UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL – UNIJUI

JANAÍNA TERHORST PIZUTTI

COMPARATIVO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS MOLDADAS NO CENTRO E LIMITES DAS FAIXAS B E C DO DNIT

Ijuí

2015

JANAÍNA TERHORST PIZUTTI

COMPARATIVO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS MOLDADAS NO CENTRO E LIMITES DAS FAIXAS B E C DO DNIT

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador(a): José Antônio Santana Echeverria

Ijuí

2015

JANAÍNA TERHORST PIZUTTI

COMPARATIVO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS MOLDADAS NO CENTRO E LIMITES DAS FAIXAS B E C DO DNIT

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo membro da banca examinadora.

Ijuí, 13 de novembro de 2015

Prof. José Antônio Santana Echeverria

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Orientador

Prof. Lia Geovana Costa Sala

Coordenador do Curso de Engenharia Civil/UNIJUÍ

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Luiz Bock

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Ao meu pai e minha mãe,

Renê e Ligia meu incondicional agradecimento.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que me oportunizaram e não mediram esforços para me dar estudo e suporte frente a minha formação pessoal e acadêmica. Obrigada pelo incentivo de sempre, pela confiança e por tantas vezes delongarem suas conquistas para consolidar a minha, que hoje é nossa.

Ao meu orientador, professor e paraninfo, José Antônio Santana Echeverria, pela total disposição e orientação prestada para desenvolvimento deste trabalho. Por me proporcionar oportunidades de aprendizado e motivação perante a cada dúvida surgida e rabiscada no “bloquinho”, elas foram essenciais.

Ao grupo PET, por tornar as manhãs de trabalho mais agradáveis e descontraídas, em especial aos colegas que participaram e ajudaram de forma comprometida a concretizar todos ensaios, Ricardo e João. Ao LEC da Unijuí, assim como ao laboratorista Luiz Donato e ao laboratório da UFSM.

Agradeço ainda, aos meus amigos, familiares, professores e colegas, que direta ou indiretamente, estiveram ao meu lado ao longo desses anos, sendo compreensivos com minhas abdicações e me dando muito além de suporte técnico e acadêmico.

RESUMO

PIZUTTI, J. T. **Comparativo laboratorial de misturas asfálticas moldadas no centro e limites das faixas B e C do DNIT**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2015.

Este estudo objetiva abordar a dosagem de misturas asfálticas usinadas a quente (CBUQ), com ênfase nas curvas granulométricas e nas composições de misturas, tendo-se como desígnio a comparação destas, para apontamento das mais satisfatórias perante análise dos parâmetros individuais de cada uma. A comparação deu-se entre as curvas das faixas centrais e nas que tangenciam os limites superiores e inferiores das Faixas B e C do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT). Todas as misturas compuseram-se basicamente de agregados graúdos, miúdos, ligante asfáltico convencional (CAP 50/70) e cal dolomítica, diferindo-se entre si basicamente pelas porcentagens significativas de cada constituinte. Para estes compostos realizou-se a análise da granulometria, densidades, absorção e o ensaio de equivalente de areia. O concreto asfáltico (CA) foi dosado de acordo com a metodologia Marshall e, para determinação do teor de ligante de projeto nas misturas asfálticas estimou-se um volume de vazios definido em 4%, obtendo-se seis teores de betume diferentes para tais. Para caracterização da mistura realizou-se o ensaio de resistência a tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), além da análise de relações volumétricas de estabilidade/fluência, teor de betume/volume de vazios, resistência a tração/módulo de resiliência, relação fíler/betume e embasou-se o do teor de CAP com teores passantes em peneiras da série adotada. Verificou-se que as misturas tiveram comportamentos bem particulares, sendo que cada uma destacou-se frente a algum dos parâmetros avaliados. Pode-se inferir que os teores de CAP seguiram a coerência de acréscimo nas curvas B superior e C superior sendo estes os mais elevados, assim como, sucedeu-se com as porcentagens de agregados miúdos e filer. A mistura B de referência foi que a resultou no mais elevado módulo de resiliência assim como a maior relação MR/RT, inferindo-se como a composição com vida de fadiga mais prolongada. Quanto a maior resistência a tração, obteve-se na mistura C inferior e a melhor relação estabilidade/fluência na mistura B inferior. Por fim, constatou-se que todas as misturas atenderam as normatizações consideradas para a relação betume/vazios e filer/betume.

Palavras-chave: Concreto asfáltico, Faixa B e C, Curvas granulométricas, Metodologia Marshall.

ABSTRACT

PIZUTTI, J. T. **Comparativo laboratorial de misturas asfálticas moldadas no centro e limites das faixas B e C do DNIT**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2015.

This study aims to address the dosage machined asphalt mixes hot (HMA), emphasizing the gradation curves and in mixtures of compositions, having as objective the comparison of these, for appointment of the most satisfactory before analysis of the individual parameters of each. The comparison was between the curves of the central tracks and the tangent to the upper and lower limits of the tracks B and C of the National Department of Infrastructure and Transport (DNIT). All mixes are composed basically of coarse aggregates, kids, conventional asphalt binder (CAP 50/70) and dolomitic lime if differing from each other mainly by significant percentages of each constituent. For these compounds was performed the analysis of particle size, densities, absorption and sand equivalent assay. The asphalt concrete (AC) was measured according to the Marshall method and for determining the design binder content in asphalt mixtures estimated a void volume defined by 4% to give six different bitumen content for such. To characterize the mixture was held the tensile strength test by diametrical compression (RT), resilient modulus (MR), and the volumetric relations stability analysis / fluency, bitumen content / volume of empty, tensile strength / resilient modulus, compared filler / bitumen and underwrote it from the CAP content with passers levels of sieves of the adopted series. It has been found that the mixtures have very specific behavior, each of which stood out against any of the parameters evaluated. It can be inferred that the CAP levels followed the increase of coherence in B top and C top curves, which are the highest, just as happened with the percentage of fine aggregates and filer. The mixture was BREF that resulted in the highest modulus of resilience as well as the higher ratio MR/RT inferring how the composition with prolonged fatigue life. As the greatest tensile strength was obtained in C bottom mixture and the best value stability / fluency in B botton mixture. Finally, it was found that all blends met the norms considered for bitumen relationship / empty and filer / bitumen.

Keywords: Asphalt concrete. Range B and C. Gradation curves. Marshall methodology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Dados característicos do Rio Grande do Sul 13
Figura 2: Componentes das camadas dos pavimentos 17
Figura 3: Resposta mecânica de um pavimento 17
Figura 4: Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas 20
Figura 5: Corte transversal de um pavimento flexível 20
Figura 6: Comportamento de diferentes curvas granulométricas 23
Figura 7: Faixas granulométricas para misturas tipo CBUQ 24
Figura 8: Diagrama da classificação de ligantes asfálticos segundo DNER 26
Figura 9: Obtenção das dimensões dos CPS's 30
Figura 10: Obtenção da estabilidade e fluência do CP 31
Figura 11: Delineamento da pesquisa 34
Figura 12: Aparência dos agregados britador CONE 36
Figura 13: Aparência dos agregados -CONE 37
Figura 14: Coleta dos materiais pétreos 37
Figura 15: Aparência da cal utilizada 38
Figura 16: Volume real, aparente e efetivo 40
Figura 17: Etapas para ensaio do agregado graúdo 41
Figura 18: Agregados miúdos submetidos a vácuo 42
Figura 19: Picnômetro com amostra não identificável visualmente 43
Figura 20: Solução aquosa e agregados miúdos em repouso 45
Figura 21: Leitura das suspensões argilosa e arenosa 46
Figura 22: Estabilização dos CP 47
Figura 23: Ensaio resistência tração 48
Figura 24: Equipamento para ensaio módulo de resiliência 49
Figura 25: Requisitos volumétricos para mistura 50
Figura 26: Contrate de composições distintas 66
Figura 27: Curvas dos parâmetros Marshall B Referência 67
Figura 28: Curvas dos parâmetros Marshall B limite inferior 68
Figura 29: Curvas dos parâmetros Marshall B limite superior 69
Figura 30: Curvas dos parâmetros Marshall C Referência 70

Figura 31: Curvas dos parâmetros Marshall C limite inferior..... 71
Figura 32: Curvas dos parâmetros Marshall C limite superior..... 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores recomendados de parâmetros para dosagem 32
Tabela 2: Número de corpos de prova 35
Tabela 3: Série de peneiras para granulometria 39
Tabela 4: Limites de Vv e RBV para concreto asfáltico 50
Tabela 5: Porcentagem média passante de cada material 54
Tabela 6: Massa específica da Brita nº 1 55
Tabela 7: Absorção da Brita nº 1 56
Tabela 8: Massa específica Brita ¾" 56
Tabela 9: Absorção da Brita ¾” 56
Tabela 10: Massa específica da Brita 3/8" 56
Tabela 11: Absorção da Brita 3/8" 57
Tabela 12: Massa específica do pó de pedra 57
Tabela 13: Massa específica da cal 57
Tabela 14: Porcentagens individuais dos materiais 59
Tabela 15: Porcentagens individuais dos materiais 60
Tabela 16: Porcentagens individuais dos materiais 61
Tabela 17: Porcentagens individuais dos materiais 62
Tabela 18: Porcentagens individuais dos materiais 63
Tabela 19: Porcentagens individuais dos materiais 64
Tabela 20: Parâmetros mistura B Referência 67
Tabela 21: Parâmetros mistura B limite inferior 68
Tabela 22: Parâmetros mistura B limite superior 69
Tabela 23: Curvas dos parâmetros Marshall C Referência 70
Tabela 24: Curvas dos parâmetros Marshall C limite inferior 71
Tabela 25: Curvas dos parâmetros Marshall C limite superior 72
Tabela 26: Resumo dosagem Marshall 73
Tabela 27: Inserção em gramas de CAP 74
Tabela 28: Resultados do ensaio de RT 75
Tabela 29: Resultados ensaio MR 76
Tabela 30: Resultado ensaio EA 78

Tabela 31: Relação MR/RT 78
Tabela 32: Relação estabilidade / fluência 79
Tabela 33: Relação betume x vazios 79
Tabela 34: Relação Fíler x Betume 80
Tabela 35: Relação passante #200 / agregado graúdo /teor de CAP 80
Tabela 36: Coeficiente de uniformidade 81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Distribuição granulométrica dos materiais 55
Gráfico 2: Enquadramento da mistura Referência B 59
Gráfico 3: Enquadramento da mistura B superior 60
Gráfico 4: Enquadramento da mistura B inferior 61
Gráfico 5: Enquadramento da Mistura Referência C 62
Gráfico 6: Enquadramento da mistura C superior 63
Gráfico 7: Enquadramento da mistura C superior 64
Gráfico 8: Curvas comparativas referentes as misturas 65
Gráfico 9: Teor de ligante nas misturas 74
Gráfico 10: Resistências a tração da mistura 75
Gráfico 11: Médias dos MR's 77

LISTA DE SIGLAS

a	absorção
%a	porcentagem de asfalto
A	massa do picnômetro vazio e seco
AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
AAUQ	Areia Asfalto Usinada a Quente
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
a.C.	Antes de Cristo
Ag	agregado graúdo
Am	agregado miúdo
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
ADP	Asfalto diluído de petróleo
AMB	Asfaltos Modificados por Borracha Moída de Pneus
AMP- E	Asfaltos modificados por polímeros Elastoméricos
ANP	Agencia Nacional de Petróleo
ARE	Agentes de reciclagem emulsionados
B	massa do picnômetro mais amostra
BINF	mistura faixa B limite inferior
BREF	mistura faixa B referência
BSUP	mistura faixa B limite superior
C	massa do picnômetro, mais amostra mais, água

CINF	mistura faixa C limite inferior
CREF	mistura faixa C referência
CSUP	mistura faixa C limite superior
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CPA	Camada porosa de atrito
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP ou CPs	Corpos de prova
d	diâmetro
D	massa do picnômetro cheio d`água
Dap	Densidade aparente
Def	Densidade efetiva
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
Dr	Densidade real
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
EA	Equivalente de areia
EAP	Emulsões Asfálticas para pavimentação
EAP-E	Emulsões asfálticas Catiônicas Modificadas por Polímeros Elástoméricos
ES	Especificação de Serviço
EM	Especificação de material
f	fíler

Ga	massa específica real do asfalto
Gag	massa específica real do agregado graúdo
Gam	massa específica real do agregado miúdo
Gf	massa específica real do asfalto
Gmb	massa especifica aparente da mistura
h	altura
Km	quilômetros
L	Leitura na balança, correspondente ao agregado submerso
LVDT	*Linear Variable Differencial Transducer*
Mh	massa ao ar, do agregado na condição saturada de superfície seca
min	minutos
mm	milímetros
MR	Módulo de resiliência
Ms	massa ao ar do agregado seco em estufa
nº	número
NAPA	*National Asphalt Pavement Association*
NBR	Norma Brasileira
Ph	Peso úmido
Pi	Peso imerso
Ps	Peso seco
RBV	Relação Betume Vazios

RT	Resistência a tração
SHRP	*Strategic Highway Research Program*
SUPERPAVE	*Superior Performance Asphalt Pavement*
T	Teor de asfalto
UNIJUÍ	Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
USACE	Corpo de Engenheiros do Exercito Americano
WAPA	*Washington Asphalt Pavement Association*
Vv	Volume de vazios
VAM	Vazios do agregado mineral

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12

1.1 CONTEXTO 12

1.2 PROBLEMA 14

1.2.1 Objetivos de Pesquisa 15

1.2.2 Delimitação 15

2 REVISÃO DA LITERATURA 16

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO 16

2.1.1 Camadas e materiais do pavimento 18

2.1.2 Agregados constituintes do pavimento 21

2.1.2.1 Classificações dos agregados 21

2.1.3 Ligante Asfáltico 25

2.1.3.1 Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP 26

2.2 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS 27

2.2.1 Método Hubbard-Field 28

2.2.2 Método de Hveem 28

2.2.3 Método Marshall 29

2.2.4 Método Superpave 32

2.2.5 Método de Triaxial Smith 33

3 MÉTODOS DE PESQUISA 34

3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA 34

3.2 DELINEAMENTO 34

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS 35

3.3.1 Caracterização 36

3.3.1.1 Agregados minerais 36

3.3.1.2 Ligante asfáltico 37

3.3.1.3 Cal hidratada 38

3.4 MÉTODOS LABORATORIAIS 38

3.4.1 Análise granulométrica 38

3.4.2 Densidades especificas/massas específicas 39

3.4.2.1 Agregados graúdos 39

3.4.2.2 Agregados miúdos 42

3.4.3 Densidades para misturas asfálticas 43

3.4.4 Equivalente de arei. 44

3.4.5 Resistência a tração por compressão diametral 46

3.4.6 Módulo de resiliência 48

3.5 RELAÇÕES PARA DOSAGEM DA MISTURA 49

3.5.1 Relação betume x Volume de vazios. 49

3.5.2 Relação estabilidade x fluência 50

3.5.3 Relação resistência a tração x Módulo de resiliência 51

3.5.4 Relação fíler x betume 51

4 RESULTADOS 53

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 53

4.1.1 Análise granulométrica 53

4.1.1.1 Granulometria dos materiais pétreos e cal 53

4.1.2 Massa específica e absorção de água dos materiais 55

4.1.3 Misturas realizadas 58

4.1.3.1 Faixa B Referência 58

4.1.3.2 Faixa B limite superior 59

4.1.3.3 Faixa B limite inferior *61*

4.1.3.4 Faixa C Referência *62*

4.1.3.5 Faixa C limite superior *63*

4.1.3.6 Faixa C limite inferior *64*

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS 65

4.2.1 Dosagem Marshall 65

4.2.2 Teor de ligante das misturas 73

4.2.3 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral 74

4.2.4 Ensaio de Módulo de Resiliência 76

4.2.5 Ensaio do Equivalente de Areia 77

4.3 PARÂMETROS ESPECÍFICOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS 78

4.4 ANÁLISE DA UNIFORMIDADE DAS MISTURAS 81

5 CONCLUSÕES 82

REFERÊNCIAS 86

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de Rodovias, mostra que o Brasil, no que refere à infraestrutura rodoviária, teve um pequeno crescimento da sua malha no período de 2004 a 2014, em comparação com o crescimento do número de veículos e de acidentes, que vêm aumentando de maneira considerável. Demonstra-se, assim, uma pressão crescente sobre as rodovias, tanto em volume de tráfego quanto em risco de vida para os seus usuários.

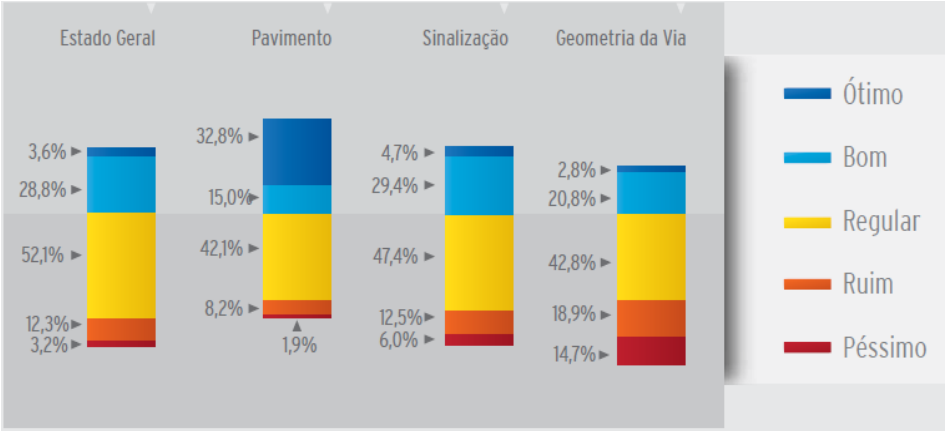
Os dados estatísticos do Departamento Nacional de Infraestrutura e transporte (DNIT, 2008), apontam que a malha rodoviária brasileira é cerca de 1 milhão 634 mil quilômetros e apenas 13% desse total é pavimentado, ou seja, 211 mil quilômetros. Estes dados evidenciam a necessidade, de extensão e aprimoramento da rede rodoviária brasileira, destacando-se principalmente a condição em que se encontra a malha rodoviária municipal, a qual abrange cerca de 1,315 milhão de quilômetros, e, encontra-se pavimentada em apenas 26 mil quilômetros, correspondendo isto a cerca de 2% de sua extensão total (ABEDA, 2010).

Além da reduzida extensão da malha rodoviária, da necessidade e dependência atual desta, outros problemas são observados e estão relacionados não somente a dados quantitativos, mas à qualidade das vias pavimentadas existentes segundo o índice de competitividade global do Fórum Econômico Mundial, divulgado em setembro de 2014.

Avaliou-se, a nível federal, pela pesquisa realizada pelo CNT (2014), que em 50,1% da extensão total o pavimento encontra-se em estado ótimo (42,4%) ou bom (7,7%), uma parcela consideravelmente grande em estado regular e uma porcentagem media em más condições, ou seja, apenas metade é satisfatória. Visto isto, ainda deve-se ponderar as disparidades existentes no que se refere às distribuições de rodovias no país.

Minimizando o exame para um plano Estadual, dados do Rio Grande do Sul refletem uma realidade um pouco mais promissora quanto a condição do pavimento, onde 89,9% tem qualidade ótima, boa ou regular, especificado conforme a Figura 1. Os dados referentes a sinalização, a geometria e ao estado geral também são apresentados, demonstrando que melhorias devem ser feitas para que haja um crescente e continuo desenvolvimento.

Figura 1: Dados característicos do Rio Grande do Sul



Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias (2014, pg.281)

Embasados nestes dados e frente à destacada predominância do modal rodoviário no deslocamento de pessoas e bens, pode-se inferir que muito ainda deve ser feito em nossa malha pavimentada federal e estadual para que torne-se suficientemente competente há exigências, condições de trafego seguras, confortáveis e apropriadas para suporte de possíveis sobrecargas.

Entende-se à importância socioeconômica para o desenvolvimento sustentável do país e o grande patrimônio público representado pelas estradas, cabendo à engenharia rodoviária o grande desafio de inovar com formas de gerência e tecnologias que possibilitem a redução do custo total do transporte do país, garantindo a manutenção e o fornecimento de uma maior extensão de rodovias em boas condições para os usuários.

O desenvolvimento de materiais mais resistentes para execução de obras rodoviárias está vinculado a melhoria das condições destas, consistindo dessa maneira em uma diminuição dos defeitos na estrutura e funcionalidade das vias, como as patologias de deformações e trincamentos. É de suma importância que se acresçam novas formas de dosagens, novas misturas asfálticas e ligantes asfálticos distintos dos convencionalmente utilizados, para que sejam consolidadas metodologias novas e ressoem em revestimentos com materiais e/ou projetos adequados.

Inserida nesta conjuntura, pode-se inferir a característica de granulometria dos agregados como sendo um dos fundamentos mais relevantes de uma mistura asfáltica, considerando que ela afeta quase todas as propriedades físicas da mesma. Com vista neste propósito, pretende-se enquadrar distribuições granulometrias, de graduação densa ou bem graduada, no centro e

tangenciando as faixas B e C do DNIT – ES 031/2006, para então avaliar propriedades dos concretos asfálticos através da metodologia de dosagem Marshall.

1.2 PROBLEMA

As composições granulométricas que tangenciam as faixas especificadas por órgãos rodoviários não são de corriqueiro uso, assim como, as misturas enquadradas na faixa B são menos usuais em relação a faixas C do DNIT. Contanto, quando testadas por Vasconcelos (2004) *apud* Coelho e Sória (1995), ambas faixas apresentaram bons resultados de resistência à deformação permanente, sendo as misturas na faixa B, porém, de pior trabalhabilidade, apesar de existirem vários traços no Brasil nessa faixa sem problemas.

SOARES *et al*. (2000) também testou granulometrias nas três faixas (A, B e C) de CBUQ do DNIT com CAP de diferentes viscosidades, obtendo misturas na faixa C que apresentaram as maiores resistências, valores da razão entre módulo de resiliência (MR) superiores e resistência à tração (RT) elevadas quando comparadas com as outras.

Considerando-se os bons resultados obtidos quando moldadas misturas nas duas faixas (B e C) pelos autores citados, propôs-se para esta pesquisa uma verificação de parâmetros para misturas compostas por agregados bem graduados, nos extremos das duas faixas, assim como no seu centro. Espera-se verificar se as misturas podem propiciar resultados aceitáveis ou superiores em algum âmbito quando não apresentam densidade dita máxima da mistura.

- Questão principal

As misturas asfálticas moldadas no centro das faixas granulométricas, B e C do DNIT, asseguram melhores resultados do que misturas que encontram-se nos limites das mesmas?

- Questões secundárias

Podem ser aceitas as misturas asfálticas que tangenciam as faixas especificadas pelo DNIT?

Há parâmetros e situações em que as curvas que tangenciam as faixas avantajam-se às centrais?

Qual a alteração da resistência a tração quando alterada faixa granulométrica?

Pode ser estabelecida uma comparação do módulo de resiliência quando alterada faixa granulométrica?

