiras		Pó	brita 0	brita 1	Traço	Faixa C DNIT		Tolerância
ABNT (mm)	ASTM					mínimo	máximo	
25,4	1"				100,0	100	100	
19,1	3/4	100,00	100,00	100,00	100,0	100	100	7
12,7	1/2	100,00	98,60	36,00	89,8	80	100	7
9,5	3/8"	100,00	82,40	8,50	78,7	70	90	7
4,8	4	98,60	15,90	2,30	48,6	44	72	5
2	10	65,30	2,60	1,60	28,8	22	50	5
0,42	40	30,70	1,90	1,30	13,9	8	26	5
0,18	80	21,20	1,80	1,20	9,9	4	16	3
0,074	200	13,65	1,40	0,90	6,5	2	10	2
Fundo		Desprezado						

Fonte: Próprios autores, 2018.

Gráfico 2 - Curva Granulométrica Faixa Grossa



Fonte: Próprios autores, 2018.

### 3.9.3 Traço faixa fina

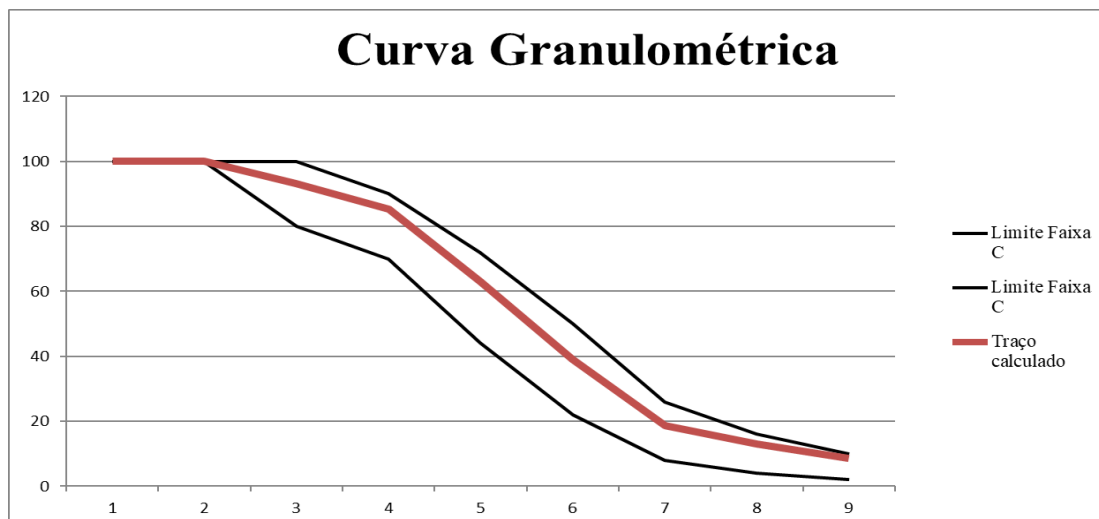
O traço definido como faixa fina, apesar de tratar da mesma granulometria adotada (Quadro 22), variando a porcentagem de cada agregado obtém-se uma curva bem mais próxima ao limite superior da faixa tipo “C” do DNIT (Gráfico 3).

**Quadro 22 - Granulometria do traço Faixa Fina**

Peneiras		Pó	brita 0	brita 1	Traço	Faixa C DNIT		Tolerância
ABNT (mm)	ASTM					mínimo	máximo	
		58,5%	31,5%	10%				±
25,4	1"				100,0	100	100	
19,1	3/4"	100,00	100,00	100,00	100,0	100	100	7
12,7	1/2"	100,00	98,60	36,00	93,2	80	100	7
9,5	3/8"	100,00	82,40	8,50	85,3	70	90	7
4,8	4"	98,60	15,90	2,30	62,9	44	72	5
2	10"	65,30	2,60	1,60	39,2	22	50	5
0,42	40"	30,70	1,90	1,30	18,7	8	26	5
0,18	80"	21,20	1,80	1,20	13,1	4	16	3
0,074	200"	13,65	1,40	0,90	8,5	2	10	2
Fundo		Desprezado						

Fonte: Próprios autores, 2018.

**Gráfico 3 - Curva granulométrica da Faixa Fina**



Fonte: Próprios autores, 2018.

