

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CLEDSON ITALO IMPERIANO

**ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO E DO DESEMPENHO
MECÂNICO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO
(RAP) EM CAPA ASFÁLTICA**

**ANÁPOLIS / GO
2020**

CLEDSON ITALO IMPERIANO

**ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO E DO DESEMPENHO
MECÂNICO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO
(RAP) EM CAPA ASFÁLTICA**

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

ORIENTADORA: VANESSA HONORATO

**ANÁPOLIS / GO
2020**

FICHA CATALOGRÁFICA

IMPERIANO, CLEDSON ITALO

Análise da caracterização e do desempenho mecânico do pavimento asfáltico recuperado (RAP) em capa asfáltica.

40P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2020).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| 1. Pavimentação | 2. Asfalto recuperado |
| 3. Ensaios de caracterização | 4. Economia e sustentabilidade |
| I. ENC/UNI | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

IMPERIANO, Cledson Italo. Análise da caracterização e do desempenho mecânico do pavimento asfáltico recuperado (RAP) em capa asfáltica. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 2020.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Cledson Italo Imperiano

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Análise da caracterização e do desempenho mecânico do pavimento asfáltico recuperado (RAP) em capa asfáltica.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2020

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.

Cledson Italo Imperiano

E-mail: cledson_43@hotmail.com

CLEDSON ITALO IMPERIANO

**ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO E DO DESEMPENHO
MECÂNICO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO
(RAP) EM CAPA ASFÁLTICA**

**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:

**VANESSA HONORATO, Mestra (UniEvangélica)
(ORIENTADORA)**

**NOME DO MEMBRO DA BANCA, titulação (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**NOME DO MEMBRO DA BANCA, titulação (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: ANÁPOLIS/GO, 20 de maio de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por tanta graça concedida a mim durante todo o processo que passei para chegar até aqui, principalmente nesses últimos meses com esse período difícil de pandemia que o Brasil e o mundo vêm passando. Agradeço aos meus pais por todo apoio e incentivo para nunca desistir de lutar junto comigo por meus sonhos.

Agradeço a Vanessa minha orientadora por toda paciência e apoio nesse trabalho e por todo conhecimento transmitido. Agradeço também a todos que de forma direta ou indireta colaboraram na minha caminhada.

Cledson Italo Imperiano

RESUMO

O presente estudo teve como finalidade a análise dos cálculos do número N, espessura do pavimento e dosagem Marshall comparando também a adição do material fresado na mistura do Concreto Usinado a Quente (CBUQ). O material fresado é obtido através da fresagem que é uma técnica constantemente utilizada para processo de manutenção e restauração de rodovias, pois possibilita intervenções apenas nos locais onde necessitam de restaurações, podendo solucionar problemas como: elevação, rebaixamento ou manutenção no greide original da pista; inclinação da pista com relação aos dispositivos de drenagem superficial; propagação de trincas, entre outros. Geralmente o material resultante da fresagem é descartado, se tornando um dos maiores poluentes na manutenção das vias, por conter o cimento asfáltico de petróleo. Como objetivo específico foi calculado primeiramente o fluxo de tráfego na Avenida Pedro Ludovico, número N, a espessura do pavimento asfáltico, dosagem Marshall para saber com o melhor teor ótimo de betume pra usar no traço ideal e por fim uma análise da adição de algumas porcentagens de material fresado no traço do CBUQ. Esses cálculos foram realizados todos manualmente e com alguns parâmetros de dados usado do trabalho Brito (2019) para que pudesse achar a resposta satisfatória do trabalho. A metodologia utilizada neste trabalho foram através de análises teóricas e experimentais, estudo de caso e cálculo da dosagem da mistura asfáltica pelo método Marshall, ensaio mais utilizado no Brasil. Como resultado obteve-se que o teor ótimo de betume ficou em 5,4% e a substituição de até 15% de material fresado na composição do CBUQ apresenta resultados dentro dos parâmetros especificados por norma, podendo ser utilizado na pavimentação diminuindo o custo e o impacto causado por esse material no meio ambiente.

PALAVRA CHAVE

Pavimentação Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Material Fresado.
Ensaio DNIT. Número N. Dosagem Marshall

ABSTRACT

The present study aimed to analyze the calculations of the number N, pavement thickness and Marshall dosage, also comparing the addition of the milled material in the mixture of the Hot Machined Concrete (CBUQ). The milled material is obtained through milling which is a technique constantly used for the process of maintenance and restoration of highways, as it allows interventions only in places where they need restorations, being able to solve problems such as: elevation, lowering or maintenance on the original runway grade; slope of the runway with respect to surface drainage devices; crack propagation, among others. Generally, the material resulting from milling is discarded, becoming one of the biggest pollutants in road maintenance, as it contains petroleum asphalt cement. As a specific objective, the traffic flow on Avenida Pedro Ludovico, number N, the thickness of the asphalt pavement, Marshall dosage was calculated first to find the best optimum bitumen content to use in the ideal mix and finally an analysis of the addition of some percentages of milled material in the CBUQ line. These calculations were all performed manually and with some data parameters used from the work Brito (2019) so that you could find the satisfactory answer of the work. The methodology used in this work was through theoretical and experimental analysis, case study and calculation of the dosage of the asphalt mixture by the Marshall method, the most used test in Brazil. As a result it was obtained that the optimum bitumen content was 5.4% and the replacement of up to 15% of milled material in the composition of the CBUQ presents results within the parameters specified by the standard, which can be used in paving reducing the cost and the impact of this material on the environment.

KEY WORD

Hot-machined Bituminous Concrete Paving (CBUQ). Milled Material. DNIT tests. Number N. Marshall dosage

FIGURAS

Figura 1: Distribuição de cargas no Pavimento Flexível.....	19
Figura 2: Estrutura do Pavimento Flexível.....	20
Figura 3: Distribuição de carga no Pavimento Flexível.....	21
Figura 4: Usina estacionaria de CBUQ.....	22
Figura 5: CBUQ.....	23
Figura 6: CBUQ.....	23
Figura 7: Diferenças entre cimentos asfálticos.....	24
Figura 8: Aplicação do CM-30, imprimação.....	25
Figura 9: Aplicação da Pintura de ligação.....	26
Figura 10: Distribuição do Asfalto CBUQ.....	26
Figura 11: Compactação CBUQ.....	27
Figura 12: Fresagem de asfalto.....	28
Figura 13: Fresagem Padrão.....	29
Figura 14: Fresagem fina.....	30
Figura 15: Microfresagem.....	30
Figura 16: Produção de mistura reciclada a frio in situ com emulsão betuminosa.....	33
Figura 17: Esquema da reciclagem a frio em central com betume-espuma.....	34
Figura 18: Todos os processos da reciclagem a frio.....	35
Figura 19: Execução de reciclagem a frio realizada pela Brow Brow na BR-116.....	35
Figura 20: Eixo Padrão Rodoviário (Tandem).....	38
Figura 21: Eixo Simples.....	40
Figura 22: Eixo Roda Dupla (tandem).....	40
Figura 23: Eixo Tandem Duplo.....	41
Figura 24: Eixo Tandem Triplo.....	41
Figura 25: Eixo não Tandem.....	42
Figura 26: Eixo Duplo Especial.....	42
Figura 27: Classificação do Veículo quanto ao Eixo.....	43
Figura 28: Fluxograma de Cálculos.....	55
Figura 29: Trecho de Estudo - Avenida Pedro Ludovico.....	56
Figura 30: Início do Trecho de Estudos.....	57
Figura 31: Término do Trecho de Estudos.....	57
Figura 32: Trecho com buracos e trincas.....	58

Figura 33: Trecho com buracos e fissuras.	59
Figura 34: Espessura do Pavimento.....	63
Figura 35: Espessura das camadas do pavimento.....	65
Figura 36: Faixa C DNIT.....	71

TABELAS

Tabela 1: Principais técnicas de reciclagem.	32
Tabela 2: Tipo de Eixo com Discriminação de Eixo	44
Tabela 3: Fator Regional pela quantidade de Chuva	46
Tabela 4: Fator de equivalência para o tipo de Eixo.....	47
Tabela 5: Carga por Eixo pela lei da Balança.....	48
Tabela 6: Carga máxima - com limites de Tolerância.	48
Tabela 7: Especificações granulométricas	54
Tabela 8: Pesquisa Quantidade de Veículos por tipo de Eixo	60
Tabela 9: Cálculo do FV total.....	62
Tabela 10: Espessura mínima do Revestimento com base no número N	63
Tabela 11: Coeficiente de Equivalência Estrutural.....	64
Tabela 12: Peso dos corpos de prova	67
Tabela 13: Volume da mistura.....	68
Tabela 14: Densidade Aparente	68
Tabela 15: Volume de Vazios com Base na Faixa C do DNIT	69
Tabela 16: Vazios com Betume	69
Tabela 17: Vazios Agregado Mineral	69
Tabela 18: Relação Betume Vazios de acordo com a faixa C do DNIT.....	70
Tabela 19: Parâmetros dos corpos de provas ideias com base na faixa C do DNIT.....	70
Tabela 20: Valores para cálculo do teor ótimo de betume.....	71
Tabela 21: Teor ótimo de Projeto	73
Tabela 22: Resultado Traço Final	74

GRÁFICOS

Gráfico 1: Pesquisa de veículos por tipo de eixo	61
Gráfico 2: Relação Vv x RCB	72
Gráfico 3: Relação Vv x RCB - De acordo Faixa C	72

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
KGF	Quilograma-força
ME	Método de ensaio
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
RAP	Resíduos Asfálticos de Pavimentação
RBV	Relação Betume/Vazios
VAM	Vazios do agregado mineral
CP	Corpo de prova
MS	Massa seca
MSsub	Massa submersa em água
GMB	Massa específica aparente
DMT	Massa específica teórica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	17
1.3 METODOLOGIA	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2. PAVIMENTOS ASFÁLTICO	19
2.1 ESTRUTURA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	20
2.2 TIPOS DE PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	21
2.2.1 Concreto Betuminoso Usinado Quente (CBUQ)	21
2.2.1.1 Definição.....	21
2.2.1.2 Mistura	23
2.2.1.3 Processo Executivo	25
2.2.2 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).....	27
2.2.2.1 Definição.....	27
2.2.2.2 Tipos de Fresagem	29
2.2.2.3 Mistura/Reciclagem	31
2.2.2.4 Tipos de Reciclagem.....	31
2.2.2.5 Processo Executivo	34
2.3 CUSTO/OBRAS	36
3. CONTROLE TECNOLÓGICO	38
3.1 CÁLCULO DO NÚMERO “N” – PAVIMENTAÇÃO	38
3.1.1 Tipos de Eixos.....	39
3.1.2 Fator de Veículos (FV)	45
3.1.3 Fator Climático Regional (FR)	46
3.1.4 Fator de Equivalência.....	46
3.1.5 Fator de Carga.....	47
3.2 DOSAGEM MARSHALL.....	49
3.2.1 Volume da Mistura.....	50
3.2.2 Massa Específica Aparente	50
3.2.3 Massas Específicas Máximas Teóricas	51
3.2.4 Volume de Vazios.....	52
3.2.5 Vazios com Betume	52
3.2.6 Porcentagem de Vazios do Agregado Mineral (VAM).....	53

3.2.7	Relação Betume Vazios (RVB)	53
4.	ESTUDO DE CASO	55
4.1	ORIGEM DE ESTUDO	56
4.2	PROCEDIMENTO PRÁTICO	60
4.2.1	Cálculo do Número “N” – Pavimentação	60
4.2.2	Dimensionamento das Camadas do Pavimento	62
4.2.3	Dosagem Marshall	66
4.2.4	Traço Final	74
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	77

1. INTRODUÇÃO

O homem, a fim de obter melhor acesso às áreas cultiváveis e às fontes de madeira, rochas, minerais e água, somado ao desejo de expandir seu território de influência, criou o que se denomina de estradas, cuja lembrança mais remota provém da China (BALBO, 2007).

O Brasil possui a quinta maior área territorial com aproximadamente 8.515.767Km², levando em consideração as terras contínuas, possui a quarta maior extensão entre todos os países do mundo (IBGE, 2012). Com o intuito de promover um melhor deslocamento de cargas e pessoas houve a necessidade de construir uma ampla rede articulada de malha viária. Surge então, o rodoviarismo, que é uma política de Estado, originada com o ex-presidente Washington Luís.

Enquanto governador de São Paulo, W.L. em 1920, pronunciou “Governar é povoar; mas, não se povoa sem se abrir estradas, e de todas as espécies; governar é, pois, fazer estradas!”. Ao assumir a presidência, inaugurou, em 1928, a Rodovia Rio-Petrópolis a primeira rodovia asfaltada do Brasil. Contudo, foi durante a presidência de Juscelino Kubitschek, ao final da década de 1950, que o rodoviarismo foi implementado de maneira contundente, visando o caráter político-econômico. Ao ampliar a malha rodoviária empresas internacionais do ramo automobilístico seriam atraídas. De acordo com a Teoria dos Polos Econômicos, (1950) a participação dessa indústria permite efeitos de escala ou de arraste, por atrair empresas correlatas ao ramo central, no caso: empresas de autopeças, componentes elétricos, lubrificantes, entre outros.

O modal rodoviário corresponde a 60% do transporte de carga no Brasil, (CNT,2018). O Brasil detém aproximadamente um 1,5 milhões de quilômetros de rodovias não pavimentadas, contra cerca de 200 mil quilômetros de rodovias pavimentadas, apenas 13,34% pavimentadas. Somado a isso, mais de 70% das rodovias pavimentadas tem idade superior a 40 anos. (DNIT, 2017). Sabe-se que, as rodovias pavimentadas, são projetadas pra uma vida útil entre 8 e 12 anos. O que indica que além de ter ultrapassado o tempo de serviço em projeto, durante esse tempo ainda houve um aumento exponencial no volume de tráfego. Em virtude do impacto do modal rodoviário na economia brasileira, o governo federal liberou, em 2019, 2 bilhões de reais para o Ministério da Infraestrutura concluir obras importantes e dar manutenção em rodovias essenciais. (EXAME, 2019)

Visando a renovação das rodovias uma possível solução sustentável e de baixo custo seria a utilização do *Reclaimed Asphalt Pavement* - (RAP), que basicamente são resíduos de asfalto fresado, utilizado como agregado graúdo na mistura asfáltica.

Segundo publicação da Federal *Highway Administration - FHWA* (1996), a reutilização ou reciclagem da estrutura de um pavimento deteriorado não é nada novo. As primeiras formas de reciclagem de pavimentos foram datadas em meados de 1915 nos Estados Unidos. No entanto, a reciclagem de pavimentos asfálticos em sua forma atual ocorreu pela primeira vez em meados dos anos 1970, quando o interesse na reciclagem foi provocado pela inflação dos preços de construção e pelo embargo do petróleo pela *Organization of the Petroleum Exporting Countries – OPEC*.

Em resposta a essas pressões econômicas, a FHWA iniciou o Projeto de Demonstração 39 – Reciclagem de Pavimentos Asfálticos (*Demonstration Project 39 – Asphalt Recycling Pavements*), em junho de 1976. O DP 39, como foi chamado, mostrava que a reciclagem de pavimentos asfálticos era uma técnica de reabilitação tecnicamente viável, e estimava que o uso do *Recycled/Reclaimed Asphalt Pavement – RAP* (como é chamado o material fresado internacionalmente) equivaleria a aproximadamente 15% da produção total de misturas asfálticas à quente, nos anos 1980. Com isso, esperava-se que a maior parte dos materiais asfálticos removidos seriam reutilizados na construção de novos pavimentos.

De acordo com Brosseau (2011), atualmente os materiais mais reciclados nos Estados Unidos são as misturas asfálticas, com mais de 80 milhões toneladas por ano. Isso representa aproximadamente duas vezes mais que os quatro resíduos notadamente mais reciclados, que são papéis, vidros, plásticos e alumínio, onde juntos somam 40 milhões de toneladas recicladas por ano.

Na Alemanha e na Holanda, os princípios de reciclagem são considerados como um modo de vida a 20 anos, diferentemente dos países do sul da Europa (Itália, Espanha, Grécia etc.), que são muito menos preocupados com estas questões Brosseau (2011) cita ainda o caso da França especificamente, onde pesquisas realizadas em 2007 e 2010 mostraram que houve um aumento significativo da proporção de misturas asfálticas antigas recuperadas e recicladas que foram empregadas em novas misturas a quente, passando de 23 para 42% em apenas três anos. Isso reflete a vontade de todos os envolvidos no âmbito rodoviário que se engajaram voluntariamente na reciclagem.

1.1 JUSTIFICATIVA

As vantagens econômicas e ambientais da utilização do material RAP são a redução dos custos de britagem; a reciclagem de 100% do material fresado; a correção e o controle

granulométrico; a usinagem de agregados reciclados com emulsão ou espuma de asfalto; a possibilidade de estocagem para aplicação posterior; a adição de diversos tipos de aditivos, proporcionando misturas com diferentes características; o processo é ecológico e limpo, reduzindo a exploração de jazidas e aumentando a vida útil de aterros de inertes e não emitindo gases tóxicos na atmosfera; oferece oportunidades de reduzir custos tanto na execução como na conservação do pavimento. (ROADEXPERTS, 2018)

Apesar de todas essas vantagens, a utilização do RAP em projetos de pavimentação ainda é pouco comum no Brasil e demais países da América Latina. Isso se deve à ausência de exigências legais e também à abundância de recursos naturais. Em outros países, cujas jazidas são escassas, essa é uma solução bastante sustentável do ponto de vista ambiental e econômico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

A pesquisa teve como objetivo geral apresentar uma caracterização do resíduo produzido pela fresagem do concreto asfáltico (RAP), através de cálculos do número N, da dosagem ideal e propor o melhor traço para o uso em capa asfáltico, conseguindo assim uma economia na pavimentação e evitando o descarte do RAP em “botas-foras” nas beiras de rodovias.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, tem-se como objetivos específicos:

- Calcular o número N através de uma pesquisa realiza *in loco*
- Calcular a espessura ideal do revestimento asfáltico (DNIT,2006)
- Calcular a dosagem Marshall para saber qual o traço ideal para usar com o material fresado de (15%, 20% e 30%);
- Realizar a análise dos resultados.

