

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Tiago da Silva Martini**

**DESENVOLVIMENTO DE DOSAGEM PARA MISTURA  
ASFÁLTICA DE CBUQ (CONCRETO BETUMINOSO  
USINADO A QUENTE) COM EMPREGO DE FRESADO PARA  
APLICAÇÃO EM VIAS URBANAS DE PORTO ALEGRE**

Porto Alegre  
2018

**TIAGO DA SILVA MARTINI**

**DESENVOLVIMENTO DE DOSAGEM PARA MISTURA  
ASFÁLTICA DE CBUQ (CONCRETO BETUMINOSO  
USINADO A QUENTE) COM EMPREGO DE FRESADO PARA  
APLICAÇÃO EM VIAS URBANAS DE PORTO ALEGRE**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientador: WASHINGTON PERES NÚÑEZ**

Porto Alegre  
2018

**TIAGO DA SILVA MARTINI**

**DESENVOLVIMENTO DE DOSAGEM PARA MISTURA  
ASFÁLTICA DE CBUQ (CONCRETO BETUMINOSO  
USINADO A QUENTE) COM EMPREGO DE FRESADO PARA  
APLICAÇÃO EM VIAS URBANAS DE PORTO ALEGRE**

Porto Alegre, 2018

Prof. Washington Peres Núñez  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientador

Dr. Lélío Antônio Teixeira Brito  
Doutor pela University of Nottingham  
Relator

**BANCA EXAMINADORA**

**Dr. Washington Peres Núñez**  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Dr. Lélío Antônio Teixeira Brito**  
Doutor pela University of Nottingham

**Ma. Lysiane Menezes Pacheco**  
Mestra pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha esposa, Francielli Vontobel e a meus pais, Arcenório F. Martini e Denir Martini

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus e a toda minha família, em especial à minha esposa Francielli Vontobel e meus pais Arcenório Francisco Martini e Denir Martini por estarem sempre ao meu lado e me apoiarem em minhas decisões.

Agradeço aos meus sogros Marne Vontobel e Cleusa Vontobel, à minha irmã Viviane Martini, meu cunhado Jurandir e minha afilhada Alessandra por compreenderem todas as vezes que deixei de comparecer a algum encontro de família.

Agradeço ao meu orientador Professor Washington Peres Núñez pela orientação neste trabalho, por me atender e sanar dúvidas no seu desenvolvimento, pelas aulas dadas em inúmeras disciplinas que cursei na área de pavimentação.

Ao relator do meu trabalho, o Professor Lélío Antônio Teixeira Brito, por se dispor a analisar e participar dessa minha empreitada.

Agradeço aos membros do LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS, em especial aos técnicos Mateus e Rodrigo por estarem sempre à disposição para desenvolver meu projeto, aos doutorandos Guilherme Ebani e Camila Kern e aos bolsistas.

Aos meus colegas da Prefeitura Municipal de Porto Alegre e aos meus amigos por entenderem quando muitas vezes deixei de participar de eventos e encontros ou até mesmo de me comunicar.

## RESUMO

MARTINI, T. S. **Desenvolvimento de dosagem para mistura asfáltica de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) com emprego de fresado para aplicação em vias urbanas de Porto Alegre**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre.