### 3.10 COMPOSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A norma ES-031 (DNIT, 2006b) determina os requisitos percentuais de granulometria e ligante asfáltico para a composição do concreto asfáltico. Na coluna referente à Faixa “C”, apresenta os limites mínimo e máximo de ligante asfáltico para a camada de rolamento, devendo apresentar-se entre 4,5 a 9,0%, aceitando tolerância de 0,3% para mais ou para menos. Deste modo, estabeleceu-se que seriam moldados corpos de prova para cada porcentagem de CAP nas faixas de 4,5%, 5,0% e 5,5% para cada traço. Através da análise dos corpos de prova, obteve-se o percentual ideal de CAP para a Faixa Fina, Faixa Ideal e Faixa Grossa (Quadro 23) que melhor se adequava às exigências da Faixa “C”. Com base nesses percentuais, foram reproduzidos três corpos de prova para cada traço com seu respectivo percentual ideal e submetido aos ensaios de tração por compressão diametral e ensaios Marshall.

**Quadro 23 - Ensaio de Extração de Betume (%CAP)**

ESPECIFICAÇÕES	Faixa Fina	Faixa Ideal	Faixa Grossa
(P1) Peso da amostra com betume (g)	1023,46	1062,45	1026,79
(P2) Peso da amostra sem betume (g)	973,66	1010,06	974,43
(P3) Diferença de pesos (g)	49,8	52,39	52,36
Teor final de Betume (% CAP)	<b>4,87</b>	<b>4,93</b>	<b>5,10</b>

Fonte: Próprios autores, 2018.

### 3.11 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio consiste em uma metodologia indireta de determinação da resistência à tração (Bernucci et al, 2010). A norma ES-031 (DNIT, 2006b) traz, por sua vez, o valor mínimo de resistência que as misturas asfálticas devem atender, sendo de 0,65 MPa. Realizado o ensaio nos três traços observou-se que todos atenderam aos requisitos mínimos da norma (Quadro 24), tendo a Faixa Grossa apresentado o maior valor de resistência na análise (1,589 Mpa).

**Quadro 24 - Tração por compressão diametral**

Características	Traço Faixa Fina			Traço Faixa Ideal			Traço Faixa Grossa			
<b>Diâmetro</b>	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	10,13	
<b>Altura</b>	6,34	6,36	6,35	6,32	6,35	6,35	6,36	6,35	6,35	
<b>Leitura</b>	855	815	830	945	900	905	995	1012	1015	
<b>Tração (MPa)</b>	1,352	1,284	1,31	1,499	1,421	1,429	1,568	1,597	1,602	
<b>Média</b>	<b>1,315</b>			> 0,65	<b>1,450</b>		> 0,65	<b>1,589</b>		> 0,65

Fonte: Próprios autores, 2018.



### 3.12 ENSAIO MARSHALL

Os ensaios Marshall tem por objetivo a determinação da estabilidade Marshall, que representa a resistência máxima à compressão radial e da fluência Marshal, que trata da deformação total apresentada pelos corpos de prova submetidos aos ensaios, conforme a norma ME-043 (DNER, 1995). Por sua vez, os valores obtidos são submetidos aos critérios estabelecidos pela norma ES-031 (DNIT, 2006b). Os ensaios foram realizados com os três traços, seguindo seus respectivos resultados.

#### 3.12.1 Traço Faixa Ideal

Resultados obtidos (Quadro 25) atenderam aos parâmetros estabelecidos na norma ES-031 (DNIT, 2006b).

**Quadro 25 - Ensaio Marshall Faixa Ideal**

C.P Nº	1	2	3	MÉDIA	ESPEC.
Peso no ar	1197,5	1196,35	1191,95	*	*
Peso lmerso	699	698,76	697,47	*	*
Volume	498,5	497,59	494,48	*	*
Dens. Apte.	2,402	2,404	2,411	2,406	
Dens. Máxima	2,497	2,497	2,497	2,5	
% de vazios	3,8	3,7	3,5	3,7	3,0 - 5,0
V.C.B (%)	11,8	11,8	11,8		*
V.A.M (%)	15,6	15,5	15,3	15,4	> 15
R.B.V (%)	75,6	76,1	77,1	76,3	75 - 82
Leit. Deflect.	1080	1050	1060	*	*
Est. Encont.	1723	1675	1691	1696	*
Fator Correção	1,06	1,06	1,07	*	*
Est. Corrigida	1.822	1.777	1.812	1.803	> 500
Fluência	3,95	3,91	3,88	3,9	2,5 - 4,5

Fonte: Próprios autores, 2018.

