

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DOUGLAS RODRIGUES SEVILHA

**DETERMINAÇÃO DE TRAÇO DE CONCRETO ASFÁLTICO USINADO  
A QUENTE COM DOSAGEM MARSHALL PARA CAMADA DE  
ROLAMENTO DE PEQUENA ESPESSURA DESTINADA A VIAS DE  
TRÁFEGO LEVE DE VEÍCULOS**

CAMPO MOURÃO

2019

DOUGLAS RODRIGUES SEVILHA

**DETERMINAÇÃO DE TRAÇO DE CONCRETO ASFÁLTICO USINADO  
A QUENTE COM DOSAGEM MARSHALL PARA CAMADA DE  
ROLAMENTO DE PEQUENA ESPESSURA DESTINADA A VIAS DE  
TRÁFEGO LEVE DE VEÍCULOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Me. Adalberto Luiz Rodrigues de Oliveira

CAMPO MOURÃO

2019



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Campo Mourão  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Construção Civil  
Coordenação de Engenharia Civil



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

**Determinação de traço de concreto asfáltico usinado a quente com dosagem marshall para camada de rolamento de pequena espessura destinada a vias de tráfego leve de veículos**  
por

**Douglas Rodrigues Sevilha**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15h30min do dia 04 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Douglas Fukunaga Surco**

(UTFPR)

**Prof. Bel. Ana Raíza Ciscoto Yoshioka**

(UTFPR)

**Prof. Me. Adalberto Luiz Rodrigues de**

**Oliveira**

(UTFPR)

**Orientador**

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

**Prof. Dra. Paula Cristina De Souza**

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e a Virgem Maria, por me guiarem e permitirem que chegasse a este momento, e por colocarem em meu caminho pessoas maravilhosas que contribuem para o meu bem.

Aos meus pais, Ulpiano e Tânia, pelo amor incondicional, pela compreensão, e por acreditarem em mim mesmo nos momentos em que fraquejei, agradeço toda dedicação, carinho, e esforços que fazem por mim, por estarem sempre ao meu lado, serem minha base, meu caminho, minha luz, meu tudo.

A minha querida namorada, companheira e meu amor Heloíse Rangel Dinallo, por toda paciência durante está longa caminhada, por não desistir de mim e me fazer uma pessoa melhor a cada dia.

A todos os meus familiares, meu avô, tios, tias e primos por sempre me acolherem e proporcionarem o aconchego familiar.

Agradeço a todos os amigos e colaboradores das empresas pelas quais passei no período do curso, em especial aos engenheiros, Douglas K. Victoria, Rodrigo H. Furlanetto e Cassio Peron Jr, que por anos compartilharam comigo seus conhecimentos, ao senhor João Batista, encarregado de laboratório, o laboratorista Joel e o auxiliar Aroldo que muito contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador Professor Adalberto Luiz Rodrigues de Oliveira por toda paciência, confiança, compreensão e empenho para a conclusão deste. E a todos os demais professores da UTFPR, que me proporcionaram valiosos conhecimentos e que fizeram parte da minha graduação.

Agradeço aos meus amigos pelos momentos de estudos, de descontração e de apoio, que sempre estiveram ao meu lado nas horas difíceis e também nos momentos de alegria.

Por fim meu sincero agradecimento a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica.

## RESUMO

O CAUQ é a mistura asfáltica de maior empregabilidade no Brasil, sendo a determinação de seu projeto fundamental para cumprir os quesitos técnicos e econômicos ao qual é dimensionado. A camada de rolamento das vias, camada composta pelo CAUQ, é a parte mais superficial da estrutura tendo contato direto com o tráfego, devendo oferecer conforto, comodidade e segurança ao trânsito, além de impermeabilidade e proteção do restante da estrutura de sustentação. A caracterização do tráfego é fator preponderante para a determinação da espessura da camada, que deve ser compatível com o traço obtido, sendo que a qualidade da mistura é dependente dos materiais empregados e do controle tecnológico aplicado, caracterizar os componentes é fundamental para garantir um trabalho satisfatório do revestimento, conhecer os materiais, classificar os agregados e definir o teor de ligante são essenciais e obrigatórios por normas para garantir os padrões de aplicabilidade da massa asfáltica. O presente trabalho realizou a determinação de um traço de CBUQ para vias de tráfego leve de veículos a ser executado com espessura de 2,0 centímetros, seguindo a especificação do DER/PR para a pavimentação com concreto betuminoso usinado a quente. O material agregado foi caracterizado quanto a sua granulometria, densidade, massa específica e equivalente de areia, utilizou-se do método de dosagem Marshall para a determinação do teor de projeto do ligante asfáltico. Os resultados obtidos no estudo seguiram as normativas que cercam o assunto e se mostraram dentro dos parâmetros determinados por normas, viabilizando a aplicabilidade técnica do projeto em questão.

**Palavras-chave:** Concreto Asfáltico. Asfalto. Granulometria.

## ABSTRACT

The hot-machined bituminous concrete is the most used asphalt mixture in Brazil, and the determination of its fundamental project is to meet the technical and economic requirements to which it is designed. The toppest layer, which is composed by the hot asphaltic mix, has direct contact with the traffic, and must provide comfort, convenience and safety to the traffic, as well as impermeability and protection to the rest of the structure. The type of traffic is a determining factor for establish the thickness of the layer that must be compatible with the trace obtained, and the quality of the mixture depends on the materials used and the technological control applied, characterizing the components is critical to ensure a satisfactory road, knowledge of the materials, classify aggregates and define the binder content are essential and mandatory by standards to ensure the asphalt mass applicability standards. The present work performed the determination of a trace of hot-machined bituminous concrete for light traffic highways of vehicles to be executed with a thickness of 2.0 centimeters, following the specification of the DER/PR for paving with hot-machined bituminous concrete. It characterized the aggregate material by its particle size, density, specific mass and equivalent of sand, and the Marshall dosage method was used to determine the design content of the asphalt binder. The results obtained in the study followed the regulations surrounding the subject and were compatible with the parameters determined by standards, enabling the technical applicability of the project in the case.

**Keywords:** Asphalt concrete. Asphalt. Granulometry.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Distribuição granulométrica.....                              | 11 |
| Figura 2 - Distribuição das refinarias de asfalto da Petrobras .....     | 15 |
| Figura 3 - Estrutura do pavimento flexível em corte .....                | 16 |
| Figura 4 - Processos para compactação Marshall .....                     | 18 |
| Figura 5 - Representação esquemática dos corpos de prova .....           | 19 |
| Figura 6 - Processos para rompimento na prensa .....                     | 20 |
| Figura 7 - Britador .....                                                | 24 |
| Figura 8 - Procedimentos para granulometria .....                        | 26 |
| Figura 9 - Ensaio de massa específica - Frasco <i>Le Chatelier</i> ..... | 29 |
| Figura 10 - Ensaio de agregado miúdo - Densidade real .....              | 30 |
| Figura 11 - Ensaio do agregado graúdo - Densidade e absorção .....       | 31 |
| Figura 12 - Ilustração do ensaio de equivalente de areia .....           | 32 |
| Figura 13 - Ensaio de Equivalente de areia.....                          | 32 |
| Figura 14 - Procedimentos para dosagem Marshall.....                     | 34 |
| Figura 15 - Massa dos corpos de prova .....                              | 35 |
| Figura 16 - Rompimento na prensa Marshall .....                          | 36 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Espessura mínima de revestimento .....              | 8  |
| Tabela 2 - Faixas granulométricas .....                        | 9  |
| Tabela 3 - Dimensões nominais das peneiras.....                | 12 |
| Tabela 4 - Especificações do CAP .....                         | 14 |
| Tabela 5 - Especificação do CAP.....                           | 24 |
| Tabela 6 - Faixa granulométrica .....                          | 25 |
| Tabela 7 – Granulometrias individuais .....                    | 26 |
| Tabela 8 - Proporção inicial dos agregados .....               | 27 |
| Tabela 9 - Composição da mistura de agregados.....             | 27 |
| Tabela 10 - Densidades dos agregados.....                      | 31 |
| Tabela 11 – Dosagem dos corpos de prova.....                   | 33 |
| Tabela 12 - Características Marshall .....                     | 37 |
| Tabela 13 - Resumo das médias da caracterização Marshall ..... | 38 |
| Tabela 14 - Teor de CAP de projeto.....                        | 38 |
| Tabela 15 - Índices com teor de projeto .....                  | 38 |
| Tabela 16 - Resultados finais e especificações DER/PR.....     | 42 |



## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 - Distribuição granulométrica .....  | 28 |
| Gráfico 2 - Volume de vazios (Vv).....         | 39 |
| Gráfico 3 - Relação betume e vazios (RBV)..... | 39 |
| Gráfico 4 - Estabilidade .....                 | 40 |
| Gráfico 5 - Fluência .....                     | 40 |
| Gráfico 6 - Densidade Aparente .....           | 41 |
| Gráfico 7 - Vazios do agregado.....            | 41 |

## LISTA DE SIGLAS

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| ANP    | Agência Nacional do Petróleo                            |
| CAP    | Cimento Asfáltico de Petróleo                           |
| CAUQ   | Concreto Asfáltico Usinado a Quente                     |
| CP     | Corpo de Prova                                          |
| DER-PR | Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná |
| DNER   | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem            |
| DNIT   | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  |
| EA     | Emulsão Asfáltica                                       |
| EAP    | Estrutura Analítica de Projeto                          |
| ES     | Especificação de Serviço                                |
| IP     | Instrução de Projeto                                    |
| ME     | Método de Ensaio                                        |
| N      | Número equivalente de operações de um eixo padrão       |
| VAM    | Volume do Agregado Mineral                              |
| Vv     | Volume de Vazios                                        |

## SUMÁRIO

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                                      | <b>3</b>  |
| <b>2 OBJETIVOS</b> .....                                       | <b>5</b>  |
| <b>2.1 Objetivo Geral</b> .....                                | <b>5</b>  |
| <b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....                         | <b>5</b>  |
| <b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....                                   | <b>6</b>  |
| <b>4 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....                             | <b>8</b>  |
| <b>4.1 Espessura da Capa de Rolamento</b> .....                | <b>8</b>  |
| 4.1.1 Composição da mistura .....                              | 9         |
| <b>4.2 Agregados</b> .....                                     | <b>10</b> |
| 4.2.1 Análise granulométrica .....                             | 11        |
| <b>4.3 Petróleo</b> .....                                      | <b>12</b> |
| 4.3.1 Ligante Asfáltico .....                                  | 13        |
| <b>4.4 Mistura Asfáltica</b> .....                             | <b>15</b> |
| 4.4.1 Concreto Betuminoso Usinado a Quente .....               | 16        |
| 4.4.2 Dosagem do Concreto Asfáltico .....                      | 17        |
| 4.4.2.1 Dosagem Marshall .....                                 | 17        |
| <b>4.5 Usina de Concreto Betuminoso Usinado a Quente</b> ..... | <b>20</b> |
| <b>5 METODOLOGIA</b> .....                                     | <b>22</b> |
| <b>6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b> .....                     | <b>24</b> |
| <b>6.1 Cimento Asfáltico de Petróleo</b> .....                 | <b>24</b> |
| <b>6.2 Agregados</b> .....                                     | <b>24</b> |
| 6.2.1 Análise granulométrica .....                             | 25        |
| 6.2.2 Densidades e massa específica dos agregados .....        | 28        |
| <b>6.3 Dosagem Marshall</b> .....                              | <b>33</b> |
| <b>7 CONCLUSÃO</b> .....                                       | <b>43</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Na busca por melhorar o caminho pelo qual percorre, o homem desenvolveu várias técnicas para tornar sua jornada mais cômoda e segura, assim surge a pavimentação, onde:

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a proporcionar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al., 2008).