O crescimento das cidades e de suas populações tem acarretado o aumento das demandas por insumos, em especial aqueles utilizados nas construções civil dos grandes centros urbanos, o que gera custos imensos e muito acúmulo de lixo no planeta. Visando reduzir os custos e a degradação, foi elaborado esse estudo/trabalho, que consiste na utilização de material fresado, ou seja, reciclado, em misturas asfálticas a quente (CBUQ). O material fresado utilizado foi obtido por fresagem a frio, em uma via da cidade de Porto Alegre e recolhido no depósito do município. Os materiais empregados foram apresentados de forma sucinta: agregado mineral com sua definição, classificação quanto à natureza, quanto ao tamanho dos grãos e quanto à distribuição deles e também foram elencadas características importantes do agregado como limpeza, resistência à abrasão, textura superficial, forma da partícula, absorção, adesividade ao ligante asfáltico, sanidade, densidade específica e massa específica. Em relação ao CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), responsável por boa parte do custo da mistura asfáltica, foram apresentadas sua composição, obtenção, métodos de classificação, sendo que sua especificação baseia-se na penetração e nos ensaios de ponto de amolecimento, viscosidade saybolt-furol, viscosidade brookfield, índice de suscetibilidade térmica, ponto de fugor, solubilidade em tricloroetileno, ductilidade e efeito do calor e do ar a 163°C. Quanto ao agente rejuvenescedor, embora não empregado neste projeto, foi feita sua apresentação. Na mistura asfáltica com o emprego de fresado, foi aplicada a dosagem do Asphalt Institute (MARQ), esse método consiste em seguir os passos da dosagem Marshall convencional para misturas com emprego de materiais novos. Foi determinado um teor de projeto e realizados ensaios de Módulo de Resiliência, de Resistência à Tração e de Dano por Umidade Induzida para caracterização da mistura. Os resultados obtidos na caracterização da mistura apresentaram valores dentro de limites estabelecidos por norma, e com boa possibilidade do emprego da mistura nas vias de Porto Alegre.

Palavras chave: material fresado, mistura asfáltica, agregado.

## ABSTRACT

MARTINI, T. S. **Desenvolvimento de dosagem para mistura asfáltica de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) com emprego de fresado para aplicação em vias urbanas de Porto Alegre.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre.

The growth of cities and their populations has resulted to an increase in demand for inputs, especially those used in civil construction of large urban centers, which generates huge costs and a lot of garbage accumulation on the planet. Aiming to reduce costs and degradation, this study/work was elaborated, which consists in the use of recycled asphalt pavement, in hot asphalt mixtures (CBUQ). The recycled asphalt pavement used was obtained by cold milling, a street in the city of Porto Alegre and collected at the city's deposit. The materials used were presented in a succinct way: mineral aggregate with its definition, classification as to the nature, as to the size of the grains and as to the distribution of them, and were also listed important characteristics of the aggregate as cleaning, abrasion resistance, superficial texture, particle shape, absorption, adhesiveness to asphalt binder, sanity, specific density and specific mass. In relation to the Petroleum Asphalt Cement, responsible for a good part of the cost of the asphaltic mixture, were presented their composition, obtaining, methods of classification, being its specification is based on the penetration and tests of softening point, saybolt-furol viscosity, brookfield viscosity, index of thermal susceptibility, flash point, solubility in trichloroethylene, ductility and effect of heat and air at 163°C. As for the rejuvenating agent, although not employed in this project, its presentation was made. In the asphalt mixture with the use of milling, it was applied the dosage of the Asphalt Institute (MARQ), method which consists on following the steps of the conventional Marshall dosage for mixtures using new materials. A project quantity was determined and made the tests of Resilience Module, the Tensile Strength and the Induced Humidity Damage for characterization of the mixture. The results obtained in the characterization of the mixture presented values within limits established by norm, and with good possibility of the use of the mixture on the streets of Porto Alegre.