#### 3.12.2 Traço Faixa Fina

Resultados obtidos (Quadro 26) atenderam aos parâmetros estabelecidos na norma ES-031 (DNIT, 2006b).

Quadro 26 - Ensaio Marshall Faixa Fina

C.P Nº	1	2	3	MÉDIA	ESPEC.
Peso no ar	1199,8	1198,36	1198,77	*	*
Peso Imerso	702,32	701,09	701,56	*	*
Volume	497,46	497,27	497,56	*	*
Dens. Apte.	2,414	2,41	2,411	2,441	
Dens. Máxima	2,5	2,5	2,5	2,5	
% de vazios	3,5	3,6	3,5	3,5	3,0 - 5,0
V.C.B (%)	11,7	11,7	11,7		*
V.A.M (%)	15,2	15,3	15,2	15,2	> 15
R.B.V (%)	76,9	76,4	76,9	76,8	75 - 82
Leit. Deflect.	890	903	887	*	*
Est. Encont.	1420	1440	1415	1425	*
Fator Correção	1,06	1,06	1,06	*	*
Est. Corrigida	1.506	1.528	1.501	1.512	> 500
Fluência	3,58	3,61	3,56	3,58	2,5 - 4,5

Fonte: Próprios autores, 2018.

### 3.12.3 Traço Faixa Grossa

Resultados obtidos (Quadro 27) atenderam aos parâmetros estabelecidos na norma ES-031 (DNIT, 2006b).

Quadro 27 - Ensaio Marshall Faixa Grossa

C.P Nº	1	2	3	MÉDIA	ESPEC.
Peso no ar	1197,86	1199,71	1192,22	*	*
Peso Imerso	697,06	699,51	693,78	*	*
Volume	500,8	500,2	498,44	*	*
Dens. Apte.	2,392	2,398	2,392	2,394	
Dens. Máxima	2,491	2,491	2,491	2,5	
% de vazios	4	3,7	4	3,9	3,0 - 5,0
V.C.B (%)	12,1	12,1	12,1		*
V.A.M (%)	16,1	15,8	16,1	16,02	> 15
R.B.V (%)	75,2	76,6	75,2	75,67	75 - 82
Leit. Deflect.	1100	1166	1210	*	*
Est. Encont.	1755	1860	1930	1848	*
Fator Correção	1,05	1,05	1,06	*	*
Est. Corrigida	1.843	1.954	2.041	1.946	> 500
Fluência	3,67	3,49	3,55	3,57	2,5 - 4,5

Fonte: Próprios autores, 2018.

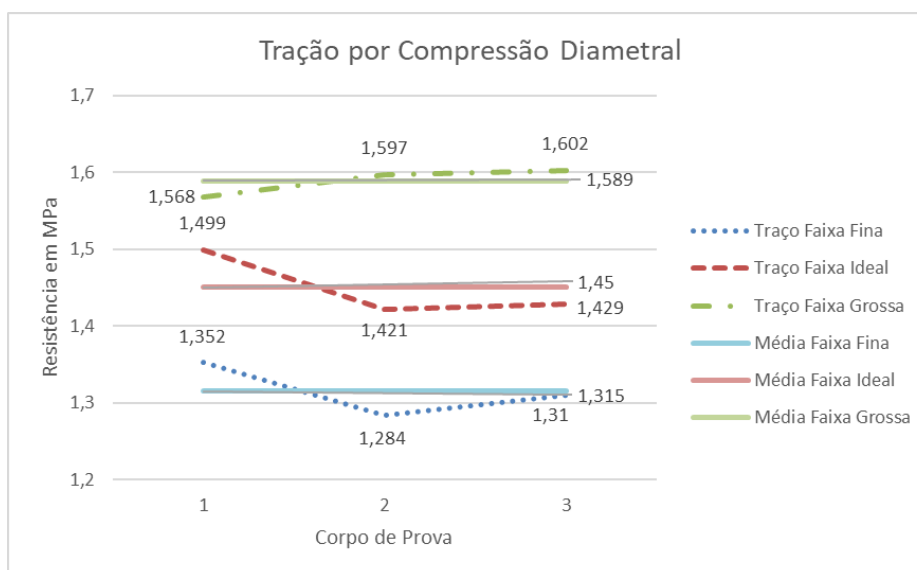
#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos de ensaios descritos no capítulo 2, itens 2.5.2 a 2.5.12, possibilitaram a caracterização dos agregados graúdo, miúdo e do ligante asfáltico que compõem os concretos asfálticos em análise, bem como sua comparação com os valores mínimos e/ou máximos requeridos pelas normas ES-031 (DNIT, 2006b) e EM-095 (DNIT, 2006), e constatação, através dos resultados (capítulo 3, itens 3.1 à 3.9), que os insumos atendem adequadamente aos parâmetros requeridos. Deste modo, a análise dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral e compressão Marshall possibilitaram a verificação da influência dos agregados no desempenho dos traços aqui estabelecidos.