1.3 METODOLOGIA

O método de pesquisa utilizado foi o quantitativo, que tem como principal objetivo traduzir opiniões informações em números utilizados para a sua classificação e posterior análise e calculos. Os dados foram obtidos com levantamento teórico e a análise feita com estudo de caso realizado In loco. A metodologia será baseada em uma pesquisa laboral.

Os principais cálculos que serão feitos para composição do CBUQ com o material fresado estão descritos abaixo:

- Número N
- Cálculo da espessura do pavimento
- Dosagem Marshall

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho abrange cinco capítulos distintos:

- O primeiro capítulo é composto pela introdução ao tipo de pavimentação mais utilizado no Brasil;
- O segundo é formado por um estudo dos pavimentos existentes e sua trajetória, com foco no Concreto Betuminoso Usinado à Quente e as suas interferências com o meio ambiente;
- O terceiro capítulo aborda as normas e ensaios que devem ser feitos no cálculo do número N e da dosagem do CBUQ;
- O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos com os ensaios, seguindo as especificações das normas do DNIT;
- No quinto capítulo estão descritas as considerações finais e sugestões para futuros trabalhos.

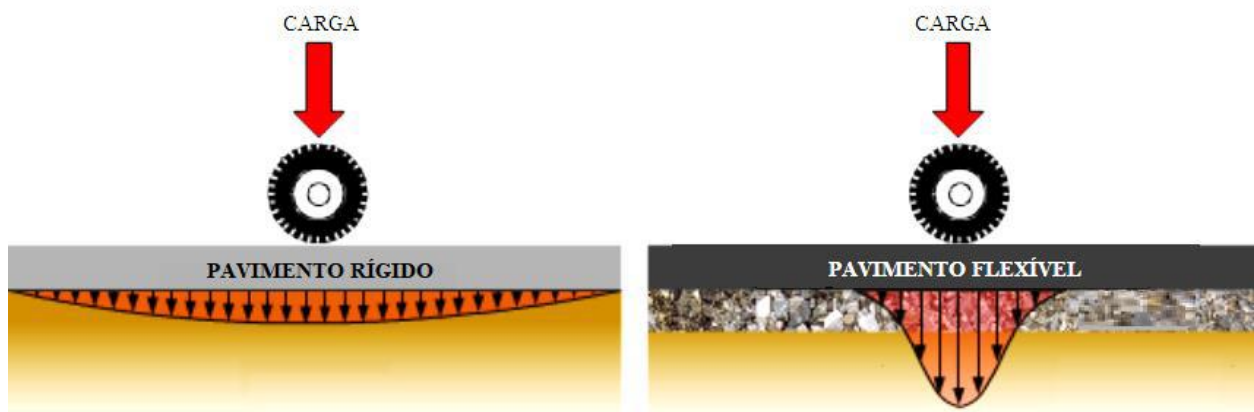
2. PAVIMENTOS ASFÁLTICO

O pavimento é uma estrutura composta por várias camadas sobre a superfície final da terraplanagem, cuja função é resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, garantindo aos usuários melhores condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Pois bem, dentre os tipos de pavimento existentes, são eles:

Rígidos, semirrígidos e flexíveis, (Figura 1). O pavimento asfáltico é caracterizado como pavimento flexível.

Esse tipo de pavimento se diferencia dos demais por apresentar deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado em todas as camadas e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente iguais entre elas.

Figura 1: Distribuição de cargas no Pavimento Flexível.



Fonte: Revista núcleo do conhecimento (2016)

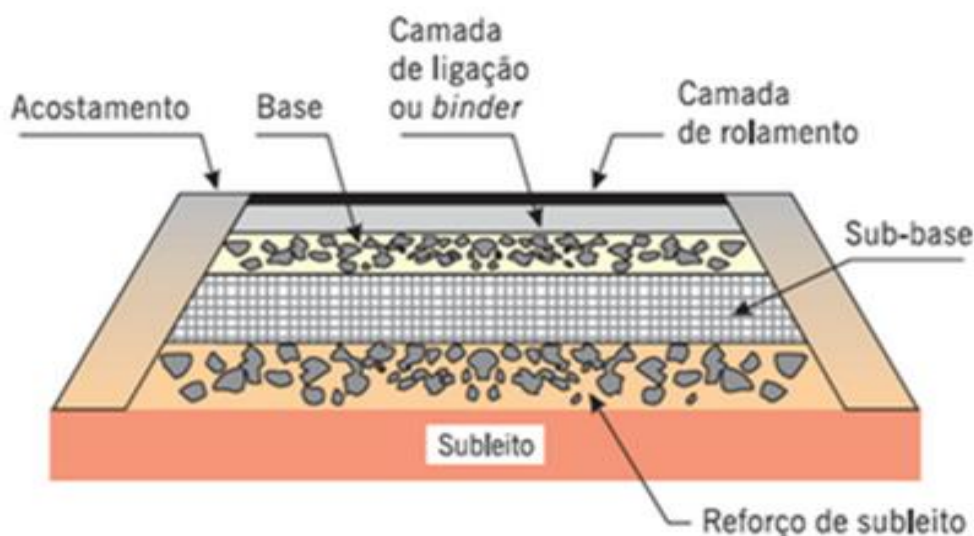
Dessa forma, o pavimento asfáltico é um tipo de pavimento flexível em que a camada de revestimento é composta por uma mistura constituída de agregados e ligantes asfálticos betuminosos. Esses ligantes são os principais responsáveis pelas características do asfalto e são oriundos da destilação do petróleo e têm a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. (Revista núcleo do conhecimento, 2018).

2.1 ESTRUTURA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL

De acordo com Balbo (2007) pavimentar uma via propicia o aumento operacional para o tráfego de veículos, através da implantação de uma superfície mais regular e mais aderente, proporcionando aos usuários maior conforto no deslocamento e mais segurança em condições de pista úmida ou molhada.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006), o pavimento de uma rodovia consiste de uma superestrutura formada por um sistema de camadas de espessura finita, construída após a terraplenagem, destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos, a melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança, e a resistir aos esforços horizontais, tornando mais durável a superfície de rolamento. Essas camadas são divididas em revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito.

Figura 2: Estrutura do Pavimento Flexível.



Fonte: Revista núcleo do conhecimento (2018)

O glossário de termos técnicos rodoviários (DNER, 2017) as define como:

- Subleito: maciço de terra que serve de fundação para o pavimento ou revestimento;
- Reforço de subleito: camada granular do pavimento executada com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte de carga do subleito e de reduzir espessura da sub-base;

- Sub-base: camada corretiva do subleito e complementar à base, com as mesmas funções desta, e executada quando, por razões de ordem econômica, for conveniente reduzir a espessura de base;
- Base: camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os ao subleito, e sobre a qual se constrói o revestimento;
- Revestimento: camada mais acima do pavimento, que recebe diretamente as ações verticais e horizontais dos veículos, e destinada a melhorar as condições do rolamento quanto ao conforto e segurança.

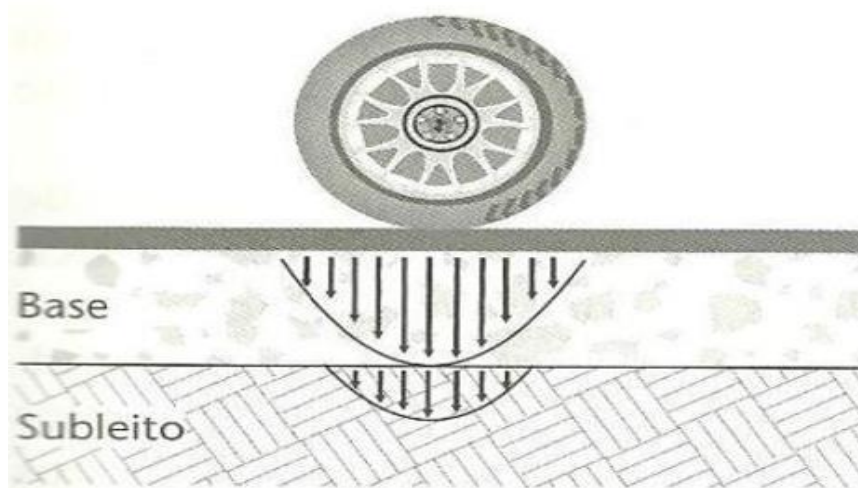
2.2 TIPOS DE PAVIMENTO FLEXIVEL

2.2.1 Concreto Betuminoso Usinado Quente (CBUQ)

2.2.1.1 Definição

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os pavimentos flexíveis são aqueles compostos por uma camada superficial asfáltica – revestimento, apoiadas em camadas de base, sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes, e que sob carregamento sofre deformação elástica em todas as camadas, ou seja, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes e com pressões concentradas (Figura 3).

Figura 3: Distribuição de carga no Pavimento Flexível.

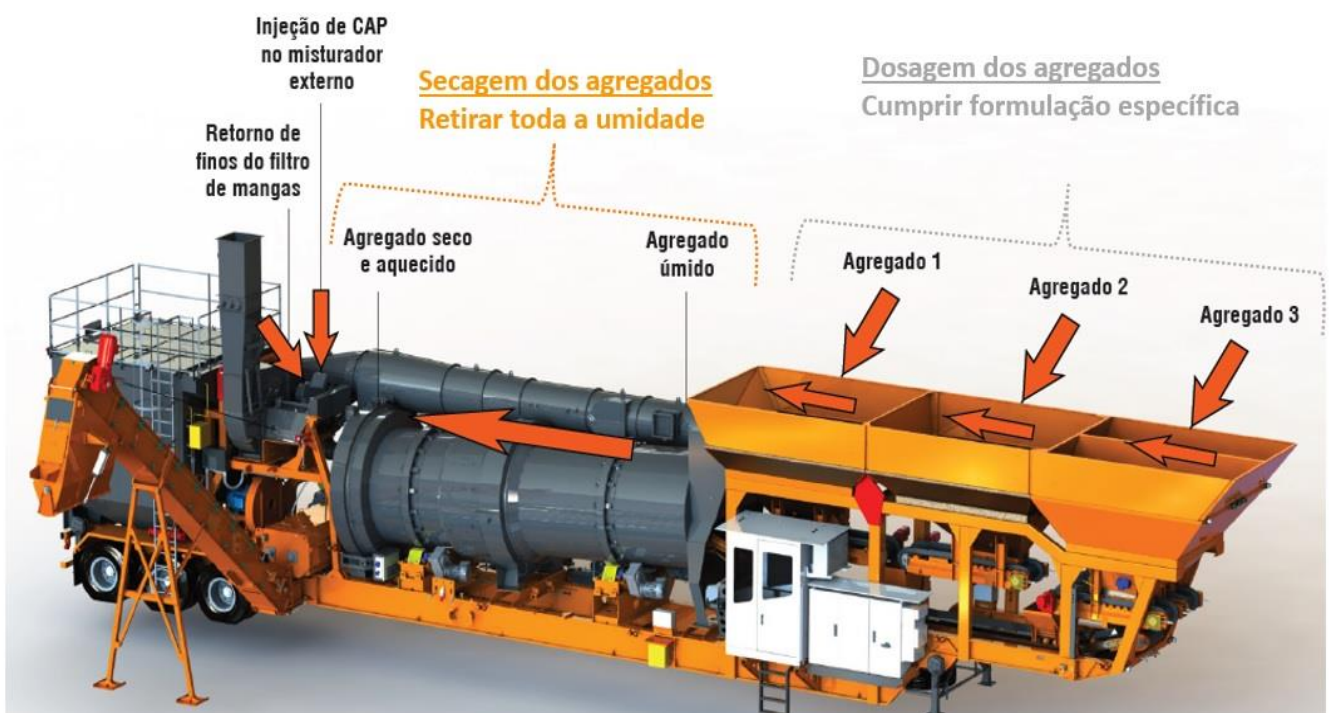


Fonte : Revista núcleo do conhecimento (2018)

Com relação aos materiais utilizados nos pavimentos flexíveis, os agregados correspondem entre 90% e 95% do revestimento, sendo responsável por suportar e transmitir as cargas aplicadas pelos veículos e resistir ao desgaste sofrido pelas solicitações. Já o material betuminoso – asfalto, corresponde entre 5% e 10% do revestimento, tendo função aglutinante e ação impermeabilizante (BERNUCCI et al., 2008).

Dentre os tipos de revestimento dos pavimentos flexíveis, existem as misturas usinadas. Para Bernucci et al. (2008), essa mistura de agregados e ligante é feita em uma usina estacionária, e posteriormente transportada para o local de utilização.

Figura 4: Usina estacionaria de CBUQ.



Fonte: CIBER (2018)

Ainda segundo Bernucci et al. (2010), um dos tipos mais utilizados no Brasil é o concreto asfáltico usinado a quente – CBUQ (Figura 5).

Figura 5: CBUQ.



Fonte: Engep (2016)

Distribuição do CBUQ, concreto usinado a quente no trecho escolhido para aplicação da mistura.

Figura 6: CBUQ.



Fonte: Engep (2016)

2.2.1.2 Mistura

O CBUQ pode ser empregado como revestimento, camada de ligação ou *binder*, regularização ou reforço do pavimento. O concreto betuminoso somente deve ser fabricado, transportado e aplicado quando a temperatura ambiente for superior a 10°C, e sua execução não é permitida em dias de chuva (DNIT, 2006).

Na Especificação de Serviço do Concreto Asfáltico – Norma 031/2006 (DNIT,2006), os materiais constituintes são o agregado miúdo, o agregado graúdo, o ligante asfáltico e o *filer*

(material de enchimento). A composição deste concreto asfáltico deve satisfazer a algumas tolerâncias em relação à granulometria e a percentuais dos ligantes asfálticos determinados no projeto de mistura.

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% (DNER-ME 054).

Já o agregado graúdo deve ter desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50% (DNER-ME 035); admitindo-se excepcionalmente agregados com valores maiores, no caso de terem apresentado comprovadamente desempenho satisfatório em utilização anterior.

O CAP é classificado com base em suas propriedades de consistência e viscosidade. A Consistência do CAP é medida em décimos de milímetro com o ensaio de penetração de uma agulha à 25°C padronizada sob diversas condições. Quanto menor o valor mais consistente é o CAP. Dessa forma, no Brasil são fabricados 4 tipos de CAP os quais são:

CAP 30/45 – (Rígido), CAP 50/70 – (Médio), CAP 85/100 – (Médio) e CAP 150/200 – (Mole). Para pavimentação o CAP 50/70 é o mais utilizado. Isso ocorre pois ele não é rígido demais como o 30/45 e nem fluido demais como o 150/200. (BALBO, 2007).

Figura 7: Diferenças entre cimentos asfálticos.

CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO
Resolução nº 19 de 11 de junho de 2005 da ANP - Regulamento Técnico ANP nº 03/2005

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25, oC)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de Amolecimento	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol	s					NBR 14950	E 102
a 135°C		192	141	110	80		
a 150°C		90	50	43	36		
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402
a 135°C, SP 21, 20rpm min		374	274	214	155		
a 150oC, SP 21, min		203	112	97	81		
a 177oC, SP 21 min		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Susceptibilidade Térmica		(-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
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25 oC, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT) A 163 °C, 85 MIN							
Variação em massa, máx	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Ductilidade a 25°C	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
penetração retida (*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

* relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração antes do ensaio.

Fonte: Brasquímica (2005)

O material de enchimento, *filer*, 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, de acordo com a Norma (DNER-EM 367).

2.2.1.3 Processo Executivo

O processo executivo do CBUQ é dividido em várias etapas, e de acordo com a Especificação de Serviço do Concreto Asfáltico – 031/2006 (DNIT, 2006), sendo elas:

- **Imprimação:** o ligante betuminoso, geralmente é asfalto diluído, CM-30 ou CM-70, sendo aplicado por um caminhão com bomba reguladora de pressão e sistema de aquecimento, logo após o perfeito adensamento da base e a varredura da superfície com vassoura mecânica. O ligante deve ser absorvido pela base em 72 horas, tendo como objetivo a impermeabilização do solo através da penetração do material betuminoso. A taxa de aplicação é definida em laboratório, variando entre 0,8 l/m² a 1,6 l/m².

Figura 8: Aplicação do CM-30, imprimação.



Fonte: Revista MT (2013)

- **Pintura de ligação:** após sete dias entre a execução da imprimação e a do revestimento, a pintura de ligação deve ser feita. O material betuminoso utilizado tem uma taxa

recomendada pelo DNIT de 0,3 l/m² a 0,4 l/m², e as mais usadas são: RR-1C e RR-2C. O objetivo da sua aplicação é promover melhor condição de aderência entre a superfície da base e o CBUQ.

Figura 9: Aplicação da Pintura de ligação.