A execução de um pavimento deve considerar quesitos técnicos e econômicos, atendendo ao projeto solicitado com o melhor custo benefício. O tráfego da via é requisito básico para a elaboração de um projeto, sendo o dimensionamento feito em função de número equivalente (N) de operações de um eixo tido como padrão, e esse equivalente é dependente do volume e da composição do tráfego na via.

Dentre os diferentes revestimentos do pavimento destacamos a camada de rolamento, parte superficial da estrutura que tem contado direto com o tráfego. Devido à grande importância socioeconômica das vias urbanas, por onde se movimenta toda a vida de uma cidade, é indispensável que estas apresentem condições satisfatórias proporcionando conforto e segurança para os usuários.

Há tempos, por todo mundo, o método mais aplicado nas camadas superficiais é o pavimento flexível composto por concreto asfáltico. A utilização desse tipo de pavimento vem sendo executada em grande escala desde a segunda metade do século XX, sendo a estrutura mais utilizada mundialmente. (ABEDA, 2010).

No Brasil se destaca a utilização dos revestimentos asfálticos, compostos basicamente da mistura de agregados e ligantes asfálticos, misturados em usina apropriada (misturas usinadas) ou preparados na própria pista (tratamentos superficiais). Eles também se diferem em relação ao ligante utilizado, sendo o concreto asfáltico de petróleo (CAP) para misturas usinadas a quente, e as emulsões asfálticas de petróleo (EAP) para os tratamentos.

O tratamento superficial é definido por Baldo (2007) como um revestimento fino, composto por agregados e asfalto (diluído ou emulsionado), executado sobre a

base sem a utilização de usinagem. O DER/PR (2017) complementa que “é o serviço por penetração que envolve aplicações de ligante asfáltico e agregados minerais em operação simples ou múltipla”.

O revestimento betuminoso mais nobre e também mais aplicado no Brasil é o concreto asfáltico, chamado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Bernucci et al. (2008), o classifica como produto da mistura previamente proporcionada de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico (CAP), ambos aquecidos em temperaturas determinadas em função da característica da viscosidade do ligante, classificadas em grupos em função de sua granulometria.

Senço (2007) esclarece que o pavimento é a estrutura que se constrói sobre o leito terrestre que pode variar em sua espessura, ou no que se refere aos materiais utilizados, devido não só às solicitações, mas também pela função à qual a estrada foi projetada para exercer.

Sendo a capa asfáltica o componente da estrutura no qual os usuários têm contato direto, exercendo funções de suma importância para a manutenção do restante do sistema estrutural esta recebe cuidados especiais, porém a determinação da melhor espessura da capa ainda é uma questão de constante debate.

Visando a dosagem de um concreto betuminoso usinado a quente, este estudo tem o objetivo de apresentar um traço para aplicação do CBUQ em camada fina com espessura de 02 (dois) centímetros.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Dosar uma mistura betuminosa para concreto asfáltico Faixa “D” DER/PR, a ser aplicado na região de Campo Mourão no estado do Paraná na capa de rolamento de vias urbanas com tráfego leve de veículos, com espessura de 2,0 centímetros.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar os agregados, quanto à granulometria, à densidade dos agregados graúdos e miúdos e à massa específica do material finamente pulverizado.
- Determinar o equivalente de areia para a mistura.
- Encontrar o teor de projeto de cimento asfáltico de petróleo (CAP), a estabilidade e a fluência da mistura asfáltica usinada a quente (CAUQ), determinados pelo método Marshall.

### 3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de uma sociedade está intimamente ligado a qualidade do seu transporte, sendo o fluxo de materiais e pessoas fator preponderante para evolução econômica e bem-estar social. Dentro das vias urbanas a qualidade da pavimentação interfere na vida de toda a população, já que é uma infraestrutura básica e medidora de desenvolvimento, além de importante ferramenta do setor público. Tornar esse serviço mais acessível deve ser busca constante visando a melhoria na qualidade de vida das pessoas.

A pavimentação das ruas é um serviço de alto custo, logo a busca por economizar recursos atendendo de maneira satisfatória às normas vigentes é de suma importância para as finanças públicas, que desprendem grande parte dos investimentos no setor e para as empresas cujas obras necessitam da implantação da infraestrutura de pavimentação.

A espessura mínima da capa asfáltica ainda é objeto de estudos e um ponto de interrogação, quanto a sua capacidade de proteção das camadas de base como a capacidade de suportar os esforços submetidos pelo trânsito (DNIT,2006).

A condição de conservação das vias urbanas é um parâmetro de desenvolvimento, sendo uma área de grandes investimentos públicos que visam proporcionar um bom fluxo de escoamento de veículos pela cidade facilitando o transporte das pessoas e de toda matéria que sustenta nosso atual modo de vida. A expansão da área urbana e implantação de novas áreas habitadas necessitam atender parâmetros de infraestrutura básica onde se inclui a pavimentação das vias de tráfego, indispensável para o crescimento das cidades.

A qualidade do pavimento é dependente de vários fatores, como a tecnologia aplicada, o meio ambiente e as ações de carga, que influenciam na deterioração do material, que quando bem projetado deve ser uma estrutura durável mantendo suas características durante seu tempo de serviço.

Dentre os fatores que influenciam na qualidade do revestimento, o mais importante é a dosagem correta do asfalto na mistura. De acordo com Maia (2011), o teor inadequado do material asfáltico é preponderante na diminuição do desempenho do pavimento flexível, pois não executar o teor de projeto – chamado teor ótimo – pode acarretar redução da vida útil.

A granulometria é outro fator diretamente ligado à qualidade, responsável pelas características que influenciam no comportamento da mistura. Ligada à trabalhabilidade, permeabilidade, estabilidade, rigidez, deformação, resistência entre outros (BERNUCCI et al., 2008).

Os projetos de pavimentação devem atender a quesitos técnicos e econômicos, ou seja, a escolha do método a ser aplicado é dependente do seu custo. Sendo o CBUQ o método mais conceituado para o revestimento flexível e tendo a cidade de Campo Mourão no estado do Paraná, todas as condições necessárias, tais como: usina adequada e pedreira para a disposição do agregado. O estudo busca ofertar um traço de concreto asfáltico para ser aplicado com pequena espessura nas vias de tráfego leve de veículos da região, tendo a condição inicial de que o CAUQ é uma tecnologia com melhores parâmetros de qualidade perante a outras opções de capa de rolamento como os tratamentos superficiais.

O presente trabalho detalha um método que atende à legislação de forma satisfatória para vias de baixo tráfego, situação de grande parte das áreas de pavimentação das cidades. Sendo a capa a camada que desprende grande parte dos custos de uma pavimentação, uma adequada espessura se torna fator determinante para a viabilidade de um projeto.



## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Espessura da Capa de Rolamento

O pavimento é dimensionado segundo o tráfego estimado a que ele será exposto durante sua vida útil<sup>1</sup>. A classificação é feita através da determinação do número N, que é definido como número equivalente de operações de um eixo tomado como padrão, dotado de uma carga de 8,2 toneladas (SOUZA, 1981).

O autor ainda salienta que a espessura mínima de um revestimento é um ponto ainda em aberto na engenharia, tanto a respeito da proteção da camada de base dos esforços impostos pelo tráfego, quanto para se evitar a ruptura do próprio revestimento devido aos esforços submetidos. Sua obra traz recomendações para a espessura do pavimento baseando-se no número N, como ilustra na Tabela 1:

**Tabela 1 - Espessura mínima de revestimento**

| <b>Equivalente N</b>          | <b>Espessura mínima de revestimento betuminoso</b> |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|
| $N \leq 10^6$                 | Tratamentos superficiais betuminosos               |
| $10^6 < N \leq 5 \times 10^6$ | Revestimento betuminoso 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: Adaptado de DNIT (2006).

O estudo busca traçar misturas para vias de tráfego leve de veículos que apresentam um número  $N \leq 10^6$ . Como indicado na Tabela 1 para estes casos se recomenda o tratamento superficial, já descrito como um revestimento de pequena espessura. Sendo assim busca-se um traço de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) para ser aplicado com uma espessura de 2 (dois) centímetros como alternativa aos tratamentos superficiais.

A Prefeitura de São Paulo (2004), trata em instrução de projeto que o número N é o valor que representa os esforços transmitidos a estrutura, na interface entre o pavimento e o pneu, ele indica as solicitações previstas no período de projeto para qual é dimensionado o pavimento. Os valores para obtenção do N são extraídos com base na contagem e classificação do tráfego do local de estudo.

<sup>1</sup> Vida útil: tempo em que se mantém a capacidade de exercer todas as funções a qual foi projetado.

A Instrução de Projeto – IP 02/2004 – ainda exemplifica a classificação das vias, onde se define locais de tráfego leve como:

Ruas de características essencialmente residenciais, para as quais não é previsto o tráfego de ônibus, podendo existir ocasionalmente passagens de caminhões e ônibus em número não superior a 20 por dia, por faixa de tráfego, caracterizado por um número "N" típico de 105 solicitações do eixo simples padrão (80 kN) para o período de projeto de 10 anos.

#### 4.1.1 Composição da mistura

A espessura mínima para a execução de uma concreto asfáltico é diretamente determinada pelo tamanho máximo do agregado utilizado para a mistura. O tamanho dos agregados e a distribuição granulométrica determinam a aplicação da massa asfáltica. (BERNUCCI et al., 2008)

O DER/PR (2017) salienta que a faixa escolhida deve apresentar um diâmetro máximo inferior a  $\frac{2}{3}$  (dois terços) da espessura da camada asfáltica e apresenta as faixas granulométricas a serem aplicadas, como mostra a Tabela 2:

**Tabela 2 - Faixas granulométricas**

| Peneira           |              | Porcentagem passante, em peso |          |           |          |          |              |
|-------------------|--------------|-------------------------------|----------|-----------|----------|----------|--------------|
| ABNT              | Abertura, mm | Faixa A                       | Faixa B  | Faixa C   | Faixa D  | Faixa E  | Faixa F      |
| 1 1/2"            | 38,10        | 100                           | 100      | -         | -        | -        | -            |
| 1"                | 25,40        | 95 - 100                      | 90 - 100 | 100       | -        | -        | -            |
| 3/4"              | 19,10        | 85 - 100                      | -        | 90 - 100  | 100      | 100      | -            |
| 1/2"              | 12,70        | -                             | 56 - 80  | -         | 80 - 100 | 90 - 100 | -            |
| 3/8"              | 9,50         | 45 - 80                       | -        | 56 - 80   | 70 - 90  | 75 - 90  | 100          |
| n.º 4             | 4,80         | 28 - 60                       | 29 - 59  | 35 - 65   | 50 - 70  | 45 - 65  | 75 - 100     |
| n.º 10            | 2,00         | 20 - 45                       | 18 - 42  | 22 - 46   | 33 - 48  | 25 - 35  | 50 - 90      |
| n.º 40            | 0,42         | 10 - 32                       | 8 - 22   | 8 - 24    | 15 - 25  | 8 - 17   | 20 - 50      |
| n.º 80            | 0,18         | 8 - 20                        | -        | -         | 8 - 17   | 5 - 13   | 7 - 28       |
| n.º 200           | 0,075        | 3 - 8                         | 1 - 7    | 2 - 8     | 4 - 10   | 2 - 10   | 3 - 10       |
| Utilização        |              | Ligação                       |          | Rolamento |          |          | Reperfilagem |
| Teor de ligante   |              | 4,0 - 5,0                     |          | 4,5 - 6,0 |          |          | 5,0 - 6,5    |
| Espessura max. mm |              | 6,0                           |          | 5,0       |          |          | 3,0          |

Fonte: Adaptado de DER/PR (2017).

## 4.2 Agregados

Podemos definir agregado como “mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais usados em combinação com um ligante para formar um concreto ou uma argamassa.” (WOODS, 1960, apud BERNUCCI et al., 2008, p. 115).