##### 4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A norma ES-031 (DNIT, 2006b) estabelece que a resistência mínima à tração aceitável para a camada de rolamento seja de 0,65 Mpa. Observa-se (Gráfico 4) que todos os traços atenderam adequadamente à exigência mínima, tendo o traço da Faixa Grossa apresentado a melhor resistência média no valor de 1,589 Mpa, seguido da Faixa Ideal no valor de 1,45 Mpa e, por fim, a Faixa Fina apresentando a menor resistência à tração no valor de 1,315 MPa.

**Gráfico 4 - Comparação dos Resultados de Tração por Compressão Diametral**



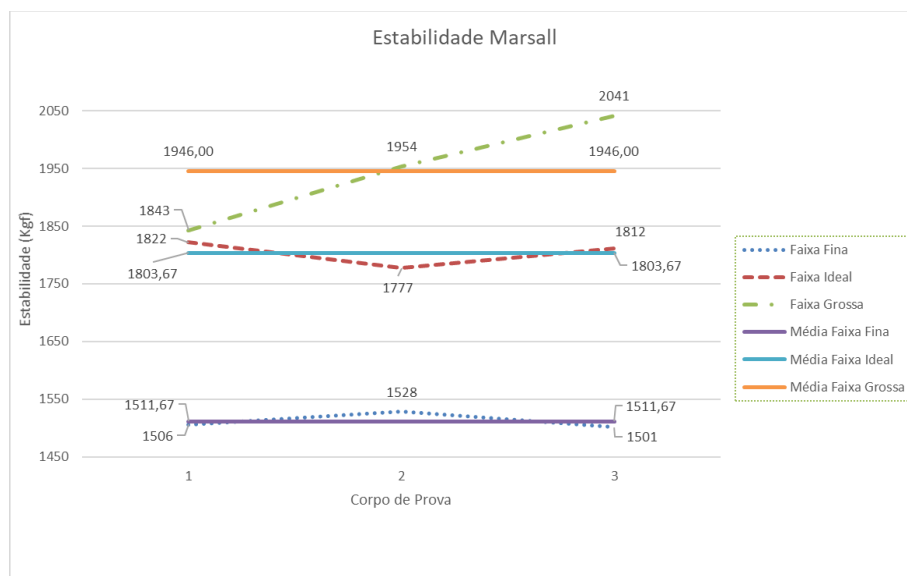
Fonte: Próprios autores, 2018.

## 4.2 ENSAIOS MARSHALL

### 4.2.1 Estabilidade Marshall

A norma 031-ES (DNIT, 2006b) determina que o concreto asfáltico tenha estabilidade mínima de 500 kgf para moldagem com 75 golpes. Os resultados obtidos (Gráfico 5) demonstram que todos os traços atenderam ao parâmetro mínimo exigido, tendo a Faixa Grossa apresentado a melhor resistência à compressão radial no valor médio de 1946 Kgf, seguida da Faixa Ideal com valor médio de 1803,67 Kgf, tendo a Faixa Fina apresentado o menor valor de resistência de 1511,67 Kgf.