1.2.1 Objetivos de Pesquisa

- Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa consistiu-se em analisar o comportamento de misturas asfálticas usinadas a quente, através da metodologia convencional Marshall e de ensaios laboratoriais, às diferentes composições granulométricas e seus devidos desempenhos.

- Objetivos específicos

Comparar curvas granulométricas de agregados minerais, respeitando os requisitos normativos para enquadramento dos mesmos em faixas de trabalho.

Avaliar através do procedimento de dosagem Marshall o comportamento de misturas asfálticas moldadas a quente.

Verificar propriedades específicas dos materiais e da mistura asfáltica, por intermédio de ensaios laboratoriais, os quais serão decisivos para obtenção e fundamento de parâmetros mecânicos, caracterização dos materiais e as respectivas interações entre os mesmos.

1.2.2 Delimitação

A pesquisa delimita-se ao estudo de composições granulométricas enquadradas nas faixas B e C do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT), enquadradas nos seus respectivos limites e faixas centrais, para posterior correlação de parâmetros laboratoriais das misturas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO

A opção do Brasil pelo modal rodoviário começou a definir-se no início do século XX, quando o automóvel, recém chegado no país, começou a ser disseminado entre parte da população em conjunto com incentivos governamentais. Os pavimentos possuem registros históricos já à 2600-2400 a.C. no Egito, e desde então, passaram a desempenhar fatores importantes para o desenvolvimento da humanidade (TORRES 2005).

Estabeleceu-se na ABNT NBR 7207/82 que o pavimento é uma estrutura construída após a terraplenagem e destinada economicamente e simultaneamente em seu conjunto a:

- Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos do tráfego;
- Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais tornando mais durável a superfície de rolamento.

O documento Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) (2006), refere-se aos pavimentos flexíveis como sendo um tipo de estrutura constituída de uma ou mais camadas de espessura finita, estável sobre um espaço, no qual o revestimento é betuminoso e dimensionamento é conduzido pela resistência do subleito.

Bernucci *et al* (2008, p. 9) registrou que:

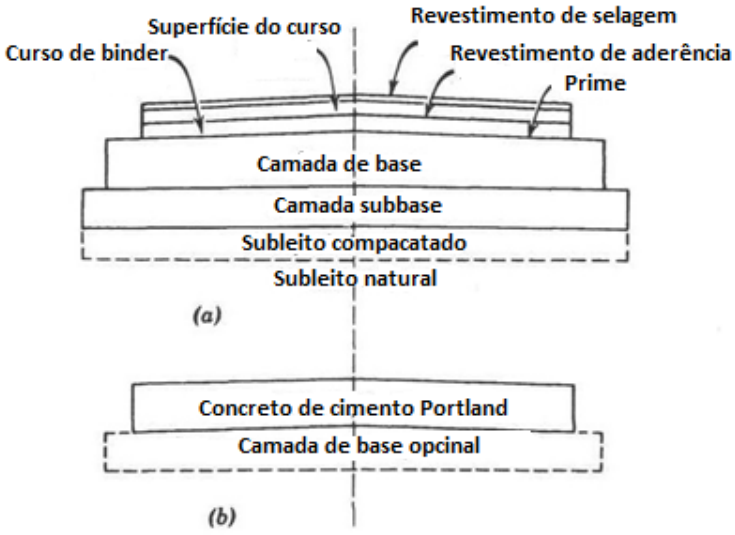
> [...] pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnico e economicamente a resistir aos esforços oriundos do trafego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Balbo (2007), define o pavimento como sendo uma estrutura composta de camadas sobrepostas formadas por diferentes materiais compactados a partir da camada do subleito. É uma estrutura que deve corresponder a durabilidade, o menor custo possível e atender de forma estrutural e operacional o tráfego.

A engenharia rodoviária subdivide as estruturas de pavimentos segundo a rigidez do conjunto em três extremos: flexíveis, rígidos e compostos. O pavimento flexível pode consistir em uma fina superfície de desgaste construída ao longo de uma camada de base e sub-base, e eles assentaram-se sobre o subleito compactado. Em contrapartida, pavimentos rígidos são feitos de

concreto de cimento Portland e pode ou não ter uma camada de base entre o pavimento e subleito, conforme ilustrado na Figura 2 (YODER E WITCZAK, 1975).

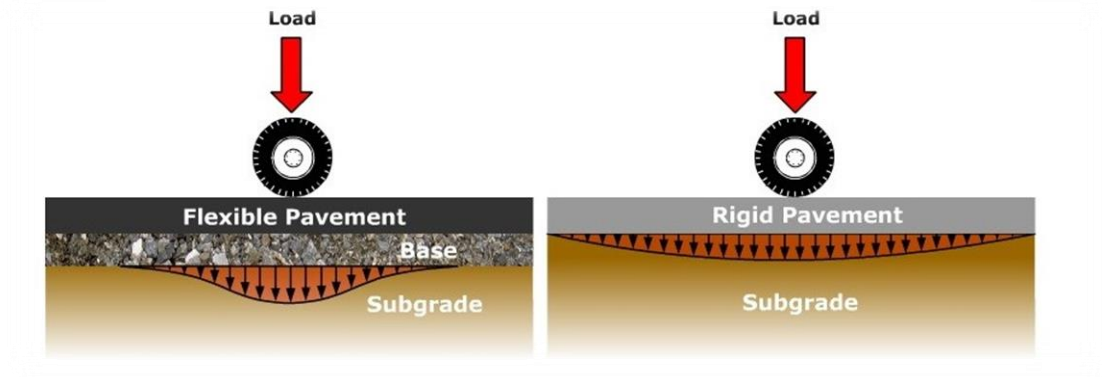
Figura 2: Componentes das camadas dos pavimento



Fonte: Adaptado Yoder e Witczak (1975, p.5)

Ainda, os autores explicam que a diferença essencial entre os dois tipos de pavimentos flexíveis e rígidos, é a forma com que eles distribuem a carga sobre o subleito. O pavimento rígido, devido à sua rigidez e módulo de elasticidade, tem tendência a distribuição da carga sobre uma área relativamente grande de solo, assim, a maior parte da capacidade de estrutura é fornecido pelo próprio revestimento (Figura 3). O principal fator considerado no projeto de pavimento rígido é a resistência estrutural do concreto. Por esta razão, pequenas variações na força do subleito têm pouca influência sobre a capacidade estrutural do pavimento.

Figura 3: Resposta mecânica de um pavimento



Fonte: WAPA (Disponível em: http://www.asphaltwa.com/)

Enquanto que, para Balbo (2007), os pavimentos flexíveis atribuem um campo de tensões concentrado próximo do ponto em que a carga foi aplicada. Nestes, as deformações, dentro de certa abrangência, não fazem com que ocorra o rompimento e são dimensionados a tração na flexão e a compressão.

Quanto aos pavimentos compostos, eles normalmente resultam da reabilitação do pavimento, em que os concretos Portland são usados para cobrir o concreto asfalto danificado ou vice-versa. (PAPAGANNAKIS E MASSAD, 2008). Medina (1997), complementa afirmando que um pavimento que tem sobre o revestimento betuminoso uma base cimentada, é dito semi-rígido. Considera-se então, o pavimento reforçado de concreto asfáltico sobre a placa de concreto como pavimento composto.

Respalda-se a observação feita por Balbo (2007), salientando que o os termos, flexível e rígido, explanados neste item, podem ser inadequados para classificar um pavimento quando se toma o revestimento como referência, uma vez que o comportamento mecânico deste pode não ser representativo do pavimento, devendo-se nestes casos delimitar qual o tipo de material do revestimento.

2.1.1 Camadas e materiais do pavimento

As camadas do pavimento possuem dimensões e materiais distintos, geralmente, quanto mais perto da superfície, mais fina é a camada e com maior custo de execução, em contraponto, quanto mais próximo do subleito (fundação) existente no local, mais espessas suas camadas e seu custo de obtenção e execução, menor (BALBO, 2007).

A constituição do pavimento se dá a partir da conformação de camadas sobre uma fundação, sendo que cada uma delas tem funções particulares e o conjunto das mesmas deve proporcionar aos veículos as condições apropriadas de rolamento e suporte em qualquer condição climática. Uma seção transversal típica de um pavimento compreende as seguintes camadas com seus peculiares materiais de construção (SENÇO, 1997; BALBO, 2007; BERNUCCI *et al*, 2008):

- Subleito: É o terreno de base do pavimento, resultante do processo de pós-terraplenagem, destina-se a aliviar esforços impostos sobre sua superfície, normalmente dispersos no seu primeiro metro de profundidade**.** Esse componente será constituído de material natural ou por material transportado e compactado (aterro);

- Reforço do subleito: o emprego de sua camada não é obrigatório, pois espessuras maiores de camadas superiores poderiam aliviar pressões sobre o subleito, em tese. Tem função de camada adicional do subleito, contribuindo também na absorção e distribuição das tensões oriundas das camadas superiores. Material é tipicamente um solo argiloso de qualidades superiores a do subleito e da regularização;

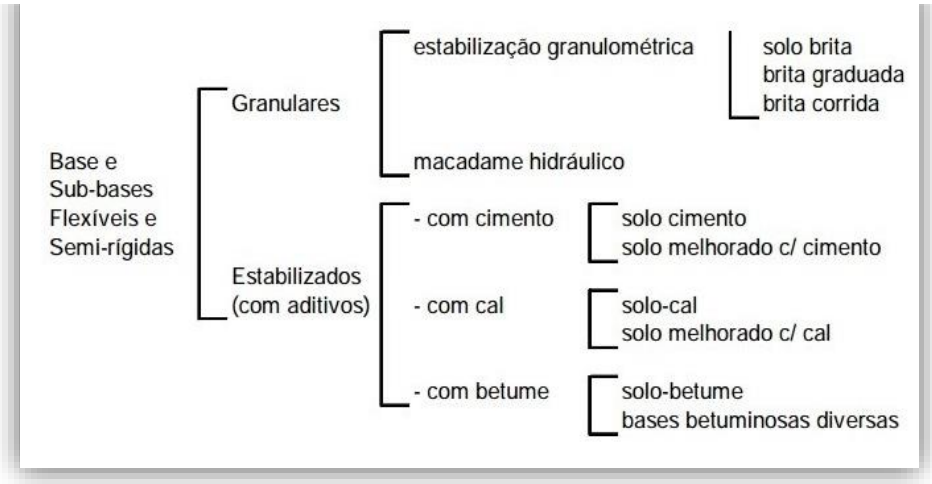
- Sub-base: camada com a função análoga à base (distribuir esforços para as demais camadas inferiores). Usa-se esta quando a espessura da base é muito espessa, por razões construtivas e econômicas ou quando não for aconselhável executar a base diretamente sobre o leito regularizado ou sobre o reforço, por circunstâncias técnico-econômicas. Os materiais típicos de construção são os mesmos abaixo citados para as bases.

- Base: tem por função aliviar pressões as camadas de solo inferiores, destina-se a resistir e distribuir ao subleito os esforços originários do tráfego, sobre a qual se construirá o revestimento. Podem ser divididas em dois grupos: bases granulares (não tem coesão, não resistem à tração, diluem as tensões de compressão principalmente devido a sua espessura) e bases coesivas (diluem as tensões de compressão frente a sua rigidez, provocando tensões de tração em sua face inferior).

- Revestimento ou camada de rolamento: está camada é a mais superficial do pavimento e, está em contato direto com cargas e ações ambientais. Responsabiliza-se por transmitir as tensões de forma minimizada para as camadas abaixo. O revestimento deve ser o mais impermeável possível para garantir condições de segurança e conforto para usuários que nela trafegam, e também a resistir aos esforços horizontais que nela atuam. O revestimento asfáltico pode compor-se de uma camada de rolamento ou por camadas intermediárias ou de ligação.
- Acostamento: Parte da plataforma contígua à pista de rolamentos, destinado ao estacionamento de veículos, ao trânsito em caso de emergência e ao suporte lateral do pavimento.

O solo estabilizado de forma natural, as misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada simples, bica corrida, concreto compactado com rolo, solo estabilizado quimicamente com cimento ou betume, entre outros materiais podem constituir as bases, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4: Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas



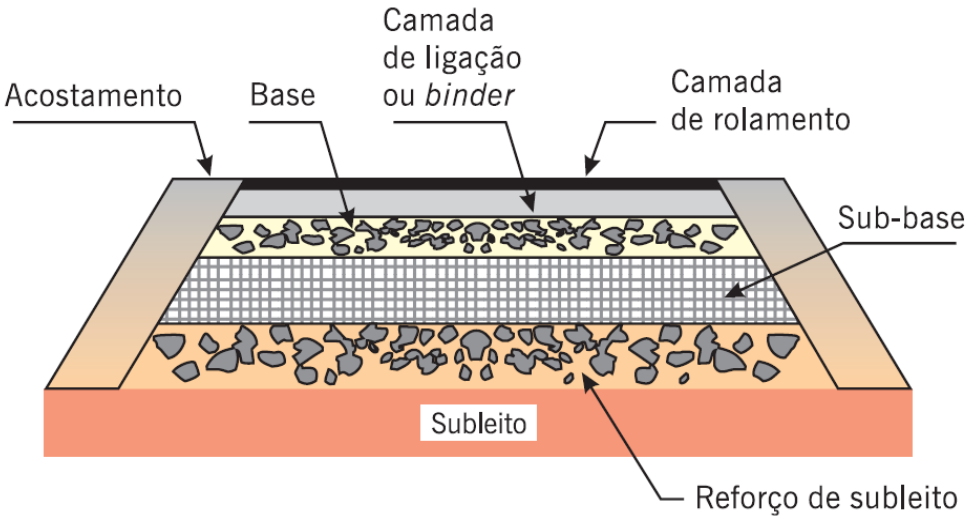
Fonte: Manual de pavimentação (DNIT 2006)

Specht (2004, p. 26) disserta que:

> [...] as camadas do revestimento incluem componentes de alto custo e merecem atenção especial. Dentre os fatores que influenciam o desempenho de uma camada asfáltica pode-se citar: características dos materiais, dosagem, condições de compactação, processo construtivo e plano de manutenção e restauração.

Balbo (2007) observa que um pavimento flexível poderá não possuir camada de sub-base ou de reforço, mas o revestimento e subleito são condições mínimas para que a estrutura seja denominada de pavimento. A composição do pavimento obedece a ordem geral conforme a Figura 5.

Figura 5: Corte transversal de um pavimento flexível



Fonte: Bernucci *et al.* (2008, p. 10)

2.1.2 Agregados constituintes do pavimento

O manual do *Asphal Institute* (2002) define o agregado mineral como todo material mineral resistente e inerte utilizado em misturas asfálticas como partículas ou fragmentos graduados. Inclui areia, pedregulhos, rocha britada, escoria e pó de pedra.

Considera-se essa porção de material fundamentalmente responsável pela capacidade de suporte de cargas dos pavimentos, pois a quantidade de agregado mineral em misturas asfálticas de pavimentação é geralmente de 90 a 95% em peso e 75 a 75% em volume e, portanto, o desempenho dos pavimentos asfálticos é muito influenciado pelo agregado.

Essa porcentagem, do peso de agregado no conjunto asfáltico, também é verificada na NBR 9935 (2011), a qual profere que o agregado tem dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto e representam a maior parte constituinte do pavimento, cerca de 90% em peso do conjunto asfalto.

2.1.2.1 Classificações dos agregados

Os agregados empregados para constituição de pavimentos podem ser classificados em três grupos principais segundo a sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos. (CERATTI e REIS, 2011):

- Natureza

I) Naturais: a NBR 9935 (2011) define agregado natural como um maciço pétreo granular que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza. Estes agregados abrangem todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais como escavação e dragagem e desmonte. Exemplificando tem-se os pedregulhos, as britas, os seixos, as areias etc. O seu emprego em pavimentos pode ser na forma e tamanho naturais, ou, podem passar por processamentos como a britagem.

II) Artificiais: estes são resíduos de processos industriais, tais como a escória de alto forno e de aciaria, ou fabricados para obtenção de alto desempenho, como a argila calcinada e a argila expandida. Os principais agregados artificiais atualmente empregados, são os vários tipos de escórias.

III) Reciclados: material granular obtido de processos de reciclagem de rejeitos ou subprodutos da produção industrial, mineração ou construção ou demolição da construção civil de

acordo com a norma citada nos itens anteriores.

- Tamanho

Segundo o DNIT 031/2006 – ES, os agregados são classificados quanto ao seu tamanho, para uso em misturas asfálticas, em:

I) Graúdo: é o material quem possui dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira nº 10. São as britas, cascalhos, seixos, etc.

II) Miúdo: material que possui partículas com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. Fica retido na peneira de nº 200, mas passa na de abertura nº 10. São as areias, o pó de pedra, etc.

III) Material de enchimento (fíler): é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, ou seja, passantes na peneira de nº 200, como é o exemplo da cal hidratada, cimento Portland, etc.

Alguns conceitos importantes relacionados ao tamanho das partículas dizem respeito ao tamanho máximo do agregado, que é a menor abertura de peneira na qual passam 100% da amostra de agregado, e o tamanho nominal máximo, que é a maior abertura da malha da peneira que retém mas não mais de 10% em peso de partículas de agregados. Essas características podem tornar instáveis misturas asfálticas e prejudicar a trabalhabilidade e/ou provocar segregação. (CERATTI E REIS, 2011)

- Distribuição dos grãos

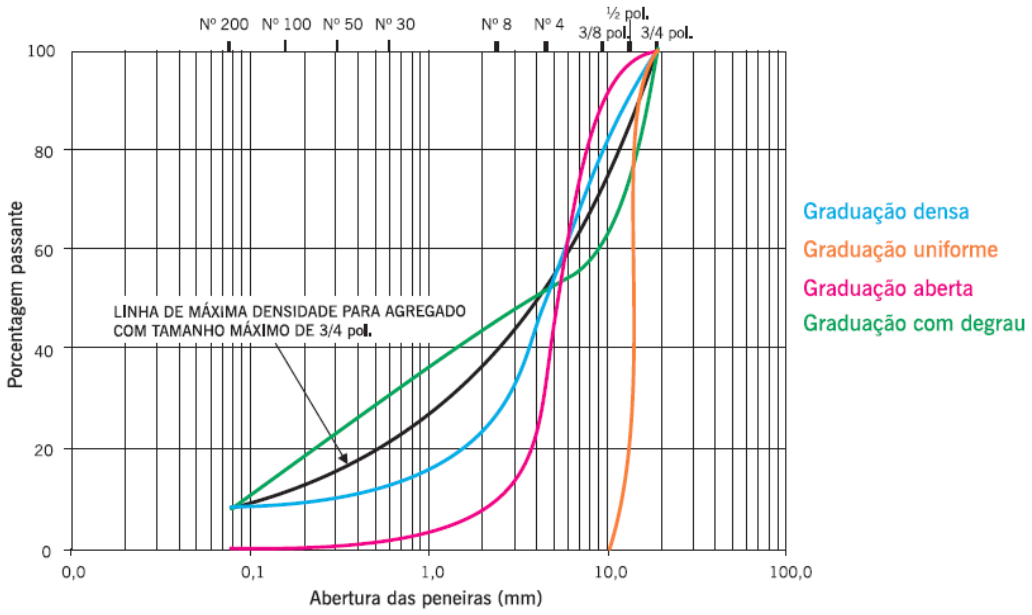
Segundo Bernucci *et al.* (2008), a distribuição granulométrica dos agregados é uma das fundamentais características perante o comportamento dos revestimentos asfálticos, influenciando em quase todas as propriedades da mistura como: a durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, rigidez, estabilidade, resistência a fadiga e a deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, etc.

Ainda, a autora afirma que a distribuição granulométrica dos agregados é determinada usualmente por meio de uma análise por peneiramento. Nessa análise, uma amostra seca de agregado é fracionada através de uma série de peneiras com aberturas de malhas progressivamente menores, sendo que a massa da fração de partículas retida em cada peneira e determinada e comparada com a massa total da amostra, a distribuição é estimada como porcentagem de massa

em cada dimensão de malha de peneira.

Ceratti e Reais (2011) também concordam com a autoria acima citada, e ressalvam a significância da distribuição granulométrica frente as características físicas da mistura, mencionado que a setorização da graduação de algumas classes auxilia na distinção de tipos de misturas asfálticas. Abaixo constam os principais tipos de graduações e suas representações conforme ilustradas na Figura 6.

Figura 6: Comportamento de diferentes curvas granulométricas



Fonte: Bernucci *et al*. (2011, p.123)

- Agregado de graduação aberta – apresenta distribuição granulométrica bem graduada e contínua, mas com escassez de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas de maior diâmetro.

- Agregado de graduação uniforme – é aquele que apresenta maior parte de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita. A curva granulométrica é bastante íngreme.

- Agregado com graduação descontinua ou em degrau: apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar identificado na

sua curva.

- Agregado com graduação descontinua ou em degrau: apresenta pequena porcentagem

de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar identificado na sua curva.

- Agregado de graduação densa ou bem graduado – apresenta distribuição granulométrica continua, próxima à densidade máxima, identificada pela verticalidade da curva.

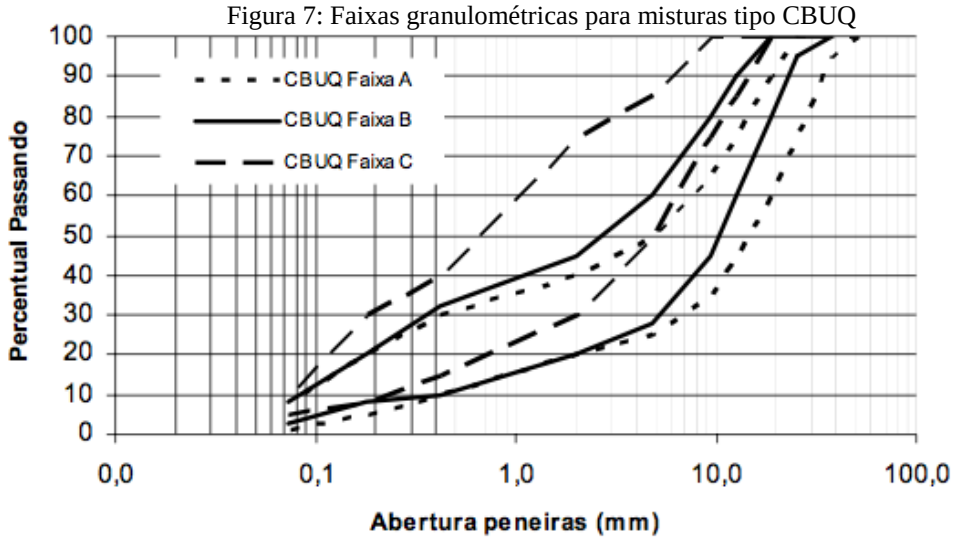
Vasconcelos (2004, pg.10) complementa que:

> [...] existem na comunidade técnica algumas ambiguidades em relação à nomenclatura adotada para diferentes distribuições granulométricas de misturas asfálticas, tais como: aberta *x* fechada, densa *x* porosa, contínua *x* descontínua. Em alguns casos, uma das descrições acima mencionadas pode não excluir uma outra, fazendo com que a mistura possua mais de uma dessas características porém em países desenvolvidos, como os Estados Unidos e vários países da Europa, criou-se a cultura de utilização de misturas abertas e/ou descontínuas, como a Camada Porosa de Atrito (CPA) ou o SMA.