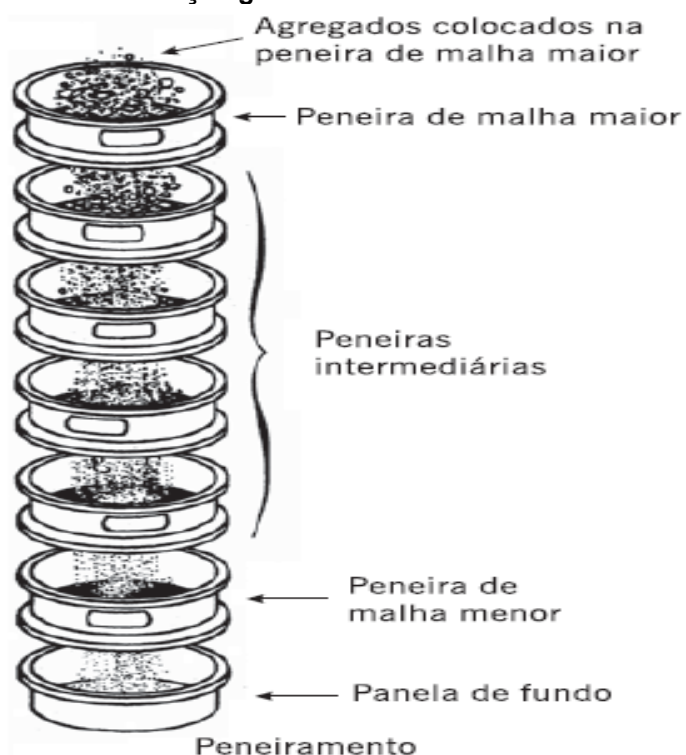
Os agregados são responsáveis pela propriedade de suportar as tensões recebidas na camada superficial do pavimento. Bernucci et al. (2008, p. 116) salienta a importância dos ensaios laboratoriais para prever o seu comportamento posterior na situação de uso.

O material escolhido deve apresentar propriedades de modo a suportar as forças impostas em sua superfície de pavimento e no seu interior. Essas características são influenciadas pela maneira de produção da brita, estocagem condições de projeto de ligantes e outras, por isso os ensaios de laboratório devem utilizar a previsão do comportamento do material em obra.

O DNIT (2006) classifica o material conforme o tamanho individual dos grãos:

- Agregado graúdo: material retido na peneira número 10 (2,0 mm).
- Agregado miúdo: material passante na peneira 10 (2,0 mm) e retido na peneira 200 (0,075 mm).
- Agregado de enchimento (*filler*): material com ao menos 65% passante na peneira 200 (0,075 mm).

A Figura 1 ilustra o conjunto de peneiras para separação do agregado.

**Figura 1 - Distribuição granulométrica**

Fonte: Bernucci et al., 2008

#### 4.2.1 Análise granulométrica

O diâmetro dos agregados é responsável pela resistência da mistura asfáltica e também determinante para espessura da camada de rolamento. A classificação da granulometria dos agregados é descrita pelo DNER ME 083/98, onde é especificado os materiais e equipamentos para o ensaio.

O ensaio se baseia no peneiramento da amostra de agregados secos, e o resultado é obtido a partir das porcentagens de materiais acumulados e passantes em cada peneira perante ao peso inicial da amostra. A Tabela 3 mostra a abertura do conjunto de peneiras a serem utilizados segundo DNIT (2006).

**Tabela 3 - Dimensões nominais das peneiras**

| 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: Adaptado de DNIT (2006)

### 4.3 Petróleo

Petróleo tem sua etimologia proveniente do latim, *petrus* e *oleum*, basicamente óleo da pedra. Por definição é um combustível fóssil, líquido oleoso rico em hidrocarbonetos, é fonte de energia e matéria prima para diversas atividades da humanidade, responsável por grande parte da produção de energia no planeta e indispensável na economia mundial. (MARTINS et al., 2015)

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bioenergia (ANP,2019) salienta a complexidade desse elemento formado por uma combinação complexa de hidrocarbonetos, que pode conter ainda pequenas quantidades de nitrogênio, enxofre e íons metálicos. A Agência exhibe um exemplo de composição do petróleo que demonstra a complicação da sua composição:

- 82% - Carbono, elemento predominante;
- 12% - Hidrogênio, formador de moléculas com o carbono;
- 4% - Nitrogênio, em forma Amina;
- 1% - Oxigênio, pouco encontrado;
- 0,5% - Sais, raramente encontrados;
- 0,5% - Metais, (ferro, cobre, entre outros) considerados resíduos.

Para ser utilizado nos diferentes ramos industriais no qual é empregado o petróleo passa por diversos processos afim de obter diferentes formulações de seus derivados.

#### 4.3.1 Ligante Asfáltico

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais utilizado pelo homem na arte de construir, com aplicação em diversos ramos da engenharia. São várias as razões para sua utilização na pavimentação: fornece forte união aos agregados; age como ligante que permite flexibilidade, impermeabilidade além de durável e resistente a ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e sais. (BERNUCCI et al. 2008)

O asfalto empregado na pavimentação é um ligante betuminoso oriundo da destilação do petróleo, caracterizado por ser um adesivo, com impermeabilidade à água e baixa reatividade. Porém, essas características não impedem que ele sofra envelhecimento por oxidação devido ação da água e do ar.

Os ligantes betuminosos são subprodutos da destilação do petróleo. Utilizamos a denominação CAP para descrever este produto que muda seu estado físico dependendo da temperatura, sendo semissólido a baixas temperaturas, viscoelástico a temperatura ambiente e líquido em altas temperaturas.

Existem muitos tipos de petróleo no mundo, com características e composições diferentes onde apenas uma parte deles é adequada para produção de asfalto. Os petróleos ou óleos crus têm características físico-químicas distintas, variam de líquidos viscosos negros até líquidos castanhos fluidos, com composição química preponderantemente aromática, parafínica ou naftênica. Em virtude da variedade de composições dos óleos crus, os asfaltos provenientes de cada tipo também terão constituições químicas diferentes. Os cimentos asfálticos de petróleos são compostos por 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio, cálcio, além de oxigênio, enxofre e nitrogênio) reunidos por ligações covalentes. (BERNUCCI et al., 2008).

O CAP é material solúvel em benzeno, tricloroetileno e bissulfeto de carbono, sendo isso um requisito de especificação, a classificação é baseada em propriedades físicas que asseguram o desempenho satisfatório do material me obra. A Resolução ANP 19/2005 classifica os cimentos utilizados no Brasil classificando-os como mostra a Tabela 4:

**Tabela 4 - Especificações do CAP**

| CARACTERÍSTICAS                        | UNIDADES | LIMITES           |                   |                   |                   | MÉTODOS      |
|----------------------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
|                                        |          | CAP<br>30 45      | CAP<br>50 70      | CAP<br>85 100     | CAP<br>150 200    | ABNT         |
| Penetração (100 g, 5s, 25°C)           | 0,1mm    | 30 45             | 50 70             | 85 100            | 150 200           | NBR 6576     |
| Ponto de amolecimento, mín             | °C       | 52                | 46                | 43                | 37                | NBR 6560     |
| Viscosidade SayboltFurol               |          |                   |                   |                   |                   | NBR<br>14950 |
| a 135 °C, mín                          | s        | 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                 |          |                   |                   |                   |                   | NBR<br>15184 |
| a 135°C, SP<br>21, 20 rpm, mín         | cP       | 374               | 274               | 214               | 155               |              |
| a 150 °C, SP<br>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<br>(+0,7) | (1,5) a<br>(+0,7) | (1,5) a<br>(+0,7) | (1,5) a<br>(+0,7) |              |
| Ponto de fulgor mín                    | °C       | 235               | 235               | 235               | 235               | NBR<br>11341 |
| Solubilidade em tricloroetileno, mín   | % massa  | 99,5              | 99,5              | 99,5              | 99,5              | NBR<br>14855 |
| Ductilidade a 25° C, mín               | cm       | 60                | 60                | 100               | 100               | NBR 6293     |

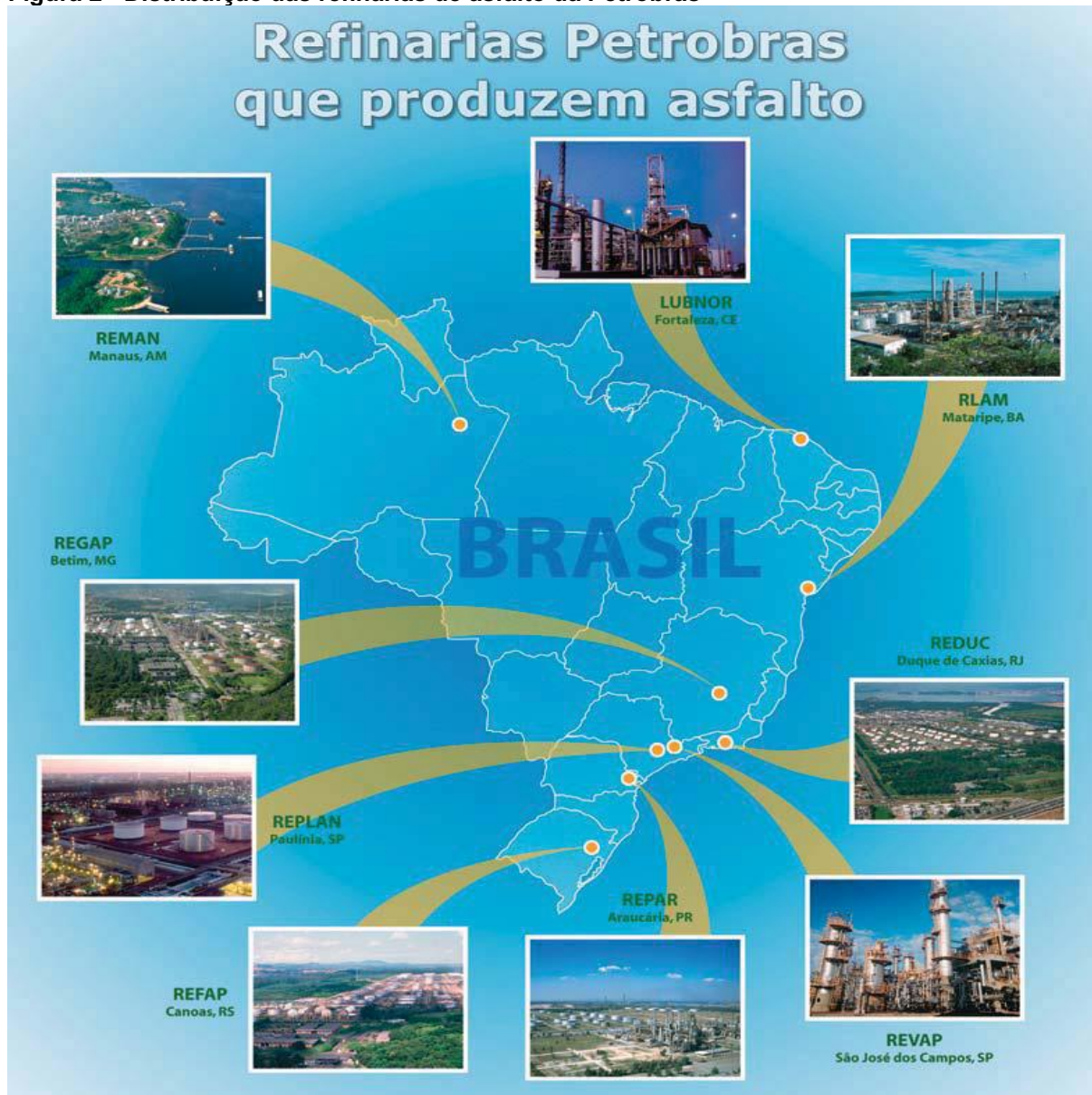
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min

|                                       |         |     |     |     |     |          |
|---------------------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|----------|
| 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 |
| Aumento do ponto de amolecimento, máx | °C      | 8   | 8   | 8   | 8   | NBR 6560 |
| Penetração retida, mín (3)            | %       | 60  | 55  | 55  | 50  | NBR 6576 |

Fonte: Adaptado de ANP 19/2005

Os ligantes derivados de petróleo são controlados no Brasil pela Petrobras, a Figura 2 mostra a distribuição das refinarias que fornecem material betuminoso.