Fonte: Revista MT (2013)

- Distribuição do CBUQ: o CBUQ deve ser distribuído sobre a superfície já imprimada e pintada, com auxílio de caminhões basculantes adequados e vibro acabadoras. Os materiais utilizados não devem exceder a temperatura de 177°C.

Figura 10: Distribuição do Asfalto CBUQ.



Fonte: Terrena Asfaltos (2017)

- Compactação do CAUQ: ao término da distribuição, a compactação deve ser iniciada pelos bordos, longitudinalmente, continuando em direção ao eixo da pista. Porém, em

superelevação deve-se começar a compactação sempre pelo lado mais baixo para o ponto mais alto da curva. Esse processo é feito com o rolo pneumático e rolo metálico liso. Com o fim da compactação o tráfego só é aberto após o completo resfriamento.

Figura 11: Compactação CBUQ.



Fonte: Revista MT (2013)

2.2.2 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

2.2.2.1 Definição

O *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), mais conhecido no Brasil como asfalto fresado, é o material proveniente do processo de fresagem de pavimentos asfálticos. A fresagem consiste na retirada de parte (ou partes) de um pavimento asfáltico, por meio de máquinas chamadas “fresadoras”, que possuem tambores de trituração.

A reciclagem do pavimento asfáltico consiste na utilização do material presente em asfaltos danificados para que as estradas sejam reabilitadas. Esse é utilizado para execução de pavimentos possam ser feitas sem a necessidade de extrair e consumir mais matérias-primas.

A grande vantagem da reciclagem do pavimento asfáltico é que todo o material danificado pode ser completamente aproveitado, e o novo pavimento ainda pode receber um reforço extra durante a reciclagem, já que muitas vezes é realizada a aplicação de alguns materiais que funcionam como agentes estabilizadores — em geral, cimento, cal ou espuma de asfalto.

Figura 12: Fresagem de asfalto.



Fonte: Terrena Asfaltos (2017)

A reciclagem do pavimento asfáltico pode representar uma grande ajuda para a preservação do meio ambiente. Isso porque, ao utilizar o material danificado para a realização de uma nova pavimentação, evita-se que o material seja descartado inadequadamente em lixões ou em vias públicas, onde poderia contaminar o meio ambiente com a química de petróleo contida no material da pavimentação.

Além disso, evita-se a utilização de materiais para a produção de novas massas asfálticas, especialmente os metais pesados presentes no petróleo. Desta maneira, a reciclagem contribui também para evitar a retirada de materiais da natureza, configurando mais uma excelente ajuda para a preservação do meio ambiente.

Outro ponto positivo da reciclagem de pavimento asfáltico está na economia que este método pode representar para os cofres públicos, pois o reaproveitamento dos materiais implica em menos processos de extração e produção, além de exigir mão de obra menor para sua aplicação. Com isso, a reciclagem pode ser até 90% mais barata do que a pavimentação tradicional.

2.2.2.2 Tipos de Fresagem

Segundo David (2009):

A reciclagem de pavimentos consiste na reutilização, após processamento, dos materiais existentes no pavimento deteriorado. Nesta técnica, toda ou parte da estrutura do pavimento existente é reaproveitada para a construção de uma camada, incorporando ou não novos materiais (JOSÉ TADEU, 2007).

Como já evidenciado neste texto, há algumas maneiras de se executar fresagem. Em função do tamanho dos “dentes” da fresa (também chamados “*bits*”) e seu espaçamento, pode-se conseguir maior ou menor profundidade de fresagem, que pode variar de apenas alguns milímetros até algumas dezenas e centímetros. Abaixo se detalham os três usuais tipos de fresagem, bem como os tambores que lhe estão associados.

- Fresagem padrão: a fresagem padrão é empregada em situações em que se deseja retirar grande parte do pavimento, normalmente da ordem de 10 a 30 centímetros. O tambor para essa aplicação costuma ter um espaçamento entre bits de 15 mm. Para tambor convencional de 2 metros, o número de *bits* é de 162.

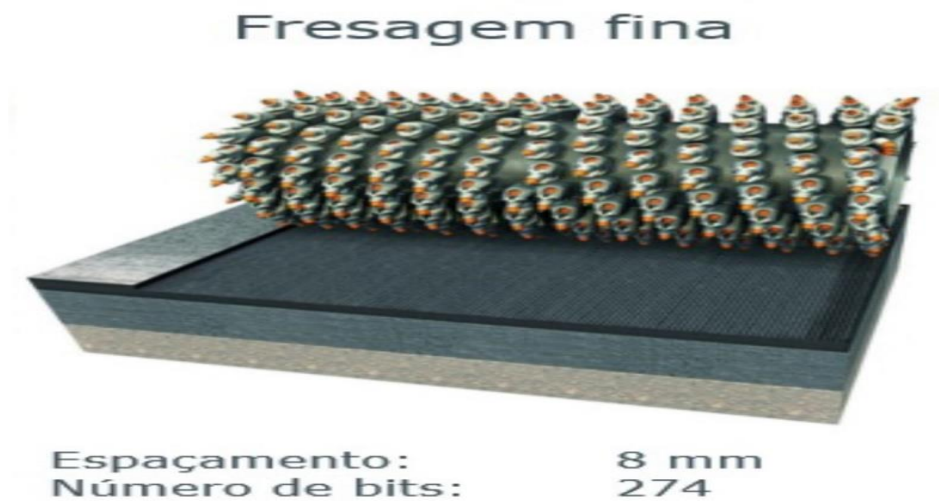
Figura 13: Fresagem Padrão



Fonte: Revista MT (2013)

- **Fresagem fina:** na fresagem fina, há retirada de poucos centímetros do pavimento, em geral menos que 10 centímetros, o que é feito por um tambor com bits espaçados de 8 mm. Um tambor convencional de 2m tem 274 *bits*.

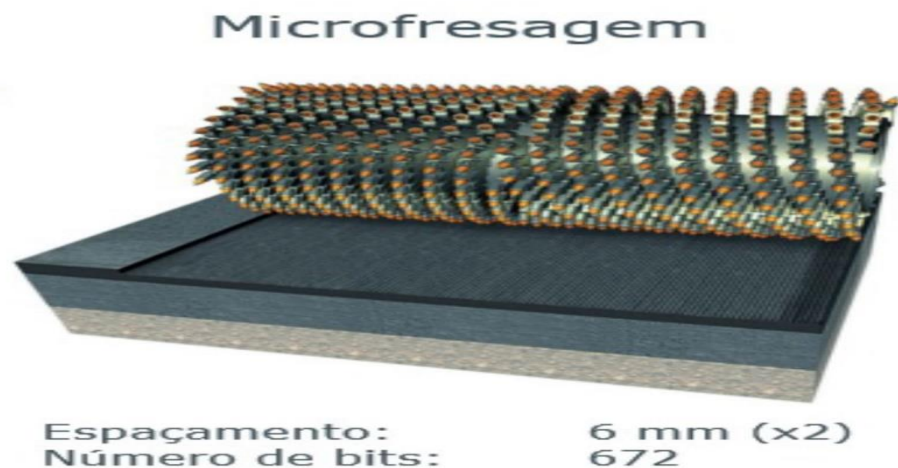
Figura 14: Fresagem fina.



Fonte: Revista MT (2013)

- **Microfresagem:** no processo de microfresagem, há retirada apenas superficial do pavimento, muitas vezes da ordem de milímetros. O espaçamento de bits no tambor é de apenas 6 mm e, para tambor de 2m, há numerosos 672 deles, configuração ideal para fresagem pouco espaçada e pouco profunda.

Figura 15: Microfresagem.



Fonte: Revista MT (2013)

2.2.2.3 Mistura/Reciclagem

Os materiais que compõem o RAP são os próprios materiais que compõem o revestimento asfáltico, ou seja, areia, brita e cimento asfáltico de petróleo (CAP), citados no item 2.2.1.2. Por esse motivo, o tipo de asfalto e seus componentes originalmente utilizados refletem nas características do material fresado obtido. Por outro lado, as características físicas do material também dependem do tipo de processo de fresagem empregado, a frio ou a quente.

Assim, as duas principais características de um RAP são:

i) a granulometria e ii) o ligante de betume (o estado, quantidade e a consistência do betume no material).

Sob o ponto de vista de uma reciclagem a frio, o mais importante é saber se o betume no material RAP é “ativo” ou “inativo”. Ou seja, o RAP é um “agregado preto” (inativo) com propriedades similares àsquelas da brita graduada ou é um “material pegajoso” (ativo) com a coesão inerente resultante do betume no material RAP? Isto é importante, pois o estado do ligante antigo influenciará significativamente o comportamento do material reciclado quando da sua reutilização (WIRTGEN, 2012, p. 203).

O ligante ativo fornece aos RAPS níveis maiores de coesão. Esta coesão pode ser prejudicial ao processo de compactação da faixa, pois o material coeso resistirá mais aos esforços de compactação, diminuído, assim, a capacidade de atingir densidades mais altas. Nesses casos, a camada sofrerá uma compactação bastante lenta devido à ação das cargas do tráfego (WIRTGEN, 2012).

Para evitar que este processo ocorra a níveis prejudiciais, Wirtgen (2012) recomenda que o RAP ativo seja misturado com 30% nominais (pelo volume) de brita graduada. Com essa mistura o material ativo tende a comportar-se como inativo. Além disso, recomenda-se que em estradas de trânsito pesado seja utilizado apenas RAP inativo em substituição à brita graduada na base para obter um desempenho satisfatório.

2.2.2.4 Tipos de Reciclagem

Atualmente, já foram desenvolvidas diversas técnicas de reciclagem utilizando o asfalto fresado. A reciclagem pode ser realizada a frio ou a quente, com processamento em Central

(Usina) ou in situ e com mistura de diversos ligantes, como cimento Portland, emulsão betuminosa e betume asfáltico.

A reciclagem de revestimento antigo deteriorado é uma alternativa utilizada para reduzir ou eliminar camadas com trincas com potencial de reflexão. Se houver também necessidade de aumento da capacidade de suporte, segue-se à reciclagem uma nova camada de rolamento, ela pode ser realizada somente com os materiais existentes fresados mais adição de agentes rejuvenescedores e/ou ligantes asfálticos novos, ou ainda com incorporação de agregado para correção granulométrica, de espuma de asfalto ou de emulsões asfálticas e até de cimento Portland. Os principais benefícios da reciclagem de revestimentos deteriorados são a reutilização dos agregados e do ligante asfáltico, a conservação de energia e a preservação ambiental.

Tabela 1: Principais técnicas de reciclagem.

Tipo de Reciclagem	Local da Mistura	
	<i>In Situ</i>	Em central
Reciclagem a frio com cimento	X	
Reciclagem a frio com emulsão betuminosa	X	X
Reciclagem a frio com betume-espuma	X	X
Reciclagem semi-quente com emulsão betuminosa		X
Reciclagem a quente	X	X

Fonte: Adaptado de Baptista (2006)

A reciclagem a frio é chamada assim pelo fato de não haver adição de calor ao longo de seu processo. Essa reciclagem é realizada com a adição de um ligante (emulsão betuminosa, betume-espuma ou cimento Portland) ao material fresado, formando uma mistura apta a constituir uma nova camada da base.

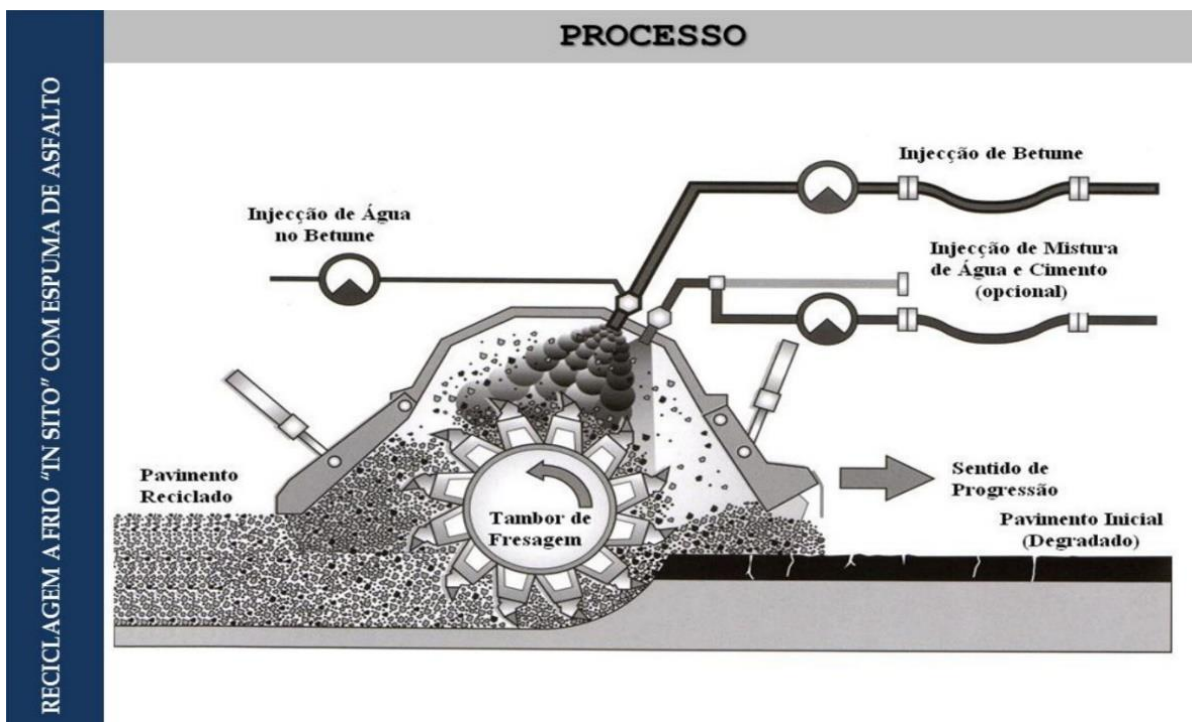
Por outro lado, na reciclagem a quente e semi-quente o material fresado é aquecido e misturado com agregado virgem e um ligante, formando uma nova mistura asfáltica.

Na reciclagem a quente, o ligante utilizado é o asfalto betuminoso, enquanto que na semi-quente utiliza-se emulsão betuminosa. Na reciclagem a quente in situ, a adição do respectivo ligante ao RAP e a aplicação da mistura ocorrem no mesmo local da fresagem e de forma sequencial. Ou seja, realiza-se a fresagem, faz-se a mistura e aplica-se a mesma.

No caso da reciclagem a frio in situ, também conhecida como *cold-in-place*, todo o processo é realizado por uma máquina denominada recicladora. Essa máquina, que evoluiu da fresadora, assume a dupla função de realizar o desbastamento do pavimento e de injetar o ligante, produzindo a mistura que fica aplicada no próprio local. De acordo com Baptista (2006), nesse tipo de processo, todo o RAP costuma ser incorporado na mistura e reutilizado (Figura 17.1).

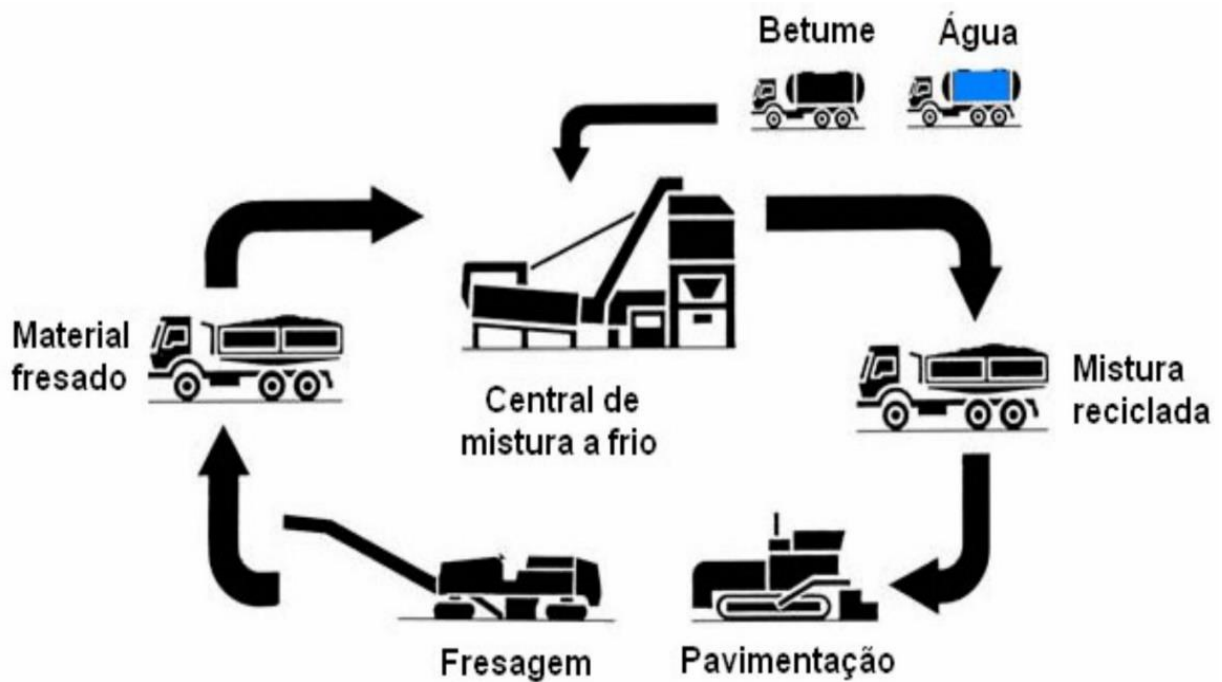
Na reciclagem em usina central (Figura 17.2), o revestimento asfáltico é desbastado pela fresadora e despejado direto em um caminhão, que o transporta para uma central. Na central, ele é misturado a um ligante para formar a mistura reciclada. A grande vantagem deste processo é a oportunidade de trabalhar o RAP, podendo-se realizar a britagem ou peneiramento do mesmo na central. O processo também permite a adição de agregado novo (brita), dosando a mistura como se achar melhor. A mistura reciclada pode ser utilizada tanto no local onde foi feita a fresagem como em outros locais. Esse tipo de reciclagem permite o uso de asfalto fresado que já está acumulado em áreas de bota-fora, contribuindo, assim, para a redução dos depósitos desse material.