Destacam-se para embasamento neste trabalho as misturas asfálticas densas e contínuas, sendo assim denominadas por apresentarem baixos valores de volume de vazios (geralmente em torno de 4%) e uma distribuição granulométrica que possui todas as frações de agregados de forma semelhante, conforme especificado anteriormente.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) adota basicamente dois tipos de mistura densa e contínua a quente, denominadas de e Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) e Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). A Figura 7 apresenta as faixas granulométricas adotadas para as misturas de CBUQ, visto que a B e a C embasaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 7: Faixas granulométricas para misturas tipo CBUQ



Fonte: Vasconcelos (2004, pg.11)

2.1.3 Ligante Asfáltico

É considerável que dentre a total malha nacional pavimentada, os pavimentos flexíveis são preponderantes, significando a totalização de 97% das rodovias brasileiras. Visto isto, entende-se o asfalto como sendo o componente principal das camadas de rolamento assim como, por vezes, em de camadas intermediárias da estrutura (ABEDA, 2010).

Ceratti e Reis (2011), descrevem o asfalto utilizado na pavimentação como sendo um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser termoviscoelástico, impermeável à água e pouco reativo. Pode-se citar diversas motivações para o uso intensivo de asfalto em pavimentação, dentre elas:

- Une os agregados, permitindo uma flexibilidade controlável;
- Durabilidade e impermeabilidade;
- Resistencia à ação de ácidos, dos álcalis e sais;
- Emprego de forma aquecido, diluído em solventes de petróleo ou emulsionado em água.
- Abeda (2010) considera os ligantes asfálticos produtos derivados do asfalto por processos industriais utilizados na pavimentação e classifica os principais tipos existentes no mercado como:

a) Cimento asfáltico de petróleo – CAP;

b) Asfalto diluído de petróleo – ADP

c) Aditivos asfálticos de reciclagem para Misturas a Quente

d) Emulsões asfálticas para pavimentação – EAP;

e) Agentes de reciclagem emulsionados – ARE

f) Asfaltos modificados por Polímeros Elastoméricos AMP – E

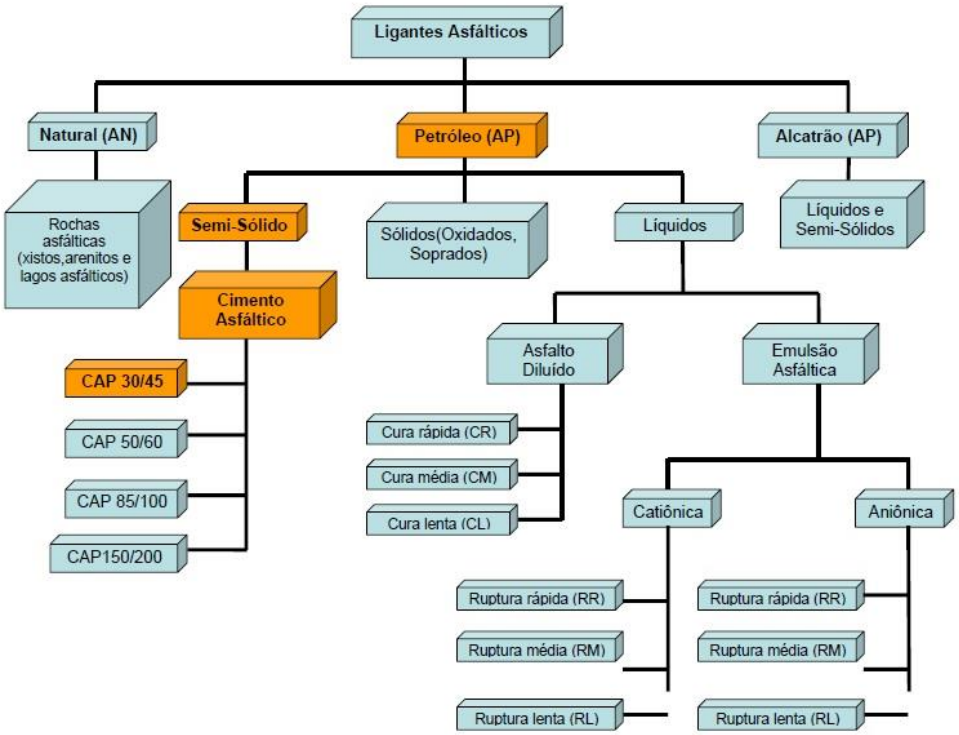
g) Asfalto modificado por Borracha Moída de Pneu – AMB

h) Emulsões asfálticas Catiônicas Modificadas por Polímeros Elástoméricos – EAP-E

A Figura 8 a seguir, apresenta o diagrama dos principais tipos de ligantes asfálticos e seus

determinados grupos, segundo a classificação do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e as definições pertinentes a cada classe de ligante asfáltico.

Figura 8: Diagrama da classificação de ligantes asfálticos segundo DNER



Fonte: Mothé (2009) adaptado DNER

2.1.3.1 Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP

Segundo a definição do *Asphalt Indutry glossary of Terms*, os cimentos asfálticos de petróleo, são caracterizados pela coloração castanho escuro a preto, constituem-se predominantemente de betumes, ocorrentes na natureza ou obtidos no processamento de petróleo. O asfalto possui proporções variáveis, com predominância de petróleo bruto e a sua utilização é cabível para pavimentação, coberturas, finalidades industriais e outros fins especiais.

Para obtenção do asfalto realiza-se o processo de destilação, no qual as frações leves, como a gasolina, diesel e querosene, são reservadas no refino do petróleo, resultando no Cimento Asfáltico de Petróleo. Com relação a sua composição, o cimento asfáltico compõe-se quase inteiramente de betume, o qual por definição, é totalmente solúvel no dissulfeto de carbono. Os asfaltos refinados são betumes quase puros e usualmente mais de 99,5% solúveis em bissulfeto de

carbono, as impurezas quando existem são inertes. (ASPHALT INSTITUTE, 2002)

Abeda (2001), diz que os CAP's na sua forma comum de utilização não são solúveis em água, apresentam-se no estado semissólido e não fluem na temperatura ambiente, necessitando de aquecimento para terem consistência apropriada e aplicação sobre o pavimento. Eles possuem propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, são flexíveis, resistentes a ação da maioria dos produtos inorgânicos e duráveis, características fundamentais para o seu desempenho como materiais de engenharia na construção e manutenção rodoviária.

Segundo a Petrobrás, o CAP deve ser homogêneo e estar livre de água, e para que seu uso seja adequado, aconselha-se o conhecimento da curva de viscosidade/temperatura deste. O seu emprego dá-se em misturas a quente, tais como os pré-misturados, areia-asfalto e concreto asfáltico.

O CAP classifica-se através do ensaio de penetração pelas normatizações DNIT-ME 155/10, ABNT 6576 e ASTM D5 em CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100, CAP 150-200. Além deste ensaio, o CAP deve obedecer intervalos de valores de outros critérios para cumprir a especificações de ductilidade, durabilidade, ponto de amolecimento, solubilidade, ponto de fulgor, entre outros.

2.2 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

O principal desígnio da dosagem de uma mistura asfáltica, conforme o Asphalt Institute (2002): é produzir uma composição que agregue trabalhabilidade satisfatória e a melhor combinação possível das seguintes características:

- Estabilidade: resistência à ação do tráfego sem sofrer distorções ou deslocamentos;
- Durabilidade: resistência à desagregação pela ação do tráfego e/ou do intemperismo;
- Flexibilidade: resistência à flexão sob ação de carga repetida, sem ocorrência de fissuras;
- Impermeabilidade: resistência à penetração e à percolação de água;
- Resistência ao atrito.

Existem diversos métodos de dosagem de misturas asfálticas, dentre os mesmos, destacam-

se o Método Hubbard-Field, Método de Hveem, Método Marshall, Método Superpave, Método de Triaxial Smith, os quais serão descritos a seguir.

2.2.1 Método Hubbard-Field

No ensaio Hubbard-Field mede-se a resistência a extrusão de corpos de prova (CP) moldados com mistura betuminosa, tendo sido um dos primeiros ensaios para avaliar as propriedades mecânicas. Tinha-se extrema necessidade quando este foi proposto de medir a estabilidade de alguns tipos de misturas betuminosas, pois a utilização dos pavimentos betuminosos difundia-se de forma rápida. (SENÇO, 2001)

O ensaio quando aplicado para misturas do tipo "*sheet-asphalt*", consiste em determinar a carga máxima resistida por um corpo de prova de 5,08cm de diâmetro e 2,54cm de altura, e forçada através de um orifício de 4,45cm de diâmetro. O ensaio acarreta um tipo de ruptura correspondente ao cisalhamento.

O autor ainda menciona que formam fixados limites, baseados em corpos de prova compactados, para misturas do tipo "*sheet-asphalt*", utilizando-se o cimento asfáltico de penetração usual e agregados acima de 65% passando na peneira nº 10 e 100% passando na peneira nº 4.

Os limites mencionados acima, com o passar do tempo, devido ao tráfego cada vez mais intenso nas estradas, foram modificados, assim como passou-se a utilizar agregados graúdos para uma melhor estabilidade. Criou-se então o ensaio Hubbard-Field Modificado, proposto aos agregados que possuem no mínimo de 35% de agregados graúdos, mantendo-se o diâmetro máximo em ¾" (19,1mm).

2.2.2 Método de Hveem

O método Hveem realiza uma análise de densidade/vazios, estabilidade e também é determinada a resistência da mistura ao inchamento em água. O mesmo, possui duas vantagens reais (MOTTA, 2000):

1ª) O método de compactação pulsante em laboratório é visto pelos técnicos como a melhor simulação do adensamento que ocorre com o CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente – em campo.

2ª) O parâmetro de resistência, a estabilidade Hveem é uma medida direta dos componentes de atrito interno da resistência de cisalhamento. Este mede a capacidade de um corpo-de-prova resistir a deformação lateral quando uma carga vertical é aplicada.

2.2.3 Método Marshall

Specht (2004) disserta que:

> O método foi desenvolvido por na década de 30 por Bruce G. Marshall, do Departamento de Transporte do Estado do Mississipi dos Estados Unidos. Esse método foi idealizado para efeito da determinação da quantidade de ligante que deveria ser usada na composição de mistura betuminosa, destinadas a serviços de pavimentação rodoviária. Durante a segunda guerra a USACE (Corpo de Engenheiros do Exército Americano), carecia de um método simples, prático e eficiente para dosagem de misturas asfálticas a quente, para uso na pavimentação de pistas de aeroportos militares.

O autor ainda menciona que a razão determinante dessa necessidade foi o crescente aumento das cargas e das pressões dos pneus contribuintes pela aviação militar, devido ao desenvolvimento de pesadas estruturas. Considerando o fato, realizou-se uma pesquisa de caráter nacional, para selecionar aparelhos de ensaio simples e de fácil transporte, para serem utilizados em campos. Para tanto, o USACE adotou o aparelho e o método de projeto de misturas betuminosas concebido por Bruce Marshall. Este método se limita a misturas betuminosas a quente, utilizando CA de petróleo de penetração compatíveis com as condições ambientais (SENÇO, 2001).

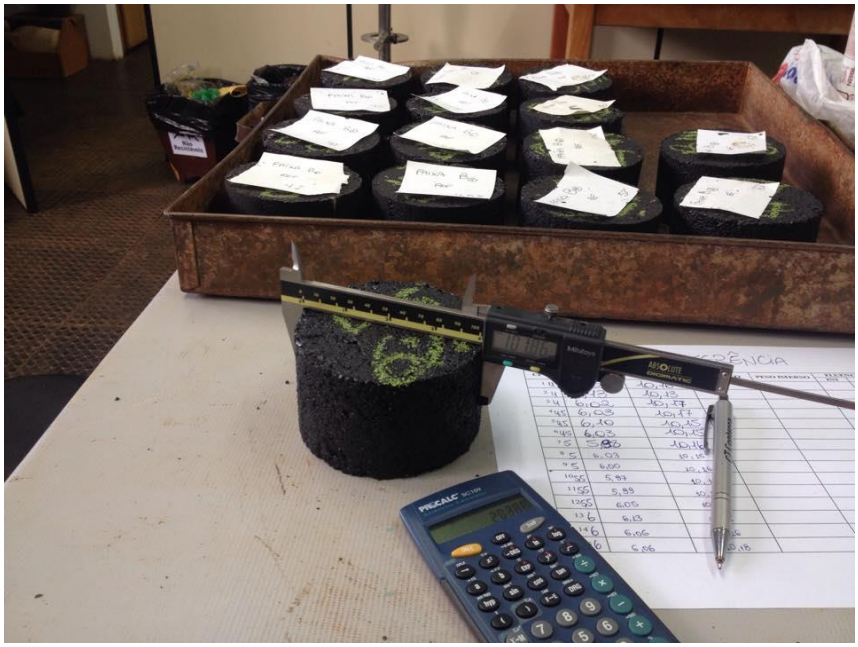
Roberts et al. (1996) *apud* Rhode (2007), relata que antes do desenvolvimento do método Superpave, aproximadamente 75% dos departamentos de estradas de rodagem dos Estados Unidos utilizavam adaptações do Método Marshall enquanto que os 25% restantes empregavam o Método de Hveem. No Brasil, o método Marshall é usado como critério na dosagem de misturas asfálticas para pavimentação e o procedimento prevê a dosagem de misturas asfálticas considerando valores admissíveis empíricos para a estabilidade e a fluência.

Após a determinação das massas específicas do CAP e das frações de agregados, da escolha das faixas granulométricas a serem utilizadas no projeto em questão e com o devido enquadramento dos materiais na mesma, segue-se a sequência de procedimentos descritos por Ceratti e Reis (2011) para dosagem Marshall:

- ligante deve estar entre 107 ºC e 177 ºC, enquanto que os agregados devem estar entre 10 ºC a 15ºC acima da temperatura estimada para o ligante.

- Adotam-se teores de asfalto para os grupos de corpos de prova (CP), sugerindo-se um teor de asfalto (T em %) para os primeiros grupos de CPs e os demais grupos com teores acima (T+0,5% e T+1,0%) e abaixo (T-0,5% e T-1,0%).
- Obtêm-se as dimensões dos CPs (diâmetro e altura) como pode ser observado na Figura 9, as massas secas, massas submersas em água, massas especificas aparentes, chegando-se a relações volumétricas típicas de dosagem.

Figura 9: Obtenção das dimensões dos CPS's



Fonte: Autoria própria

- A partir do teor de asfalto, ajusta-se o percentual em massa de cada agregado;
- Calcula-se a massa especifica máxima teórica correspondente ao teor de asfalto considerado;
- Faz-se os cálculos dos parâmetros de dosagem para cada corpo de prova;

Posteriormente a última etapa concluída, determinam-se os parâmetros mecânicos definidos pela norma DNER-ME 43/95, estabilidade e fluência, conforme ilustrado na Figura 10. A primeira definida como a resistência máxima a compressão radial apresentada pelo corpo de prova e, a segunda como a deformação totalitária dada pelo corpo de prova desde a aplicação da carga inicial nula a máxima.

Figura 10: Obtenção da estabilidade e fluência do CP

Fonte: Autoria própria

Estudos realizados por Nascimento (2008) e Cervo et al. (2014) propõem a comparação do método de dosagem Marshall com o Superpave, constatando-se que o teor de projeto de ligante é menor na dosagem Superpave, por este ser mais sensível à alteração de ligante durante sua compactação. Os estudos ainda verificam que em ambas a metodologias uma curva decrescente de volume de vazios com o teor de ligante, ou seja, à medida que se acresce o teor de ligante existe um decréscimo no volume de vazios. Esse fato é ocasionado devido a maior presença de ligante nos espaços deixados pelos agregados.

Existem várias formas de se determinar o teor de projeto utilizando a metodologia Marshall. De acordo com a NAPA (*National Asphalt Pavement Association*), a escolha do teor é baseada apenas no valor de volume de vazios (Vv) igual a 4%. Destaca-se que no Brasil tem-se adotado este parâmetro em conjunto com outros como a estabilidade Marshall, o RBV (Relação Betume Vazios) da mistura e a resistência à tração indireta (RT).

A especificação de serviço de concreto asfáltico mais usada no país (DNIT ES-031/04) apresenta os requisitos de dosagem de concreto asfáltico mostrados na Tabela 1 como referencia

para projetos. (BERNUCCI *et al.* 2008); (CAVALCANTI, 2010).

Tabela 1: Valores recomendados de parâmetros para dosagem

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25ºC, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65	0,65

Fonte: DNIT ES-031/04

2.2.4 Método Superpave

O método em questão foi criado para substituir os métodos de Hveem e Marshall, utilizados nos Estados Unidos entre 1940 e 1990, com a finalidade de se garantir mais precisão em suas análises. O Superpave (*Superior Performance Asphalt Pavements* – Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior) foi um dos resultados finais do SHRP e concebido para auxiliar na seleção de materiais e projeto de misturas. Este método especifica materiais, projeta e analisa misturas asfálticas e antecipa desempenho de pavimentos compreendendo metodologias e critérios (MARQUES 2004); (CERATTI e REIS 2001).

A metodologia em questão, compreende o dimensionamento de misturas adaptadas aos requisitos de desempenho ditadas pelo tráfego e clima. Ele promove a escolha e a combinação do ligante asfáltico, agregados e algum modificante necessário para alcançar o nível solicitado para o desempenho do pavimento (MOTTA, 2000).

Bernucci *et al.* (2008), difere os métodos Marshall e Superpave citando duas distinções básicas entre as mesmas. A primeira faz menção a forma de compactação, enquanto na dosagem Marshall realizada por impacto (golpes), na dosagem Superpave é realizada por amassamento (giros). A segunda, diz respeito a forma de escolha da granulometria da mistura de agregados, na qual a metodologia Superpave incluiu conceitos de pontos de controle e zonas de restrição.

O estudo realizado por Marques *et al.* (2001), comparando os métodos, Marshall e

Superpave, mostra que os modos de compactação e energia distintos resultaram em arranjos do esqueleto mineral distintos, apesar da utilização de teores de asfalto praticamente iguais. Os vazios do agregado mineral (%VAM) obtidos pela compactação giratória mostraram-se inferiores ao obtido pela compactação por impacto. Não obstante, os dois métodos tenham resultado em teores praticamente idênticos de ligante, foram obtidas características mecânicas distintas, sendo a dosagem Superpave mais conservativa.

Marques (2004) observa que o procedimento de dosagem Superpave, utiliza critérios volumétricos, assim como o Marshall, para a definição da dosagem. Infere também que o procedimento, embora indicar outros tipos de avaliação como a sensibilidade à água e ensaios de desempenho, também não avalia as características resilientes da mistura.

2.2.5 Método de Triaxial Smith

O método Triaxial Smith tem sido bastante usual, e, sobressai-se por melhor correlacionar o confinamento, praticamente total, que as laterais de uma porção de material de um maciço recebe na natureza com as condições de confinamento no laboratório, ao se aplicar uma pressão lateral, os corpos-de-prova e, depois submetê-los a pressões verticais (SENÇO, 2001).

O mesmo autor implica que o ponto impresumível dos métodos baseados em experiências desenvolvidos, é o fato de serem restritos as considerações para as quais se fizeram correlações dos resultados laboratoriais e aqueles que são observados em campo.

3 MÉTODOS DE PESQUISA

3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Esta pesquisa classifica-se como básica.

Quanto aos procedimentos é uma pesquisa experimental.

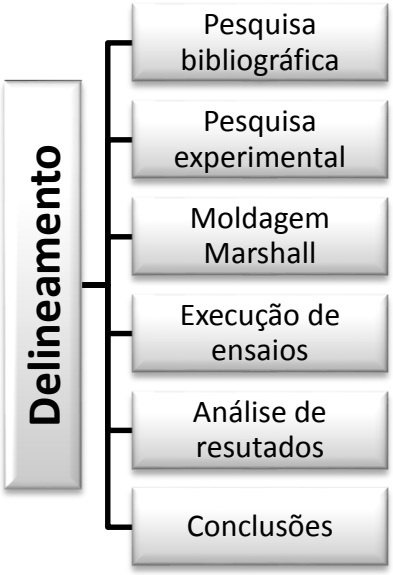
Do ponto de vista da forma de abordagem a pesquisa pode ser classificada como quantitativa.

Primeiramente concluiu-se a elaboração da etapa de revisão bibliográfica desta pesquisa para então obtenção dos materiais necessários para prática dos ensaios (coleta dos agregados, obtenção da cal e ligante asfáltico). Após a caracterização dos materiais foram feitas as misturas e suas respectivas análises laboratoriais para a avaliação de suas propriedades físico-mecânicas relevantes.

3.2 DELINEAMENTO

O trabalho realizou-se a partir das etapas descritas seguir, as quais estão representadas no esquema da Figura 11.

Figura 11: Delineamento da pesquisa



Fonte: Autoria própria

Na pesquisa bibliográfica buscou-se aprofundar os conhecimenos gerais sobre os pavimentos e revestimentos asfálticos, suas composições e a relevância dos agregados na otimização dos resutados operacinais dos pavimentos, por meio de livros, normas, manuais e especificações técnicas.

No estágio seguinte, propôs-se a definição dos materiais que serão utilizados para entao a preparação das misturas e seus devidos ensaios, os quais realizaram-se no Laboratório de Engenharia Civil da Unijui seguindo as determinações normativas epecíficas para cada ensaio.

Com os resutados obtidos a partir dos ensaio e da moldagem, fez-se uma análise em comparação com às especificações exigidas pelos órgãos de controle. Por fim, na última etapa obtiveram-se as conclusões dos resultados e as considerações finais sobre o assunto.

Para os ensaios serão moldados um total de 174 corpos de prova referentes as 6 misturas realizadas. As mesmas foram denominadas de BINF (mistura faixa B limite inferior), BREF (mistura faixa B de referência), BSUP (mistura faixa B limite superior), CINF (mistura faixa C limite inferior), CREF (mistura faixa C de referência) e CSUP (mistura faixa C limite superior). A Tabela 2 traz as quantidades e ensaios submetidos nesta pesquisa.

Tabela 2: Número de corpos de prova

ENSAIOS	**Binf**	**BREF**	**Bsup**	**Cinf**	**CREF**	**Csup**
Marhsall	15	15	15	15	15	15
Resistência a tração	3	3	3	3	3	3
Módulo de resiliência	3	3	3	3	3	3
SUB TOTAL	21	23	23	23	23	23
TOTAL	**174**					

Fonte: Autoria própria

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados para a realização dos ensaios laboratoriais foram: agregados minerais, cal e o cimento asfáltico de petróleo.

3.3.1 Caracterização

3.3.1.1 Agregados minerais

A amostra, com a qual os ensaios foram realizados, constituiu-se da reunião de várias amostras parciais, retiradas de vários pontos do lote submetido à amostragem, para representar, em média, as características do material. De maneira total, os agregados utilizados na pesquisa foram coletados, transportados e posteriormente estocados conforme diretrizes desta norma.