Figura 2 - Distribuição das refinarias de asfalto da Petrobras



Fonte: Bernucci et al., 2008

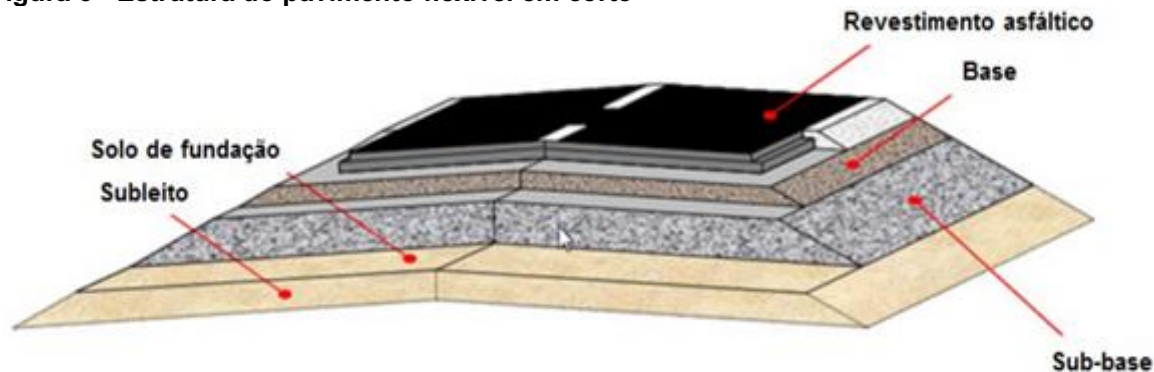
#### 4.4 Mistura Asfáltica

Predomina nas vias urbanas brasileiras o pavimento flexível, composto basicamente por quatro camadas principais, o revestimento asfáltico ou capa de rolagem, base, sub-base e reforço do subleito, apresentados na Figura 3. Sendo a camada superficial que tem contato direto com os pneus dos veículos, está



basicamente formada pela mistura do ligante asfáltico com os agregados. (RIBAS, 2016)

**Figura 3 - Estrutura do pavimento flexível em corte**



Fonte: Ribas, 2016

Comumente usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais de vários tamanhos, a fim de garantir, junto com o ligante, as propriedades de impermeabilidade, flexibilidade e resistência. (BERNUCCI et al., 2008)

#### 4.4.1 Concreto Betuminoso Usinado a Quente

O DNIT (2006), define o concreto asfáltico como “Mistura executada a quente em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado, material de enchimento (filler) se necessário e cimento asfáltico, espalhada e compactada a quente.

O CBUQ é classificado e dimensionado, entre outros, segundo a sua função estrutural. O DER/PR (2017) classifica:

- Camada de rolamento ou "capa asfáltica": camada superficial da estrutura destinada a receber diretamente a ação do tráfego. A mistura empregada deve apresentar estabilidade e flexibilidade compatível com o funcionamento elástico da estrutura e condições de segurança ao tráfego.
- Camada de ligação ou "binder": camada posicionada imediatamente abaixo do revestimento. Apresenta em relação à mistura utilizada para camada de rolamento, diferenças de comportamento, decorrentes do emprego de agregado de maior diâmetro máximo, existência de maior percentagem de vazios, menor consumo de "filler" e de ligante.

- Camada de nivelamento ou "reperfilagem": serviço executado com massa asfáltica de graduação fina, com a função de corrigir deformações da superfície de um antigo revestimento e, simultaneamente, promover a selagem de fissuras existentes.

Determinado a função do revestimento, é composta a mistura dos agregados para enquadramento nas faixas granulométricas de trabalho determinadas.

#### 4.4.2 Dosagem do Concreto Asfáltico

A dosagem do concreto asfáltico consiste na escolha, através de procedimentos experimentais de um teor "ótimo" de ligante, a partir da definição da faixa granulométrica. O teor de projeto do ligante varia de acordo com o método utilizado para tal, é função de outros parâmetros com a energia de compactação, o tipo da mistura, temperatura, entre outros. O ensaio mais utilizado no mundo é o Marshall, desenvolvido na década de 1940 pelo engenheiro Bruce Marshall. (BERNUCCI et al., 2008, p. 205)

##### 4.4.2.1 Dosagem Marshall

O ensaio é baseado na compactação por impacto de uma amostra de mistura em um molde, com diâmetros e altura definidos, compactados por uma massa deslizante também definida. (RIBAS, 2016)

Segundo Vasconcelos et al. (2003), a dose de asfalto é determinada pelo volume de vazios (Vv) que se determina pela densidade máxima teórica (DMT), e da densidade aparente do corpo de prova. Através deste método se obtém a quantidade ótima de ligante a ser utilizada na mistura asfáltica usinada a quente, destinada à pavimentação.

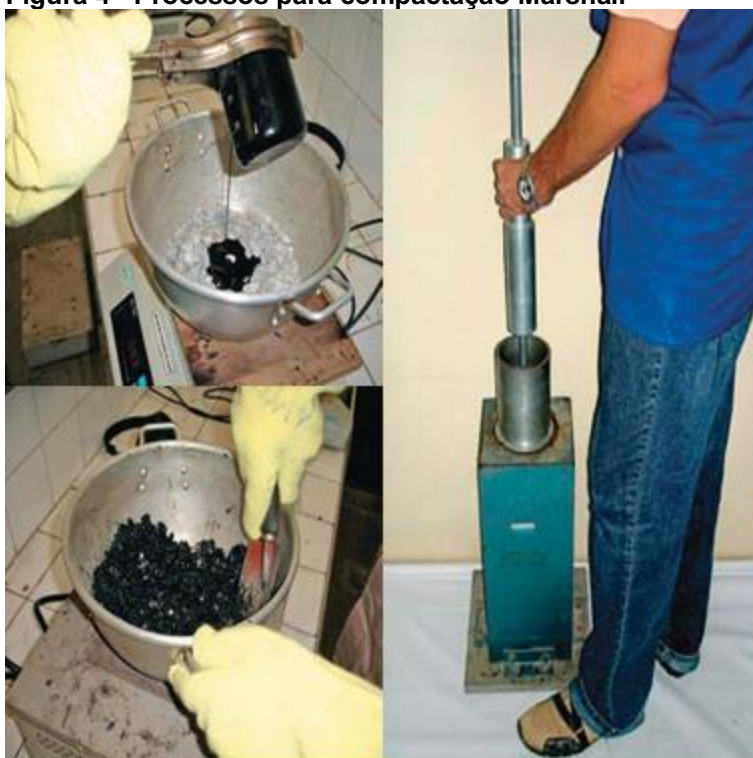
O Método foi desenvolvido no decorrer da 2ª Guerra Mundial para garantir uma mistura asfáltica capaz de resistir a pressão de pneus das aeronaves militares. Durante anos a dosagem Marshall foi sendo aprimorada e até hoje é o método mais utilizado no Brasil. (BERNUCCI et al., 2008)

O passo a passo do método se resume nas etapas:

- Determinação das massas específicas reais dos agregados e do CAP.
- Escolha da faixa granulométrica, de acordo com órgão vigente.

- Determinação da composição dos agregados, de maneira a se enquadrarem na faixa granulométrica selecionada, sendo determinado o percentual em massa de cada agregado componente da mistura.
- Obtenção da temperatura de mistura e compactação, a partir da escolha do CAP.
- Adoção de teores de asfalto para diferentes grupos de corpos de prova (CP), cada grupo deve ser composto por 3 CP. A Figura 4 mostra etapas do processo.
- Desmoldagem e obtenção das massas específicas aparentes dos CPs.
- Com o teor de cada grupo ajusta-se o percentual em massa de cada agregado.
- Cálculos dos parâmetros de dosagem.
- Utilização da prensa Marshall para determinação da fluência<sup>2</sup> e estabilidade<sup>3</sup> do corpo de prova. A Figura 6 mostra prensa Marshall.

**Figura 4 - Processos para compactação Marshall**



Fonte: Bernucci et al., 2008

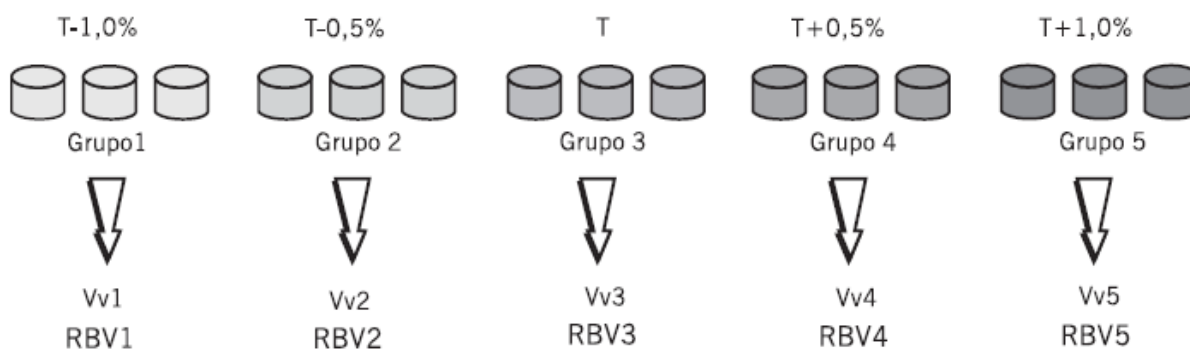
---

<sup>2</sup> Deslocamento na vertical apresentado pelo corpo-de-prova correspondente.

<sup>3</sup> Carga máxima a qual o corpo-de-prova resiste antes da ruptura, definida com um deslocamento ou quebra de agregado.

Utilizando o mesmo processo de mistura e compactação são moldados ao menos 3 corpos de prova para cada teor de asfalto determinado, sendo um total de 5 grupos fixados pela faixa granulométrica adotada que expõem os limites máximos e mínimos do teor. A Figura 5 exemplifica a obtenção de cada grupo de CP, divididos pelo teor de CAP.

**Figura 5 - Representação esquemática dos corpos de prova**



Fonte: Bernucci et al., 2008

Todos os corpos são pesados, medidos e submetidos a ensaios para obtenção da massa específica. Posteriormente são imersos em banho-maria para atingir a temperatura ideal de rompimento na prensa Marshall.

**Figura 6 - Processos para rompimento na prensa**



Fonte: Bernucci et al., 2008

Obtidos os valores dos parâmetros volumétricos e mecânicos determinados, são gerados os gráficos com as curvas em função dos teores de asfalto visando a escolha do teor ótimo. Bernucci et al. (2008) observa que o método oferece diferentes alternativas de determinação do teor de projeto. Em geral a escolha se baseia apenas no volume de vazios da mistura ( $V_v$ ).

#### **4.5 Usina de Concreto Betuminoso Usinado a Quente**

A qualidade do revestimento depende da utilização e de procedimentos pertinentes em distintas etapas, desde a concepção do projeto à execução da obra.

Bernucci et al. (2008) resume que o objetivo das usinas de asfalto é garantir de forma adequada a mistura das frações dos agregados, aquecer a mistura e o ligante asfáltico, misturando todos os materiais e formando a mistura dentro das características predeterminadas. Ainda salienta que, elas são um conjunto de equipamentos mecânicos e eletrônicos conectados para a produção da mistura, apresentam diferenças quanto sua capacidade e princípios de produção, podem ser moveis ou estacionárias.

## 5 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado com a contribuição de uma construtora especializada em pavimentação, localizada na cidade de Campo Mourão, estado do Paraná. A empresa forneceu os materiais necessários além de dispor do laboratório e equipamentos para os ensaios.

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) foi disponibilizado pela empresa e a caracterização desses materiais se deu pelo laudo técnico da refinaria.