Figura 16: Produção de mistura reciclada a frio in situ com emulsão betuminosa



Fonte: WIRTGEN1 (2004), apud BAPTISTA (2006)

Figura 17: Esquema da reciclagem a frio em central com betume-espuma



Fonte: WIRTGEN2 (2003), apud BAPTISTA (2006)

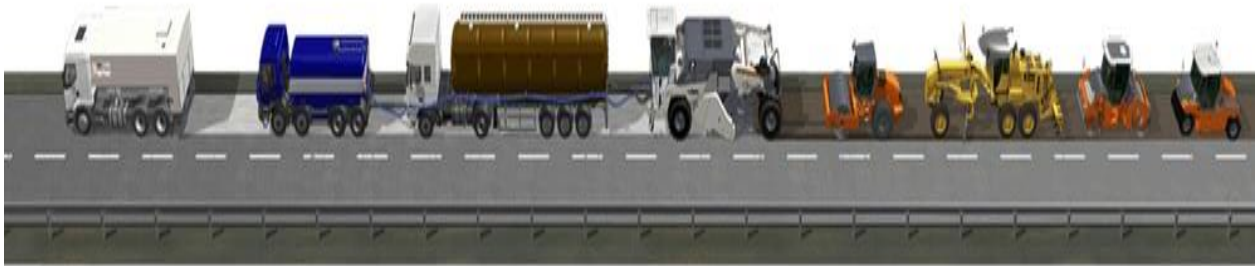
2.2.2.5 Processo Executivo

Como o método de reciclagem in situ a frio é o mais utilizado no país, abaixo se detalha a execução desse processo, no caso em que se usam, como 12 estabilizadores, cimento e espuma de asfalto, o que também configura alternativa usual.

- Espargimento de cimento: um espargidor de cimento distribui o cimento na via, que será introduzido na recicladora após sua passagem sobre a pista.
- Passagem da recicladora: a recicladora passa sobre a pista, retirando a quantidade de pavimento necessária, bem como o cimento que estava por cima, ao mesmo tempo em que faz mistura desses materiais com espuma de asfalto e água, numa câmara interna. Após mistura, o material é depositado na pista.
- Compactação: rolos compactadores passam sobre a via, do tipo cilindro liso para material predominantemente granular ou do tipo “pé de carneiro” para misturas em maior parte argilosas.
- Nivelamento: passagem de motoniveladoras para acabamento final.

Figura 18: Todos os processos da reciclagem a frio.

Comboio para Reciclagem a Frio



Fonte: Terrena Asfaltos (2017)

Figura 19: Execução de reciclagem a frio realizada pela Brow Brow na BR-116



Fonte: Revista MT (2016)

2.3 CUSTO/OBRAS

No Brasil, a reciclagem foi empregada pela primeira vez em 1960 pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro, onde o material asfáltico era removido das vias urbanas com marteletes e transportado até usinas para serem misturados novamente (CASTRO, 2003).

Em 1980 teve-se o incentivo do DNER no processo de reciclagem “in situ”, o qual consistia da utilização de equipamentos que fresavam o revestimento, processavam a mistura do material fresado e promoviam o seu espalhamento no local, por dois métodos (DNER, 1998):

- Método Marine: Empregava a planta móvel recicladora Marine A.R.T. 220, de fabricação italiana, onde a fresagem era realizada a frio. Essa técnica foi utilizada para a restauração de cerca de 80 km da rodovia Presidente Dutra no estado do Rio de Janeiro.
- Método Wirtgen: Utilizava a planta móvel "remixer" da Wirtgen, onde a fresagem era realizada após o aquecimento da superfície do revestimento. A técnica 25 foi adotada pelo DNER na Rodovia Presidente Dutra, em 1986, em cerca de 140 km da rodovia nas proximidades de Taubaté.

A primeira experiência brasileira de reciclagem de uma rodovia, após incentivos do DNER em 1980, ocorreu em 1985, em um trecho de 100 km da Rodovia Anhanguera, entre São Paulo e Campinas. Os autores citam que neste caso foi executada a fresagem do revestimento e posterior reciclagem em usina drum mixer (CAMPOS, 1987; MELLO; CAMERATO, 1995, apud DAVID, 2006).

Na década de 90, de acordo com Bonfim e Domingues (1995), foi realizada a primeira obra de reciclagem in situ a frio em área urbana no país, em um segmento comercial da Via Anchieta, São Paulo. Já segundo Pinto et al. (1995 apud David, 2006), a reciclagem a frio in situ foi realizada pela primeira vez no Brasil pelo DNER em 1993, na BR-393, Rio de Janeiro, com a utilização de emulsão especial.

Em 2004, foi executado um trecho experimental na rodovia SP-147, entre Piracicaba e Limeira. Devido ao sucesso obtido, esta tecnologia foi escolhida para a restauração de 35 km desta rodovia. O projeto incluiu, entre outros, a avaliação da viabilidade de aplicação do sistema, projeto de mistura, testes de desempenho em amostras preparadas no laboratório e uma emulsão especialmente formulada para garantir coesão, rigidez inicial e elevada durabilidade. (LIBERATORI; CONSTANTINO; TUCHUMANTEL, 2005).

Oliveira, Baran e Schmidt (2010), apresentam uma análise de projeto efetuada onde foi adotada a reciclagem profunda de pavimentos como solução de restauração para alguns segmentos da BR-282, entre os municípios de Florianópolis e Lages em Santa Catarina, totalizando aproximadamente 215 km. Para 76 km, onde a situação era mais crítica, foi constatado que a reciclagem profunda com correção granulométrica e adição de cimento era a alternativa mais adequada. Os autores também reforçam que a economia da reciclagem é realmente evidente e tem desempenho satisfatório.

Os trabalhos de Trichês, Lorena e Santos (2010) e Trichês e Santos (2013) mostram a avaliação do desempenho da reciclagem com a adição de cimento empregada na restauração da rodovia SC-303 (SC-150), trecho BR-282 entre os municípios de Joaçaba e Capinzal, Santa Catarina. O trecho de 30 km apresentava comprometimento total do revestimento e a reciclagem foi executada entre os anos de 2006 e 2007. A reciclagem contemplou em 15% de adição de agregados virgens, adição de 3% em peso de cimento, trituração de 8 cm de revestimento e 12 cm da camada de base, tratamento superficial simples e execução de revestimento em asfalto-borracha com 4 cm de espessura.

Bessa et al. (2014) apresentam um trabalho voltado à técnica de reciclagem à frio na reutilização do material fresado. Foi adotada compactação Marshall para confecção das amostras, utilizando 2, 3 e 4% de emulsão asfáltica, ainda acrescidos 3% de água e 1% de cimento. Os autores realizaram ensaio de MR e RT, verificaram também a resistência ao dano por umidade induzida das amostras com teores variáveis de emulsão.

Os resultados apresentados mostram que o aumento no teor de emulsão levou a uma pequena queda nos valores de MR e a um aumento nos valores de RT. O ensaio de dano por umidade revela maiores perdas em suas propriedades nas amostras com maior teor de emulsão asfáltica. Ainda, concluiu que alterações do tipo e do teor dos ligantes hidráulicos não apresentou variações significativas nos resultados mecânicos.

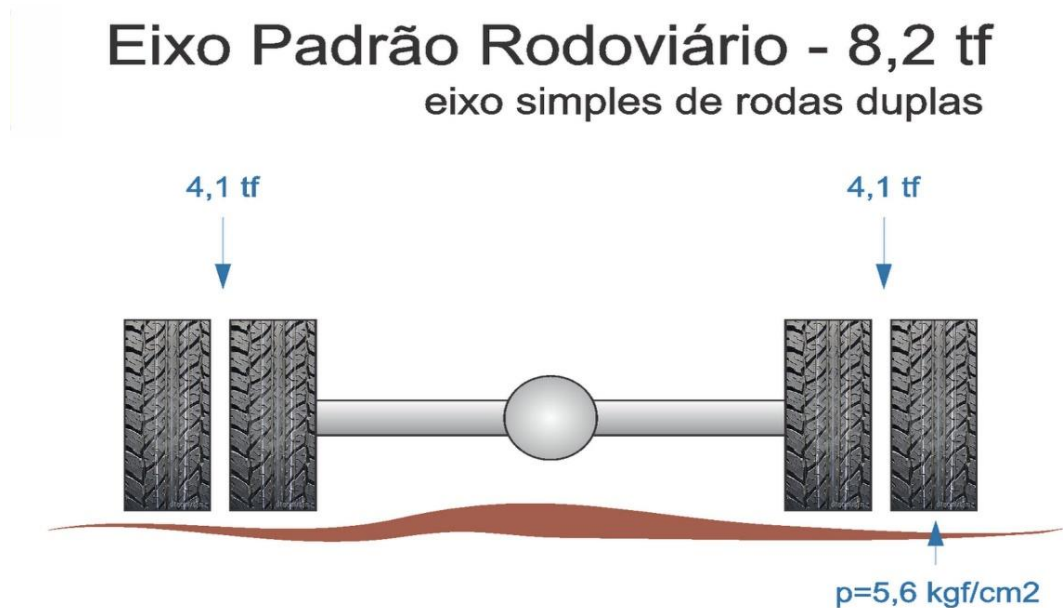
3. CONTROLE TECNOLÓGICO

Nesse capítulo serão abordados os parâmetros necessários e a metodologia de cálculo do Número N, da espessura das camadas (Base, Sub-base e Revestimento) e da Dosagem Marshall.

3.1 CÁLCULO DO NÚMERO “N” – PAVIMENTAÇÃO

É o número de repetições (ou operações) dos eixos dos veículos, equivalentes às solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf durante o período considerado de vida útil do pavimento e é definido pelo DNER (1996).

Figura 20: Eixo Padrão Rodoviário (Tandem)



Fonte: Site Pedreira (2017)

O Parâmetro “N” – número de repetições do eixo padrão Tandem que equivale a 8,2 tf sobre o revestimento asfáltico dentro de um ano (365 dias) é determinado utilizando-se a seguinte expressão:

$$N = 365 \times TMDA \times FV \times FR \times FD \times \text{Vida Útil} \quad (01)$$

Onde:

TMDA = Tráfego Médio Diário Anual na rodovia

FV = Fator de Veículos (Dano médio por veículo causado ao pavimento)

FR = Fator Climático Regional (adotado = 1,0)

FD = Fator Direcional (considerado como sendo 50% no caso de rodovia de pista simples)

A expressão acima é decorrente do “Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis” do DNER, elaborado em 1966 pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza e revista em 1971.

Na metodologia indicada pelo DNER, consideram-se apenas os caminhões e ônibus (veículos comerciais), como sendo os únicos veículos existentes na corrente de tráfego. Justifica-se pelo fato de que os automóveis apresentam um efeito muito pequeno em função de seu peso muito baixo.

Assim sendo, a expressão pode ser escrita:

$$N = 365 \times (TMDA_{\text{ônibus}} \times FV_{\text{ônibus}} + TMDA_{\text{caminhões}} \times FV_{\text{caminhões}}) \times FR \times FD \quad (02)$$

3.1.1 Tipos de Eixos

- a) EIXOS SIMPLES: conjunto de duas ou mais rodas, cujos centros estão em um plano transversal vertical ou podem ser incluídos entre dois planos transversais distantes de 100 cm, que se estendem por toda a largura do veículo. Podem ser de dois tipos:

DE RODAS SIMPLES: com 2 rodas, uma em cada extremidade;

Figura 21: Eixo Simples



Fonte: Transporte Digital. (2017)

DE RODAS DUPLAS: com 4 rodas, sendo duas em cada extremidade (4 pneus)

Figura 22: Eixo Roda Dupla (tandem)

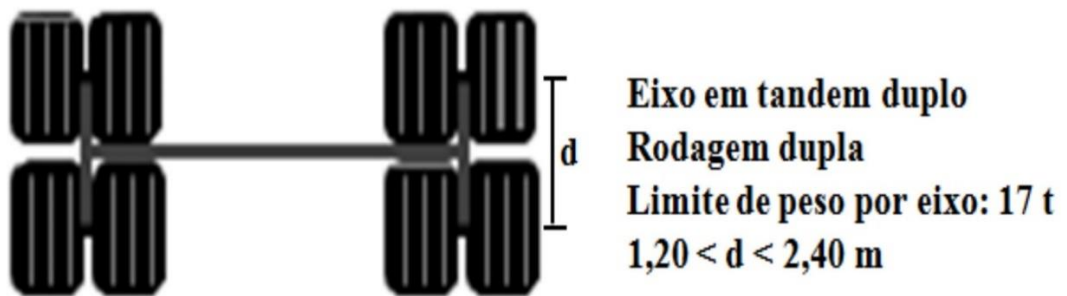


Fonte: Transporte Digital (2017)

- b) **EIXOS TANDEM (RODAS DUPLAS)**: dois ou mais eixos consecutivos, cujos centros estão distantes de mais de 100 cm e menos de 200 cm, e ligados a um dispositivo de suspensão que distribui a carga igualmente entre os eixos (balancim). Os conjuntos desses eixos constituem um eixo tandem. Podem ser:

TANDEM DUPLO: 2 eixos com 2 rodas em cada extremidade (8 pneus), sendo nos fabricantes nacionais, o espaçamento médio de 1,36 m

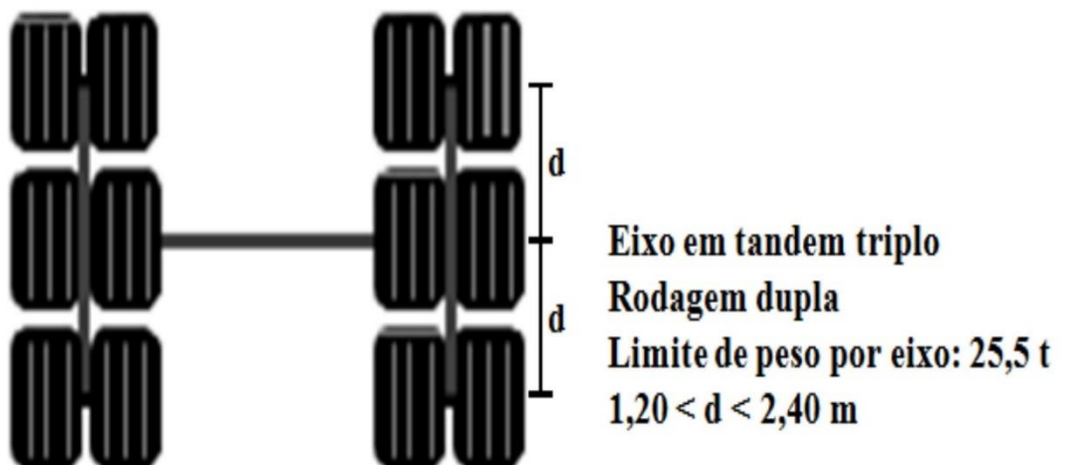
Figura 23: Eixo Tandem Duplo



Fonte: Transporte Digital. (2017)

TANDEM TRIPLA: 3 eixos, com 2 rodas em cada extremidade (12 pneus)

Figura 24: Eixo Tandem Triplo

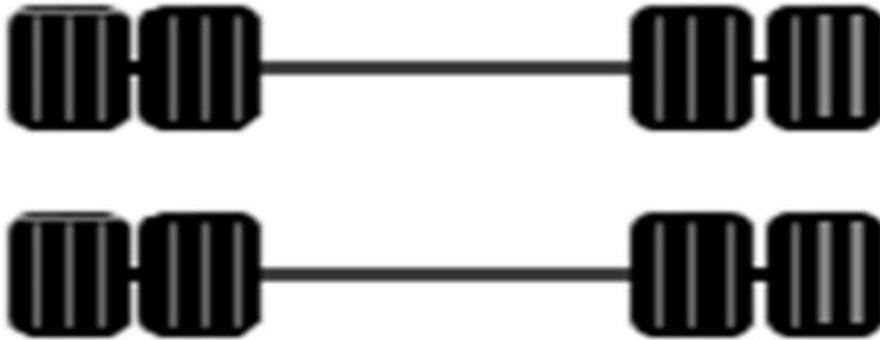


Fonte: Transporte Digital. (2017)

c) OUTROS EIXOS:

EIXO DUPLO NÃO EM TANDEM: com 2 eixos, rodas duplas (8 pneus), mas com espaçamento entre eixos superior a 2,00 m

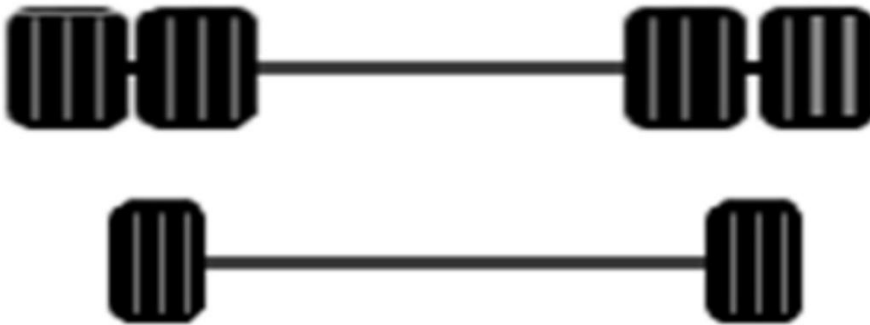
Figura 25: Eixo não Tandem



Fonte: Transporte Digital. (2017)