Os agregados britados que foram analisados para compor a mistura serão: brita ¾”, brita 3/8” e o pó de pedra (provenientes do britador de impacto VSI), brita 1 e pó de pedra (retiradas do britador tipo cone). Todos os agregados provieram de rocha basáltica.

As Figura 12 e Figura 13 ilustram o tamanho dos grãos e o aspecto visual de cada um dos materiais utilizados na mistura. Os agregados coletados foram submetidos a ensaios laboratoriais no Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ.

Os materiais pétreos utilizados na pesquisa provieram da empresa CONSTRUBRÁS – Construtora de Obras Rodoviárias Ltda, com sede no munícipio de Barra Funda – RS. A coleta dos agregados, conforme ilustrado na Figura 14, foi realizada na unidade de produção do município de São Luiz Gonzaga – RS, devido à localidade desta.

Figura 12: Aparência dos agregados britador CONE

Fonte: Autoria própria

Figura 13: Aparência dos agregados -CONE

Fonte: Autoria própria

Figura 14: Coleta dos materiais pétreos

Fonte: Autoria própria

3.3.1.2 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico empregado neste estudo foi o CAP 50/70, produzido na Refinaria Alberto Pasqualini – REFAP, sediada em Canoas – RS. A escolha deste tipo de cimento asfáltico, foi motivada por convencionalmente ser utilizado em obras de pavimentação no estado do Rio Grande do Sul e no Brasil.

3.3.1.3 Cal hidratada

A partir de 2009 o DNIT tem indicado a inclusão de cal em misturas asfálticas a serem utilizadas nas rodovias federais brasileiras, contudo, não especifica a natureza mineral da cal e nem faz distinção em relação ao tipo de agregado. Resultados obtidos por Boeira (2014), afirmam que analisando a influência promovida pela cal nas misturas, observa-se a possibilidade de produção de composições de elevado módulo e desempenho através da incorporação de cal hidratada. A adição desse material tem influência positiva, de forma que os módulos de resiliência e resistência a tração foram superiores quando comparados com a mistura de referência.

A cal do tipo dolomítica de classe dois – CHII foi a agregada , esta compõe-se de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, apresenta forma de pó e estado físico sólido, densidade: 0,49 a 0,54 ton/m³, ph equivalente a 12 e sua aparecia visual pode ser observada na Figura 15. A procedência é da empresa FIDA de Caçapava do Sul – RS. Embora sua composição apresente menor teor de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e de estudos evidenciarem a melhor eficiência da cal calcítica, é mais usual, acessível e desencadeia as propriedades desejadas a mistura.

Figura 15: Aparência da cal utilizada

Fonte: Autoria própria

3.4 MÉTODOS LABORATORIAIS

3.4.1 Análise granulométrica

Como já mencionado na revisão bibliográfica desta pesquisa, a distribuição granulométrica implica efetivamente no comportamento de misturas e é uma de suas principais características.

Para tanto, realizou-se a análise granulométrica dos materiais escolhidos para este estudo a fim de verificar seu enquadramento nestas faixas de trabalho determinadas pela norma DNIT – ES 031/2006, (Pavimentos Flexíveis – Especificações de Serviço).

Determinou-se a distribuição dos agregados por meio de amostras secas fracionadas através de uma série de peneiras com abertura de malhas distintas entre si. Considerando que, a massa da porcentagem de partículas retidas em cada peneira é determinada e comparada com a massa total da amostra. As peneiras adotadas para execução da granulometria deste estudo estão representadas na Tabela 3 o processo de peneiramento seguiu especificações da DNER – ME 080/1994.

Tabela 3: Série de peneiras para granulometria

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	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%
N° 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
N° 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
N° 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
N° 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
N° 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: DNIT ES-031/04

3.4.2 Densidades especificas/massas específicas

3.4.2.1 Agregados graúdos

As relações entre quantidade de matéria (massa) e volume são denominadas massas especificas. Existem três tipos de massas especificas de acordo com Bernucci et al. (2008):

- Real (Dr): dada como a relação entre a massa seca e o volume real.

- Aparente (Dap): é a relação entre a massa seca e o volume aparente do agregado (inclui volume do agregado solido mais o volume dos poros superficiais contendo água).
- Efetiva (Def): a relação representa a massa seca e o volume efetivo (volume do agregado sólido somado ao volume de poros permeáveis à agua não preenchidos por asfalto).

A Figura 16 abaixo representa de forma ilustrativa os volumes dos materiais.

Figura 16: Volume real, aparente e efetivo

Fonte: Bernucci et al. (2008, p.145)

Como procedimento para determinação das densidades (aparente e real) do agregado graúdo e sua absorção (a), quantidade de água que o agregado absorve quando imerso, seguiu-se recomendações da norma DNER 081/1998. As equações a seguir correspondem respectivamente a densidade aparente, absorção e densidade relativa do agregado

$$Dap = \frac{Ms}{Mh-L} \qquad [3.1]$$

$$a = \frac{Ph-Ps}{Ps}\ x\ 100 \qquad [3.2]$$

$$Dr = \frac{Ps}{Ps-Pi} \qquad [3.3]$$

Onde:

Dap = Densidade aparente;

Def = Densidade efetiva;

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

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

L = leitura na balança correspondente ao agregado submerso, em g;

Dr = Densidade real

A = Absorção do agregado, em porcentagem

Ph = Peso úmido, em g;

Ps = Peso seco, em g;

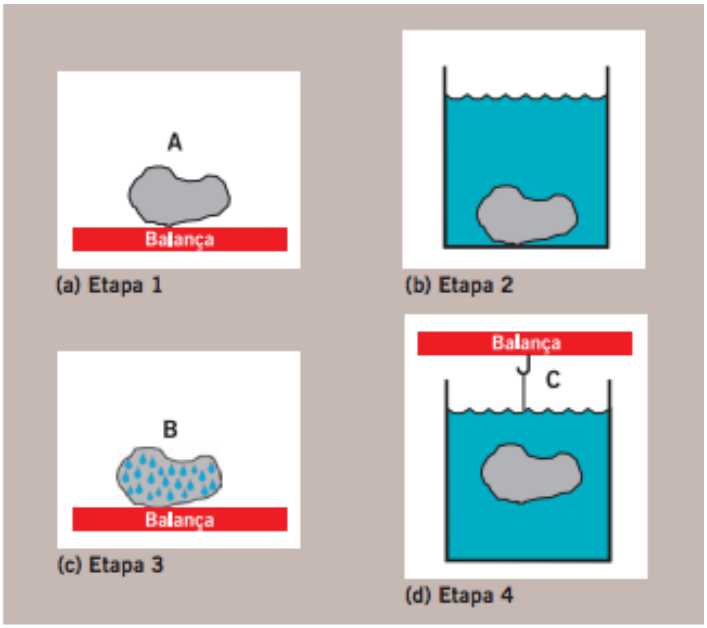
Pi = Peso imerso, em g;

O para determinação da densidade consiste basicamente nas seguintes etapas mencionadas abaixo:

- Lavagem de duas amostras e secagem por um período de 24 horas.
- Após pesagem das amostras, obtêm-se o peso seco (Ps)
- Imergir por 24 horas
- Passado esse tempo, retirar os agregados das bandejas, tirar levemente a umidade destes e os pesa, para obter o peso superficialmente úmido (Ph).
- Por fim, põe-se as amostras no cesto metálico onde se obtém o peso imerso (Pi).

A Figura 17 ilustra de forma simplificada as etapas descritas acima para execução do ensaio do cesto metálico.

Figura 17: Etapas para ensaio do agregado graúdo



Fonte: Bernucci et al. (2008, p.148)

3.4.2.2 Agregados miúdos

Para os grãos menores do que 4,8mm, determinou-se a densidade real de acordo com os procedimentos prescritos pela DNER-ME 084/95, com o auxílio de um picnômetro (Figura 18). Ceratti e Reis (2011) explicam que a condição de superfície saturada seca não é observada facilmente como nos agregados graúdos, como pode ser vista na Figura 19, sendo a absorção das partículas miúdas não determinadas pela norma em questão.

A densidade real deu-se através da relação da massa de determinado volume da amostra para massa de igual volume de água destilada, conforme a:

$$Dr = \frac{B-A}{(D-A)-(C-B)} \qquad [3.4]$$

Onde:

Dr = densidade real do agregado miúdo;

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

B = massa do picnômetro mais amostra, em g;

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

D = massa do picnômetro cheio d`água, em g;

Figura 18: Agregados miúdos submetidos a vácuo

Fonte: Autoria própria

Figura 19: Picnômetro com amostra não identificável visualmente

Fonte: Autoria própria

3.4.3 Densidades para misturas asfálticas

Tendo em visto que os materiais constituem-se por díspares frações granulométricas, dificultando assim a determinação da massa específica dos grãos e a absorção, recomenda-se a possibilidade de computar um valor para a massa específica média através de um valor ponderado das várias frações da mistura ou utilizando a metodologia Rice.

- **Determinação DMT – ponderação de massas**

A determinação da densidade máxima teórica (DMT) é habitualmente efetivada pelo meio de uma ponderação das massas específicas reais dos materiais que compõem a mistura em questão. Tendo-se as todas as massas específicas reais dos materiais e as suas proporções na mistura asfáltica, realizou-se uma ponderação para a determinar a DMT para os diferentes percentuais de ligante.

A equação propicia o cálculo da DMT através das massas em relação a mistura e das massas específicas reais dos materiais constituintes e está descrita abaixo.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{Ga}+\frac{\%Ag}{GAg}+\frac{\%Am}{GAm}+\frac{\%f}{Gf}} \qquad [3.5]$$

Na qual:

%a = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica;

%Ag, %Am, %f = porcentagem de agregado graúdo, miúdo e fíler, respectivamente, expressas em relação à massa total da mistura;

Ga, Gag, Gam, Gf = massas especificas reais do asfalto, agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, respectivamente.

Esta expressão pode ser usada com as massas específicas efetivas dos agregados ou até a média entre as massas específicas reais e aparentes explica Bernucci et al. (2008).

- **Determinação Gmm, Dmm ou massa especifica RICE**

Outra forma de determinação da massa específica máxima medida (Gmm, Dmm) ou densidade específica pode ser determinada em laboratório seguindo a ASTM 2041 (2000). No Brasil não há ainda método normatizado para essa determinação, embora alguns órgãos e instituições de pesquisa já adotem alguma variação das referidas normas norte-americanas.

O procedimento de ensaio seguiu a norma citada anteriormente, e sua vantagem, comparado ao método de ponderações, está na obtenção da massa específica da mistura asfáltica sem a necessidade da obtenção das massas específicas dos seus constituintes separadamente, além de já considerar a absorção de ligante pelos agregados. A Gmm é determinada conforme as variáveis indicadas na equação seguinte:

$$Gmm = \frac{A}{A+B-C} \times 0{,}9971 \qquad [3.6]$$

Onde:

A = massa da amostra seca em ar, g;

B = massa do recipiente com volume completo com água, g;

C = massa do recipiente + amostra submersa em água, g.

3.4.4 Equivalente de areia

Alguns materiais deletérios tais como, vegetação, conchas e grumos de argila presentes

sobre as partículas, tornam agregados inadequados para utilização nos revestimentos asfálticos, a menos que esses materiais representem pequenas quantidades. Bernucci et al. (2008), ressalta que a limpeza dos materiais pode ser verificada visualmente mas uma análise granulométrica com lavagem é mais eficiente.

A especificação da norma DNER-EM 054/1997 prescreve o método para obtenção do valor do equivalente de areia (EA) de solos ou agregados miúdos, usando reagentes e soluções químicas específicas. Define-se como a relação volumétrica que corresponde a razão entre a altura do nível superior de areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo. A realização do ensaio se dá numa proveta sob condições estabelecidas na norma citada.

Para realização do ensaio, reuniu-se uma amostra de agregados com tamanhos de partículas menores do que 4,8mm junto a uma solução de cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído é mantida em repouso por tempo determinado Figura 20. Determina-se a altura do material floculado em suspenção e a altura de agregado depositado por sedimentação (Figura 21).

Figura 20: Solução aquosa e agregados miúdos em repouso

Fonte: Autoria própria

Figura 21: Leitura das suspensões argilosa e arenosa

Fonte: Autoria própria

Considera-se ara utilização do agregado em concreto asfáltico, o equivalente de areia deve ser de pelo menos 55% e o cálculo se dá de acordo com a equação:

$$EA = \frac{leitura\ do\ topo\ de\ areia}{leitura\ do\ topo\ de\ argila}\ x\ 100 \qquad [3.7]$$

3.4.5 Resistência a tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral ou tração indireta, conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro” foi desenvolvido inicialmente pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para determinar a resistência a tração de corpos de prova de concreto através da solicitação estática.

Conforme preconiza a DNIT-ME 136/2010, este ensaio determina a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas, por meio do ensaio de compressão, o corpo de prova para o ensaio pode ser obtido diretamente na pista por extração, por meio de sonda ou moldado em laboratório.

Os corpos de prova devem possuir forma cilíndrica, altura entre 3,50cm e 6,50cm e

diâmetro de 10cm. Antecedendo o rompimento dos corpos de prova, deve ser realizada a medição da altura e do diâmetro destes, para que então, sejam estabilizados em temperatura e tempo determinamos em norma (Figura 22).

Figura 22: Estabilização dos CP

Fonte: Autoria própria

Aplicam-se então cargas gradativas crescentes na prensa (Figura 23), até que esta cause a ruptura do corpo de prova, em seguida o rompimento tem- se o valor da resistência do corpo de prova. A fórmula para cálculo do Rt está descrita abaixo:

$$RT = \frac{2F}{\pi.D.h} \qquad [3.8]$$

Onde:

RT= Resistência a tração

F= força aplicada

D= diâmetro do CP

h= altura do CP

Figura 23: Ensaio resistência tração

Fonte: Autoria própria

3.4.6 Módulo de resiliência

Francis Hveen, adotou o nome “resiliência”, que é definido classicamente como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. O mesmo também criou o equipamento para medição das deformações através de sensores eletromecânicos, o estabilômetro. (BERNUCCI et al., 2008)

A norma DNIT-ME 135/2010, estabelece que o módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada.

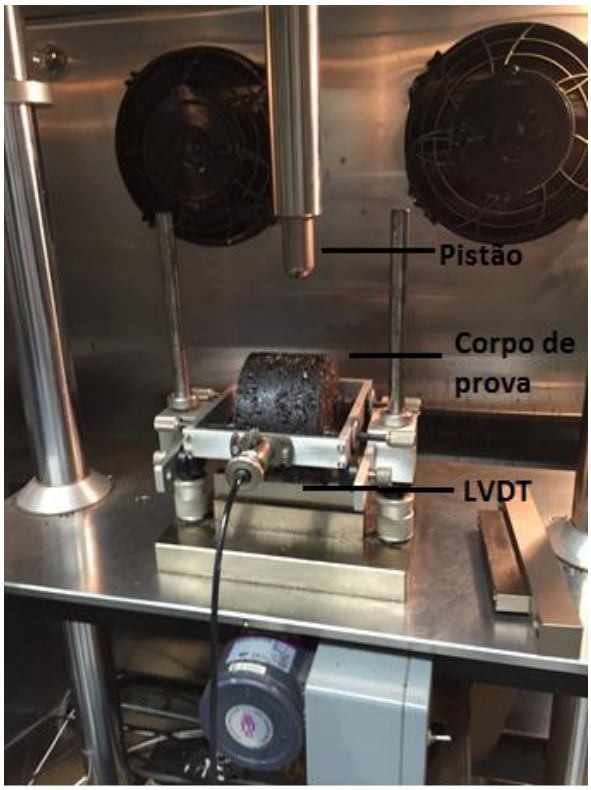
Bernucci et al. (2008) menciona que o módulo de resiliência de misturas asfálticas a quente pode variar com o tipo de mistura, a faixa granulométrica, o tipo de ligante, as propriedades volumétricas, a energia de compactação, a temperatura de compactação e a temperatura da realização do ensaio, entre outras variáveis.

Utilizam-se para este ensaio corpos de prova cilíndricos de altura entre 3,50cm e 6,50cm e diâmetro de 10cm moldados conforme a metodologia Marshall, a temperatura de 25°C. O equipamento constitui-se de uma estrutura metálica, um pistão que proporciona carregamento

repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático unido a um regulador de tempo de e frequência de 1 Hz, conforme mostrado na Figura 24. A amostra ensaiada sofre deformações horizontais medidas através de um transdutor tipo LVDT (*Linear Variable Differencial Transducer*) ligado a um microcomputador.

Seguindo recomendações da norma citada neste item, para execução do ensaio utiliza-se a presa para acomodação dos corpos de prova, e, como medida de prudente, deve-se observar o ajuste do pistão de carga para o contato com o corpo de prova, objetivando-se o melhor registro possível.

Figura 24: Equipamento para ensaio módulo de resiliência



Fonte: Autoria própria

3.5 RELAÇÕES PARA DOSAGEM DA MISTURA

3.5.1 Relação betume x Volume de vazios

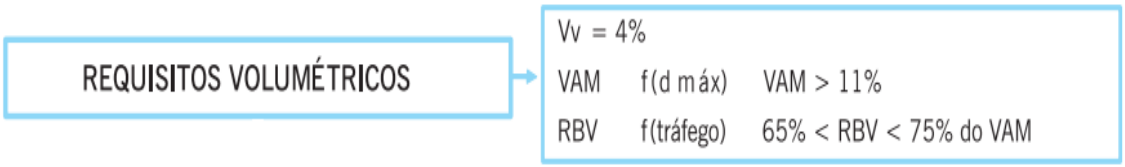
O volume de vazios é um dos parâmetros mais importantes para obtenção de uma boa dosagem, sendo imprescindível para a escolha do teor de asfalto na mistura. Esse parâmetro é influenciado diretamente pela densidade máxima teórica (DMT) e da massa especifica aparente da mistura (Gmb).

A afinidade estabelecida entre o betume e o volume de vazios, é dada entre a relação do volume de vazios nos agregados minerais (VAM) e o volume de vazios na mistura asfáltica compactada. A equação abaixo apresenta a relação matemática para o cálculo da relação betume/ volume de vazios.

$$RBV = 100 \times (\frac{VAM - Vv}{VAM}) \qquad [3.8]$$

A *Dirección Nacional de Vialidad* (1998) determina que os vazios para mistura de camada de concreto asfáltico deve situar-se entre 3 e 5%, enquanto que, a relação betume/vazios para CA deve obedecer a ordem de 70 a 80%. Bernucci et al. (2008), apresenta valores condizentes com estes para os requisitos volumétricos, de acordo com o esquema da Figura 25, assim como os que serão adotados nesta pesquisa para as faixas B e C do DNIT conforme a Tabela 4.

Figura 25: Requisitos volumétricos para mistura



Fonte: Bernucci et al. (2008, p.233)

Tabela 4: Limites de Vv e RBV para concreto asfáltico

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: Bernucci et al. (2008, p.225)

3.5.2 Relação estabilidade x fluência

Ceratti e Reis (2011) descrevem que:

> [...] a estabilidade é a carga máxima resistida pelo corpo de prova antes de rompida, definida como um descolamento ou quebra do agregado de modo a causar diminuição de carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante ou quebra do agregado de modo a causar diminuição na carga necessária (0,8mm/segundo); e a fluência é o deslocamento máximo apresentado pelo CP correspondente a aplicação da carga máxima.

Sobre esta relação, a norma da *Dirección Nacional de Vialidad* (1998) especifica que para misturas betuminosas deve-se obedecer fluências entre 2mm a 4,5mm para estabilidade (mínima) de 800kg.

Ressalva-se ainda, que para camadas de concreto asfáltico a relação estabilidade/fluência deve estar entre 2100kg/cm e 4000kg/cm, devendo-se evitar tendências que alcancem a estabilidade máxima coincidentes com fluência mínima.

3.5.3 Relação resistência a tração x Módulo de resiliência

Muitos autores apresentam a relação MR/RT como um parâmetro de comparação entre as misturas no que diz respeito ao comportamento à fadiga (trincamento). A norma DNER PRO 269/94 sugere que misturas com relações MR/RT da ordem de 5000 apresentam um bom comportamento estrutural, ou seja, são flexíveis enquanto possível e tem boa resistência a tração. Logo, para uma mesma RT, uma relação MR/RT menor é uma vantagem, porque permite o uso de camadas menos espessas para um a mesma vida de fadiga.

Esta razão tem sido utilizada usada como um apontadora da vida de fadiga de misturas asfálticas, visto que ela acrescenta informações de rigidez e resistência. É mais desejável um valor pequeno desta razão, pelo fato de obter-se uma baixa rigidez (para evitar elevada absorção de tensões, que levam ao trincamento prematuro do revestimento), e ainda, uma alta resistência à tração, uma vez que de maneira geral a maior resistência na ruptura é adjunta a uma maior resistência à fadiga (BERNUCCI et al., 2008).

Além do valor médio proposto pela norma citada, desenvolveram-se outros modelos de correlações, como a proposta por Motta e Pinto (1994), a qual adota um valor de 4385 para a relação, ou ainda, sugerido por Motta (1998) para misturas com polímero uma relação equivalente a 3000 a 3500.

3.5.4 Relação fíler x betume

Segundo Silva (2005), o fíler colocado na mistura betuminosa tem essencialmente duas funções, uma função estrutural de preenchimento dos vazios, ocasionados pelos componentes (agregados) mais grossos da composição. O outro emprego diz respeito a função de interação com o betume, esta faz com que haja formação do mastique betuminoso.

Em estudos mais aprofundadas explica-se que a quantidade de betume para envolver o fíler varia de acordo com o tipo deste, o fíler calcário por exemplo, apresenta um mastique mais grosso, logo, a quantidade de betume para envolver o fíler calcário é inferior ao tipo granítico.

De forma geral, considera-se a proporção pó/ligante como a relação entre o teor de material passante na peneira nº200 (fíler) e o teor de ligante, parâmetro que deve manter-se entre 0,6% e 1,2% (BERNUCCI et al. 2008).

4 RESULTADOS

Neste capítulo da pesquisa apresentam-se e discutem-se os resultados dos ensaios realizados para com a dosagem das misturas de concreto asfáltico convencional moldadas nas duas faixas propostas, B e C do DNIT.

Optou-se pela realização de ensaios que caracterizassem a mistura de forma mecânica, estrutural e também física seguindo-se para todas considerações as normativas de órgãos rodoviários vigorantes.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Análise granulométrica

Em conformidade com a metodologia descrita anteriormente, as peneiras utilizadas na dosagem seguiram especificação do DNIT 031/2006, enquanto que, o método de realização da granulometria decorreu do DNER – ME 080/1994, norma esta, que preconiza a realização da granulometria com lavagem para que o pó existente entre os grãos seja eliminado e posteriormente os mesmos garantam maior aderência com o cimento asfáltico.

Procedido o peneiramento isolado de cada material, formulou-se a curva granulométrica de cada um dos constituintes da mistura, agregados britados e material de enchimento (cal). A partir desta caracterização segmentou-se à dosagem das misturas à serem analisadas mecânica e estruturalmente. É de importante respaldo ainda, lembrar que a diferença entre as duas faixas quanto a analise granulométrica esta no fato da utilização da peneira ½” para faixa C. Estas caracterizações serão descritas nos itens a seguir.