**Gráfico 5 - Comparação dos Resultados da Estabilidade Marshall**



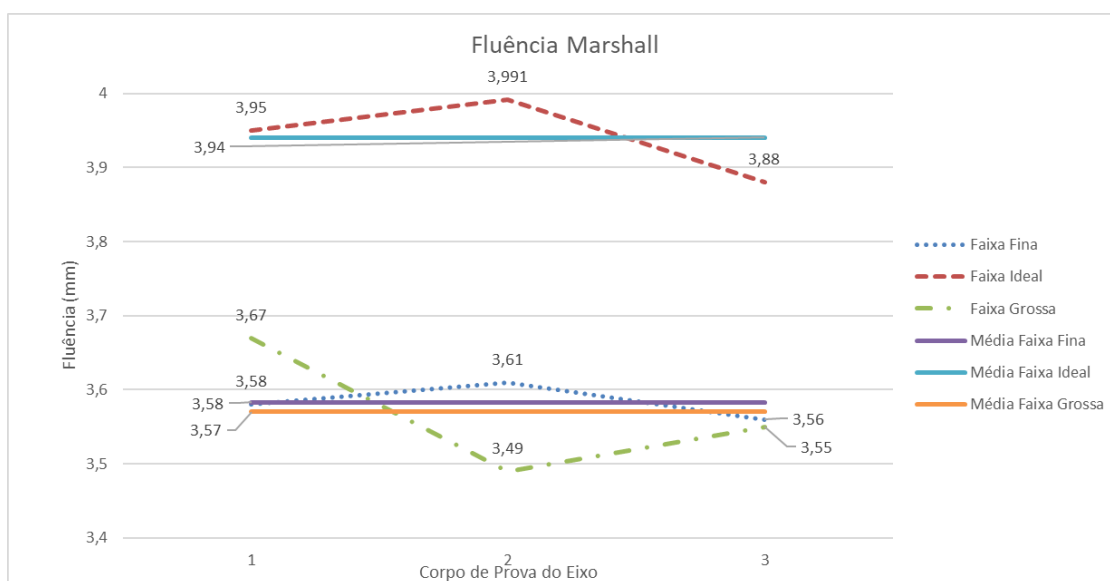
Fonte: Próprios autores, 2018.

### 4.2.2 Fluência Marshall

Segundo Souza et al (2015), a fluência é a deformação vertical máxima de um corpo de prova medida desde a aplicação da carga até o momento em que a estabilidade começa a cair, logo altos valores de fluência indicam uma mistura plástica, o que acarretará deformações permanentes, porém, baixos valores ocorrem em misturas com teor de vazios abaixo do especificado e teor de asfalto insuficiente, acarretando num asfalto frágil (quebradiço) prejudicando a durabilidade do pavimento. Assim, a determinação do valor ideal da fluência ou margem de trabalho depende diretamente da observação empírica do comportamento do

concreto asfáltico, sendo adotado neste trabalho os valores utilizados pela usina de CBUQ onde foram realizados os experimentos que variam de 2,5 a 4,5 mm. Com base nestes parâmetros, observa-se que a Faixa Ideal apresentou a maior deformação vertical média, no valor de 3,94mm, seguida da Faixa Fina com 3,58 mm e a Faixa Grossa apresentando a menor deformação de 3,57mm (Gráfico 6).

**Gráfico 6 - Comparação dos Resultados da Fluência Marshall**



Fonte: Próprios autores, 2018.

Conforme pôde-se observar, todas as misturas atenderam aos requisitos estabelecidos pelas normas. Todavia, o traço Faixa Grossa apresentou os melhores resultados nos ensaios de tração e compressão, demonstrando ainda uma menor deformação vertical (fluência) quando comparado com os outros traços. Pode-se atribuir tal desempenho ao maior percentual de agregado graúdo presente na mistura (58%), em especial a Brita 0 que apresentou o melhor resultado no ensaio de índice de forma 1,80, quando comparado com a Faixa Ideal (52%) e Faixa Fina (41,5%).

Assim, sugere-se para trabalhos futuros a análise da viabilidade econômica dos traços aqui apresentados, verificando o custo comercial de cada traço e sua viabilidade de mercado.