EIXO DUPLO ESPECIAL: típico dos TRIBUS, compreendendo conjunto de 2 eixos, sendo um com rodas duplas e outro com rodas simples (6 pneus)

Figura 26: Eixo Duplo Especial







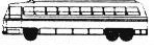














Fonte: Transporte Digital. (2017)

Figura 27: Classificação do Veículo quanto ao Eixo

Configuração do Veículo	Classificação DNER	Limite por Eixo (t)	PBT (t)
 	2C	6,0 + 10,0	16,0
	3C	6,0 + 17,0	23,0
 	3C	6,0 + 13,5	19,5
 	2S1	6,0+10,0+10,0	26,0
	2S2	6,0+10,0+17,0	33,0
	3S2	6,0+17,0+17,0	40,0
	2S3	6,0+10,0+25,5	41,5
	2C2	6,0+10,0+10,0+10,0	36,0
	3C2	6,0+17,0+10,0+10,0	43,0

Fonte: Adaptada DNER (1996)

Tabela 2: Tipo de Eixo com Descriminação de Eixo

TIPOS DE VEÍCULOS										
CLASSE / TIPO		CONFIGURAÇÃO	TIPOS DE EIXOS				Nº EIXOS	Nº PNEUS	Nº UNIDADES	
			1º	2º	3º	4º				
VEÍCULOS LEVES	CARROS DE PASSEIO		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	SIMPLES DE RODAS SIMPLES			02	04	01	
	UTILITÁRIOS (PICK-UPS E FURGÕES)	 	SIMPLES DE RODAS SIMPLES	SIMPLES DE RODAS SIMPLES			02	04	01	
ÔNIBUS	ÔNIBUS ≈ 2C		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	SIMPLES DE RODAS DUPLAS			02	06	01	
	TRIBUS		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	DUPLO ESPECIAL			03	08	01	
VEÍCULOS COMERCIAIS	CAMINHÕES	CAMINHÃO LEVE (608 e F4000)	2C LEVE		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	SIMPLES DE RODAS DUPLAS		02	06	01
		CAMINHÕES MÉDIOS E PESADOS	2C		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	SIMPLES DE RODAS DUPLAS		02	06	01
			3C		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	DUPLO TANDEM		03	10	01
			4C		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	TRIPLO TANDEM		04	14	01
	CAMINHÕES COM SEMI-REBOQUE (CARRETAS)	2S1		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	SIMPLES DE RODAS DUPLAS	SIMPLES DE RODAS DUPLAS		03	10	01
		2S2		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	SIMPLES DE RODAS DUPLAS	DUPLO TANDEM		04	14	01
		2S3		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	SIMPLES DE RODAS DUPLAS	TRIPLO TANDEM		05	18	01
		3S2		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	DUPLO	DUPLO TANDEM		05	18	01
		3S3		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	DUPLO	TRIPLO TANDEM		06	22	01
	CAMINHÕES COM REBOQUE (ROMEU E JULIETA)	2C2		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	SIMPLES DE RODAS DUPLAS	SIMPLES DE RODAS DUPLAS	SIMPLES DE RODAS DUPLAS	04	14	02
		2C3		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	SIMPLES DE RODAS DUPLAS	SIMPLES DE RODAS DUPLAS	DUPLO	05	18	02
		3C2		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	DUPLO	SIMPLES DE RODAS DUPLAS	SIMPLES DE RODAS DUPLAS	05	18	02
		3C3		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	DUPLO	SIMPLES DE RODAS DUPLAS	DUPLO	06	22	02
	"TREMINHÃO"	3C4		SIMPLES DE RODAS SIMPLES	DUPLO	DUPLO	DUPLO	07	26	02

Fonte: Godoy e Machado (1993)

3.1.2 Fator de Veículos (FV)

O Fator de Veículo (FV) é definido como “um número que multiplicado pelo número de veículos que operam, diretamente, o número de eixos equivalentes ao eixo padrão” (DNER, 1996). De acordo com o DNER, este fator pode ser calculado de duas maneiras:

$$FV = FE \times FC \quad (03)$$

$$FV = \frac{\sum(P_i \times FV_i)}{100} \quad (04)$$

Onde:

FV_i = fator de veículo individual para as diferentes categorias de veículos (automóveis, ônibus, caminhões leves, caminhões médios, caminhões pesados, reboques e semirreboques).

FE = Fator de equivalência

Os FV_i para automóveis e caminhões leves são considerados desprezíveis. Estes métodos de determinação de FV são iguais desde que FE seja calculado com base nos "conjuntos de eixo". No trabalho original de Turnbull et al. (1962), não há o conceito de FV, FC ou FE, e sim de Total de Equivalência de Operações, que por sua vez é um parâmetro relativo à frota e não a cada categoria de veículo. No Brasil, o FV foi originalmente definido como um parâmetro relativo à frota por Souza (1966). A introdução do conceito de FV_i para cada categoria de veículo foi feita por Queiróz (1982) no meio técnico brasileiro, e certamente estava ligado ao fato da pesquisa ICR da qual o citado autor participava, estar introduzindo no Brasil os fatores de equivalência de operação ligados à AASHTO, que trabalha com esta forma de apresentação. Nesta pesquisa foram definidas 5 classes de veículos, sendo a classe 1 referente a automóveis, a classe 2 referentes a ônibus, a classe 3 referentes a caminhões, a classe 4 referentes a caminhões trucado e a classe 5 referentes a caminhões tratores com semirreboque. Várias foram as condições de distribuição de frotas encontradas e de percentuais de excesso por eixo ou por categoria de veículos. Por exemplo, numa certa pesagem realizadas nas rodovias do nordeste, entre os ônibus foi encontrado 4,3% de eixos com excesso, 20,8% entre os caminhões médios, 16,3% entre os caminhões pesados e 49,1% entre os reboques. No entanto, não foi detalhado quanto de excesso em cada caso, mas estes

valores estão certamente embutidos nos FV calculados por categoria (Menezes et al., 1988). Em Sales et al. (1987) comenta-se que as diferenças entre FV sem sobrecarga e com sobrecarga variaram entre 19,5% a 488,7% conforme a região considerada.

3.1.3 Fator Climático Regional (FR)

Um mesmo pavimento apresentará resistências diferentes em diferentes condições climáticas. Este fato deve-se a constatação de que a umidade presente no subleito e no interior de uma estrutura de pavimento é variável em função do regime de chuvas de determinada região.

Consequentemente, são diferentes as respostas estruturais de pavimentos com a mesma estrutura e submetidos aos mesmos carregamentos, mas sob condições de umidade diferentes, refletindo isto no aumento ou diminuição da sua vida útil de serviço.

Para tentar minimizar este efeito no dimensionamento de pavimentos, o método do DNER (1996) propôs a adoção de um Fator Climático Regional, em função da precipitação pluviométrica anual, e que deve ser adotado no cálculo do número “N”. A Tabela 3 mostra os valores a serem adotados para o Fator climático Regional:

- Altura média de Chuva (mm)
- Fator Climático Regional (FR).

Tabela 3: Fator Regional pela quantidade de Chuva

CHUVA (mm)	FR
Até 800 mm	0,7
De 800 a 1.500	1,4
Mais de 1.500	1,8

Fonte: Autor (2020)

3.1.4 Fator de Equivalência

Com base no tipo de eixo do veículo e seu respectivo peso conforme a Tabela 4 normatizada pelo DNER (1996) calcula-se o fator de equivalência separadamente para cada eixo levando em consideração o peso em toneladas de acordo com tabela 5.

Tabela 4: Fator de equivalência para o tipo de Eixo.

Tipo de eixo	Faixa de Cargas (T)	Equações (P em Tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 - 8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0 - 11	$FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,434}$
Tandem triplo	0 - 18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

P = Peso bruto total sobre o eixo

Fonte: Adaptada da DNER (1996)

3.1.5 Fator de Carga

É o coeficiente que, multiplicado pelo número de eixos que circulam, dá o número equivalente de eixos padrões e fornece a carga equivalente de 8,2 tf, ou 18 kps, ou 80 KN. Métodos para sua determinação:




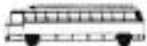




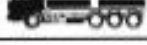





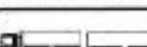
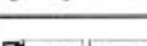
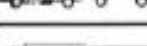


- USACE – U. S. Army Corps of Engineers, conhecido como CE – Corpo de Engenheiros (foram reproduzidos no Método de Pavimentos Flexíveis do DNER – Engenheiro Murillo Lopes de Souza)
- AASHTO - American Association Standard Highway and Transportation Officials (foram reproduzidos no Procedimento DNER-PRO 159-85 e HDM).

Existem outros métodos, mas nesse trabalho será adotado apenas os métodos USACE e AASHTO.

Cada veículo comercial (ônibus/caminhão) possui limitações de carga a transportar e esses limites são fixadas pela Lei da Balança. A lei, no entanto, embora determine o limite de carga, permite uma tolerância (em média, 7,5%).

As Tabelas 5 e 6 mostram os limites de carga por eixo definidos pela lei da balança e os limites com tolerância.

Tabela 5: Carga por Eixo pela Lei de Balanço
 Tabela 6: Carga máxima - com limites de Tolerância.

CARGA MÁXIMA (COM TOLERÂNCIA)								
CLASSE / TIPO		CONFIGURAÇÃO	TIPOS DE EIXOS					
			1º	2º	3º	4º	Σ	
VEÍCULOS LEVES	CARROS DE PASSEIO							
	UTILITÁRIOS (PICK-UPS E FURGÕES)	 						
ÔNIBUS	ÔNIBUS ≡ 2C		6,0	10,0			16,0	
	TRIBUS							
VEÍCULOS COMERCIAIS	CAMINHÃO LEVE (608 e F4000)	2C LEVE		2,0	4,5			6,50
		CAMINHÕES MÉDIOS E PESADOS	2C		6,45	10,75		
	3C			6,45	18,28			24,73
	4C			6,45	27,43			33,88
	CAMINHÕES COM SEMI-REBOQUE (CARRETAS)	2S1		6,45	10,75	10,75		27,95
		2S2		6,45	10,75	18,28		35,48
		2S3		6,45	10,75	27,43		44,62
		3S2		6,45	18,28	18,28		43,01
		3S3		6,45	18,28	27,43		52,16
	CAMINHÕES COM REBOQUE (ROMEU E JULIETA)	2C2		6,45	10,75	10,75	10,75	38,70
		2C3		6,45	10,75	10,75	18,28	46,23
		3C2		6,45	18,28	10,75	10,75	46,23
		3C3		6,45	18,28	10,75	18,28	53,76
	"TREMINHÃO"	3C4		6,45	18,28	18,28	18,28	61,29

Fonte: Godoy e Machado (1993)

3.2 DOSAGEM MARSHALL

O método de dosagem mais usado mundialmente faz uso da compactação por impacto e é denominado método Marshall em referência ao engenheiro Bruce Marshall que o desenvolveu na década de 1940. O método de dosagem Marshall de misturas asfálticas DNER-ME 043(1995) ainda é o mais utilizado no país. Foi concebido no decorrer da 2ª Guerra Mundial como um procedimento para definir a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas de roda e pressão de pneus das aeronaves militares. Originalmente a compactação Marshall utilizava um esforço de 25 golpes com o soquete Proctor, seguido de aplicação de uma carga estática de 5.000 libras (2.268kgf) durante dois minutos. A aplicação dessa carga tinha a finalidade de nivelar a superfície do corpo-de-prova, visto que, como o soquete utilizado tinha diâmetro menor que o corpo-de-prova, a superfície final não era totalmente plana. Outras fontes citam a compactação inicial como sendo de 10 golpes seguidos de mais 5 (White, 1985). Antes de apresentar os procedimentos de dosagem Marshall, são definidos alguns parâmetros utilizados.

O teor de ligante deve ser criteriosamente escolhido, devido à grande influência que o mesmo exerce sobre o pavimento. Excesso de ligante causará deformações do revestimento com a ação do tráfego e falta de ligante acarretará em um pavimento pouco durável, permeável, sujeito à fissuração e sem resistência ao desgaste superficial. Para seleção do teor ótimo de CAP, primeiramente prepara-se 15 corpos de prova: 3 para determinação da densidade aparente da mistura compactada e cinco grupos de 3 corpos de prova. Cada grupo deve ter um teor diferente de CAP (teor de asfalto efetivo).

Os 5 teores devem ser em incrementos de 0,5%. Pelo menos 2 grupos devem estar abaixo e 2 grupos devem estar acima do teor ótimo de ligante que pode ser aproximado por experiência. O teor ótimo de CAP pode ser selecionado através do método baseado num valor selecionado a partir dos teores obtidos para atender os limites do DNER de volume de vazios (3% a 5%) e RBV (Relação Betume Vazios) (75% a 82%) para o CBUQ e volume de vazios (3% a 8%) e RBV (65% a 72%) para o AAUQ. A partir destes quatro limites de especificação, obtêm-se quatro (04) teores de CAP. O teor ótimo é selecionado tomando a média dos teores centrais. Esta metodologia é adotada pelo DNER-CE (Soares et al., 1999). O conceito de teor ótimo deve ser reavaliado. Uma dosagem racional deve projetar uma mistura com resistência capaz de suportar as tensões nas camadas que compõe a estrutura do pavimento, aumentando a vida útil do mesmo.

3.2.1 Volume da Mistura

O volume da mistura (V) nada mais é que o peso do corpo de prova no ar menos o peso do corpo de prova imerso em água.

$$V = P_{ar} - P_{imerso} \quad (05)$$

Onde:

V = volume da mistura

P_{ar} = peso do corpo de prova no ar

P_{imerso} = peso do corpo de prova imerso em água

3.2.2 Massa Específica Aparente

Massa específica aparente, obtida a partir de corpos-de-prova de uma mistura asfáltica compactada (Gmb), é dada pela seguinte razão:

$$Gmb = \frac{P_{ar}}{V} \quad (06)$$

Onde:

P_{ar} = peso do corpo de prova no ar

V = volume da mistura

Gmb = massa específica aparente

O DNER-ME 117 (1994) fixa o modo pelo qual se determina a massa específica aparente de mistura asfáltica em corpos-de-prova moldados em laboratório ou obtidos em pista.

Segundo esse método, a massa específica aparente (Gmb) é definida como a relação entre a massa seca do corpo-de-prova compactado e a diferença entre essa massa seca (M_s) e a massa seca do corpo-de-prova posteriormente submersa em água ($M_{s, sub}$), multiplicado por 0,9971 que é a massa específica da água a 25° C em temperatura ambiente pela DNER-ME 117(1994), ou seja:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_s - M_{s,sub}} \times 0,9971 \quad (07)$$

Onde:

M_s = Massa do corpo de prova compactado seco

$M_{s,sub}$ = Massa do corpo de prova saturado seco e depois submerso em água

3.2.3 Massas Específicas Máximas Teóricas

A massa específica máxima teórica, tradicionalmente denominada densidade máxima teórica (sigla DMT no Brasil), é dada pela ponderação entre as massas dos constituintes da mistura asfáltica. Esse parâmetro é definido na norma de dosagem de misturas asfálticas NBR 12891.

A determinação da DMT é comumente realizada através de uma ponderação das massas específicas reais dos materiais que compõem a mistura asfáltica (brita 3/4", areia de campo, pó-de-pedra e asfalto, por exemplo). O ensaio de massa específica (correspondente numericamente à densidade) nesses agregados é feito segundo as normas do DNER para agregado graúdo (DNER-ME 81/98) e agregado miúdo (DNER-ME 84/95). De posse das massas específicas reais de todos os materiais e suas respectivas proporções, faz-se uma ponderação para a determinação da DMT da mistura para os diferentes percentuais de ligante. A expressão 5.4 apresenta o cálculo da DMT através das massas (M_i) e das massas específicas reais (G_i) dos materiais constituintes.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a g + \%a f + \%f + \%b}{D a g + D a f + D f + D b}} \quad (08)$$

Onde:

$\%a$ = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica (por exemplo, no caso de um teor de asfalto de 5%, utiliza-se o número 5 na variável $\%a$ no denominador da expressão);

$\%A_g$, $\%A_m$ e $\%f$ = porcentagens do agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, respectivamente, expressas em relação à massa total da mistura asfáltica;

G_a , G_{Ag} , G_{Am} e G_f = massas específicas reais do asfalto, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do *filler*, respectivamente.