4.1.1.1 Granulometria dos materiais pétreos e cal

Conforme apresenta a Tabela 5 e o Gráfico 1 os materiais pétreos apresentam características distintas entre si.

A brita nº 1 (britador cone), caracteriza-se como material graúdo e de granulometria fechada ou de graduação uniforme em conformidade com o terno utilizado na revisão bibliográfica desta pesquisa, sua maior parte de partículas encontra-se em uma faixa bastante estreita. O material ficou retido em praticamente sua totalidade em duas peneiras apenas, na peneira ¾" (19,1mm) e peneira ½ (12,7mm).

A brita denominada ¾" (britador VSI) apresentou uma curva íngreme. Assim como a brita nº1, caracteriza-se como material graúdo e de granulometria fechada, e fica retido praticamente na peneira 3/8" (9,5mm) e peneira ½ (12,7mm).

A brita 3/8” (britador VSI) também apresenta a mesma granulometria graúda, entretanto seu material se mantém retido entre as peneiras 4" (4,8mm) e 10" (2mm).

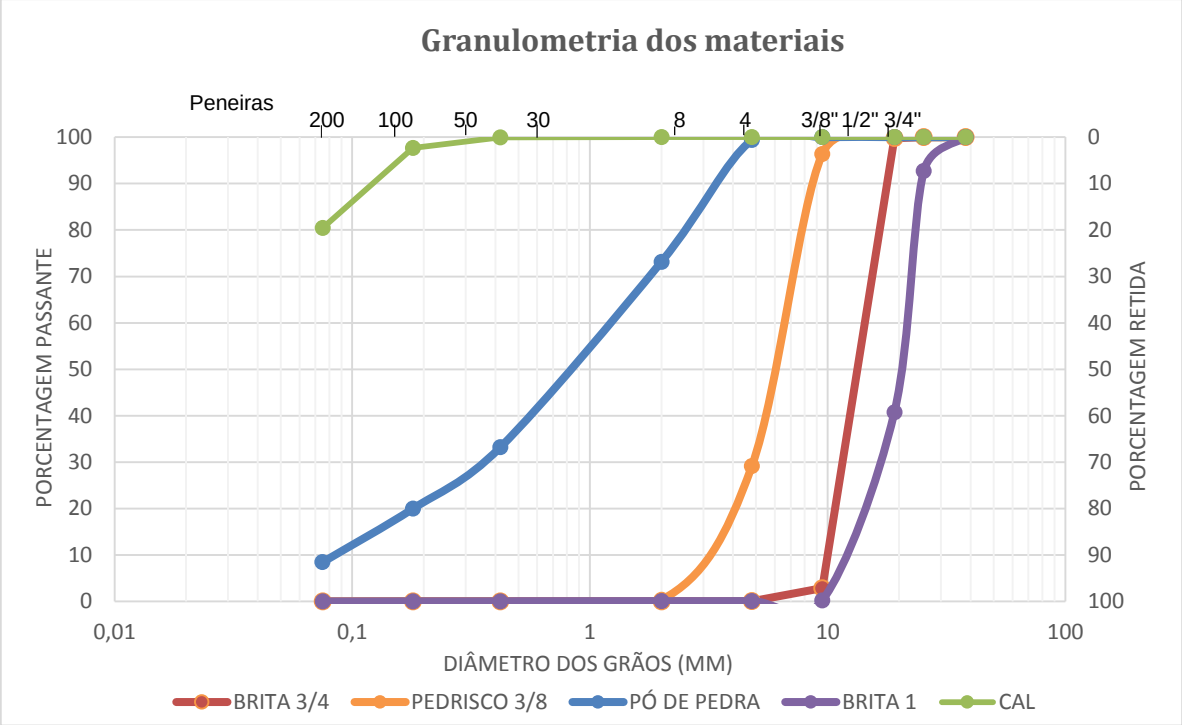
O pó-de-pedra (britador VSI) e a cal hidratada, diferentemente dos outros materiais analisados, apresentaram uma granulometria miúda, visivelmente com grande porcentagem de finos. O pó tem maior distribuição entre as peneiras e é praticamente 100% passante na peneira nº4, apresentando desta forma uma curva granulométrica denominada aberta e sua distribuição contemplou as peneiras n°10, n°40, n°80, n°200. Enquanto que a cal, caracteriza-se como material de enchimento e portanto teve sua porcentagem mais significativa passando na peneira de malha nº 200.

Tabela 5: Porcentagem média passante de cada material

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA						
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**
1 1/2"	**38,1**	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1	**25,4**	92,69	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	**19,1**	40,73	99,79	100,00	100,00	100,00
1/2"	**12,7**	1,08	40,81	100,00	100,00	100,00
3/8"	**9,5**	0,21	2,86	96,40	100,00	100,00
n°4	**4,8**	0,07	0,07	29,13	99,38	100,00
n°10	**2,0**	0,06	0,02	0,32	73,17	100,00
n°40	**0,42**	0,03	0,01	0,03	33,21	99,95
n°80	**0,18**	0,02	0,01	0,02	19,97	97,71
n°200	**0,075**	0,00	0,00	0,00	8,44	80,48

Fonte: Autoria própria

Gráfico 1: Distribuição granulométrica dos materiais



Fonte: Autoria própria

4.1.2 Massa específica e absorção de água dos materiais

Dividiu-se as densidades das misturas de acordo com a granulometria dos seus materiais constituintes e, seus valores foram obtidos por meio das fórmulas apresentadas na metodologia desta pesquisa. A parte de material graúdo foi preconizada pela norma DNER – ME 081/1998 como pode ser observado na Tabela 6, Tabela 8 e Tabela 10, enquanto que a absorção dos mesmos foi calculada por meio da NBR NM 53/2003, como pode ser visto nas tabelas Tabela 7, Tabela 9 e Tabela 11.

Tabela 6: Massa específica da Brita nº 1

Densidade Real Agregado Graúdo - DNER-ME 081/98			
AMOSTRA 1 **(g)**		AMOSTRA 2 **(g)**	
m	1789	m	1760
ms	1802	ms	1770
ma	1189,47	ma	1169,86
d	2,920	**d**	2,933
da	2,921	**da**	2,932
MÉDIA D		**2,926**	
Diferença d		0,012	

Fonte: Autoria própria

Tabela 7: Absorção da Brita nº 1

Absorção de Água - NBR NM 53/2002			
AMOSTRA 1		AMOSTRA 2	
m	1309,86	**m**	1249,47
ms	1322,58	**ms**	1261,73
a	0,971	**a**	0,981
MÉDIA ABSORÇÃO		**0,976**	
Diferença Absorção		0,010	

Fonte: Autoria própria

Tabela 8: Massa específica Brita ¾"

Densidade Real Agregado Graúdo - DNER-ME 081/98			
AMOSTRA 1		**AMOSTRA 2**	
m	1789	**m**	1760
ms	1802	**ms**	1770
ma	1189,47	**ma**	1169,86
d	2,921	**d**	2,933
da	2,921	**da**	2,933
MÉDIA D		**2,927**	
Diferença d		0,012	

Fonte: Autoria própria

Tabela 9: Absorção da Brita ¾”

Absorção de Água - NBR NM 53/2002			
AMOSTRA 1		**AMOSTRA 2**	
m	1789	**m**	1760
ms	1802	**ms**	1770
A	0,727	**A**	0,568
MÉDIA ABSORÇÃO		**0,647**	
Diferença Absorção		**0,158**	

Fonte: Autoria própria

Tabela 10: Massa específica da Brita 3/8"

Densidade Real Agregado Graúdo - DNER - ME 081/1998			
AMOSTRA 1		**AMOSTRA 2**	
m	1751	**m**	1773
ms	1777	**ms**	1789
ma	1164,78	**ma**	1179,05
d	2,860	**d**	2,907
da	2,860	**da**	2,907
MÉDIA D		**2,883**	
Diferença d		0,047	

Fonte: Autoria própria

Tabela 11: Absorção da Brita 3/8"

AMOSTRA 1		AMOSTRA 2	
m	1751	m	1773
ms	1777	ms	1789
A	1,485	**A**	0,902
Média Absorção		**1,194**	
Diferença Absorção		0,582	

Fonte: Autoria própria

A massa especifica do material miúdo, ou seja, pó de pedra, foi verificada através da norma DNER-ME 084/1995 pelo método de ensaio do picnômetro e seus resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Massa específica do pó de pedra

Densidade Real do Agregado Miúdo - DNER-ME 084/95			
AMOSTRA 1		**AMOSTRA 2**	
a	141,68	**a**	131,2
b	333	**b**	328,79
c	776,27	**c**	751,2
d	649,98	**d**	620,55
D25	2,942	**D25**	2,952
MÉDIA		**2,947**	
DIFERENÇA		0,0097	

Fonte: Autoria própria

A cal, por ser um material mais fino, teve sua densidade determinada através do frasco de Le Chatelier, conforme preconizado pela norma de cimento Portland NBR NM 23/2000. Os resultados referentes a cal estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Massa específica da cal

DENSIDADE CAL - Le Chatelier	
AMOSTRA 1	**AMOSTRA 2**
v1= 0,4ml	v1= 0,2ml
m1= 55g	m1= 55g
v2= 22,6ml	v2= 22,2ml
μ= 2,4775 g/cm³	μ= 2,4886 g/cm³
MÉDIA	**μ= 2,4830 g/cm³**

Fonte: Autoria própria

4.1.3 Misturas realizadas

Com o reconhecimento granulométrico dos materiais, formulou-se seis misturas, as quais tiveram por finalidade atender a Faixa B (camada de ligação ou rolamento) e a Faixa C (camada destinada ao rolamento) do DNIT - ES 031/2006.

Todas essas misturas tiveram como base o peso do material constituinte do corpo de prova de 1200g, e, como materiais integrantes a brita nº 1, brita ¾", brita 3/8", pó de pedra, CAP 50/70 e ainda, a cal devido a suas características mencionadas no item 3.3.1.3 deste trabalho.

Cabe salientar que, para que se fizesse possível a realização de todas as misturas e o enquadramento das curvas nas faixas propostas para este estudo, com o material escolhido para tal, fez-se necessário que houvessem alterações nas características granulométricas para as misturas C limite inferior (CINF), B limite superior (BSUP) e inferior (BINF).

Ainda, é de importante menção de que as misturas citadas necessitaram de uma porcentagem passante maior nas peneiras de menor diâmetro, ou seja, #40, #80 e #200 do material pó de pedra. Logo, nessas peneiras foram feitas alterações quando entendidas necessárias, lembrando que o objetivo principal da pesquisa é a comparação das misturas.

Uma análise com vista generalizada das misturas realizadas, permitiu-se inferir que a quantidade de material mais fino (pó de pedra) apresentou-se superior nas curvas superiores (B e C) enquanto que, nas curvas inferiores (B e C), a mistura teve uma quantidade de material mais graúdo (brita 1, brita ¾ e brita 3/8) considerável em relação ao pó de pedra. Para melhor esclarecimento, a seguir serão apresentadas características detalhadas e particularidades de cada uma das misturas.

4.1.3.1 Faixa B Referência

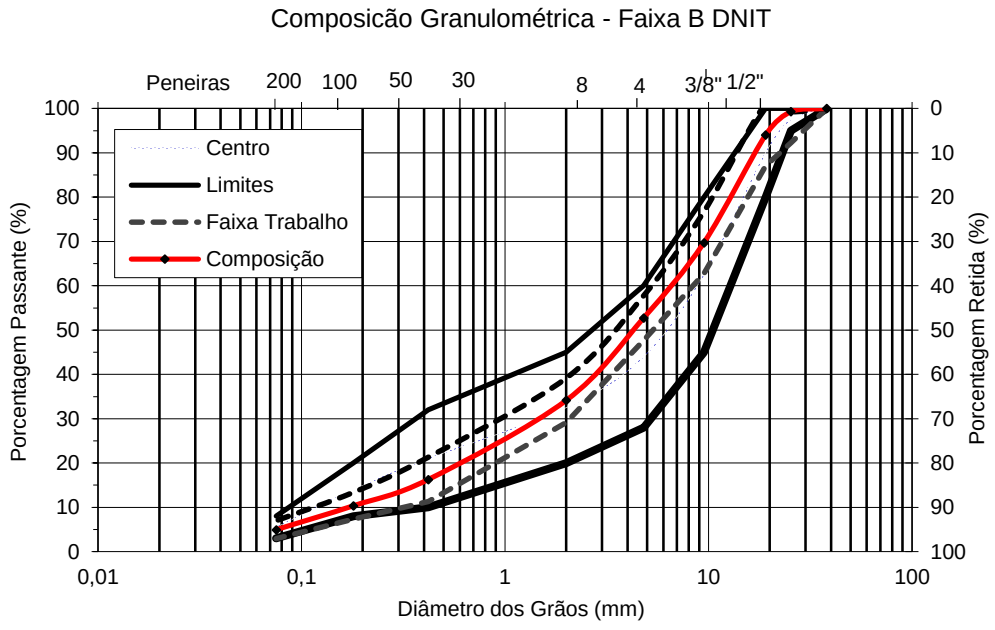
Para a composição da mistura dita como base, traçou-se uma mistura com vista à maior aproximação possível da faixa central e, com atenção para as faixas de trabalho estabelecidas pela norma DNIT 031/2006 – ES. Utilizou-se para esta todos os materiais pétreos disponíveis (brita 1, brita ¾, brita 3/8 e pó de pedra), além do CAP 50/70 e 1,5% de cal dolomítica. A mistura Referência B mostra-se detalhada na Tabela 14 e no Gráfico 2.

Tabela 14: Porcentagens individuais dos materiais

COMPOSIÇÃO DA MISTURA						
% mistura		**10,0%**	**24,0%**	**14,0%**	**50,5%**	**1,5%**
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**
1 1/2"	**38,1**	10,0	24,0	14,0	50,5	1,5
1	**25,4**	9,3	24,0	14,0	50,5	1,5
3/4"	**19,1**	4,1	23,9	14,0	50,5	1,5
3/8"	**9,5**	0,0	0,7	13,5	50,5	1,5
n°4	**4,8**	0,0	0,0	4,1	50,2	1,5
n°10	**2**	0,0	0,0	0,0	37,0	1,5
n°40	**0,42**	0,0	0,0	0,0	16,8	1,5
n°80	**0,18**	0,0	0,0	0,0	10,1	1,5
n°200	**0,075**	0,0	0,0	0,0	4,3	1,2
frações	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**TOTAL**
%	10%	24%	14%	50,5%	1,5%	100%

Fonte: Autoria própria

Gráfico 2: Enquadramento da mistura Referência B



Fonte: Autoria própria

4.1.3.2 Faixa B limite superior

Para que fosse possível o enquadramento do material escolhido no limite superior da faixa B, tiveram de ser feitas alterações nas características granulométricas do pó de pedra. A alteração

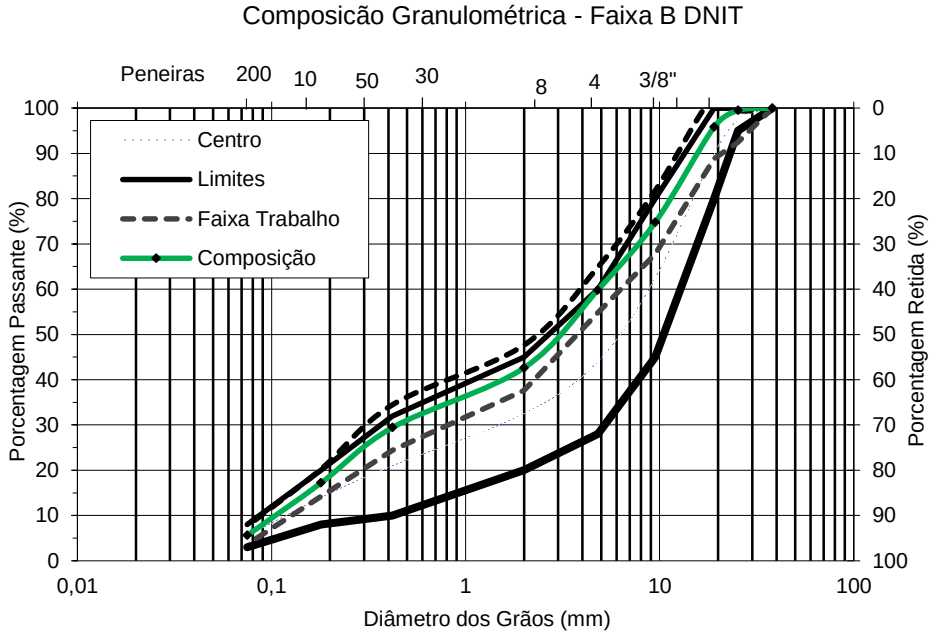
se deu devido a necessidade de mais material passante nas peneiras de menor diâmetro, logo acresceu-se 5% no passante da peneira nº10, 10% no passante da peneira nº40 e na peneira nº80, correspondentes ao material mencionado. As porcentagens de cada material e a curva resultante podem ser observados abaixo na Tabela 15 e no Gráfico 3.

Tabela 15: Porcentagens individuais dos materiais

COMPOSIÇÃO DA MISTURA						
% mistura		**7,0%**	**18,0%**	**21,0%**	**52,5%**	**1,5%**
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**
1 1/2"	**38,1**	7,0	18,0	21,0	52,5	1,5
1	**25,4**	6,5	18,0	21,0	52,5	1,5
3/4"	**19,1**	2,9	18,0	21,0	52,5	1,5
3/8"	**9,5**	0,0	0,5	20,2	52,5	1,5
n°4	**4,8**	0,0	0,0	6,1	52,2	1,5
n°10	**2**	0,0	0,0	0,1	41,0	1,5
n°40	**0,42**	0,0	0,0	0,0	27,9	1,5
n°80	**0,18**	0,0	0,0	0,0	15,7	1,5
n°200	**0,075**	0,0	0,0	0,0	4,4	1,2
Frações	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**TOTAL**
%	7%	18%	21%	52,5%	1,5%	100%

Fonte: Autoria própria

Gráfico 3: Enquadramento da mistura B superior



Fonte: Autoria própria

4.1.3.3 Faixa B limite inferior

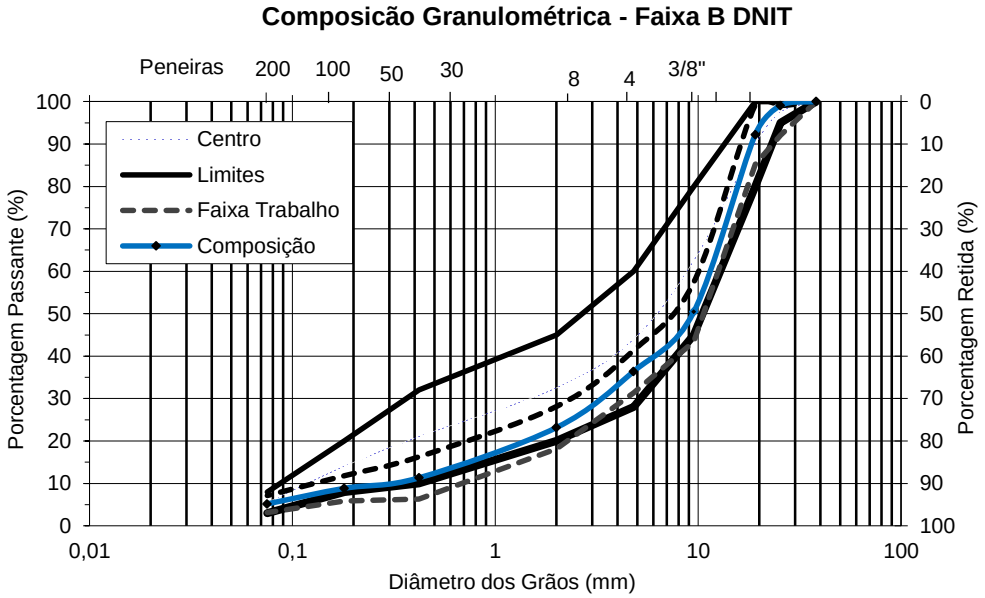
Seguindo a coerência utilizada no limite superior da faixa B, houve a adição de 5% passante na peneira nº 80 e 5% na peneira nº 200 do material pó de pedra. Nota-se que comparando esta com a composição B superior, está mistura caracteriza-se por maior quantidade de agregados pétreos de maior diâmetro, o que pode ser observado na Tabela 16 e no Gráfico 4.

Tabela 16: Porcentagens individuais dos materiais

COMPOSIÇÃO DA MISTURA						
% mistura		**13,0%**	**37,0%**	**19,0%**	**29,5%**	**1,5%**
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**
1 1/2"	**38,1**	13,0	37,0	19,0	29,5	1,5
1	**25,4**	12,0	37,0	19,0	29,5	1,5
3/4"	**19,1**	5,3	36,9	19,0	29,5	1,5
3/8"	**9,5**	0,0	1,1	18,3	29,5	1,5
n°4	**4,8**	0,0	0,0	5,5	29,3	1,5
n°10	**2**	0,0	0,0	0,1	21,6	1,5
n°40	**0,42**	0,0	0,0	0,0	9,8	1,5
n°80	**0,18**	0,0	0,0	0,0	7,4	1,5
n°200	**0,075**	0,0	0,0	0,0	4,0	1,2
Frações	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**TOTAL**
%	13%	37%	19%	29,5%	1,5%	100%

Fonte: Autoria própria

Gráfico 4: Enquadramento da mistura B inferior



Fonte: Autoria própria

4.1.3.4 Faixa C Referência

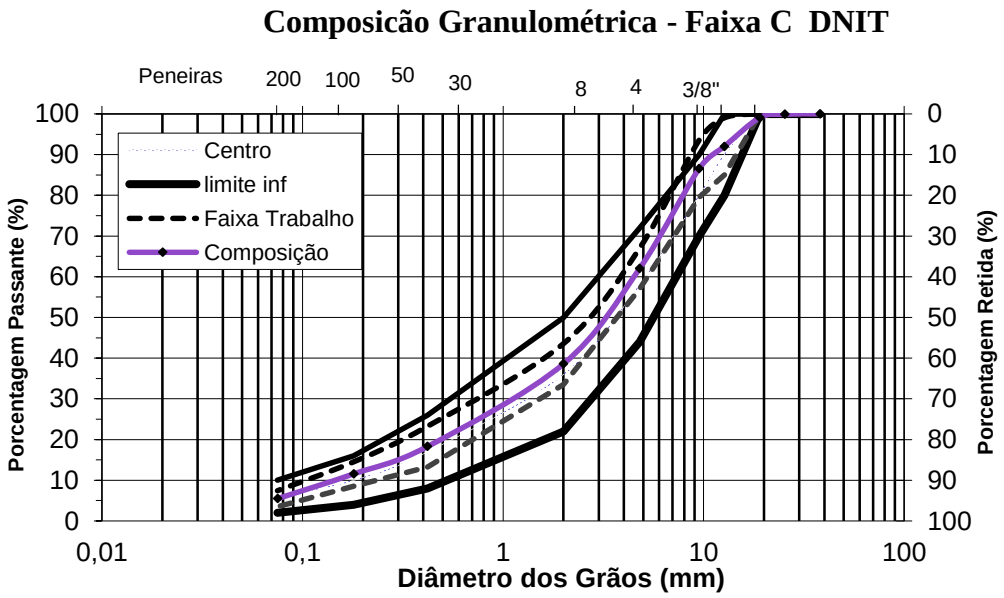
Para o enquadramento desta mistura, usou-se a mesma metodologia da mistura B Referência descrita anteriormente, porém, respeitou-se seus limites particulares estabelecidos no DNIT 031/2006 –ES. Os resultados podem ser vistos na Tabela 17 e no Gráfico 5.