## REFERÊNCIAS

- ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. Rio de Janeiro: Ultraset, 2 ed. 2010. 144p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51: Agregado graúdo: Ensaio de abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro. 2001.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro. 2005.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro. 2005b.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2006.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados - Terminologia**. Rio de Janeiro. 2011.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11341: Derivados de petróleo – Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto de Cleveland**. Rio de Janeiro. 2015.
- BERNUCCI, Liedi Bariani, MOTTA, Laura Maria Goretti da, CERATTI, Jorge Augusto Pereira, & SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 3ª ed.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA. 2010
- BÜHLER, Aislan Vieira. Desempenho de Rodovias em TSD: **Uma abordagem Econométrica. In: Reunião anual de pavimentação**, 34. Campinas. 2003, 13 p.
- CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial**. BRASÍLIA: CNT : SEST : SENAT. 2017
- CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília: CNT.2017b
- DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. **ME – 078. Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso**. Rio de Janeiro. 1994
- DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. **ME – 086. Agregados – determinação do índice de forma**. Rio de Janeiro. 1994b

DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. **ME – 043. Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall.** Rio de Janeiro.1995

DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. **ME – 084. Agregado miúdo – determinação da densidade real.** Rio de Janeiro.1995b

DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. **ME – 054. Equivalente de Areia.** Rio de Janeiro. 1997

DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. **EM – 367. Material de enchimento para misturas betuminosas.** Rio de Janeiro. 1997b

DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. **PRO – 120. Coleta de amostra de agregados.** Rio de Janeiro. 1997c

DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. **ME – 035. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”.** Rio de Janeiro.1998

DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. **ME – 081. Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.** Rio de Janeiro. 1998b

DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. **ME – 083. Agregados – análise granulométrica.** Rio de Janeiro. 1998c

DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. **ES – 392. Pavimentação: tratamento superficial duplo com asfalto polímero.** Rio de Janeiro. 1999

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **EM – 095. Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material.** Rio de Janeiro. 2006.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **ES – 031. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro. 2006b

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Manual de Pavimentação.** Rio de Janeiro, 2006c

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Manual de Estudos de Tráfego.** Rio de Janeiro, 2006d

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **ME – 131. Materiais asfálticos – Determinação de ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2010.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **ME – 136. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2010b

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **ME – 155. Material asfáltico – Determinação de Penetração – Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2010c

ODA, Sandra; FERNANDES JÚNIOR, José L. **Borracha de Pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação**. Acta Scientiarum – Maringá, 2004.

PINTO, José Luiz Giovanetti. **Micro Pavimento: O grande e ainda pouco conhecido e aliado das administrações municipais na solução da recuperação e da manutenção dos pavimentos asfálticos**. Asfalto em revista, ano 5, n. 22, Rio de Janeiro. 2012.

PMSP - PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Instrução de Projeto 02: Classificação das vias**. São Paulo, Secretaria da infra-estrutura urbana, 2004. Disponível em: <[http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SMSO%202018/NORMAS%20TECNICAS%20DE%20PAVIMENTACAO/INSTRUCAO%20DE%20PROJETOS/ip\\_02\\_2004\\_classificacao\\_das\\_vias.pdf](http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SMSO%202018/NORMAS%20TECNICAS%20DE%20PAVIMENTACAO/INSTRUCAO%20DE%20PROJETOS/ip_02_2004_classificacao_das_vias.pdf)>. Acessado em 05 de junho de 2018.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1.ed. São Paulo: Pini, 2001.

SILVA, Amanda Helena Marcandali da. **Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero**. 2011. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SOARES, Jorge Barbosa *et al.* **Quatro anos de observação da pista experimental do Ceará**. UFC – Fortaleza, 2008.

SOUZA, José Antônio, SOUSA, João Mota, KATO, Ricardo Bentes. **Análise do Desempenho de Concreto Betuminoso Usinado à Quente com a Adição de Rejeito da Mineração do Cobre Segundo os Parâmetros Marshall**. E&S – Engineering and Science, (2015). Edição: 4, Volume:2. Disponível em: <http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/viewFile/3168/2225>. Acessado em outubro de 2018.

UOL, **Má conservação de rodovias elevam em R\$ 14 Bilhões os gastos de combustíveis**. <http://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2013/11/01/ma-conservacao-de-rodovias-elevam-em-r-14-bi-gasto-de-combustivel-diz-pesquisa.htm>. Consultado em fevereiro de 2016.