3.2.4 Volume de Vazios

O volume de vazios existente na mistura em relação ao volume total da mistura

$$V_v = \frac{DMT - D_{aparente}}{DMT} \times 100 \quad (09)$$

Onde:

V_v = volume de vazio

DMT = densidade máxima teórica

$D_{aparente}$ = densidade aparente

3.2.5 Vazios com Betume

O volume com vazios (VCB) é a razão entre densidade teórica multiplicado pela percentagem de CAP por densidade do CAP adotado como 1,02 g/cm³

$$VCB = \frac{D_{aparente} \times \%CAP}{D_{cap}} \quad (10)$$

Onde:

VCB = vazios com betume

%CAP = percentagem e CAP

$D_{aparente}$ = densidade aparente

3.2.6 Porcentagem de Vazios do Agregado Mineral (VAM)

É a soma dos vazios não preenchidos (V_v) com os vazios preenchidos por betume (V_{cb}), ou seja, é o volume total de vazios da mistura.

$$VAM = V_v + V_{cb} \quad (11)$$

Onde:

VAM = volume agregado mineral

V_{cb} = vazios com betume

V_v = volume de vazios

3.2.7 Relação Betume Vazios (RVB)

É a relação entre o volume de betume e o volume total de vazios

$$RVB = \frac{100 \times V_{cb}}{VAM} \quad (12)$$

Onde:

RVB = relação betume vazios

VAM = volume agregado mineral

Através da dosagem Marshall buscam-se misturas com:
 Densidade máxima possível para garantir máxima estabilidade;
 Fluência entre certos limites, para garantir flexibilidade;
 Volume de vazios entre certos limites para garantir que não ocorra oxidação da massa asfáltica pela ação da água e/ou ar, e que também não ocorra exsudação e
 Relação betume vazios entre certos limites, para garantir que exista betume suficiente e que não ocorra exsudação.

A faixa usada como parâmetro nesse trabalho foi a faixa C.

Tabela 7: Especificações granulométricas

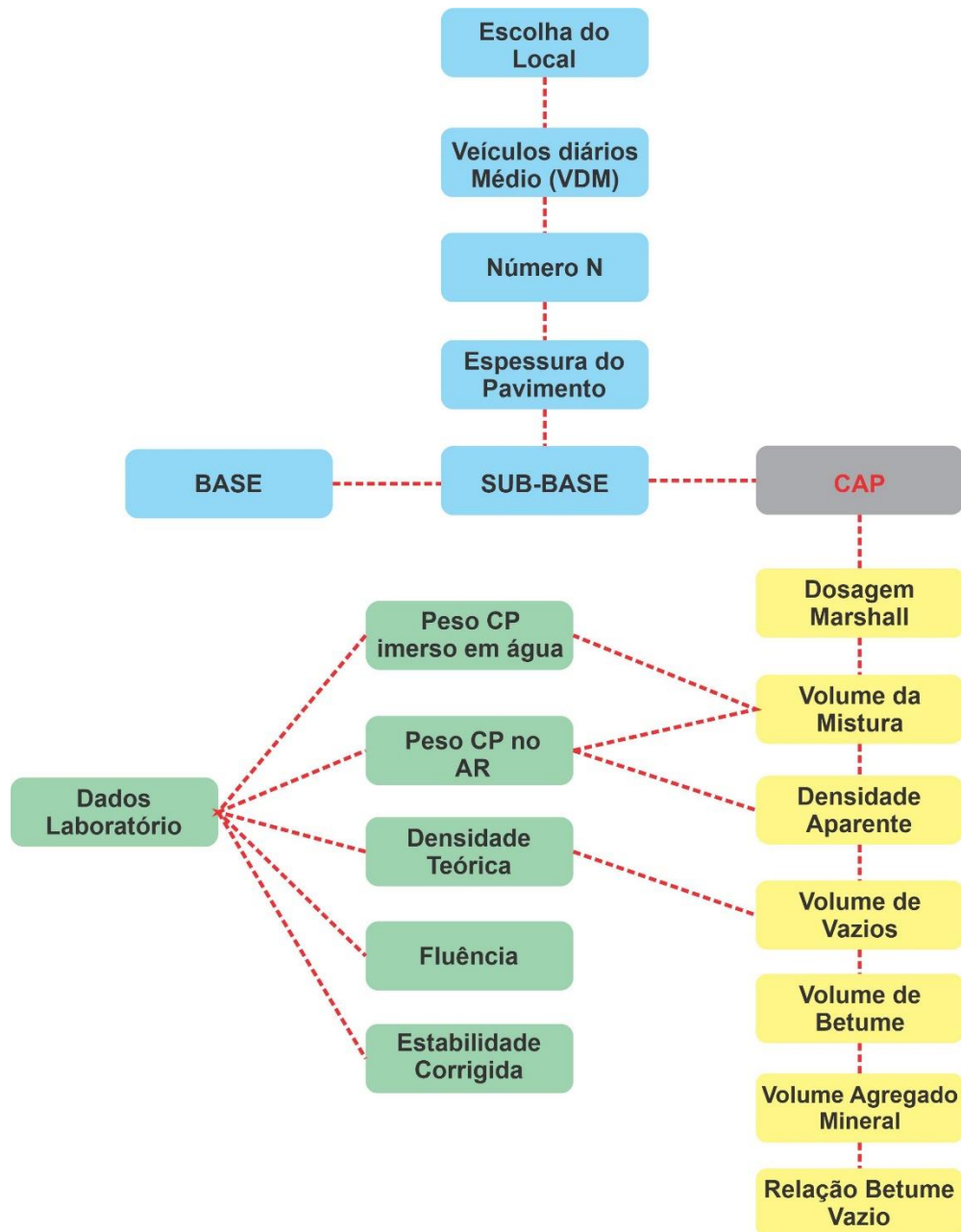
Peneira de Malha Quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	Faixa A	Faixa B	Faixa C	Tolerâncias
2"	50,8	100	–	–	–
1 ½"	38,1	95 – 100	100	–	±7%
1"	25,4	75 – 100	95 – 100	–	±7%
¾"	19,1	60 – 90	80 – 100	100	±7%
½"	12,7	–	–	80 – 100	±7%
3/8"	9,5	35 – 65	45 – 80	70 – 90	±7%
Nº 4	4,8	25 – 50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

Fonte: DNIT 031/2006-ES

4. ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo serão realizados os cálculos do número n, da espessura do pavimento e a dosagem Marshall, obtendo assim o teor ótimo de betume e o traço ideal, conforme Figura 28.

Figura 28: Fluxograma de Cálculos.



Fonte: Autor (2020)

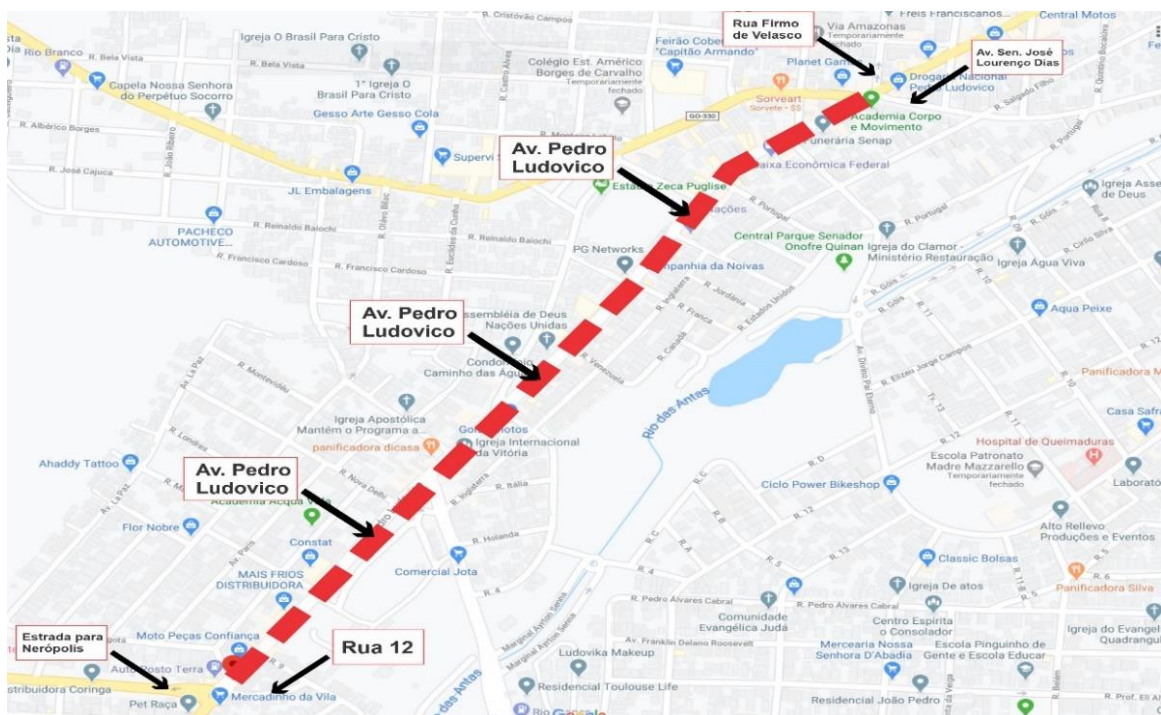
4.1 ORIGEM DE ESTUDO

O trabalho foi realizado através das recomendações do DNIT (2006a), para composição da mistura Marshall para concreto asfáltico camada de rolamento, conforme diretrizes preconizadas pela norma ES 031 – Especificações de Serviço.

O intuito desse trabalho é calcular o número N (número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 t) para um trecho da Avenida Pedro Ludovico cuja contagem do VDM no ano de 2020 no mês de março foi de 1148 veículos / dia nos dois sentidos de tráfego. Vale ressaltar que na data da contagem a cidade passava por um período de quarentena, portanto o valor do VDM está provavelmente reduzido. Com o número N consegue se achar a espessura ideal para aquele trecho, e assim posteriormente achar o traço ideal para o pavimento, utilizando o material fresado retirado da própria avenida.

Conforme a Figura 29, o local escolhido para o estudo o foi iniciado na rotatória da Avenida Pedro Ludovico com a estrada para Nerópolis e Rua 12 (Figura 30) e terminou no cruzamento com a Avenida Senador José Lourenço Dias e Rua Firmo de Velasco (Figura 31).

Figura 29: Trecho de Estudo - Avenida Pedro Ludovico



Fonte: Google Earth (2020)

Figura 30: Início do Trecho de Estudos



Fonte: Google Earth (2020)

Trecho escolhido para estudo, pelo alto fluxo de veículos da região devido ao Seasa e pelas patologias do asfalto.

Figura 31: Término do Trecho de Estudos



Fonte: Google Earth (2020)

O trecho está com o pavimento asfáltico deteriorado com muitas patologias como fissuras, trincas e buracos, a maioria dessas patologias causadas por peso excessivo de caminhões que tem uma carga por cada eixos tandem de 8,2 tf (Figura 32 e 33).

Um das soluções mais econômicas e rápidas para esse problema é refazer o pavimento asfáltico através de uma máquina fresadora, onde é possível fazer a utilização do material fresado retirado (com todo tratamento adequado) adicionando ao novo pavimento como agregado graúdo.

Nesse trabalho será realizado um traço através do número “N”, onde será descoberto tanto o teor ótimo ideal de CAP para o traço quando a espessura do pavimento a ser realizado nesse trecho da Avenida.

Figura 32: Trecho com buracos e trincas



Fonte: Google Earth (2020)

Figura 33: Trecho com buracos e fissuras.



Fonte: Google Earth (2020)

4.2 PROCEDIMENTO PRÁTICO

4.2.1 Cálculo do Número “N” – Pavimentação

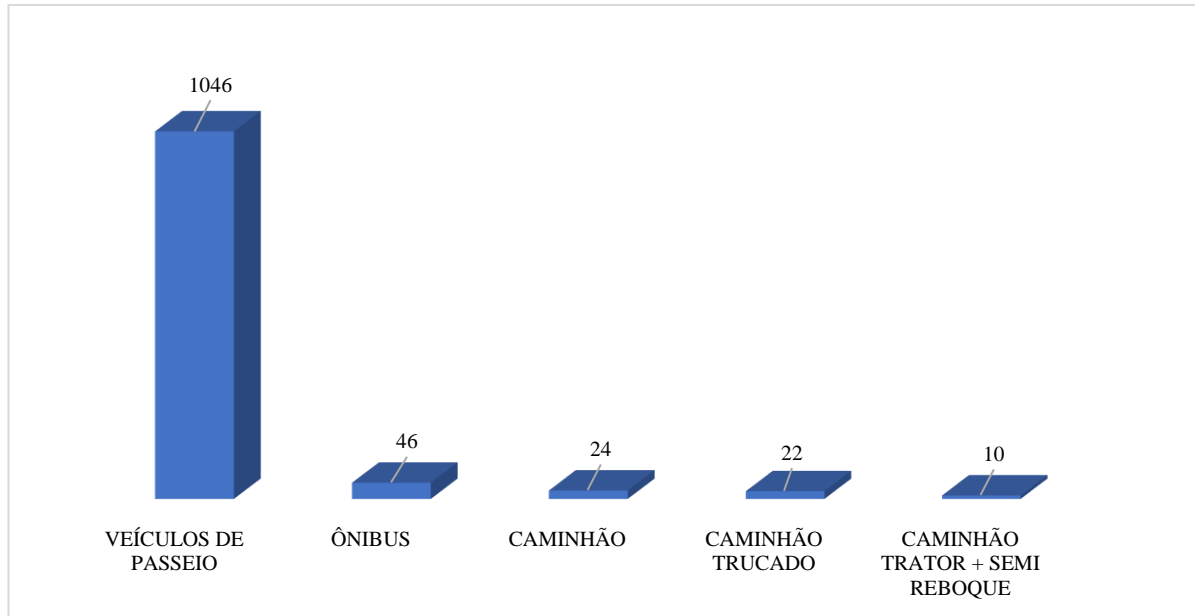
No dia 20/04/2020 foi realizado uma pesquisa no trecho de estudos da avenida Pedro Ludovico, onde buscava os resultados de fluxos de trânsito do local, foram contados veículos leves, ônibus e caminhões. Para os devidos cálculos foram usados apenas os veículos com eixos tandem, ou seja, caminhões, como padrão com 8,6tf que causam muito efeito a deformação do pavimento asfáltico. A Tabela 8 apresenta os resultados da contagem.

Tabela 8: Pesquisa Quantidade de Veículos por tipo de Eixo

TIPO VEÍCULO	CLASSE	TIPOS DE EIXO	QUANTIDADE
Carro de passeio			1046
Ônibus	2E	SRS + SRD	46
Caminhão	2C	SRS + SRD	24
Caminhão trucado	3C	SRS + TD	22
Caminhão trator + Semirreboque	2S3	SRS + SRS + TT	10
		TOTAL	1148

Fonte: Autor (2020)

Gráfico 1: Pesquisa de veículos por tipo de eixo



Fonte: Autor (2020)

Para o cálculo do número N na Tabela 8 foi usado como parâmetro:

- Fator Direcional (FD): 1,0
- Fator Regional (FR): 1,4
- SRS = 6 Tf
- SRD= 10Tf
- TD= 17Tf
- TT= 25,5Tf
- Vida Útil de projeto: 10 anos

FE= Fator de equivalência de veículo inteiro

$$FE= \sum(\text{fator de equivalencia}) \quad (11)$$

O FE se refere ao dano ao pavimento equivalente de cada classe de veículo, por exemplo o 2E equivale a 0,28 + 3,29 de acordo com tabela 4 que corresponde a 3,57 eixos padrões (SRD com 8,2Tf). Ou seja, causa uma deformação plástica ao pavimento 3,57 vezes maior que um eixo padrão.

$$FV = \text{Quantidade} \% \times FE \quad (12)$$

FV TOTAL é o dano médio causado por cada veículo q passa no pavimento

Tabela 9: Cálculo do FV total.

CLASSE	TIPOS DE EIXO	FATOR DE EQUIVALÊNCIA				QUANTIDADE	QUANTIDADE (%)	FE P/ VEÍCULOS	FV
		SRS	SRD	TD	TT				
2E	SRS + SRD	0,28	3,29	-	-	46	45,10%	3,57	1,61
2C	SRS + SRD	0,28	3,29	-	-	24	23,53%	3,57	0,84
3C	SRS + TD	0,28	-	8,55	-	22	21,57%	8,83	1,90
2S3	SRS + SRD + TT	0,28	3,29	-	9,3	10	9,80%	12,87	1,26
					TOTAL	102	100%	FV TOTAL:	5,62

Fonte: Autor (2020)

$$N = 365 \times \text{TMDA} \times FV \times FR \times FD \times \text{vida útil}$$

$$N = 365 \times 102 \times 5,62 \times 1,4 \times 1,0 \times 10$$

$$N = 2,93 \times 10^6 \text{ (EIXOS PADRÕES)}$$

4.2.2 Dimensionamento das Camadas do Pavimento

O pavimento asfáltico (CBUQ) tem um tamanho mínimo e é necessário usar o número N para saber qual é esse tamanho mínimo, basta usar a tabela 10 e alguns parâmetros obtidos no trabalho de Brito 2019 como:

- Base: material granular com CBR > 80;
- Sub-Base: material granular com CBR \geq 20;
- Subleito: Índice de Suporte (IS) = 6.

Figura 34: Espessura do Pavimento



Fonte: Autor (2020)

Tabela 10: Espessura mínima do Revestimento com base no número N

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	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: DNER (1981)

Com base no número $N = 2,93 \times 10^6$ achou a espessura mínima como 5,0 cm, ou seja, o $h_r = 5,0$ cm para revestimento betuminoso. Para saber as outras medidas são necessárias usar a tabela 11 para achar o coeficiente estrutural de cada camada.

Tabela 11: Coeficiente de Equivalência Estrutural.