Tabela 17: Porcentagens individuais dos materiais

COMPOSIÇÃO DA MISTURA						
% mistura		**1,5%**	**11,0%**	**35,5%**	**50,5%**	**1,5%**
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**
1 1/2	**38,1**	1,5	11,0	35,5	50,5	1,5
1	**25,4**	1,4	11,0	35,5	50,5	1,5
3/4"	**19,1**	0,6	11,0	35,5	50,5	1,5
1/2"	**12,7**	0,0	4,5	35,5	50,5	1,5
3/8"	**9,5**	0,0	0,3	34,2	50,5	1,5
n°4	**4,8**	0,0	0,0	10,3	50,2	1,5
n°10	**2**	0,0	0,0	0,1	37,0	1,5
n°40	**0,42**	0,0	0,0	0,0	16,8	1,5
n°80	**0,18**	0,0	0,0	0,0	10,1	1,5
n°200	**0,075**	0,0	0,0	0,0	4,3	1,2
frações	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**TOTAL**
%	1,5%	11,0%	35,5%	50,5%	1,50%	100,0%

Fonte: Autoria própria

Gráfico 5: Enquadramento da Mistura Referência C



Fonte: Autoria própria

4.1.3.5 Faixa C limite superior

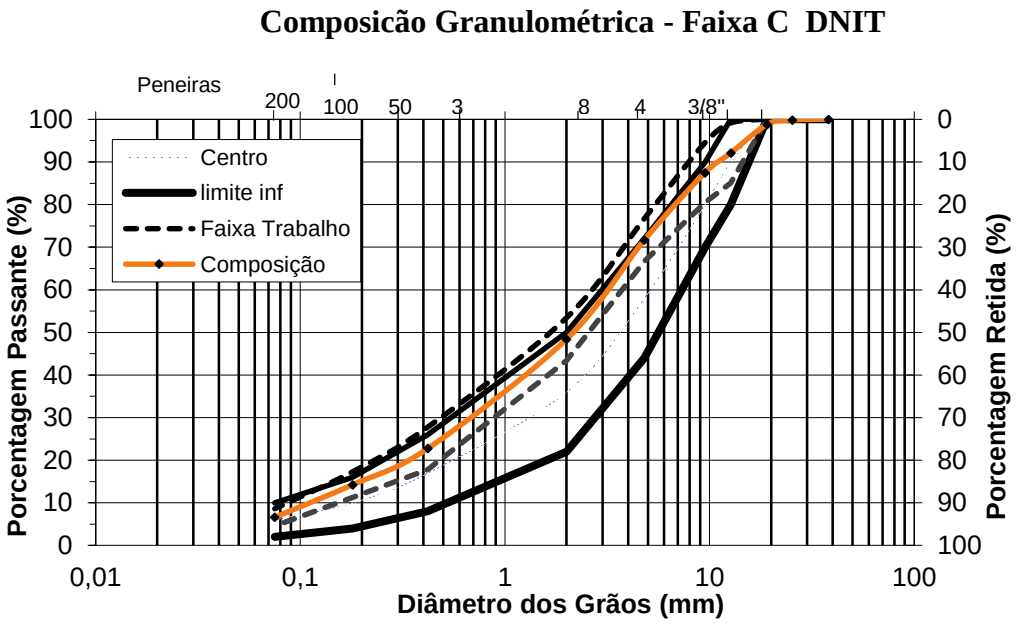
Para esta mistura utilizou-se grande quantidade de pó de pedra. Para tal, almeja-se uma menor quantidade de vazios, frente as porcentagens de materiais indicadas na Tabela 18 e no Gráfico 6.

Tabela 18: Porcentagens individuais dos materiais

COMPOSIÇÃO DA MISTURA						
% mistura		**2,0%**	**10,0%**	**22,5%**	**64,0%**	**1,5%**
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**
1 1/2	**38,1**	2,0	10,0	22,5	64,0	1,5
1	**25,4**	1,9	10,0	22,5	64,0	1,5
3/4"	**19,1**	0,8	10,0	22,5	64,0	1,5
1/2"	**12,7**	0,0	4,1	22,5	64,0	1,5
3/8"	**9,5**	0,0	0,3	21,7	64,0	1,5
n°4	**4,8**	0,0	0,0	6,6	63,6	1,5
n°10	**2**	0,0	0,0	0,1	46,8	1,5
n°40	**0,42**	0,0	0,0	0,0	21,3	1,5
n°80	**0,18**	0,0	0,0	0,0	12,8	1,5
n°200	**0,075**	0,0	0,0	0,0	5,4	1,2
Frações	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**TOTAL**
%	2,0%	10,0%	22,5%	64,0%	1,50%	100,0%

Fonte: Autoria própria

Gráfico 6: Enquadramento da mistura C superior



Fonte: Autoria própria

4.1.3.6 Faixa C limite inferior

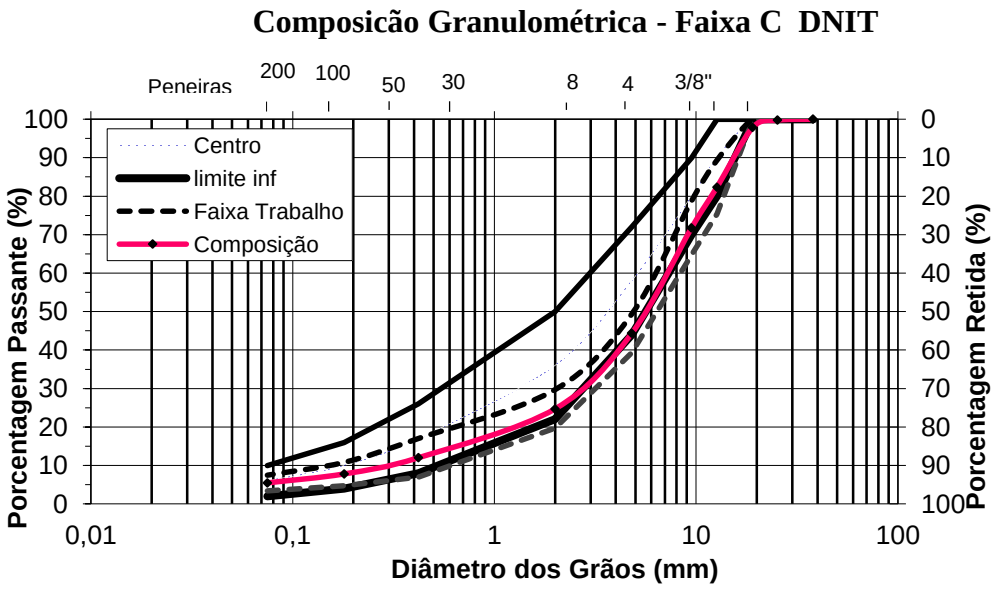
Esta mistura exigiu a adição de 5% passante na peneira nº 200 do pó de pedra para melhor tangenciar seu limite. Em relação a mistura CSUP, aproximadamente a metade de material pó foi empregado, o que faz-se esperar um teor de vazios mais elevado. A Tabela 19 e o Gráfico 7 caracterizam e quantificam esta mistura.

Tabela 19: Porcentagens individuais dos materiais

COMPOSIÇÃO DA MISTURA						
% mistura		**2,0%**	**10,0%**	**22,5%**	**64,0%**	**1,5%**
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**
1 1/2	**38,1**	2,0	10,0	22,5	64,0	1,5
1	**25,4**	1,9	10,0	22,5	64,0	1,5
3/4"	**19,1**	0,8	10,0	22,5	64,0	1,5
1/2"	**12,7**	0,0	4,1	22,5	64,0	1,5
3/8"	**9,5**	0,0	0,3	21,7	64,0	1,5
n 4	**4,8**	0,0	0,0	6,6	63,6	1,5
n 10	**2**	0,0	0,0	0,1	46,8	1,5
n 40	**0,42**	0,0	0,0	0,0	21,3	1,5
n 80	**0,18**	0,0	0,0	0,0	12,8	1,5
n 200	**0,075**	0,0	0,0	0,0	5,4	1,2
frações	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**TOTAL**
%	2,0%	10,0%	22,5%	64,0%	1,50%	100,0%

Fonte: Autoria própria

Gráfico 7: Enquadramento da mistura C superior



Fonte: Autoria própria

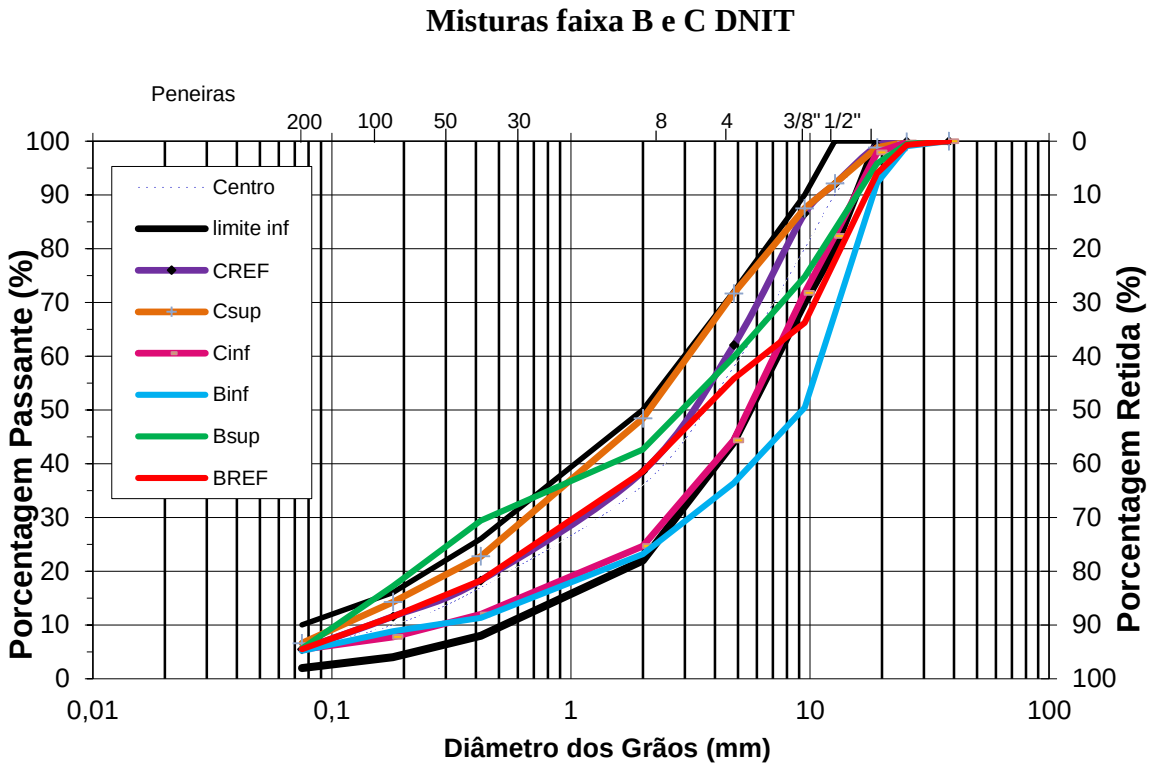
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.2.1 Dosagem Marshall

Após a definição das seis composições distintas, moldou-se 15 corpos de prova para cada uma delas a fim de determinar seus respectivos teores de ligante.

Estas combinações diferiram-se fundamentalmente em relação as quantidades de materiais graúdos e miúdos (descrito e ilustrado nos itens anteriores deste trabalho) que consequentemente alteraram a demanda de ligante asfáltico. O Gráfico 8 representa o comparativo e as variações das composições moldadas.

Gráfico 8: Curvas comparativas referentes as misturas



Fonte: Autoria própria

Pode-se inferir que com as pequenas modificações realizadas na granulometria das peneiras inferiores de algumas misturas, unida a ênfase para que todas dispusessem de uma quantidade mínima de 5% passante na peneira n°200, fez com que nesta, as misturas comportassem-se de forma bem parecida numericamente, sendo que todas possuíram um passante de 5 a 7% do total.

Percebe-se que as misturas mais extremas, no maior intervalo entre suas curvas, são as misturas BINF e a CSUP confirmando-se a maior diferença de material pó de pedra, 29,5% e 64% respectivamente do total de suas composições.

Ainda, é notória que a maior distinção entre elas deu-se entre a faixa de peneiras n°40 e 3/8” onde o maior extremo também foi tido entre as duas misturas mencionadas. As mais análogas foram as misturas BINF E CINF, sendo até a peneira n°10 muito assemelhadas.

Para tanto, houve expectativas em relação a diferenciação da aparência dos CP’S, ao volume de vazios, a resistência, entre outras características. A Figura 26 corrobora de forma visual os resultados obtidos, os quais serão apresentados nos itens seguintes deste trabalho.

Figura 26: Contrate de composições distintas

Fonte: Autoria própria

Quanto aos resultados particulares de cada uma, as Figura 27,

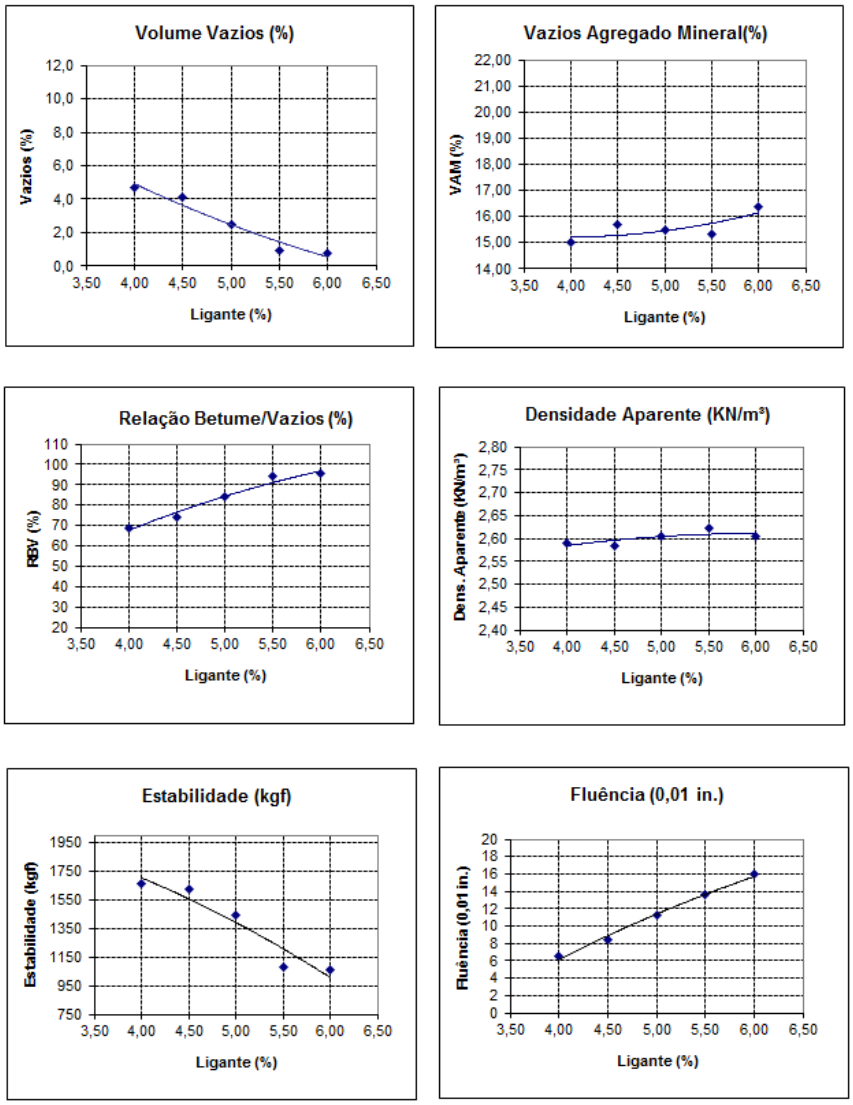
Figura **28**, Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32 demonstram as curvas dos parâmetros encontrados com a dosagem Marshall para cada mistura. Ainda, na Tabela 20, Tabela 21, Tabela 22, Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25.

Tabela 20: Parâmetros mistura B Referência

Propriedade	***Teor de Betume (%)***				
	4,0	*4,5*	*5,0*	*5,5*	*6,0*
Volume de Vazios (%)	4,7	4,1	2,5	0,9	0,8
Relação Betume Vazios (%)	69	74	84	94	95
Vazios do Agregado Mineral (%)	15,00	15,69	15,47	15,30	16,36
Densidade Máx. Teórica (g/cm³)	2,72	2,69	2,67	2,65	2,62
Densidade Aparente (g/cm³)	2,59	2,58	2,60	2,62	2,60
Estabilidade (1/100 in)	1662	1621	1437	1081	1062
Fluência (kgf)	6	8	11	14	16

Fonte: Autoria própria

Figura 27: Curvas dos parâmetros Marshall B Referência



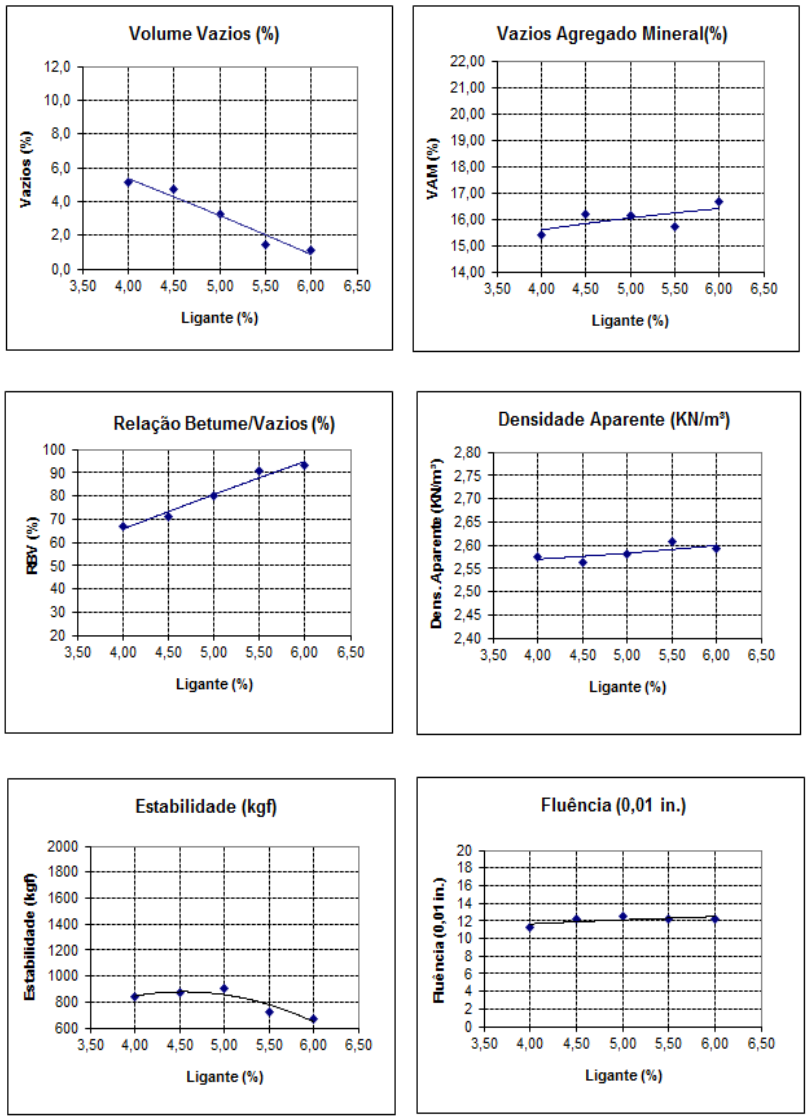
Fonte: Autoria própria

Tabela 21: Parâmetros mistura B limite inferior

Propriedade	***Teor de Betume (%)***				
	4,0	*4,5*	*5,0*	*5,5*	*6,0*
Volume de Vazios (%)	5,1	4,7	3,3	1,4	1,1
Relação Betume Vazios (%)	67	71	80	91	93
Vazios do Agregado Mineral (%)	15,38	16,20	16,14	15,72	16,63
Densidade Máx. Teórica (g/cm³)	2,71	2,69	2,67	2,64	2,62
Densidade Aparente (g/cm³)	2,58	2,56	2,58	2,61	2,59
Estabilidade (1/100 in)	840	873	903	721	669
Fluência (kgf)	11	12	13	12	12

Fonte: Autoria própria

Figura 28: Curvas dos parâmetros Marshall B limite inferior



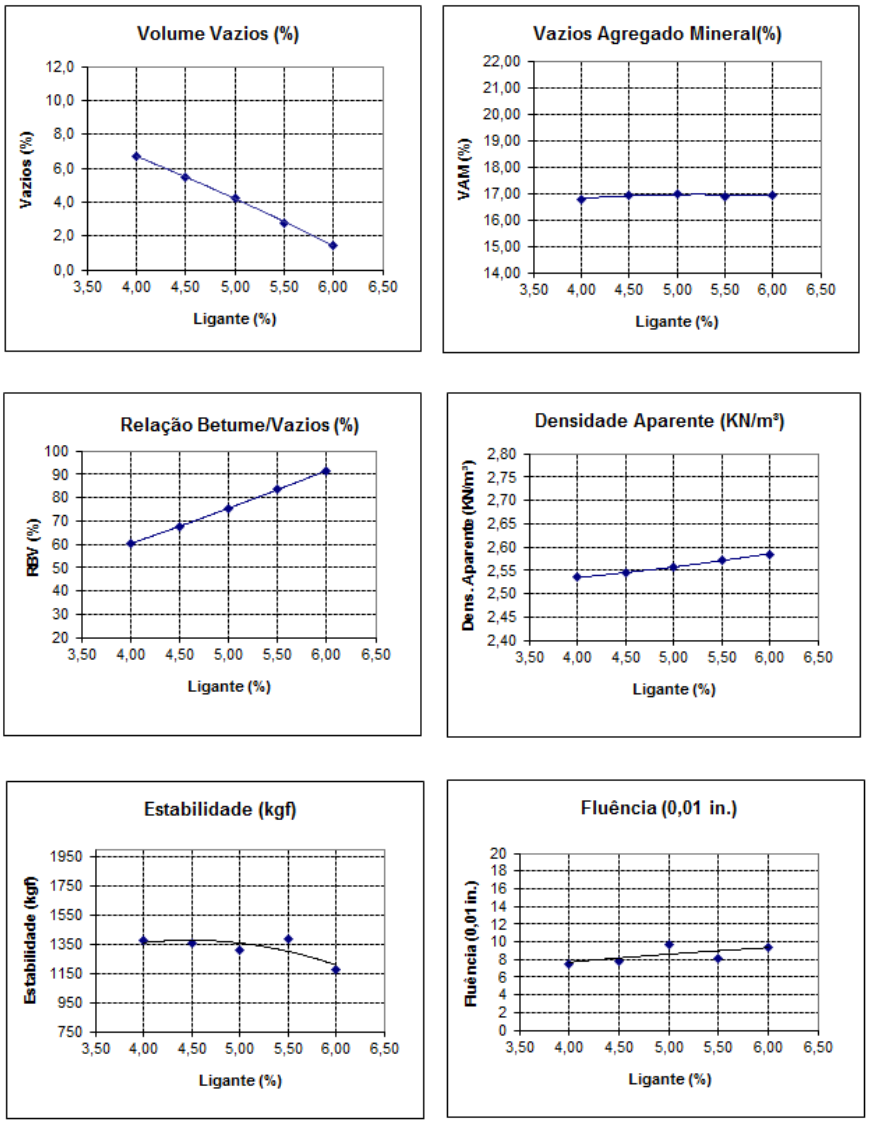
Fonte: Autoria própria

Tabela 22: Parâmetros mistura B limite superior

Propriedade	***Teor de Betume (%)***				
	4,0	*4,5*	*5,0*	*5,5*	*6,0*
Volume de Vazios (%)	6,7	5,5	4,2	2,8	1,4
Relação Betume Vazios (%)	60	68	75	84	91
Vazios do Agregado Mineral (%)	16,79	16,92	16,97	16,88	16,91
Densidade Máx. Teórica (g/cm³)	2,72	2,69	2,67	2,65	2,62
Densidade Aparente (g/cm³)	2,53	2,54	2,56	2,57	2,58
Estabilidade (1/100 in)	1377	1355	1305	1389	1170
Fluência (kgf)	8	8	10	8	9