Os agregados são oriundos de uma pedreira, localizada na cidade de Campo Mourão, no estado do Paraná, e o material de enchimento (Filler) necessário também foi disponibilizado pela empresa.

A faixa granulométrica e a caracterização dos agregados foram determinados segundo suas propriedades granulométricas e suas densidades reais e aparentes, além do equivalente de areia da mistura, de acordo com as descrições das seguintes normas:

- DER/PR ES-P 21/17: “Pavimentação: Concreto Asfáltico Usinado a Quente.”
- DNER ME 083/98: “Agregados Análise Granulométrica”.
- DNER ME 085/94: “Material Finamente Pulverizado – Determinação de Massa Específica Real” – apresenta procedimentos para determinação da massa específica de cimentos Portland, solos finos e materiais de enchimento.
- DNER ME 084/95: “Agregado Miúdo – Determinação da Densidade Real” – apresenta procedimentos para determinação.
- DNER ME 081/98: “Determinação da Absorção e da Densidade do Agregado Graúdo” – apresenta procedimentos para determinação da densidade aparente e absorção d’água.
- DNER ME 054/97: “Equivalente de Areia”.

Para a dosagem e caracterização da mistura, foi utilizado a DNER ME 043/95 que traz as diretrizes do ensaio Marshall, de onde obtivemos:

- Volume de vazios (Vv): volume de vazios da mistura em relação ao volume total da mistura.

- Relação betume-vazios (RBV): relação entre volume de betume e o volume total de vazios.
- Estabilidade Marshall: resistência máxima do corpo de prova submetido a compressão radial.
- Fluência: deformação que o corpo de prova sofre desde a carga inicial até a carga máxima (quando rompe).
- Massa específica aparente: diferença entre as massas dos corpos de prova pesados ao ar e pesados submersos em água.
- Vazios do agregado mineral (VAM): volume total de vazios da mistura, soma dos vazios preenchidos e não preenchidos por betume.
- Teor de ligante do projeto: quantidade de ligante controlada adequadamente para garantir cobertura total dos agregados.

Sendo o teor ótimo da mistura betuminosa uma condição de suma importância na qualidade da mistura betuminosa a determinação deste parâmetro é parte essencial da composição do traço de CBUQ. O teor é obtido através da relação de vazios da mistura – percentagem de vazios ( $V_v$ ) e a relação betume-vazios (RBV). Assim obtivemos o projeto de mistura betuminosa quente para usinas, a serem empregadas na região de estudo.

O CAUQ é considerado o mais nobre dentre os revestimentos asfálticos e comprovadamente com qualidade superior aos tratamentos, espera-se que seu custo seja viável devido às comodidades da região, que ofertam uma estrutura para a confecção da mistura.

Barufi (2013) salienta que o CAUQ segue um processo mais minucioso de ensaios tecnológicos: é fabricado em usina específica e calibrada, sendo um processo industrial, com mais controle e segurança, quando comparado aos métodos de tratamentos e revestimentos asfálticos.



## 6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 Cimento Asfáltico de Petróleo

Foi utilizado o cimento asfáltico contido em estoque na empresa, sendo este um CAP 50/70. A caracterização do material se deu por meio de laudo técnico disponibilizado pelo fornecedor, junto a nota fiscal do produto.

Para o projeto é de interesse o valor da densidade relativa do CAP onde o valor é mostrado na Tabela 5:

**Tabela 5 - Especificação do CAP**

| Densidade           |               |
|---------------------|---------------|
| Densidade do betume | $D_b = 1,010$ |

Fonte: Autoria própria (2019)

### 6.2 Agregados

Os agregados disponibilizados pela construtora foram coletados junto a pedreira, demonstrada na Figura 7.

**Figura 7 - Britador**



Fonte: Autoria própria (2019)

O material recolhido foi levado ao laboratório para a determinação das propriedades pertinentes.

A faixa granulométrica escolhida foi a Faixa "D" DER/PR, cujos parâmetros são mostrados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Faixa granulométrica**

| <b>Faixa granulométrica especificada</b> |             |                           |                 |
|------------------------------------------|-------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Peneiras</b>                          |             | <b>Faixa "D" D.E.R/PR</b> |                 |
| <b>(pol)</b>                             | <b>(mm)</b> | <b>Média</b>              | <b>Limites</b>  |
| 1 1/2"                                   | 38,100      | 100,00                    | 100,00 - 100,00 |
| 1"                                       | 25,400      | 100,00                    | 100,00 - 100,00 |
| 3/4"                                     | 19,100      | 100,00                    | 100,00 - 100,00 |
| 1/2"                                     | 12,700      | 90,00                     | 80,00 - 100,00  |
| 3/8"                                     | 9,520       | 80,00                     | 70,00 - 90,00   |
| nº 4                                     | 4,800       | 60,00                     | 50,00 - 70,00   |
| nº 10                                    | 2,000       | 40,50                     | 33,00 - 48,00   |
| nº 40                                    | 0,420       | 20,00                     | 15,00 - 25,00   |
| nº 80                                    | 0,180       | 12,50                     | 8,00 - 17,00    |
| nº 200                                   | 0,075       | 7,00                      | 4,00 - 10,00    |

**Fonte: Autoria própria (2019)**

### 6.2.1 Análise granulométrica

Seguindo a norma para determinação da granulometria o material foi seco, fracionado e peneirado, onde se obteve a granulometria individual de cada componente para composição da mistura de agregados dentro da faixa predeterminada. Tais procedimentos são explicitados na Figura 8.

**Figura 8 - Procedimentos para granulometria**



Fonte: Autoria própria (2019)

Os dados obtidos destes processos são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Granulometrias individuais**

| <b>Composição da mistura granulométrica dos Agregados + filler</b> |               |                                          |             |                 |              |                 |
|--------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------|-------------|-----------------|--------------|-----------------|
| <b>Peneiras</b>                                                    |               | <b>Porcentagem passando nas peneiras</b> |             |                 |              |                 |
| <b>(pol)</b>                                                       | <b>(mm)</b>   | <b>1/2"</b>                              | <b>3/8"</b> | <b>PÓ 3/16"</b> | <b>Areia</b> | <b>Cal CH-1</b> |
| <b>3/4"</b>                                                        | <b>19,050</b> | 100,00                                   | 100,00      | 100,00          | 100,00       | 100,00          |
| <b>1/2"</b>                                                        | <b>12,700</b> | 45,20                                    | 100,00      | 100,00          | 100,00       | 100,00          |
| <b>3/8"</b>                                                        | <b>9,520</b>  | 12,10                                    | 100,00      | 100,00          | 100,00       | 100,00          |
| <b>nº 4</b>                                                        | <b>4,800</b>  | 0,60                                     | 37,10       | 99,20           | 99,50        | 100,00          |
| <b>nº 10</b>                                                       | <b>2,000</b>  | 0,60                                     | 2,80        | 66,90           | 98,00        | 100,00          |
| <b>nº 40</b>                                                       | <b>0,420</b>  | 0,50                                     | 0,60        | 32,80           | 57,10        | 100,00          |
| <b>nº 80</b>                                                       | <b>0,180</b>  | 0,40                                     | 0,50        | 26,40           | 2,30         | 93,60           |
| <b>nº 200</b>                                                      | <b>0,075</b>  | 0,30                                     | 0,40        | 16,20           | 0,30         | 78,10           |

Fonte: Autoria própria (2019)

Assim foi possível a determinação inicial das proporções dos agregados, como mostra a Tabela 8.

**Tabela 8 - Proporção inicial dos agregados**

| <b>Proporção inicial dos agregados</b> |                    |
|----------------------------------------|--------------------|
| <b>Material</b>                        | <b>Porcentagem</b> |
| 1/2"                                   | 23,00 %            |
| 3/8"                                   | 28,00 %            |
| PÓ                                     | 37,00 %            |
| Areia                                  | 11,00 %            |
| Cal CH-1                               | 1,00 %             |
| <b>Total</b>                           | <b>100,00 %</b>    |

Fonte: Autoria própria (2019)

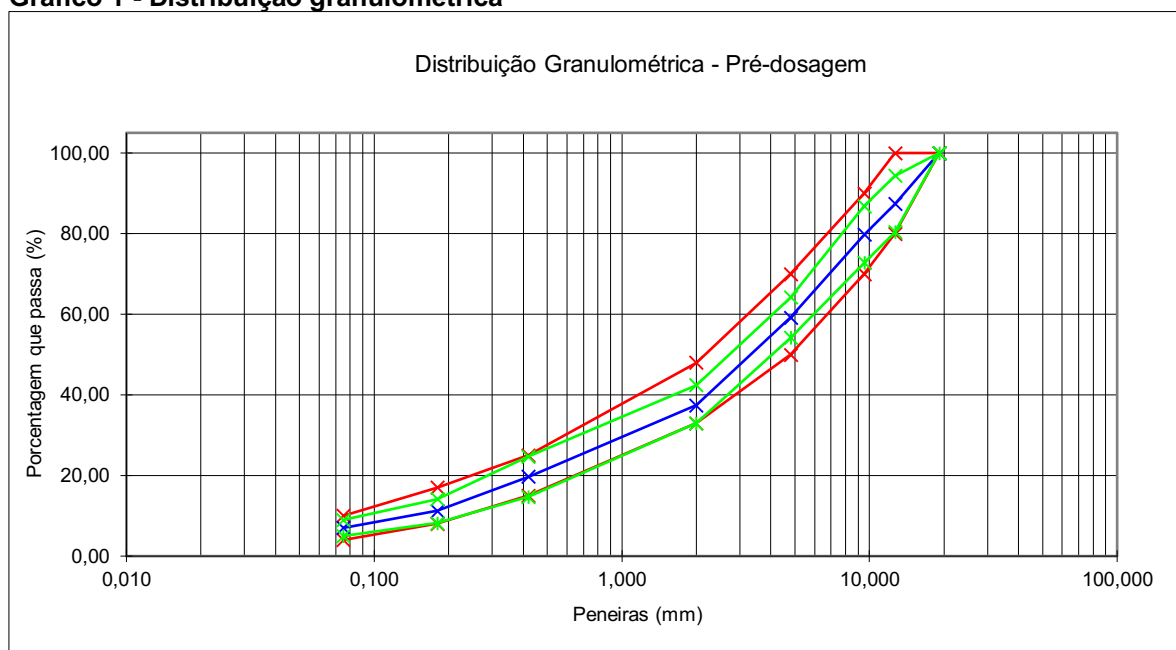
Com a base de dados obtidos se formulou a granulometria inicial do projeto da mistura, exemplificado na Tabela 9.

**Tabela 9 - Composição da mistura de agregados**

| <b>Granulometria inicial dos agregados</b> |             |                                |                          |          |             |
|--------------------------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------|----------|-------------|
| <b>Peneiras</b>                            |             | <b>CBUQ Faixa "D" D.E.R/PR</b> |                          |          |             |
| <b>(pol)</b>                               | <b>(mm)</b> | <b>Projeto</b>                 | <b>Faixa de trabalho</b> |          | <b>Tol.</b> |
| 1 1/2"                                     | 38,100      | 100,00                         | 100,00                   | - 100,00 | ± 7         |
| 1"                                         | 25,400      | 100,00                         | 100,00                   | - 100,00 | ± 7         |
| 3/4"                                       | 19,100      | 100,00                         | 100,00                   | - 100,00 | ± 7         |
| 1/2"                                       | 12,700      | 87,40                          | 80,40                    | - 94,40  | ± 7         |
| 3/8"                                       | 9,520       | 79,78                          | 72,78                    | - 86,78  | ± 7         |
| nº 4                                       | 4,800       | 59,18                          | 54,18                    | - 64,18  | ± 5         |
| nº 10                                      | 2,000       | 37,46                          | 33,00                    | - 42,46  | ± 5         |
| nº 40                                      | 0,420       | 19,70                          | 14,70                    | - 24,70  | ± 5         |
| nº 80                                      | 0,180       | 11,19                          | 8,19                     | - 14,19  | ± 3         |
| nº 200                                     | 0,075       | 6,99                           | 4,99                     | - 8,99   | ± 2         |

Fonte: Autoria própria (2019)

Observamos que a granulometria do projeto se encaixa dentro dos limites impostos pela faixa específica de granulometria, portanto essa proporção de projeto é adequada para a mistura. O Gráfico 1 é a demonstração do encaixe do projeto dentro dos limites da faixa.