Componentes dos pavimentos	Coeficiente de equivalência estrutural (K)
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento por penetração	1,20
Base granular	1,00
Sub-base granular	0,77(1,00)
Reforço do subleito	0,71 (1,00)
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 Kg/cm^2	1,70
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 Kg/cm^2 e 28 Kg/cm^2	1,40
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 Kg/cm^2 e 21 Kg/cm^2	1,20
Bases de Solo-Cal	1,20

Coeficientes de equivalência estrutural para alguns materiais

Fonte: DNER (1996)

Com base nessa tabela achou que para a camada de revestimento vai ser usado $KR=2$ e para Base e Sub-base = 1. Em seguida, usa-se o ábaco com a fórmula a seguir para dimensionar a espessura do H20, no lugar de CBR pode se usar o IS quando convir.

$$H20 = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (26)$$

Calculando se acha:

$$H20 = 26,54 \text{ cm};$$

Para achar a espessura do h_b é necessário fazer uma inequação porque o coeficiente estrutural é diferente das demais camadas.

$$h_r \times k_r \times h_b \times k_b \geq H_{20}$$

$$5 \times 2 + h_b \times 1 \geq 26,54$$

$$h_b \geq (26,54 - 10) / 1$$

$$h_b \geq 16,54\text{cm}$$

Para calcular o H6 vai usar a formula 26 novamente:

Calculando se acha:

$$H_6 = 54,52\text{cm};$$

Para achar a espessura do HB é necessário fazer uma inequação porque o coeficiente estrutural é diferente das demais camadas.

$$h_r \times k_r \times h_b \times k_b \times h_{20} \times k_{20} \geq H_6$$

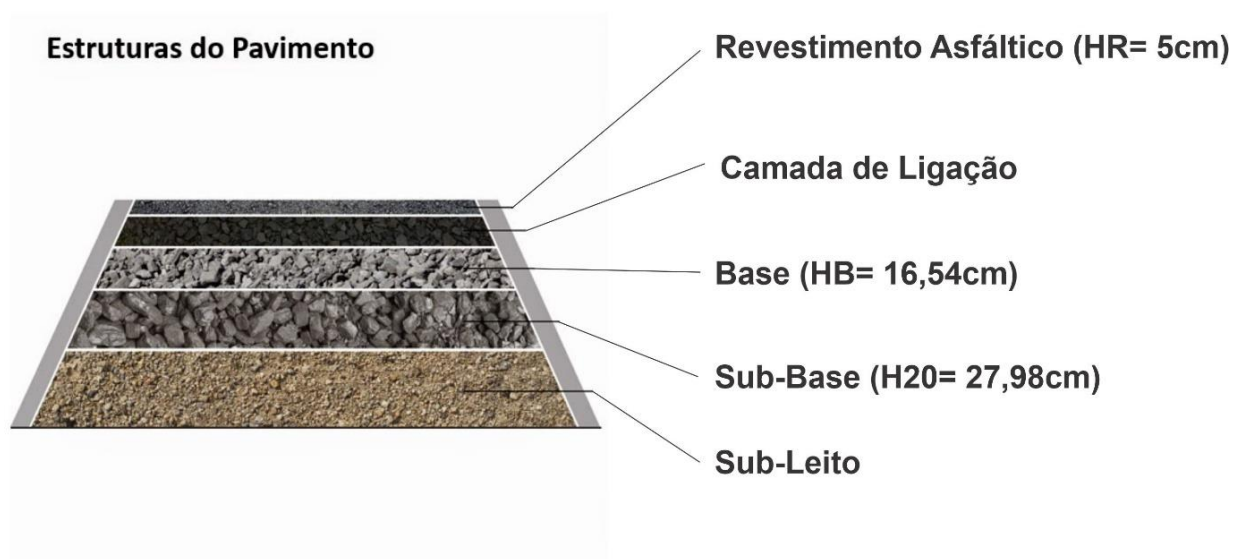
$$5 \times 2 + 16,54 \times 1 + H_{20} \times 1 \geq 54,52$$

$$H_{20} \geq (54,52 - 26,54) / 1$$

$$H_{20} \geq 27,98\text{cm}$$

O dimensionamento ficou estabelecido de acordo com a Figura 34.

Figura 35: Espessura das camadas do pavimento.



Fonte: Autor (2020)

4.2.3 Dosagem Marshall

O teor de ligante deve ser criteriosamente escolhido, devido à grande influência que o mesmo exerce sobre o pavimento. Excesso de ligante causará deformações do revestimento com a ação do tráfego e falta de ligante acarretará em um pavimento pouco durável, permeável, sujeito à fissuração e sem resistência ao desgaste superficial. Para seleção do teor ótimo de CAP, primeiramente prepara-se 15 corpos de prova: 3 para determinação da densidade aparente da mistura compactada e cinco grupos de 3 corpos de prova. Cada grupo deve ter um teor diferente de CAP (teor de asfalto efetivo).

Os dados necessários para realizar a dosagem marshall foi cedido pela empresa Carlos Campos Consultoria e Construções LTDA no trabalho da Brito (2019). Eles realizaram os ensaios no dia 25 de agosto procurando o traço ideal para o pavimento asfáltico, utilizando material fresado como agregado. Segue no Anexo A os dados dos 15 corpos de prova.

A Tabela 12 apresenta os resultados com os corpos de prova de CBUQ comum produzidos para o ensaio de estabilidade e fluência Marshall. Assim, a partir desses dados, é possível determinar o teor ótimo de CAP para a mistura calculada. Para produção da camada de revestimento de pavimento flexível deve-se observar os seguintes parâmetros, considerando uma média dos resultados de 03 corpos de prova (PINTO, 2018):

- Estabilidade Marshall: > 500 kgf.
- Fluência: 2,0 mm – 4,6 mm.

Todos os resultados de Peso no ar, Peso na água, estabilidade corrigida e fluência se encontram no Anexo A. A Tabela 12 apresenta um resumo da média dos corpos de prova para cada teor de betume.

Tabela 12: Peso dos corpos de prova

Betume (%)	4	4,5	5	5,5	6
CBUQ COMUM					
Peso ao ar (g)	1192,12	1163,57	1178,03	1177,80	1189,15
Peso na água (g)	680,11	667,86	681,70	684,22	689,31
Est. Corrig (kgf)	801	1127	1419	1823	1171
Fluência (mm)	1,7	2,7	3,0	3,7	5,3
CBUQ COM 15% DE FRESADO					
Peso ao ar (g)	1184,47	1187,40	1184,33	1192,17	1171,60
Peso na água (g)	685,73	689,47	690,07	693,73	681,17
Est. Corrig (kgf)	1404	1406	1423	1384	1325
Fluência (mm)	3,0	3,3	4,3	6,3	9,3
CBUQ COM 20% DE FRESADO					
Peso ao ar (g)	1187,10	1195,38	1190,67	1193,33	1185,57
Peso na água (g)	687,03	693,47	691,50	690,43	685,13
Est. Corrig (kgf)	1468	1626	1664	1423	1354
Fluência (mm)	3,0	4,0	5,5	6,0	6,7
CBUQ COM 30% DE FRESADO					
Peso ao ar (g)	1191,67	1185,00	1187,17	1196,33	1177,57
Peso na água (g)	683,17	683,30	691,07	697,47	684,47
Est. Corrig (kgf)	1351	1395	1535	1614	1532
Fluência (mm)	3,3	5,7	7,0	8,0	9,0

Fonte: Brito (2019)

Assim, a partir desses dados, é possível determinar o teor ótimo de CAP para a mistura calculada, conforme tabela 26. Para produção da camada de revestimento de pavimento flexível deve-se observar os seguintes parâmetros, considerando uma média dos resultados de 03 corpos de prova (PINTO, 2018):

- Porcentagem de Vazios: 3 % a 5%.
- Relação Betume/Vazios (R.B.V.): 75 % a 82 %.
- Estabilidade Marshall: > 500 kgf.
- Fluência: 2,0 mm – 4,5 mm.
- % CAP: 4,5 % a 9%
- Vazios do agregado mineral (V.A.M): > 15.

A tabela 13 apresenta o resultado do Volume da Mistura (V) e foram calculadas com auxílio da Equação 06.

Tabela 13: Volume da mistura

CORPOS DE PROVA - VOLUME														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
505,96	510,39	519,68	502,64	493,12	491,38	496,33	482,61	510,05	491,56	493,39	495,79	499,84	503,24	496,44
501,00	491,30	503,90	497,10	498,50	498,20	497,50	493,10	492,20	498,50	498,70	498,10	494,70	486,50	490,10
498,60	500,70	500,90	501,60	503,40	500,74	504,80	495,80	496,90	502,40	503,40	502,90	505,80	497,20	498,30
514,90	504,40	506,20	502,20	501,10	501,80	498,60	494,60	495,10	498,90	498,60	499,10	495,30	490,90	493,10

Fonte: Autor (2020).

A tabela 14 apresenta o resultado da Densidade aparente (Daparente) e foram calculadas com o auxílio da Equação 07.

Tabela 14: Densidade Aparente

CORPOS DE PROVA - DENSIDADE APARENTE														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2,3584	2,3363	2,2912	2,2477	2,3981	2,3982	2,3735	2,4158	2,3334	2,3919	2,3922	2,3746	2,3791	2,3657	2,3926
2,3756	2,3849	2,3646	2,3864	2,3842	2,3834	2,3954	2,3948	2,3982	2,3836	2,3958	2,3961	2,3869	2,3961	2,3838
2,3714	2,3779	2,3723	2,3762	2,3798	2,3889	2,3633	2,4014	2,3916	2,3553	2,3788	2,3846	2,3604	2,3695	2,3775
2,3432	2,3456	2,3418	2,3618	2,3622	2,3619	2,3905	2,3939	2,3947	2,4013	2,3961	2,3969	2,3858	2,3907	2,3878

Fonte: Autor (2020).

A tabela 15 apresenta o resultado de Volume de Vazios e foram calculadas com o auxílio da Equação 09.

Tabela 15: Volume de Vazios com Base na Faixa C do DNIT

CORPOS DE PROVA - VOLUME DE VAZIOS														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4,0924	4,9902	6,8240	8,5949	2,4775	2,4732	3,4778	1,7567	5,1062	2,7273	2,7155	3,4309	3,2509	3,7938	2,7005
4,0142	3,6405	4,4624	3,5781	3,6706	3,7018	3,2171	3,2384	3,1025	3,6949	3,1988	3,1877	3,5595	3,1881	3,6849
4,4160	4,1568	4,3801	4,2243	4,0783	3,7104	4,7436	3,2095	3,6023	5,0667	4,1183	3,8868	4,8602	4,4954	4,1724
6,7579	6,6630	6,8141	6,0164	6,0007	6,0128	4,8749	4,7412	4,7088	4,4456	4,6514	4,6194	5,0606	4,8663	4,9840

Fonte: Autor (2020)

A tabela 16 apresenta o resultado de Vazios com Betume e foram calculadas com o auxílio da Equação 10.

Tabela 16: Vazios com Betume

CORPOS DE PROVA - VAZIOS COM BETUME														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
9,2485	9,1619	8,9851	9,9161	10,5798	10,5802	11,6347	11,8422	11,4384	12,8977	12,8993	12,8044	13,9945	13,9159	14,0741
9,3163	9,3525	9,2728	10,5284	10,5183	10,5149	11,7420	11,7395	11,7559	12,8525	12,9187	12,9202	14,0406	14,0947	14,0223
9,2998	9,3250	9,3033	10,4832	10,4992	10,5395	11,5849	11,7714	11,7237	12,7001	12,8270	12,8580	13,8848	13,9381	13,9852
9,1889	9,1983	9,1834	10,4197	10,4215	10,4201	11,7181	11,7346	11,7386	12,9481	12,9202	12,9245	14,0343	14,0630	14,0456

Fonte: Autor (2020)

A tabela 17 apresenta o resultado de Vazios do agregado mineral e foram calculadas com o auxílio da Equação 11.

Tabela 17: Vazios Agregado Mineral

CORPOS DE PROVA - VAZIOS AGREGADO MINERAL														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
13,3409	14,1521	15,8091	18,5110	13,0573	13,0534	15,1125	13,5989	16,5446	15,6250	15,6148	16,2353	17,2453	17,7098	16,7746
13,3305	12,9931	13,7351	14,1065	14,1889	14,2167	14,9591	14,9779	14,8585	16,5474	16,1175	16,1078	17,6001	17,2828	17,7072
13,7157	13,4817	13,6834	14,7075	14,5775	14,2499	16,3284	14,9810	15,3259	17,7668	16,9453	16,7447	18,7450	18,4335	18,1576
15,9468	15,8613	15,9975	16,4361	16,4222	16,4330	16,5930	16,4758	16,4474	17,3937	17,5716	17,5439	19,0949	18,9293	19,0296

Fonte: Autor (2020)

A tabela 18 apresenta o resultado de Relação Betume Vazios e foram calculadas com o auxílio da Equação 12.

Tabela 18: Relação Betume Vazios de acordo com a faixa C do DNIT

CORPOS DE PROVA - VAZIOS AGREGADO MINERAL														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
69,32%	64,74%	56,84%	53,57%	81,03%	81,05%	76,99%	87,08%	69,14%	82,55%	82,61%	78,87%	81,15%	78,58%	83,90%
69,89%	71,98%	67,51%	74,63%	74,13%	73,96%	78,49%	78,38%	79,12%	77,67%	80,15%	80,21%	79,78%	81,55%	79,19%
67,80%	69,17%	67,99%	71,28%	72,02%	73,96%	70,95%	78,58%	76,50%	71,48%	75,70%	76,79%	74,07%	75,61%	77,02%
57,62%	57,99%	57,41%	63,40%	63,46%	63,41%	70,62%	71,22%	71,37%	74,44%	73,53%	73,67%	73,50%	74,29%	73,81%

Fonte: Autor (2020)

De acordo com os cálculos feitos e obedecendo a faixa C do DNIT e seguindo os parâmetros já citados estabelece alguns dados para os corpos de prova ideal seguindo os padrões.

Tabela 19: Parâmetros dos corpos de provas ideias com base na faixa C do DNIT

	CORPOS DE PROVA			
	COMUM	15%	20%	30%
CORPO DE PROVA N°	6	9	12	14
TEOR DE CAP	4,5	5,0	5,5	6,0
DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA	2,459	2,475	2,481	2,513
PESO DO CP SECO NO AR (g)	1178,42	1180,40	1199,20	1165,70
PESO DO CP SUBMERSO (g)	687,04	688,20	696,30	679,20

Fonte: Autor (2020)

Tabela 20: Valores para cálculo do teor ótimo de betume

	CORPOS DE PROVA			
	COMUM	15%	20%	30%
CORPO DE PROVA N°	6	9	12	14
VOLUME	491,38	492,20	502,90	486,50
DENSIDADE APARENTE	2,3982	2,3982	2,3846	2,3961
VOLUME DE VAZIOS	2,4732	3,1025	3,8868	4,8663
VAZIOS DE BETUME	10,5802	11,7559	12,8580	14,0947
VAZIOS AGREGADO MINERAL	13,0534	14,8584	16,7448	18,9610
RELAÇÃO BETUME VAZIOS	81,05%	79,12%	76,79%	74,29%

Fonte: Autor (2020)

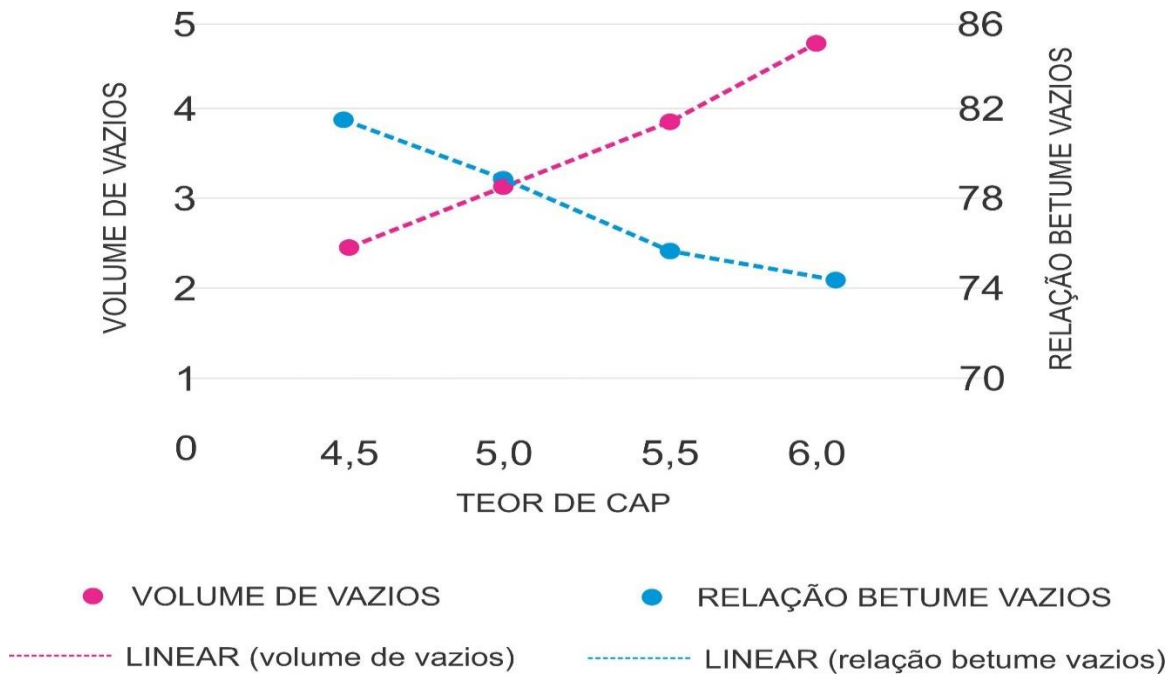
Pode-se então selecionar o teor de projeto a partir dos parâmetros de dosagem Vv e RCB. Com os valores dos corpos de prova que obedecem as faixa C do DNIT de Vv e RCB obtidos nos grupos de corpos-de-prova é possível traçar um gráfico (Gráfico 38) do teor de asfalto (no eixo “x”) versus Vv (no eixo “y1”) e RCB (no eixo “y2”). Adicionam-se então linhas de tendência para os valores encontrados dos dois parâmetros. O gráfico deve conter ainda os limites específicos das duas variáveis, indicados pelas linhas rosa e azul, e apresentados no Gráfico 39. A partir da interseção das linhas de tendência do Vv e do RCB com os limites respectivos de cada um destes parâmetros, são determinados quatro teores de CAP (X1, X2, X3 e X4). O teor ótimo é selecionado tomando a média dos dois teores centrais, ou seja, teor ótimo = $(X2 + X3) / 2$.