Fonte: Autoria própria

Figura 29: Curvas dos parâmetros Marshall B limite superior



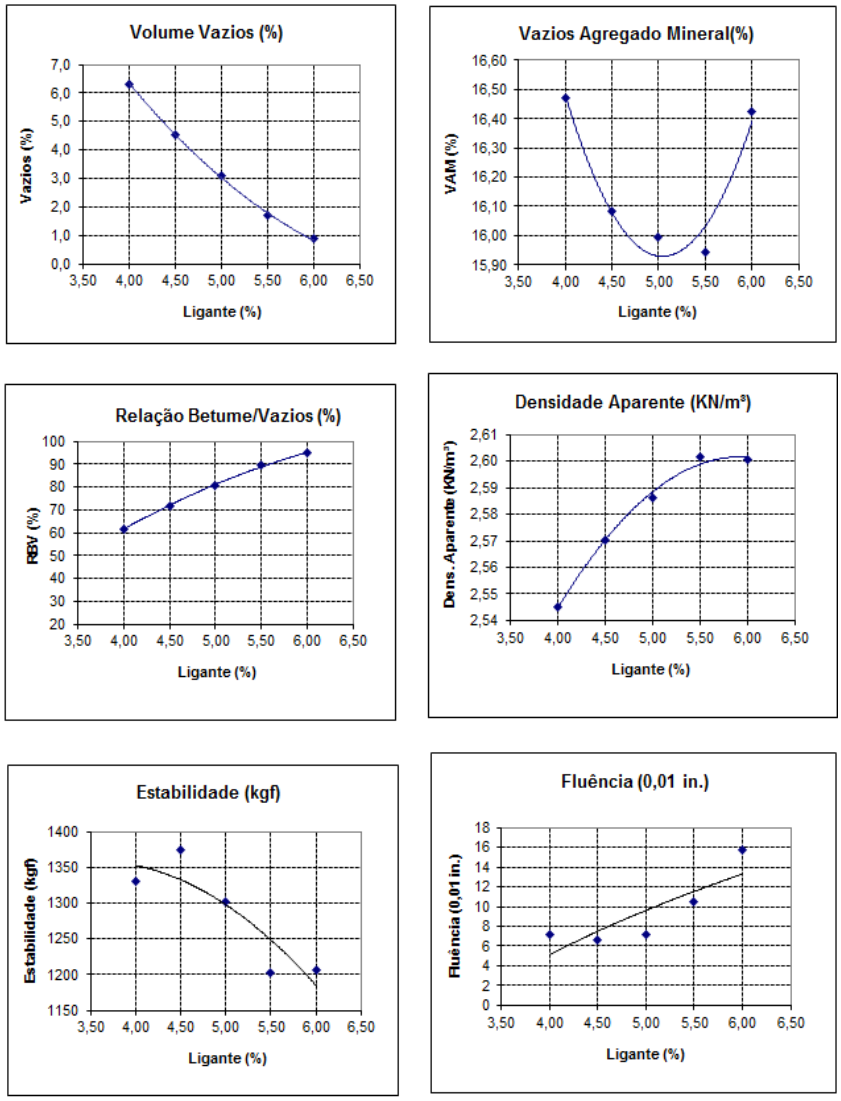
Fonte: Autoria própria

Tabela 23: Curvas dos parâmetros Marshall C Referência

Propriedade	***Teor de Betume (%)***				
	4,0	*4,5*	*5,0*	*5,5*	*6,0*
Volume de Vazios (%)	6,3	4,6	3,1	1,7	0,9
Relação Betume Vazios (%)	62	72	81	89	95
Vazios do Agregado Mineral (%)	16,47	16,08	15,99	15,95	16,42
Densidade Máx. Teórica (g/cm³)	2,72	2,69	2,67	2,65	2,62
Densidade Aparente (g/cm³)	2,54	2,57	2,59	2,60	2,60
Estabilidade (1/100 in)	1331	1374	1301	1202	1207
Fluência (kgf)	7	7	7	10	16

Fonte: Autoria própria

Figura 30: Curvas dos parâmetros Marshall C Referência



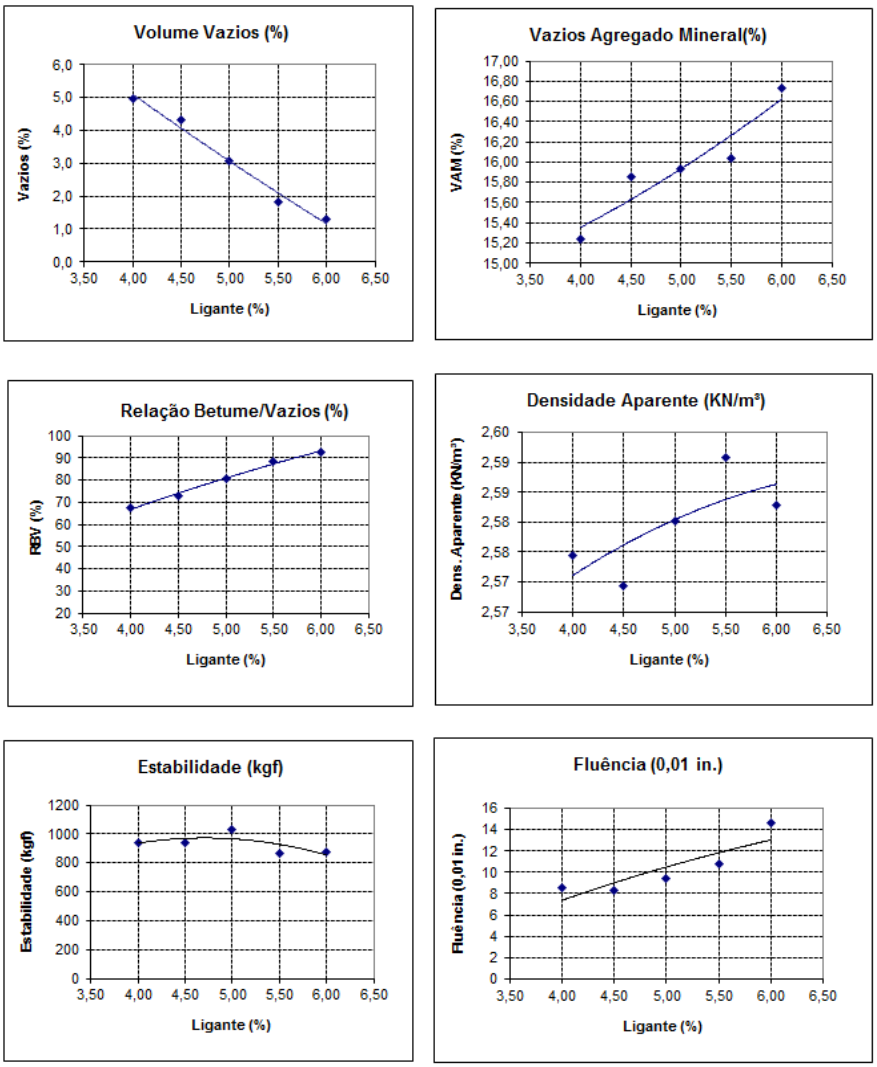
Fonte: Autoria própria

Tabela 24: Curvas dos parâmetros Marshall C limite inferior

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS					
Propriedade	***Teor de Betume (%)***				
	4,0	*4,5*	*5,0*	*5,5*	*6,0*
Volume de Vazios (%)	5,0	4,3	3,1	1,8	1,3
Relação Betume Vazios (%)	67	73	81	89	92
Vazios do Agregado Mineral (%)	15,24	15,85	15,94	16,04	16,74
Densidade Máx. Teórica (g/cm³)	2,71	2,69	2,66	2,64	2,62
Densidade Aparente (g/cm³)	2,57	2,57	2,58	2,59	2,58
Estabilidade (1/100 in)	938	943	1029	868	873
Fluência (kgf)	9	8	9	11	15

Fonte: Autoria própria

Figura 31: Curvas dos parâmetros Marshall C limite inferior



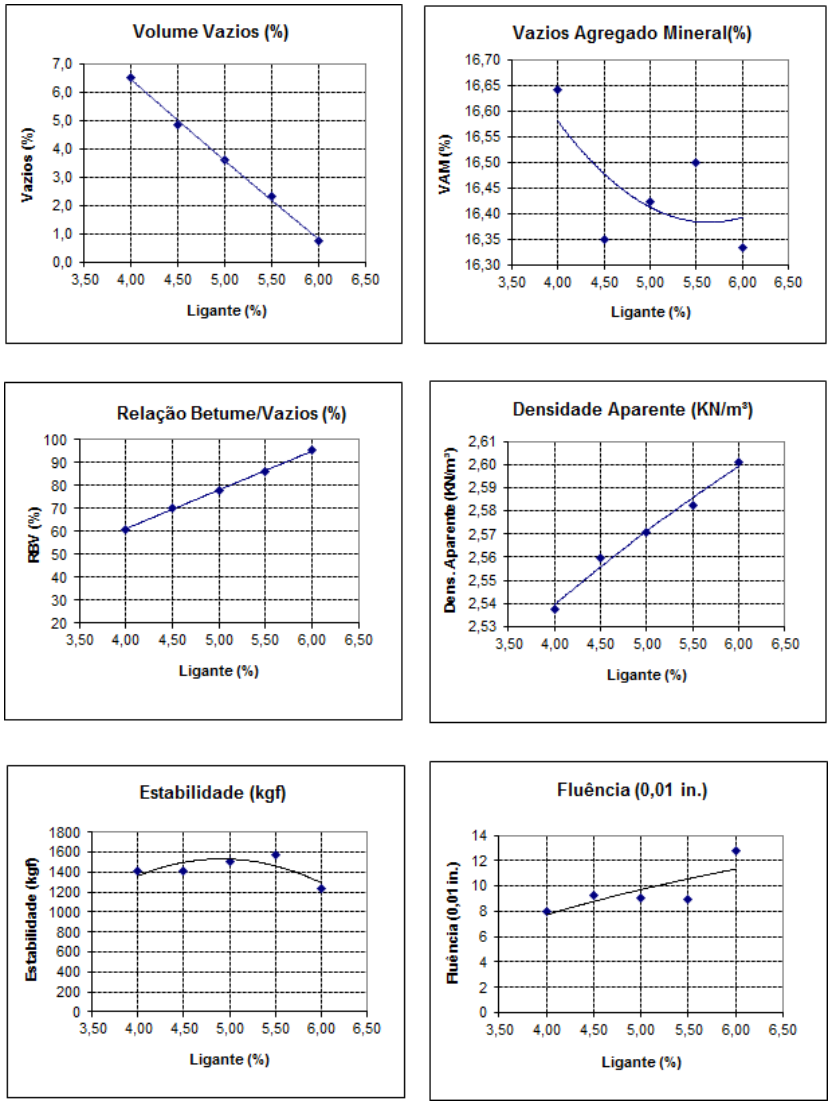
Fonte: Autoria própria

Tabela 25: Curvas dos parâmetros Marshall C limite superior

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS					
Propriedade	***Teor de Betume (%)***				
	4,0	*4,5*	*5,0*	*5,5*	*6,0*
Volume de Vazios (%)	6,5	4,9	3,6	2,3	0,8
Relação Betume Vazios (%)	61	70	78	86	95
Vazios do Agregado Mineral (%)	16,64	16,35	16,42	16,50	16,33
Densidade Máx. Teórica (g/cm³)	2,71	2,69	2,67	2,64	2,62
Densidade Aparente (g/cm³)	2,54	2,56	2,57	2,58	2,60
Estabilidade (1/100 in)	1411	1408	1513	1577	1240
Fluência (kgf)	8	9	9	9	13

Fonte: Autoria própria

Figura 32: Curvas dos parâmetros Marshall C limite superior



Fonte: Autoria própria

A Tabela 26 apresenta de forma resumida os resultados referentes a dosagem Marshall para as seis misturas:

Tabela 26: Resumo dosagem Marshall

Propriedades	DNIT 031/2006						
	Especificação	BINF	BREF	BSUP	CINF	CREF	CSUP
Teor de betume		4,75	4,53	5,07	4,63	4,70	4,85
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	70 a 80	75,28	74,49	76,42	74,80	75,06	75,61
Vazios do Agregado Mineral (%)	>16	16,18	15,68	16,96	15,87	16,04	16,40
Densidade Aparente (g/cm³)	-	2,57	2,58	2,56	2,57	2,57	2,57
Estabilidade (1/100 in)	>800	888	1516	1316	964	1344	1487
Fluência (kgf)	8 a 16	12,13	8,01	9,99	7,50	7,00	9,00

Fonte: Autoria própria

4.2.2 Teor de ligante das misturas

Ceratti e Reis (2010, p. 84) proferem que:

> O método de dosagem Marshall pode apresentar diversas alternativas para escolha do teor de projeto de ligante asfáltico. Segundo a *National Asphalt Pavement Association* – NAPA (1982), a escolha do teor de asfalto primordialmente para camadas de rolamento em concreto asfáltico é baseada somente no volume de vazios (Vv), correspondente a 4%, ou o volume de vazios corresponde a média das especificações. No Brasil, a escolha do teor de projeto correspondente a 4% também é adotada por alguns órgãos rodoviários.

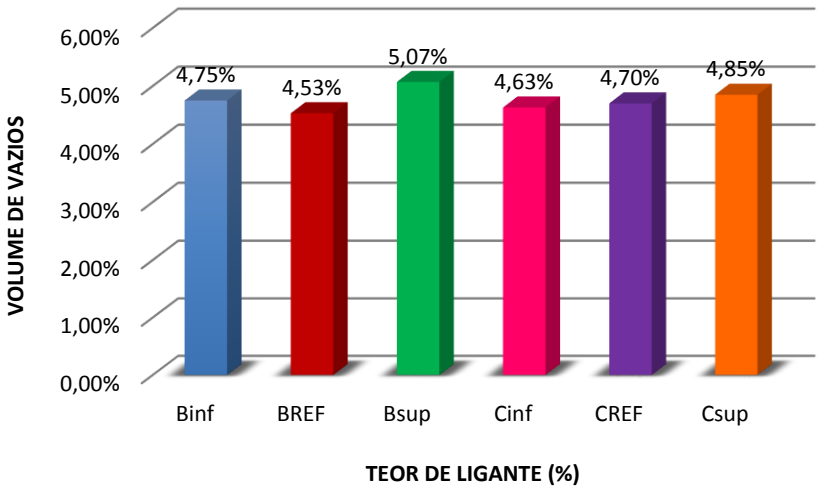
Para este estudo, empregou-se a metodologia descrita, estimando-se um volume de vazios igual a 4%, a partir deste fator os teores de ligante de cada mistura acabaram por ser encontrados. Os valores corresponderes podem ser observados no Gráfico 9.

Percebe-se através dos valores numéricos obtidos que o teor de ligante das misturas não se manteve constante. Salienta-se que as misturas superiores, BSUP e CSUP, apresentaram os maiores teores de CAP em relação as demais misturas, fato este que pode ser explicado em primeiro princípio pela maior porcentagem de agregados miúdos na mistura, o que acaba por aumentar a superfície de absorção dos mesmos.

A mistura CINF apresentou um decréscimo pequeno no teor de ligante, em relação mistura CREF de 0,07%, visto que há uma porcentagem de agregados miúdos significativa entre estas. Em

contrapartida, a mistura BINF teve um acréscimo no teor de ligante em relação mistura BREF de 0,22%. Ainda, comparando as misturas da faixa B com as da faixa C pode-se constatar uma maior variação no teor de ligante entre as misturas da faixa B.

Gráfico 9: Teor de ligante nas misturas



Fonte: Autoria própria

Definidos os teores de projeto para cada uma das misturas, obteve-se sua inserção, em gramas de CAP, para realização dos demais ensaios propostos conforme concisos na Tabela 27.

Tabela 27: Inserção em gramas de CAP

MISTURA	TEOR DE LIGANTE (g)
CINF	58,3
CREF	59,2
CUSP	61,2
BINF	59,8
BREF	56,9
BSUP	64,1

Fonte: Autoria própria

4.2.3 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

A norma DNER – ME 138/94 preconiza este ensaio, o qual objetiva aferir a resistência à tração que o corpo de prova apresenta. Fez-se a análise através da média de 3 corpos de prova moldados com o teor de projeto de ligante para cada tipo de mistura, totalizando 18 CP's. Estimou-se através dos resultados obtidos, que as misturas BREF e CREF apresentaram valores menores de

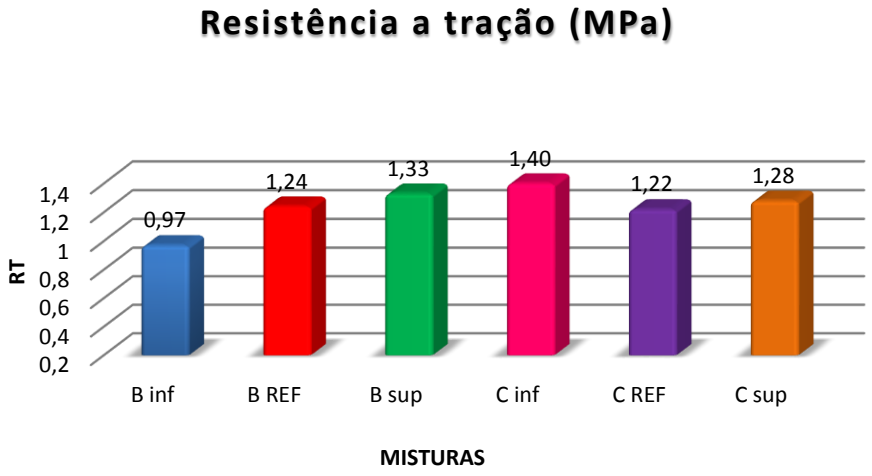
resistência a tração quando comparadas as misturas BSUP, CSUP e CINF. Portanto, com exceção da mistura BINF, as demais misturas tiveram suas resistências aumentadas em relação as misturas referências. O Gráfico 10 e Tabela 28 mostram os resultados obtidos.

Tabela 28: Resultados do ensaio de RT

MISTURAS	DIÂMETRO	ALTURA	LEITURA PRENSA	CARGA (kgf)	CARGA (N)	RT (Mpa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
BINF 1	10,11	6,04	585	967,42	9674,20	1,01	**0,97**	0,09
BINF 2	10,13	6,04	617	1020,34	10203,39	1,06		
BINF 3	10,11	6,21	505	835,12	8351,24	0,85		
BREF 1	10,14	5,97	741	1225,40	12253,99	1,29	**1,24**	0,04
BREF 2	10,14	5,93	715	1182,40	11824,03	1,25		
BREF 3	10,14	5,98	687	1136,10	11360,99	1,19		
BSUP 1	10,12	6,02	805	1331,24	13312,37	1,39	**1,33**	0,05
BSUP 2	10,16	5,94	730	1207,21	12072,08	1,27		
BSUP 3	10,14	5,99	770	1273,36	12733,57	1,33		
CINF 1	10,11	5,96	858	1418,88	14188,83	1,50	**1,40**	0,17
CINF 2	10,11	6,06	678	1121,22	11212,15	1,17		
CINF 3	10,12	5,98	889	1470,15	14701,48	1,55		
CREF 1	10,15	6,06	670	1107,99	11079,86	1,15	**1,22**	0,05
CREF 2	10,15	6,08	728	1203,90	12039,01	1,24		
CREF 3	10,15	6,02	736	1217,13	12171,31	1,27		
CSUP 1	10,17	6,00	790	1306,43	13064,31	1,36	**1,28**	0,08
CSUP 2	10,15	5,99	751	1241,94	12419,36	1,30		
CSUP 3	10,13	6,09	682	1127,83	11278,30	1,16		

Fonte: Autoria própria

Gráfico 10: Resistências a tração da mistura



Fonte: Autoria própria

4.2.4 Ensaio de Módulo de Resiliência

Com intuito de verificar a tensão-deformação do pavimento, este módulo objetivou caracterizar a deformação das seis misturas asfálticas ensaiadas.

Para tanto, analisou-se 18 corpos de prova, 3 de cada mistura à temperatura estável de 25°C, visto que o módulo de misturas asfálticas tem grande influência desse valor, diferindo-se de materiais para execução de bases, sub-bases e subleito no tão influenciáveis pela temperatura e sim pela umidade.