**Gráfico 1 - Distribuição granulométrica**

Fonte: Autoria própria (2019)

### 6.2.2 Densidades e massa específica dos agregados

Após peneiramento foi calculada inicialmente a massa específica do material finamente pulverizado, caracterizado por ter ao menos 65% de sua massa passante na peneira 200, sendo a parte mais fina da mistura. A massa específica ( $\mu$ ) é dada pela Equação 1.

$$\mu = \frac{\text{massa do material}}{\text{volume de líquido deslocado}} \quad \text{Equação (1)}$$

A Figura 9 demonstra parte do procedimento de ensaio.

**Figura 9 - Ensaio de massa específica - Frasco *Le Chatelier***



**Fonte: Autoria própria (2019)**

Seguindo a caracterização dos agregados partiu-se para a determinação da densidade dos agregados miúdos. O resultado é obtido pela Equação 2.

$$D_{am} = \frac{b-a}{[(d-a)-(c-a)]} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde os parâmetros são:

- $D_{am}$  = densidade do agregado miúdo;
- $a$  = massa do picnômetro vazio;
- $b$  = massa do picnômetro mais amostra;
- $c$  = massa do picnômetro mais amostra mais água;
- $d$  = massa do picnômetro cheio de água.

**Figura 10 - Ensaio de agregado miúdo - Densidade real**



Fonte: Autoria própria (2019)

Para os agregados graúdos foram obtidos a densidade e a absorção do material, a densidade foi alcançada com a Equação 3.

$$Dap = \frac{Ms}{Mh-L} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde os parâmetros são:

- Dap = densidade do aparente;
- Ms = massa ao ar do agregado seco;
- Mh = massa ao ar do agregado saturado;
- L = leitura na balança do material submerso.

A Absorção foi obtida pela Equação 4.

$$a = \left[ \frac{Mh - Ms}{Ms} \right] * 100 \quad \text{Equação (4)}$$



**Figura 11 - Ensaio do agregado graúdo - Densidade e absorção**



Fonte: Autoria própria (2019)

Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 10.

**Tabela 10 - Densidades dos agregados**

| <b>Densidades das frações da mistura</b> |                  |
|------------------------------------------|------------------|
| Finamente pulverizado                    | $\mu = 2,804$    |
| Agregado miúdo                           | $D_{am} = 2,898$ |
| agregado graúdo                          | $a = 2,500$      |
|                                          | $D_{ap} = 2,790$ |

Fonte: Autoria própria (2019)

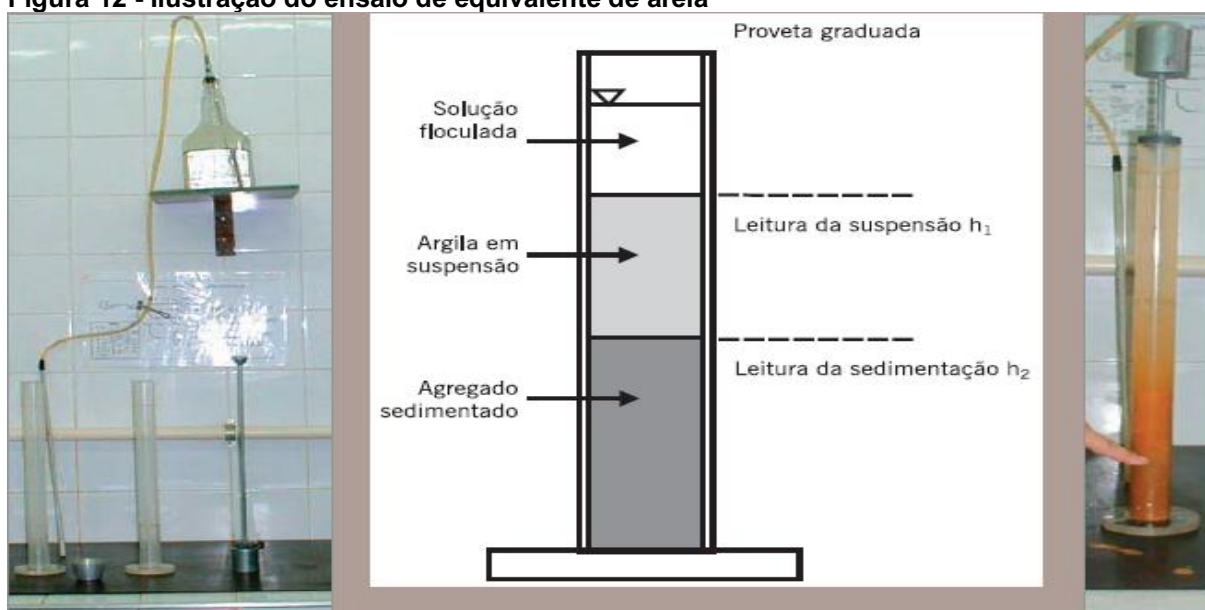


Ainda prosseguindo com os agregados foi determinado o equivalente de areia (EA), que é a relação entre a altura do nível superior de areia e a altura do nível superior da suspensão de argila do agregado miúdo, o ensaio mostra a proporção relativa de materiais argilosos na amostra de agregados miúdos, determinando o teor de argila e definido seu percentual na fração do agregados. A relação é dada pela Equação 6.

$$EA = \left( \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \right) * 100 \quad \text{Equação (6)}$$

A Figura 12 ilustra de forma esquemática a execução do processo de ensaio.

**Figura 12 - Ilustração do ensaio de equivalente de areia**



Fonte: Bernucci et al., 2008

O ensaio realizado é mostrado na Figura 13.

**Figura 13 - Ensaio de Equivalente de areia**



Fonte: Autoria própria (2019)

Com este ensaio obteve-se que o EA do agregado miúdo é de 61,5%, estando dentro do parâmetro, que exige que ele seja superior a 55%.

### 6.3 Dosagem Marshall

A fim de encontrar o teor de concreto asfáltico de projeto utilizamos o método de dosagem Marshall, tendo fixado a faixa granulométrica correspondente a Faixa "D" DER/PR temos que o teor de ligante deve estar entre 4,5 e 6,0. Seguindo as recomendações normativas foram então moldados 3 corpos de prova para os teores predeterminados como exemplificado na Tabela 11.

**Tabela 11 – Dosagem dos corpos de prova**

| Teor (%) | Corpo de prova |
|----------|----------------|
| 4,00     | CP 1A          |
|          | CP 2A          |
|          | CP 3A          |
| 4,50     | CP 1B          |
|          | CP 2B          |
|          | CP 3B          |
| 5,00     | CP 1C          |
|          | CP 2C          |
|          | CP 3C          |
| 5,50     | CP 1D          |
|          | CP 2D          |
|          | CP 3D          |
| 6,00     | CP 1E          |
|          | CP 2E          |
|          | CP 3E          |

**Fonte: Autoria própria (2019)**

A Figura 14 mostra as etapas de procedimentos para a moldagem dos corpos de prova, para cada teor de ligante especificado, a fim de se encontrar o teor de CAP que será adotado para a mistura.

Figura 14 - Procedimentos para dosagem Marshall



Fonte: Autoria própria (2019)

Moldados os CPs e após resfriamento e desmolde, obtivemos as massas específicas aparentes dos corpos como mostrado na Figura 15, depois se iniciaram

os preparativos para obtenção da estabilidade e fluência das misturas, a Figura 16 mostra os procedimentos.

**Figura 15 - Massa dos corpos de prova**



Fonte: Autoria própria (2019)



Figura 16 - Rompimento na prensa Marshall



Fonte: Autoria própria (2019)

Com o conjunto de ensaios realizados e com todos os resultados encontrados, foi elaborada a Tabela 12 que resume todos os dados encontrados para cada corpo de prova das diferentes concentrações de ligante.

Tabela 12 - Características Marshall

| Características Marshall                   |                            |            |            |                           |              |
|--------------------------------------------|----------------------------|------------|------------|---------------------------|--------------|
| <b>Teor de Asfalto (A)</b>                 |                            | 4,0%       |            | <b>Resultados Obtidos</b> |              |
| <b>Características Marshall</b>            | <b>Especificação D.E.R</b> | <b>CP1</b> | <b>CP2</b> | <b>CP3</b>                | <b>Média</b> |
| Porcentagem de vazios (%)                  | 3 a 5                      | 6,912      | 7,395      | 7,172                     | 7,160        |
| Relação Betume-Vazios (%)                  | 70 a 82                    | 58,902     | 57,128     | 57,935                    | 57,988       |
| Estabilidade (kgf)                         | 850 (50 golpes)            | 979,164    | 892,127    | 957,405                   | 942,899      |
| Fluência (mm)                              | 2,00 a 4,00                | 1,750      | 1,850      | 1,900                     | 1,833        |
| Massa espec. aparente (g/cm <sup>3</sup> ) |                            | 2,505      | 2,492      | 2,498                     | 2,498        |
| Vazios do agregado mineral (%)             | mínimo 15,0                | 16,818     | 17,249     | 17,050                    | 17,039       |
| <b>Teor de Asfalto (B)</b>                 |                            | 4,5%       |            | <b>Resultados Obtidos</b> |              |
| <b>Características Marshall</b>            | <b>Especificação D.E.R</b> | <b>CP1</b> | <b>CP2</b> | <b>CP3</b>                | <b>Média</b> |
| Porcentagem de vazios (%)                  | 3 a 5                      | 5,512      | 5,212      | 5,324                     | 5,349        |
| Relação Betume-Vazios (%)                  | 70 a 82                    | 67,103     | 68,396     | 67,906                    | 67,802       |
| Estabilidade (kgf)                         | 850 (50 golpes)            | 1.087,960  | 1.131,478  | 1.022,682                 | 1.080,707    |
| Fluência (mm)                              | 2,00 a 4,00                | 2,300      | 2,450      | 2,200                     | 2,317        |
| Massa espec. aparente (g/cm <sup>3</sup> ) |                            | 2,520      | 2,528      | 2,525                     | 2,524        |
| Vazios do agregado mineral (%)             | mínimo 15,0                | 16,755     | 16,491     | 16,590                    | 16,612       |
| <b>Teor de Asfalto (C)</b>                 |                            | 5,0%       |            | <b>Resultados Obtidos</b> |              |
| <b>Características Marshall</b>            | <b>Especificação D.E.R</b> | <b>CP1</b> | <b>CP2</b> | <b>CP3</b>                | <b>Média</b> |
| Porcentagem de vazios (%)                  | 3 a 5                      | 3,781      | 4,045      | 3,970                     | 3,932        |
| Relação Betume-Vazios (%)                  | 70 a 82                    | 76,905     | 75,630     | 75,990                    | 76,175       |
| Estabilidade (kgf)                         | 850 (50 golpes)            | 1.153,238  | 1.218,515  | 1.196,756                 | 1.189,503    |
| Fluência (mm)                              | 2,00 a 4,00                | 2,850      | 3,100      | 2,950                     | 3,000        |
| Massa espec. aparente (g/cm <sup>3</sup> ) |                            | 2,545      | 2,538      | 2,540                     | 2,541        |
| Vazios do agregado mineral (%)             | mínimo 15,0                | 16,370     | 16,600     | 16,534                    | 16,501       |
| <b>Teor de Asfalto (D)</b>                 |                            | 5,5%       |            | <b>Resultados Obtidos</b> |              |
| <b>Características Marshall</b>            | <b>Especificação D.E.R</b> | <b>CP1</b> | <b>CP2</b> | <b>CP3</b>                | <b>Média</b> |
| Porcentagem de vazios (%)                  | 3 a 5                      | 3,699      | 3,890      | 4,043                     | 3,877        |
| Relação Betume-Vazios (%)                  | 70 a 82                    | 78,817     | 77,931     | 77,234                    | 77,994       |
| Estabilidade (kgf)                         | 850 (50 golpes)            | 1.109,719  | 1.066,201  | 1.098,840                 | 1.091,587    |
| Fluência (mm)                              | 2,00 a 4,00                | 3,200      | 3,400      | 3,300                     | 3,300        |
| Massa espec. aparente (g/cm <sup>3</sup> ) |                            | 2,525      | 2,520      | 2,516                     | 2,520        |
| Vazios do agregado mineral (%)             | mínimo 15,0                | 17,464     | 17,627     | 17,758                    | 17,616       |
| <b>Teor de Asfalto (E)</b>                 |                            | 6,0%       |            | <b>Resultados Obtidos</b> |              |
| <b>Características Marshall</b>            | <b>Especificação D.E.R</b> | <b>CP1</b> | <b>CP2</b> | <b>CP3</b>                | <b>Média</b> |
| Porcentagem de vazios (%)                  | 3 a 5                      | 3,846      | 3,654      | 4,038                     | 3,846        |
| Relação Betume-Vazios (%)                  | 70 a 82                    | 79,447     | 80,304     | 78,605                    | 79,452       |
| Estabilidade (kgf)                         | 850 (50 golpes)            | 979,164    | 957,405    | 1.022,682                 | 986,417      |
| Fluência (mm)                              | 2,00 a 4,00                | 3,600      | 3,900      | 4,000                     | 3,800        |
| Massa espec. aparente (g/cm <sup>3</sup> ) |                            | 2,500      | 2,505      | 2,495                     | 2,500        |
| Vazios do agregado mineral (%)             | mínimo 15,0                | 18,713     | 18,551     | 18,876                    | 18,713       |