Figura 36: Faixa C DNIT

Faixas	Vv (%)		RBV (%)	
	Mín	Máx	Mín	Máx
A (DNIT 031/2004)	4	6	65	72
B e C (DNIT 031/2004)	3	5	75	82
3 (Aeronáutica, rolamento)	3	5	70	80
7 (Aeronáutica, ligação)	5	7	50	70

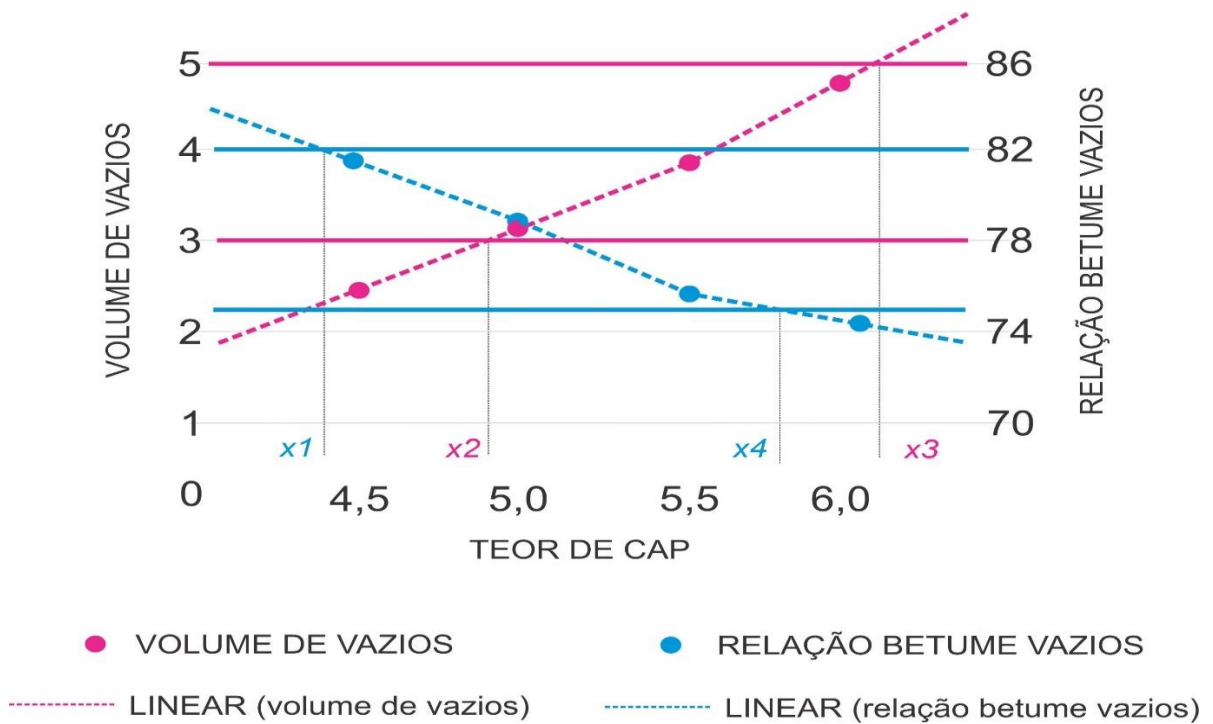
Fonte: Liedi Bernucci (2008)

Gráfico 2: Relação Vv x RCB



Fonte: Auto (2020)

Gráfico 3: Relação Vv x RCB - De acordo Faixa C



Fonte: Autor (2020)

Para exemplificar o método, a Tabela 21 apresenta a escolha do teor de projeto de uma mistura de concreto asfáltico na faixa C do DNIT. Foi inicialmente escolhido um teor de asfalto de 4,5% para o CBUQ COMUM. Os demais grupos foram dosados com 5,0%, 5,5% e 6,0%. Os valores dos parâmetros de dosagem apresentados são relativos às médias dos CPs de cada grupo. Na última linha da tabela é indicado o teor ótimo determinado através de um gráfico como o da Gráfico 3 O teor de projeto é dado por $(X2 + X3) / 2$, onde $X1 = 4,4\%$, $X2 = 4,9\%$, $X3 = 5,9\%$ e $X4 = 6,1\%$.

Tabela 21: Teor ótimo de Projeto

	CORPOS DE PROVA			
	COMUM	15%	20%	30%
CORPO DE PROVA N°	6	9	12	14
VOLUME	491,38	492,20	502,90	486,50
DENSIDADE APARENTE	2,3982	2,3982	2,3846	2,3961
VOLUME DE VAZIOS	2,4732	3,1025	3,8868	4,8663
VAZIOS DE BETUME	10,5802	11,7559	12,8580	14,0947
VAZIOS AGREGADO MINERAL	13,0534	14,8584	16,7448	18,9610
RELAÇÃO BETUME VAZIOS	81,05%	79,12%	76,79%	74,29%
TEOR DE PROJETO%	5,40			

Fonte: Autor (2020)

Ressalte-se que os critérios convencionais volumétricos não garantem que o teor de projeto, dito “ótimo”, corresponda necessariamente ao melhor teor para todos os aspectos do comportamento de uma mistura asfáltica. Com a disseminação dos métodos mecanísticos de dimensionamento, recomenda-se que numa dosagem racional a mistura seja projetada para um determinado nível de resistência à tração (RT) e de módulo de resiliência (MR), de maneira que os conjuntos de tensões nas camadas que compõem a estrutura do pavimento não venham a diminuir a vida útil do pavimento.

4.2.4 Traço Final

Depois de finalizados os cálculos e conseqüentemente a apresentação e análise dos resultados, é possível estabelecer o traço ideal de acordo com os ensaios disponibilizados pelo laboratório Carlos Campos. Esse dado é passado em porcentagens e será calculado em peso a partir da quantidade a ser produzida. Com os dados apresentados nesse estudo, a dosagem de melhor desempenho teórico seria com o ajuste dos agregados de acordo com a Tabela 22, que mostra a porcentagem com CAP e sem CAP caso faça uma mistura sem CAP.

Tabela 22: Resultado Traço Final

Agregados	CBUQ comum		CBUQ com material fresado					
			15%		20%		30%	
	% sem CAP	% com CAP	% sem CAP	% com CAP	% sem CAP	% com CAP	% sem CAP	% com CAP
Brita 1	15,00	14,19	12,75	12,11	12,00	11,42	10,50	9,98
Brita 0	30,00	28,38	25,5	24,23	24,00	22,84	28,00	26,60
Pó de Brita	55,00	52,03	46,75	44,41	44,00	41,87	31,50	29,92
Material fresado	-	-	15,00	14,25	20,00	19,03	30,00	28,50
CAP	-	5,4	-	5,0		4,84		5,00

Fonte: Brito (2019)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados apresentados, é possível afirmar que para cada tipo de material a ser utilizado para o investimento de um pavimento de qualidade, haverá um estudo a ser feito, considerando a origem dos materiais e a finalidade da produção. Assim, é apresentado todos os cálculos necessários para uma determinação eficaz de espessura e de dosagem para o CBUQ. Para os cálculos executados, observa-se a DNER (1996). para cálculo do número N e DNER-ME 043(1995) para a dosagem Marshall que estabelece os limites e parâmetros necessários para avaliação dos resultados.

Dentre os objetivos propostos nesse trabalho todos foram realizados e os resultados encontrados foram positivos. Os parâmetros usados pra ter esses resultados usamos o método do USACE – DNER (2006) e os dados de laboratório o trabalho do (Brito,2019). Assim, ficou definido o número total de veículos, o número N, a espessura do pavimento asfáltico, a dosagem Marshall e por fim o traço ideal juntamente com o teor ótimo de betume pra cada porcentagem citada nos objetivos específicos.

Os cálculos realizados foram tecnicamente positivos, o número N do trecho da Avenida Pedro Ludovico usando apenas veículos com eixo tandem que causam um impacto grande ao pavimento foi $2,93 \times 10^6$ toneladas força (tf), deu um valor abaixo do esperado, mas pelo simples motivo de o estudo ter sido feito no meio de uma pandemia motivada pelo Covid-19. Sendo assim, a espessura do pavimento ficou de 5cm com base no número N. Nesse trecho usando a dosagem Marshall encontrou-se que o teor ótimo de betume ideal foi de 5,40% para o traço ideal usando o traço comum de CBUQ, de 5,0% para 15% de material fresado, de 4,84% para 20% de material fresado e de 5,0% para 30% de material fresado.

A utilização do material fresado reciclado do pavimento asfáltico pode representar uma grande ajuda para a preservação do meio ambiente. Isso porque, ao utilizar o material danificado para a realização de uma nova pavimentação, evita-se que o material seja descartado inadequadamente em lixões ou em vias públicas, onde poderia contaminar o meio ambiente com a química de petróleo contida no material da pavimentação. Além disso, a reciclagem contribui também para evitar a retirada de materiais da natureza, configurando mais uma excelente ajuda para a preservação do meio ambiente.

Outro ponto positivo da reciclagem de pavimento asfáltico está na economia que este método pode representar para os cofres públicos, pois o reaproveitamento dos materiais implica em menos processos de extração e produção, além de exigir mão de obra menor para sua aplicação. Com isso, a reciclagem pode ser até 90% mais barata do que a pavimentação tradicional.

Indico também esse TCC como base para trabalhos futuros abordando como tema a reciclagem do material fresado retirado através das fresadoras para reciclagem.

REVISÃO BIBLIOGRAFICA

- ASFALTOS, T. Terrena Asfaltos. **Terrena Asfaltos**, 2016. Disponível em: <<https://terrenaasfaltos.com.br/servicos-de-pavimentacao/asfalto-quente-cbuq/>>. Acesso em: 20 Novembro 2019.
- ATUAL, A. C. T. CNT. **CNT**, 2018. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada>>. Acesso em: 20 NOVEMBRO 2019.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1º. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2007.
- BAPTISTA, C. N. **Pavimentação**. [S.l.]: Editora Globo, v. 3.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.
- BIANCHI, F. R.; BRITO, I. R. T.; CASTRO, V. A. B. Artigos. **Ibracon**, 2008. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/ISIS_RAQUEL.pdf>. Acesso em: 19 Agosto 2019.
- BRASQUIMICA. brasquimica. **brasquimica**, 2017. Acesso em: 20 Novembro 2018.
- BRITO, A. J. A. D. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO MATERIAL FRESADO NA COMPOSIÇÃO DO CBUQ, Anápolis, Novembro 2019.
- CARDOSO, H. Experts. **roadexperts**, 2018. Disponível em: <<https://www.roadexpertsla.com/pt-br/experts/artigo/pavimentacao-asfaltica-e-os-desafios-da-segregacao-de-material>>. Acesso em: 20 Novembro 2019.
- CASTRO, T. Q. D. **Avaliação do Desempenho de Pavimentos Permeáveis**. [S.l.]: Novas Edições Acadêmicas, 2003.
- CAVA, F. Saindo da Zona de Conforto. **ALÉM DA INÉRCIA**, 2017. Disponível em: <<https://alemdainercia.wordpress.com/2017/08/01/superestrutura-rodoviaria-cimento-asfaltico-de-petroleo/>>. Acesso em: 8 Novembro 2019.
- CONCEPA/ANTT. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS**. CONCEPA/ANTT. Porto Alegre. 2017.
- CONCEPA/ANTT. **RECICLAGEM DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: ESTUDO DA**. CONCEPA/ANTT. Porto Alegre. 2015.

- CONSTRUCAOCIVILPET. Ciber. **civilizacaoengenhaira**, 2018. Disponível em: <<https://civilizacaoengenhaira.wordpress.com/2018/04/30/como-funciona-uma-usina-de-asfalto/>>. Acesso em: 20 Novembro 2019.
- CONTEÚDO, E. exame. **EXAME**, 2019. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/economia/governo-vai-liberar-r-2-bilhoes-para-conclusao-de-obras-de-rodovias/>>. Acesso em: 20 novembro 2019.
- DNER-ME. **Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles"**. Rio de Janeiro: [s.n.], 035/1998.
- DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3º. ed. Rio de Janeiro: Printed in Brazil, 2006.
- DNIT. **Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: [s.n.], 158/2011 - ME.
- DNIT. **Pavimentação - Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregados graúdo para misturas asfálticas**. Brasília: [s.n.], 413/2019 - ME.
- DNIT. **Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall**. Rio de Janeiro: [s.n.], 178/2018 - PRO.
- DNIT. **Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio**. Rio de Janeiro: [s.n.], 159/2011-ES.
- DNIT. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico**. Rio de Janeiro: [s.n.], 031/2006.
- FERNANDES, L. P. G.; OTSUBO, M. T.; SOUZA, M. R. R. D. Artigos. **Edisciplinas.USP**, 2018. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4312007/mod_resource/content/1/Trabalho%201%20-%20Fresagem%20e%20reciclagem%20asf%C3%A1ltica%20em%20obras%20de%20reabilita%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2019.
- FILHO, J. M. D. M.; ROCHA, E. G. D. A. Engenharia Civil. **Núcleo do Conhecimento**, 2018. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/pavimentos-flexivel>>. Acesso em: 8 Setembro 2019.
- IBGE. Agência de Notícias. **IBGE**, 2012. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de->

noticias/releases/14318-asi-ibge-apresenta-nova-area-territorial-brasileira-8515767049-km>. Acesso em: 6 Novembro 2019.

JESUS, M. D. Artigos dos Experts. **Road Experts**, 2017. Disponível em: <<https://www.roadexpertsla.com/pt-br/experts/artigo/asfalto-fresado-rap-tecnologias-para-aplicacao>>. Acesso em: 8 Novembro 2019.

MT, R. Revista MT. **Revista MT**, 2017. Disponível em: <http://www.revistamt.com.br/Arquivos/Edicoes/MT_140.pdf>. Acesso em: 20 Novembro 2018.

RIBEIRO, T. P. Núcleo do Conhecimento. **Núcleo do Conhecimento**, 2017. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/wp-content/uploads/artigo-cientifico/pdf/pavimento-flexivel.pdf>>. Acesso em: 20 Novembro 2018.

SANTOS, Á. S. D.; LEANDRO, E. D. A. **ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ASFALTO FRESADO COMO BASE E SUB-BASE**. Goiânia: [s.n.], 2017.

VIANA, D. Pavimento Asfáltico. **Guia da Engenharia**, 2019. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/pavimento-asfaltico/>>. Acesso em: 16 Outubro 2019.

ANEXO A

Betume (%)	4			4,5			5			5,5			6		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Corpos de prova															
CBUQ COMUM															
Peso ao ar (g)	1193,24	1192,42	1190,69	1129,76	1182,54	1178,42	1178,03	1165,89	1190,17	1175,78	1180,3	1177,32	1189,15	1190,52	1187,78
Peso na água (g)	687,28	682,03	671,01	627,12	689,42	687,04	681,7	683,28	680,12	684,22	686,91	681,53	689,31	687,28	691,34
Est. Corrig (kgf)		801		1127				1419			1823			1171	
Fluência (mm)		1,7		2,7			3				3,7			5,3	
CBUQ COM 15% DE FRES ADO															
Peso ao ar (g)	1190,2	1171,7	1191,5	1186,3	1188,5	1187,4	1191,7	1180,9	1180,4	1188,2	1194,8	1193,5	1180,8	1165,7	1168,3
Peso na água (g)	689,2	680,4	687,6	689,2	690	689,2	694,2	687,8	688,2	689,7	696,1	695,4	686,1	679,2	678,2
Est. Corrig (kgf)		1404		1406			1423				1384			1325	
Fluência (mm)		3		3,3			4,3				6,3			9,3	
CBUQ COM 20% DE FRES ADO															
Peso ao ar (g)	1182,4	1190,6	1188,3	1191,9	1198	1196,24	1193	1190,6	1188,4	1183,3	1197,5	1199,2	1193,9	1178,1	1184,7
Peso na água (g)	683,8	689,9	687,4	690,3	694,6	695,5	688,2	694,8	691,5	680,9	694,1	696,3	688,1	680,9	686,4
Est. Corrig (kgf)		1468		1626			1664				1423			1354	
Fluência (mm)		3		4			5,5				6			6,7	
CBUQ COM 30% DE FRES ADO															
Peso ao ar (g)	1206,5	1183,1	1185,4	1186,1	1183,7	1185,2	1191,9	1184	1185,6	1198	1194,7	1196,3	1181,7	1173,6	1177,4
Peso na água (g)	691,6	678,7	679,2	683,9	682,6	683,4	693,3	689,4	690,5	699,1	696,1	697,2	686,4	682,7	684,3
Est. Corrig (kgf)		1351		1395			1535				1614			1532	
Fluência (mm)		3,3		5,7			7				8			9	

Autor: Brito (2019)