A Tabela 29, expressa desvios padrão de cada mistura, seus coeficientes de variação, módulos e médias obtidos com a realização do ensaio, este sucedeu-se no laboratório da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

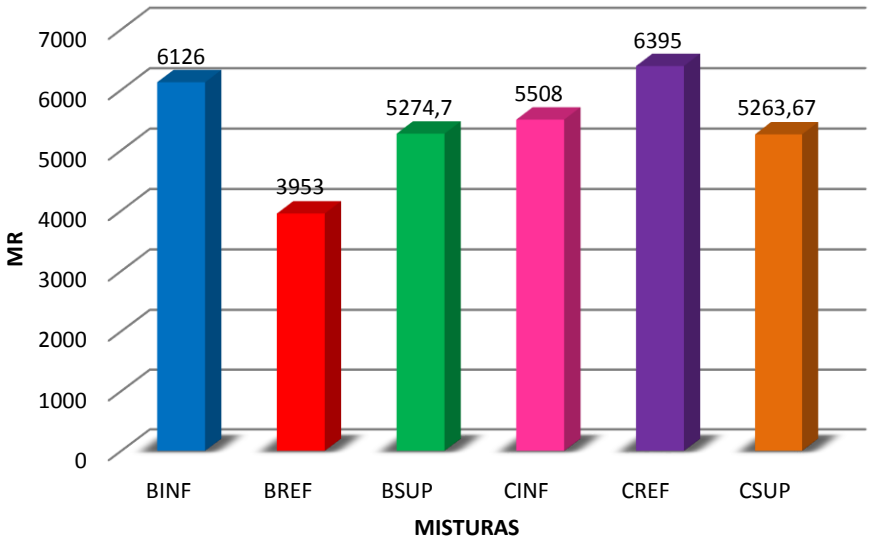
Tabela 29: Resultados ensaio MR

CP	Diâmetro	Altura	MR	Média (MPa)	DP	CV(%)
BINF	10,17	6,17	4788	**6126**	184,96	3,86
BINF	10,21	6,03	6565		239,78	3,65
BINF	10,18	6,11	7025		314,28	4,47
BREF	10,18	6,02	4343	**3953**	189,75	4,37
BREF	10,19	6,05	3563		151,27	4,25
BREF	10,2	6,05	-		22,17	2,37
BSUP	10,21	6,02	5571	**5274,67**	179,86	3,23
BSUP	10,18	6,02	4917		178,31	3,63
BSUP	10,15	6,03	5336		198,96	3,73
CINF	10,14	5,97	5647	**5508**	259,45	4,59
CINF	10,16	6,04	5080		128,88	2,54
CINF	10,16	6,03	5797		200,42	3,46
CREF	10,18	6,03	7261	**6395**	292,63	4,03
CREF	10,18	6,02	5990		224,09	3,74
CREF	10,17	6,1	5934		211,9	3,57
CSUP	10,18	6,11	6524	**5263,67**	330,13	5,06
CSUP	10,17	6,11	4033		123,07	3,05
CSUP	10,17	6,1	5234		186,23	3,56

Fonte: Autoria própria

Resumidamente, o Gráfico 11 mostra os resultados obtidos, constatando-se que a mistura da faixa C referência (CREF), foi a que apresentou maior valor para o MR, equivalente a 6395 MPa e o menor foi encontrado na BREF (3953MPa).

Gráfico 11: Médias dos MR's



Fonte: Autoria própria

De acordo com pesquisadores, os valores para módulo de resiliência devem se manter acima de 3000, portanto todas as misturas mostraram-se aceitáveis.

4.2.5 Ensaio do Equivalente de Areia

O ensaio do equivalente de areia seguiu as especificações da norma DNER-ME 054/97, o qual objetiva determinar a proporção de material (pó ou argila) em amostras de agregado miúdo. Para melhor correlação de dados e seguindo particularizações da norma, ensaiou-se duas amostras de 110g de material de partículas menores que 4,8mm com solução de cloreto de cálcio-glicerina-formoaldeído.

Mediu-se a altura de material floculado em suspenção e do agregado depositado por sedimentação e foram obtidos os valores referentes ao ensaio seguem na Tabela **30**. Estes mostram que os agregados são satisfatórios para uso em concreto asfáltico, visto que o mínimo atingido deve ser 55% e obteve-se um valor de EA de 71%.

Tabela 30: Resultado ensaio EA

EQUIVALENTE DE AREIA		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2
Leitura topo de areia	5,6	5,8
Leitura topo de argila	7,8	8,3
EA	0,7179	0,6987
Média	0,7083	
	71%	

Fonte: Autoria própria

4.3 PARÂMETROS ESPECÍFICOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

- **Relação MR x RT**

Já foram desenvolvidos alguns modelos base de valores para relação módulo de resiliência *versus* resistência a tração, como o a proposto por Motta e Pinto (1994), o de Motta (1998) e o que tange a DNER 269/94 conforme já mencionado na metodologia deste trabalho, entre outros.

A razão MR/RT é empregada como um indicador da vida de fadiga de misturas, já que agrega informações de resistência e rigidez. Visto isto, e considerando que quanto menor o valor da relação maior será a flexibilidade da mistura, sugere-se a mistura BREF, a qual apresenta uma relação numérica de 3187,90, a que terá uma vida de fadiga mais longa. A Tabela 31 mostra os resultados obtidos.

Tabela 31: Relação MR/RT

Misturas	RT (MPa)	MR (MPa)	MR/RT
BINF	0,97	6126,00	6315,46
BREF	1,24	3953,00	3187,90
BSUP	1,33	5274,70	3965,91
CINF	1,40	5508,00	3934,29
CREF	1,22	6395,00	5241,80
CSUP	1,28	5263,67	4112,24

Fonte: Autoria própria

- **Relação estabilidade / fluência**

De acordo com a DNER-ME/043 o valor mínimo que deve ser obedecido pera estabilidade é de 500Kgf, enquanto que a fluência deve estabelecer-se inscrita numa faixa de 8 a 16/0.01in. Para

a relação, a *Dirección Nacional de Vialidad* (1998), nos direciona a valores referentes a estabilidade x fluência entre 53,37 a 101,6kg/0,01in.

Os resultados são apontados na Tabela 32 e indicam a mistura BINF como relação que melhor obedece a norma citada.

Tabela 32: Relação estabilidade / fluência

Misturas	Estabilidade (kgf)	Fluência (0.01in)	Estab./Flu.
BINF	888	12,13	73,24
BREF	1516	8,01	189,36
BSUP	1316	9,99	131,70
CINF	964	7,50	128,58
CREF	1344	7,00	192,00
CSUP	1487	9,00	165,22

Fonte: Autoria própria

- **Relação betume x vazios**

O volume de vazios nos agregados minerais (VAM) e o volume de vazios na mistura asfáltica compactada, com referência a norma *Dirección Nacional de Vialidad* (1998), a qual estipula que os vazios para mistura de camada de concreto asfáltico deve situar-se entre 3 e 5% e boas relações com assumem o valor de 70 a 80%, todos parâmetros encontram-se dentro da faixa estabelecida. Com os valores estimados de 4% para o volume de vazios, teve-se todas as misturas condizentes com o aconselhável, como pode ser visto na Tabela 33.

Tabela 33: Relação betume x vazios

Misturas	VV	VAM	RBV
Binf	4	16,18	75,28
BREF	4	15,68	74,49
Bsup	4	16,96	76,42
Cinf	4	15,87	74,80
CREF	4	16,04	75,06
Csup	4	16,40	75,61

Fonte: Autoria própria

- **Relação fíler x betume**

Todas misturas apresentaram-se dentro da faixa 0,6% a 1,2% (Bernucci 2010), com exceção da mistura CSUP, visto que nesta há uma porcentagem, na composição da mistura, de passante na #200 consideravelmente maior em reação as demais misturas, elevando-se assim a relação filer/betume desta mistura. A Tabela 34 exibe os resultados obtidos.

Tabela 34: Relação Fíler x Betume

MISTURA	Fíler/ Passante #200(%)	Teor de CAP (%)	Fíler/betume
BINF	5,2	4,75	1,09
BREF	5,5	4,53	1,21
BSUP	5,6	5,07	1,10
CINF	5,4	4,63	1,17
CREF	5,5	4,7	1,17
CSUP	6,6	4,85	1,36

Fonte: Autoria própria

- **Relação teor de CAP x passante #200 x passante #10**

A Tabela 35 exibe a condição estabelecida entre o passante na #200, o passante na #10 e o teor de CAP requerido por cada mistura asfáltica. Pode ser observado diante desses índices que as misturas obedeceram de maneira geral a lógica seguinte: a medida que aumentou a porcentagem passante na #200 e na peneira #10, o teor de CAP na mistura também sofreu elevação.

A única mistura que não obedeceu este proposito foi a BINF, visto que seu teor de CAP foi elevado diante de suas porcentagens passantes nas peneiras em questão, quando comparado a sua referência.

Tabela 35: Relação passante #200 / agregado graúdo /teor de CAP

MISTURA	Passante #200(%)	Passante #10 (%)	Teor de CAP
BINF	5,2	23,2	4,75
BREF	5,5	38,5	4,53
BSUP	5,6	42,6	5,07
CINF	5,4	24,7	4,63
CREF	5,5	38,6	4,7
CSUP	6,6	48,4	4,85

Fonte: Autoria própria

4.4 ANÁLISE DA UNIFORMIDADE DAS MISTURAS

O coeficiente de não uniformidade (Cu) nos possibilita uma indicação da distribuição do tamanho das partículas de um determinado material, sendo que ele corresponde um coeficiente adimensional.

Apesar de ter maior emprego em avaliações de graduação de solos e areias, esse coeficiente foi utilizado para analisar de forma generalizada as misturas. Com ele, relacionou-se o diâmetro das peneiras (em mm) que permitem passar 60% de material (D60%) com o diâmetro das peneiras que permitem passar 10% do mesmo.

Quanto ao desempenho das misturas em função desse coeficiente, percebeu-se na faixa B que a composição inferior, BINF, teve a menor relação (27,5), seguida da intermediária, BSUP (45,45), e da BREF, que foi a maior com 46,67. Ou seja, a BREF abrangeu a maior variedade de partículas em sua composição e denomina-se uma mistura bem graduada.

Para as misturas da faixa C, sucedeu-se a mesma sequência numérica das relações ocorrentes na faixa B, sendo que a maior referiu-se a CREF (33,33) e apontando a melhor graduação dentre estas. Os resultados podem ser vistos na Tabela **36**.

Ainda pode-se ressaltar que essas não uniformidades de materiais nas misturas de referência, implicaram em RT's intermediárias (entre suas misturas inferiores e superiores) e em relações estabilidade/fluência mais elevadas que as demais.

Tabela 36: Coeficiente de uniformidade

CURVA	**D60**	**D10**	**CU= D60/D10**
BINF	11	0,4	27,50
BREF	7	0,15	46,67
BSUP	5	0,11	45,45
CINF	8	0,3	26,67
CREF	5	0,15	33,33
CSUP	3	0,11	27,27

Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÔES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho, o qual teve como objetivo geral, como já mencionado, avaliar características de misturas asfálticas a quente moldadas nas faixas B e C do DNIT. De acordo com os resultados obtidos nos ensaios realizados e a análise dos dados, se fez possível a verificação de alguns comportamentos das mesmas, os quais faz-se menção a seguir.

Dosagem Marshall

Todos os parâmetros analisados alusivos a dosagem Marshall satisfizeram as normativas consideradas, sendo o teor de ligante um dos fatores mais preponderantes para este trabalho. Dentre as misturas ensaiadas, as composições superiores, BSUP e CSUP, obtiveram um acréscimo no teor de ligante em relação a suas referências, sendo mais significativo o aumento obtido na mistura BSUP, o qual foi de 0,54%.

As misturas da faixa B demandaram uma variação de ligante maior entre suas misturas e, as referências, B e C, assumiram valores de teores médios em relação todas as misturas. Para diagnóstico das misturas na Faixa C, pode-se afirmar que o teor foi menor na curva inferior, médio na referência e mais elevado na superior. A seguinte lógica foi repetida nas duas misturas da Faixa B, com exceção da BINF.

A mistura BINF teve um teor de ligante bastante elevado em comparação com a CINF, e comparável as demais. Percebeu-se que esta composição quando era misturada, continha aparente excesso de ligante asfáltico, e, quando moldados os corpos de prova, era perceptível uma sobra no recipiente de CAP e por vezes até ocorreu desagregação de agregados do corpo de prova. Mesmo a mistura tendo uma quantidade mas reduzida de agregados miúdos, entende-se que seja válida a verificação do teor de ligante por meio do extrator de betume Rotarex.

Resistência a tração

Através do ensaio de resistência à tração pode-se ressaltar que as misturas superiores obtiveram um aumento de valor em relação a suas referências, fato este, que repetiu-se para ambas as faixas, B e C, tendo acréscimos de 0,09 e 0,06 respectivamente. A mistura com a maior resistência a tração foi a CINF, assumindo o valor de 1,4MPa, visto que esta tem um teor de betume

inferior em relação mistura referência. A mistura enfatizada anteriormente, BINF, teve comportamento individualizado sendo a mais baixa resistência a tração obtida.

Módulo de resiliência

De acordo com pesquisadores, os valores para MR devem se manter acima de 3000 para serem considerados satisfatórios, neste caso, todas atenderam as exigências. Referente ao ensaio de módulo de resiliência teve-se o maior valor apresentado pela mistura CREF, com 6395MPa e o menor valor obtido na mistura BREF, 3187,90MPa.

Relação MR/RT

Visto que a razão MR/RT é empregada como um indicador da vida de fadiga de misturas e considerando que quanto menor o valor da relação, maior será a flexibilidade da mistura, sugere-se a mistura BREF, a qual apresenta uma relação numérica de 3187,90 com a vida de fadiga mais prolongada.

Estabilidade x fluência

Para os valores mínimos correspondentes a estabilidade, a totalidade dos resultados foi bastante superiores a 500kgF. Para fluência, teve-se a mistura CINF (7,5/.01in.) e CREF (7/.01in.) que não enquadrara-se entre 8/.01in e 16/.01in. Apesar disso, apenas a mistura CINF, com relação estabilidade/fluência de 73,24Kgf/.01in, seguiu os princípios da *Dirección Nacional de Vialidad* (1998) que indica relações entre 53,37 a 101,6kg/0,01in.

Relação betume/vazios (RBV)

As maiores relações betume/vazios foram encontradas nas misturas BSUP e CSUP, equivalendo a 76,42% e 75,61% respectivamente. Em relação a normatização considerada todas as elas asseguraram uma boa relação, assumindo valores entre de 74 a 76, considerados intermediários na faixa de 70 a 80% conforme preconizado pela *Dirección Nacional de Vialidad (1998).*

Relação fíler x betume

A totalidade das misturas mostraram-se dentro da faixa estudada para esta relação, sendo a mais baixa obtida na mistura BINF, que resultou 1,09. A exceção foi a mistura CSUP (1,36), visto que, a mesma possui porcentagem de material constituinte passante na #200 de 6,6%, elevando-se assim a relação filer/betume desta.

Relação do teor de CAP / passante na #200 / passante na #10

Com relação ao teor de ligante, as misturas mostraram que a medida que se aumentou a porcentagem passante na #200 e na peneira #10, o teor de CAP na mistura também teve elevação. Visto isto, menciona-se as composições BSUP e CSUP como as que tiveram os valores mais elevados para as três considerações. Excedeu-se do comportamento a BINF, que teve uma porcentagem de ligante maior (4,75%) enquanto diminui seu teor de agregados passantes nas #10 e #200, com valores respectivos de 23,2% e 5,2%

Peculiaridades entre as misturas asfálticas

As composições tiveram comportamentos (numéricos e aparentes) distintos entre si, mesmo que procedidas de forma igual. Essas diferenças foram importantes e possíveis graças ao arranjo granulométrico sofrer pequenas modificações passantes em peneiras de diâmetros menores, conforme explicitado neste trabalho. Os resultados corroboraram ainda mais a importância da distribuição granulométricas no desempenho de misturas almejáveis.

Dentre essas misturas, pode-se citar a BINF foi a que apresentou a menor RT dentre todas, o único valor de relação estabilidade/fluência dentro dos parâmetros estabelecidos, a maior relação passante #200 x passante #10, e a menor relação fíler x betume.

Quanto a composição BREF, requereu-se o teor de ligante de projeto mais baixo entre todas as misturas analisadas, 4,53% de CAP do total da composição. O módulo de resiliência e a relação betume/vazios também foram as mais baixas obtidas, além da menor relação MR/RT, apontando-a para uma vida de fadiga mais longa

Já a BSUP compreendeu em sua composição 52,5% de material pó de pedra (material retido somente nas peneiras < n°10), esta foi a que requereu o teor de betume mais alto entre todas elas, 5,07%, seu MR foi quase equivalente a média da mistura CSUP. Desta ainda, obteve-se a maior relação de betume/vazios (76,42%).

Para a CINF, teve-se o menor teor de ligante das misturas da Faixa C, equivalente a 4,63%. A maior resistência a tração e a relação passante #200 *x* passante #10 maior (numericamente igual a BINF) pertenceu a esta.

A CREF, teve o MR mais alto (6395MPa) e obteve a relação estabilidade x fluência mais elevada (192KfF/0.1in.). Sua RT foi intermediária entre sua curva inferior e superior.

Por fim, a respeito da mistura CSUP pode-se observar a maior porcentagem de material pó de pedra de todas as misturas, 64% do total, também a maior relação fíler x betume, e ainda, um teor de CAP inferior apenas BSUP.

REFERÊNCIAS

ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas.** Soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**. ASTM D 5-97.** Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, United States, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2041**: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. United States, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: **Cimento Portland e outros materiais em pó** – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6576:** Materiais asfálticos - Determinação da penetração, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7207**: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 9935:** Agregados – Terminologia, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook** Manual series no 4. Lexington, KY, USA, 1987. Versão traduzida, 2002.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Indutry glossary of Terms**. Disponivel em: <http://www.asphaltinstitute.org/> Acesso em 05/mai/2105.

BOEIRA, Fernando Dekeper. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales**. 2014. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia - Construção Civil e Preservação Ambiental) - UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p., il.

BERNUCCI, Leidi Bariani *et al*. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008. 501 p.,il.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. **Manual de Pavimentação**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, IPR - 719, 2006. 274 p., il.

CAVALCANTI, L.S. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas.** 222f, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro , 2010.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira; REIS, Rafael Marcal Martins de. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 151p., il.

CERVO, T.C.; MORO, R. R.; PEREIRA, D.S.; ROSSATO.F.P.; SPECHT.L.P. Estudo relacionando dosagens: um comparativo entre os métodos Marshall e Superpave. In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGIA EM ENGENHARIA, 26, Alegrete, 2014. Disponível em: <http://cc.alegrete.unipampa.edu.br/cricte/papers/cricte2014_submission_48.pdf >. Acesso em: Acesso em 01/mai/2015.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Brasília, 2014. 288p., il.

COELHO, V.; SÓRIA, M.H.A. Influência da Granulometria e da Temperatura nas Deformações Permanentes das Trilhas-de-Roda. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29, Cuiabá, 1995. v.2, p.402-431.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043: Misturas betuminosas a quente** - Ensaio Marshall, 1995, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME043-95.pdf> Acesso em 02/abril/2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 054: Equivalente de areia –** Método de ensaio, 1997, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME054-97.pdf > Acesso em 07/mai./2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 080: Solos: Análise granulométrica por peneiramento**, 1994, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME080-94.pdf> Acesso em 25/abr./2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 081 Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo** – Método de ensaio, Rio de Janeiro – RJ, 1998, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT081_1998_ME.pdf> Acesso em 02/mai./2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 084: Agregado miúdo** - determinação da densidade real – Método de ensaio, 1995, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME084-95.pdf> Acesso em 05/mai./2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNER-ME 120: Coleta de agregados**, Rio de Janeiro – RJ, 1997, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-PRO120-97.pdf> Acesso em 12/abr./2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 269: Projeto de restauração de pavimentos flexíveis –** Procedimento, 1994, Disponível em <http://www.coenge.ufcg.edu.br/download/Download_230.pdf> Acesso em 15/set./2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT 031-ES: Pavimentos flexíveis** - Concreto asfáltico – Especificação de serviço, Rio de Janeiro – RJ, 2006, Disponível em <http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/DNIT031_2006_ES.pdf>, Acesso em 06/abr./2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT 135-ME: Determinação do módulo de resiliência** – Método de ensaio, Rio de Janeiro – RJ, 2010, Disponível em < http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT135_2010_ME.pdf> Acesso em 06/mai./2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE**. DNIT 136-ME:**– **Determinação da resistência à tração por compressão diametral** – Método de ensaio, Rio de Janeiro – RJ, 2010, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT136_2010_ME.pdf> Acesso em 06/mai./2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE**. DNIT 155-ME:**– **Determinação da penetração** – Método de ensaio, Rio de Janeiro – RJ, 2010, Disponível em < http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT155_2010_ME.pdf > Acesso em 06/mai./2015.

DIRECCIÓN NACIONAL DE VIALIDAD. Bases y carpetas de mezclas preparadas en caliente - Pliego de especificaciones técnicas, Buenos Aires, 1998.

HIRSH.F. ROZEK.T.M, SPECHT.L.P . Avaliação do desgaste de misturas em concreto asfáltico considerando o teor de finos, índice de lamelaridade e tipo de ligante. In: Salão de iniciação científica, 18, Porto Alegre. Livro de resumos... Porto Alegre, 2006. Disponível em < http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/69542/Resumo_200601559.pdf?sequence=1>. Acesso em: 26/set/2015.

LEITE. L.F.M.; MOTTA.L. M. G.; BERNUCCI L.B.; SOARES J.B. *Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratry.* In: Asphalt Rubber – The pavement material of the 21 Century – Proceedings. Villamoura, Portugal. p. 309-318.

MARQUES. Geraldo.L.O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória,** 2004. 490f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MARQUES, G.L.O., MOTTA, L.M.G., LEITE, L.M., et al. Exemplos de Dosagem Superpave no Brasil. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33, Florianópolis. Anais... Florianópolis, 2001. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/249136246/Anais-33RAPvFlorianopolis#scribd> Acesso em: 14/abr./2015

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. 421 p., il.

MOTTA, Laura Maria Goretti. **Princípios de Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas**. Tradução Comentada, IBP – Instituto brasileiro do Petróleo, 41p. 2000.

MOTHÉ Michelle Gonçalves. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica,** 2009. 180f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Ciências – Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) c UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

NASCIMENTO, L.A. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente.** Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2008. 204f.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997. v.1., il.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Pini, 2001. v.2., il.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de Pneus**, 2004. 279 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2004.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. **Pavement design and materials**. New Jersey: J. Wiley, 2008. 542 p., il.

PETROBRÁS. Cimentos asfálticos de petróleo – CAPs. Disponivel em <http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/asfalticos/cap> Acesso em 05/mai/2105.

RHODE. L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos**, 2007. 250f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2007.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, R.E.; LEE, D.; KENNEDY, T.W. *Hot Mix Asphalt Materials: Mixture Design, and Construction*. Maryland: National Asphalt Pavement Association, 1996.

SILVA. H.M.R.D**. Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique,** 2005. 351f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho – Escola de Engenharia, Portugal, 2005. Disponível em: < http://www.crp.pt/docs/A45S121-11_Art_T5_7CRP_2013.pdf> Acesso em: 12/mai./2015.

SOARES, J.B.; FREITAS, F.A.C.; CASTELO BRANCO, J.V.; MOTTA, L.M.G. Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ. In: Reunião Anual de Pavimentação, 32, Brasília, 2000, v. I, p. 148-160.

TORRES, Raul Rodrigues. A história das primeiras rodovias pavimentadas. **Estradas,** Porto Alegre, ano 5, n.09, nov.2005, p. 64-70.

VASCONCELOS, Kamila Lima. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pela metodologia Marshall e SUPERPAVE com diferentes granulometrias**. 2004. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – UFC, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2 ed. New Jersey: J. Wiley, 1975. 711 p., il.

WASHINGTON ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION - WAPA. **Materials - Aggregate**. Disponível em <http://www.asphaltwa.com/category/6/61-wapa-pavement-types/>. Acesso em 16/abr./2015