Fonte: Autoria própria (2019)

Resumindo os resultados e exemplificando as médias para cálculo do teor de projeto obtive-se a Tabela 13.

**Tabela 13 - Resumo das médias da caracterização Marshall**

| Resumo das médias dos ensaios |        |        |              |          |       |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------------|----------|-------|--------|
| Teor                          | Vazios | RBV    | Estabilidade | Fluência | Massa | VAM    |
| 4,0                           | 7,160  | 57,988 | 942,899      | 1,833    | 2,498 | 17,039 |
| 4,5                           | 5,349  | 67,802 | 1.080,707    | 2,317    | 2,524 | 16,612 |
| 5,0                           | 3,932  | 76,175 | 1.189,503    | 3,000    | 2,541 | 16,501 |
| 5,5                           | 3,877  | 77,994 | 1.091,587    | 3,300    | 2,520 | 17,616 |
| 6,0                           | 3,846  | 79,452 | 986,417      | 3,800    | 2,500 | 18,713 |

Fonte: Autoria própria (2019)

Com estes dados calculou-se o teor de projeto da mistura asfáltica, tendo por base os parâmetros de volume de vazios (Vv) e a relação entre betume e vazios (RBV), exemplificado na Tabela 14.

**Tabela 14 - Teor de CAP de projeto**

| Cálculo do teor ótimo de betume |       |         |            |
|---------------------------------|-------|---------|------------|
| Valores limites                 |       |         |            |
| Vazios                          | Teor  | RBV     | Teor       |
| 3,0                             | 5,954 | 70,0    | 4,793      |
| 5,0                             | 4,867 | 82,0    | 5,879      |
| Média =                         | 5,411 | Média = | 5,336      |
| Teor médio calculado .....      |       |         | 5,374      |
| <b>Teor adotado .....</b>       |       |         | <b>5,4</b> |

Fonte: Autoria própria (2019)

Tendo o teor de projeto adequado calcula-se os índices referentes a ele, que compõem a Tabela 15.

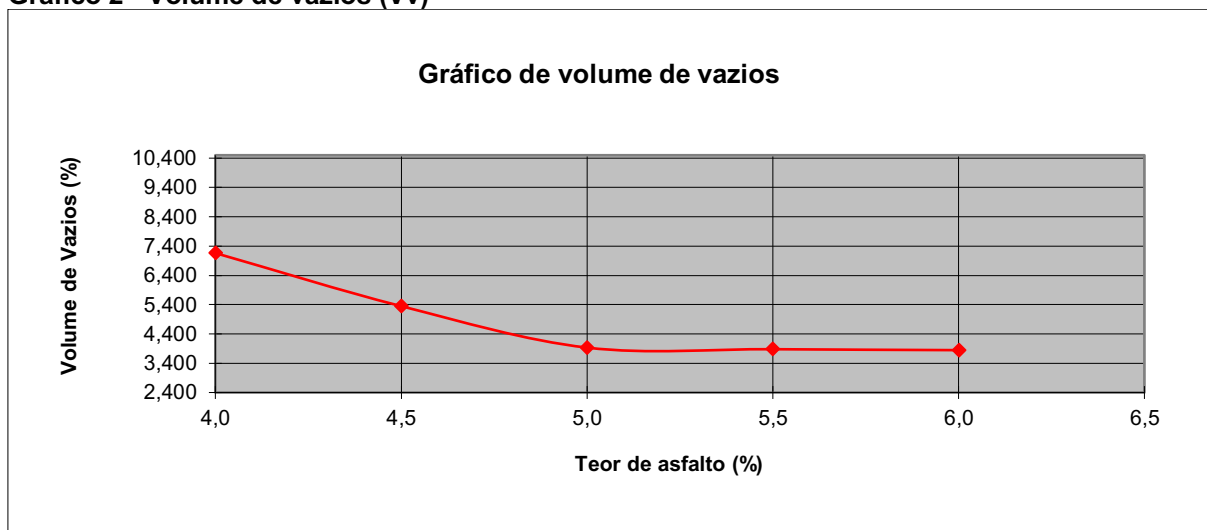
**Tabela 15 - Índices com teor de projeto**

| Cálculo dos índices em função do teor ótimo de betume |        |        |              |          |           |        |
|-------------------------------------------------------|--------|--------|--------------|----------|-----------|--------|
| Teor                                                  | Vazios | RBV    | Estabilidade | Fluência | Densidade | VAM    |
| 5,40                                                  | 3,905  | 77,085 | 1.140,545    | 3,150    | 2,531     | 17,059 |

Fonte: Autoria própria (2019)

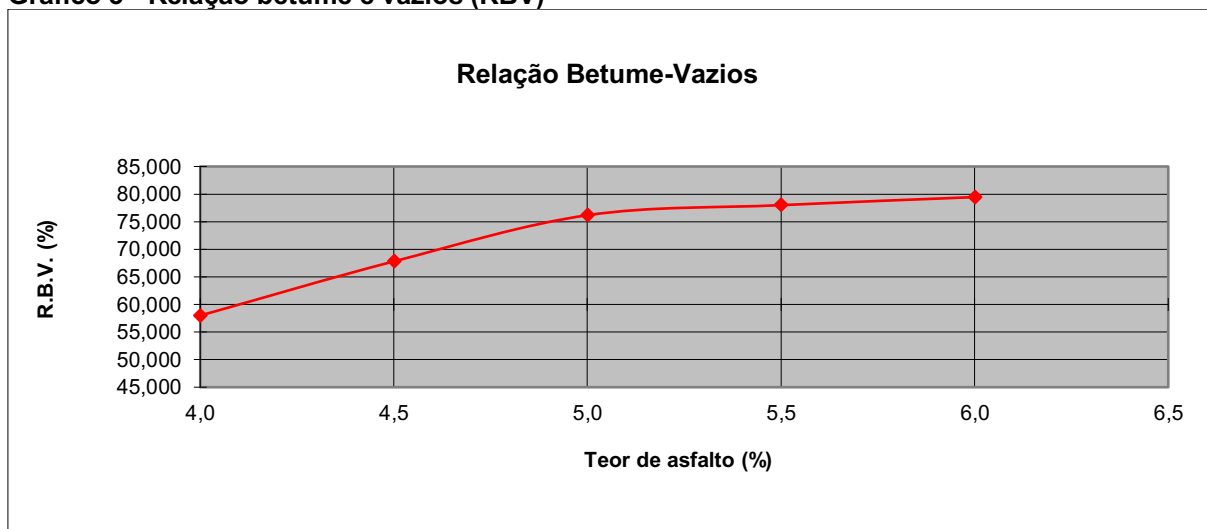
De posse desse conjunto de dados, geramos os gráficos referentes aos parâmetros do Método Marshall, tendo como base as médias dos ensaios da Tabela 13 e o teor de projeto de 5,4. Os resultados estão plotados nos gráficos seguintes:

**Gráfico 2 - Volume de vazios (Vv)**



Fonte: Autoria própria (2019)

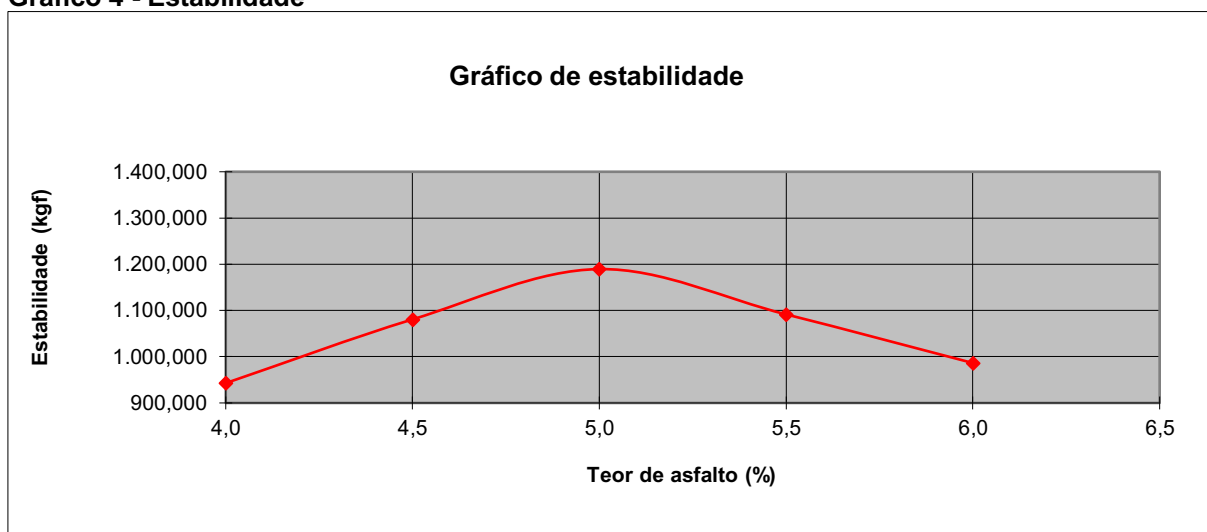
**Gráfico 3 - Relação betume e vazios (RBV)**



Fonte: Autoria própria (2019)

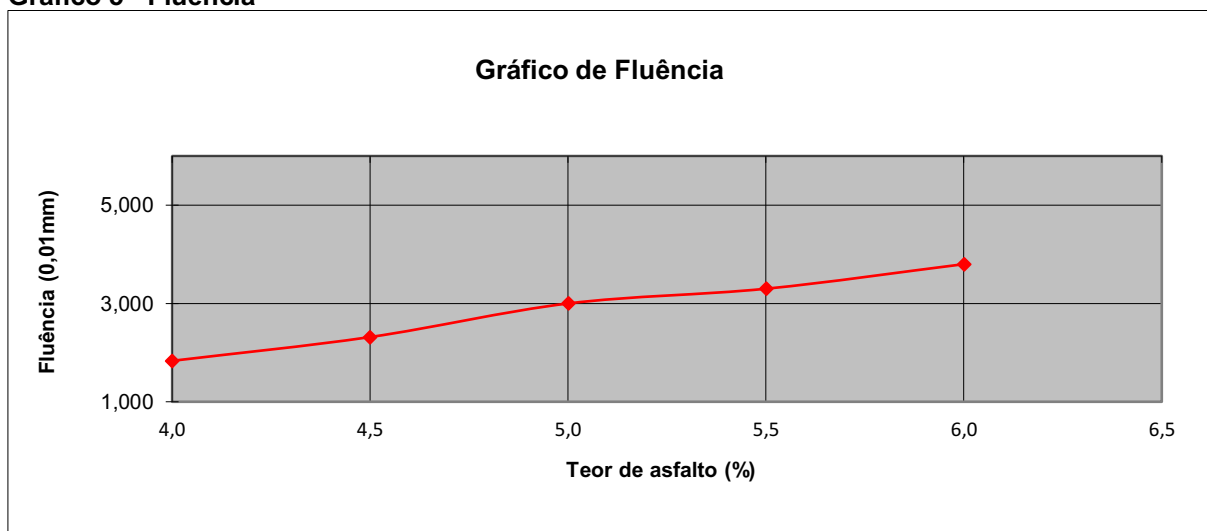


Gráfico 4 - Estabilidade

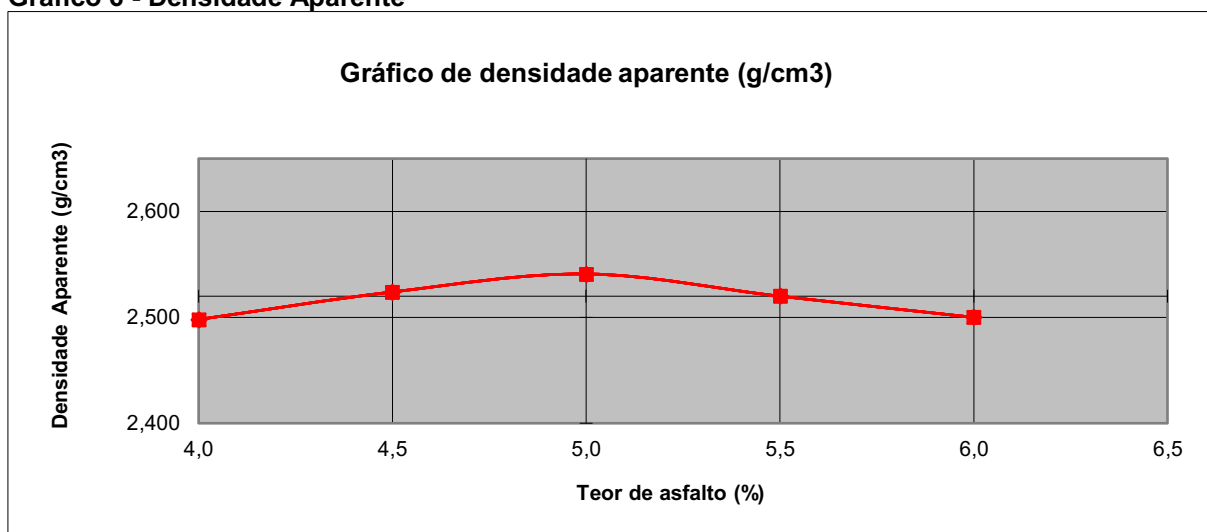


Fonte: Autoria própria (2019)

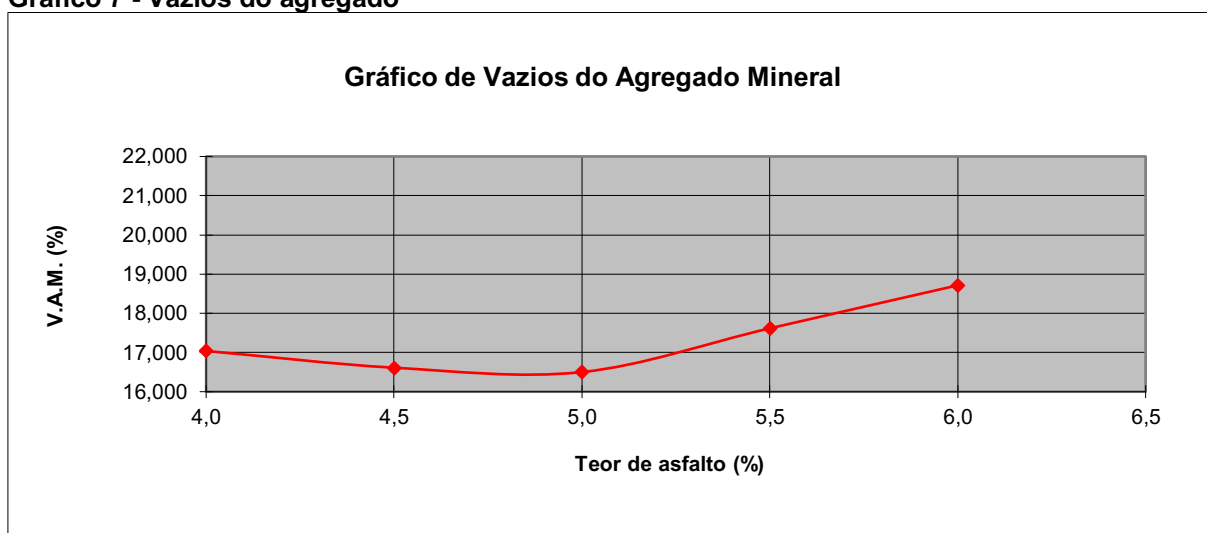
Gráfico 5 - Fluência



Fonte: Autoria própria (2019)

**Gráfico 6 - Densidade Aparente**

Fonte: Autoria própria (2019)

**Gráfico 7 - Vazios do agregado**

Fonte: Autoria própria (2019)

Por fim a Tabela 16 resume os dados da dosagem Marshall.

**Tabela 16 - Resultados finais e especificações DER/PR**

| <b>Resultado final</b>                     |                               |                  |
|--------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| <b>Características Marshall</b>            | <b>Especificação D.E.R/PR</b> | <b>Resultado</b> |
| Porcentagem de Vazios (%)                  | 3,00 a 5,00                   | 3,91             |
| Relação Betume-Vazios (%)                  | 70,00 a 82,00                 | 77,085           |
| Estabilidade (kgf)                         | mínimo = 850                  | 1.140,5          |
| Fluência (mm)                              | 2,00 a 4,00                   | 3,150            |
| Massa Espec. Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | -                             | 2,531            |
| Vazios do Agregado Mineral (%)             | mínimo = 15,00                | 17,06            |
| Relação Filler / Betume (%)                | 0,80 a 1,600                  | 1,29             |
| Equivalente de areia (%)                   | Mínimo = 55,00                | 61,50            |
| Teor de Betume (%)                         | -                             | 5,40             |

**Fonte: Autoria própria (2019)**

## 7 CONCLUSÃO

O presente trabalho compôs um projeto de mistura asfáltica do tipo CBUQ, para aplicação em vias com fluxo leve de veículos, a ser executado com espessura de 2,0 cm. O traço determinado e enquadrado na faixa granulométrica “D” do DER/PR se mostrou pertinente e atende à normativa quanto ao diâmetro máximo dos agregados para a espessura da capa de rolagem definida. A granulometria da mistura e a espessura da capa se mostraram condizentes com a norma vigente, devido ao traço da mistura e ao diâmetro dos agregados constituintes.

O material agregado foi dividido segundo a granulometria e, assim, obtidas as densidades dos miúdos e grãos e a massa específica do material finamente pulverizado, obtendo-se valores condizentes com a aplicabilidade deles para a pavimentação asfáltica seguindo as normativas vigentes. Com o material agregado, analisamos o equivalente de areia da fração miúda – parâmetro fundamental para a qualidade da massa de asfalto. A mistura apresentou, então, um valor acima do mínimo exigido por norma, sendo propícia para a composição do concreto asfáltico.

Todo o agregado apresentou condições favoráveis para execução do projeto, garantido a possibilidade de execução do traço.

Para a dosagem do ligante asfáltico foi utilizado o modelo de Marshall, seguindo todas as recomendações do Método de Ensaio do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Foram aferidos parâmetros indicados pelo método para a obtenção do teor de ligante do projeto, sendo o resultado obtido condizente com a especificação técnica da faixa granulométrica predeterminada. Todos os ensaios realizados com a mistura asfáltica para a determinação do teor tiveram resultados dentro dos parâmetros da metodologia descrita no DNER-ME 043/95, ofertando confiabilidade para a aplicação, da mistura descrita, como capa de rolagem para vias de tráfego leve de veículos.

Todos os dados obtidos no projeto seguiram as normativas que cercam o assunto e se mostraram dentro dos parâmetros determinados, viabilizando a aplicabilidade técnica do projeto em questão.

O presente trabalho cumpriu todos os seus objetivos propostos, se mostrando totalmente viável tecnicamente para ser executado em situações reais onde as condicionantes do trânsito se enquadrem na situação proposta, sendo solução para a capa de rolagem de estruturas de pavimento para vias com tráfego leve.

## REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Disponível em <http://www.anp.gov.br/petroleo-e-derivados2/petroleo>. Acesso: 12 de Outubro de 2019.

AGENCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Resolução ANP n. 19, de 11 de julho de 2005. Disponível em <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2005/julho&item=ramp-19--2005>. Acesso: 12 de Outubro de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. ABEDA. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. Rio de Janeiro, 2010.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007.

BARUFI, B. R. **Viabilidade da aplicação do CBUQ 2 cm ao TST para pavimentação (tráfego leve) de vias urbanas**. Trabalho de conclusão de curso de graduação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2013.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA. p. 504, 2008.

BRASIL. DNIT 031/2006 - ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de Serviço. Norma rodoviária. Rio de Janeiro: 2006.

\_\_\_\_\_. DNIT: Manual de pavimentação. 3.ed. – Rio de Janeiro. 2006.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 085: Material finamente pulverizado – determinação da massa específica. Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 043: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1995.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 084: Agregado miúdo – determinação da densidade real. Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1995.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 054: Equivalente de areia. Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1997.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 081: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1998.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 083: Agregados – análise granulométrica. Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1998.

MAIA, I. G. **Estudo comparativo do ensaio de fratura de disco chanfrado e da fadiga a compressão diametral de misturas asfálticas**. 2011. 136 f. Dissertação

(Mestrado em engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MARTINS, S.S.S.; SILVA, M.P.; AZEVEDO, M.O.; **Produção de petróleo e impactos ambientais: algumas considerações**. Ver. HOLOS, 2015. Disponível em <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/2201>. Acesso: 01 de Novembro de 2019.

PARANÁ. DER/PR ES-P 21: Pavimentação: Concreto asfáltico usinado à quente. Especificação de serviços rodoviários. Curitiba, 2017.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. IP – 02/2004: Classificação das Vias. Disponível em: [https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SMSO%202018/NORMAS%20TECNICAS%20DE%20PAVIMENTACAO/INSTRUC%20AO%20DE%20PROJETOS/ip\\_02\\_2004\\_classificacao\\_das\\_vias.pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SMSO%202018/NORMAS%20TECNICAS%20DE%20PAVIMENTACAO/INSTRUC%20AO%20DE%20PROJETOS/ip_02_2004_classificacao_das_vias.pdf). Acesso: 25 de Novembro de 2019.

RIBAS, C. Y. Avaliação da influência do método de compactação na macroestrutura de misturas asfálticas densas utilizando o processamento digital de imagem. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, 2016.

SENÇO, W. Manual de técnicas de pavimentação. V.1, 2.ed. São Paulo: Pini, 2007.

SOUZA, M. L. Método de projeto de pavimentos flexíveis. 3.ed. Rio de Janeiro, 1981.

VASCONCELOS, K. L. et al. Efeito do procedimento de dosagem no teor de projeto e comportamento mecânico de misturas asfálticas. **Revista transportes**, v.11, p.22-30, dez., 2003.

WOODS, K.B. *Highway engineering handbook*. New York: McGraw Hill, 1960.