**Key-words:** recycled asphalt pavement, asphalt mix, aggregate.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da Análise por Peneiramento.....	26
Figura 2: Representação Convencional de Curvas Granulométricas .....	28
Figura 3: Esquema para medir parâmetros para determinação do equivalente de areia (EA)..	33
Figura 4: Esquema de Partícula de Agregado na Determinação da Gsa .....	35
Figura 5: Esquema de Partícula de Agregado na Determinação da Gsb .....	36
Figura 6: Esquema do Ensaio de Penetração.....	37
Figura 7: Esquema Viscosímetro Brookfield .....	38
Figura 8: Equipamento de Fresagem .....	40
Figura 9: Divisão da Amostra por Quarteamento.....	41
Figura 10: Extrator por Refluxo .....	42
Figura 11: Arranjo do Ensaio de Compressão Diametral.....	46
Figura 12: Ensaio de Compressão Diametral de Corpo-de-Prova Cilíndrico .....	47
Figura 13: Ensaio de Compressão Diametral de Corpo-de-Prova Cilíndrico .....	48
Figura 14: Redução da amostra .....	51
Figura 15: Amostra reduzida .....	51
Figura 16: Redução da amostra para refluxo.....	52
Figura 17: Amostra para refluxo .....	52
Figura 18: Início do ensaio de refluxo.....	54
Figura 19: Fim do ensaio solução pingando translúcida .....	54
Figura 20: Material fresado após extração do ligante.....	55
Figura 21: Adesividade sem cal .....	58
Figura 22: Adesividade com cal .....	58
Figura 23: Sem cal (descolamento) .....	59
Figura 24: Com cal (sem descolamento) .....	59
Figura 25: Ensaio de Penetração .....	63
Figura 26: Execução do Ensaio de Viscosidade .....	63
Figura 27: Ensaio de Ponto de Amolecimento .....	64
Figura 28: Amostra moldada para ensaio de Ductilidade .....	65
Figura 29: Fim do ensaio de Ductilidade de uma das Amostras .....	65
Figura 30: Curva Composição da Mistura.....	66
Figura 31: Gráfico Gmm em Função do Teor de Ligante .....	70



Figura 32: Gráficos dos parâmetros medidos e calculados em função do teor de ligante.....	73
Figura 33: Imagem dos Ensaios de MR e RT.....	78
Figura 34: Imagem condicionamento 16h à -18°C e banho 24h à 60°C.....	80
Figura 35: Possível separação do material ao virar o CP no compactador.....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	23
Tabela 2: Especificação Brasileira Para Agentes Rejuvenescedores (DNC 733/97) .....	25
Tabela 3: Dimensões nominais das peneiras segundo o DNER-ME 035/95 .....	27
Tabela 4: Massa Mínima por Amostra de Ensaio.....	28
Tabela 5: Determinação da Graduação do Material após Análise Granulométrica (DNER-ME 086/94).....	30
Tabela 6: Critérios para Adoção de Resultados Ensaio de Penetração .....	37
Tabela 7: Granulometria material fresado .....	56
Tabela 8: Granulometria do Agregado .....	57
Tabela 9: Ensaio de Índice de Forma .....	60
Tabela 10: Equivalente de Areia .....	60
Tabela 11: Ensaio de Abrasão “LOS ANGELES” .....	61
Tabela 12: Ensaio de Absorção .....	62
Tabela 13: Composição da Mistura .....	66
Tabela 14: Peso em massa dos materiais que compõe a mistura.....	67
Tabela 15: Peso e porcentagem de materiais que compõe a mistura para cada teor .....	68
Tabela 16: Volumetria e Massa Específica Aparente.....	69
Tabela 17: Resultado do Ensaio de Massa Espec. Máxima Medida .....	70
Tabela 18: Parâmetros Calculados do CPs para cada Teor .....	71
Tabela 19: Determinação da Estabilidade e Fluência.....	72
Tabela 20: Determinação valores médios dos parâmetros medidos e calculados .....	72
Tabela 21: Peso em massa dos materiais que compõe a mistura.....	74
Tabela 22: Peso e porcentagem de materiais que compõe a mistura para teor de projeto .....	74
Tabela 23: Volumetria e Massa Específica Aparente.....	75
Tabela 24: Parâmetros em função do N° de golpes.....	75
Tabela 25: Parâmetros e Valores médios para ensaios de MR e RT .....	76
Tabela 26: Volumetria e Massa Específica Aparente.....	76
Tabela 27: Parâmetros e Valores médios para ensaios Estabilidade e Fluência .....	77
Tabela 28: Parâmetros para ensaio de Dano por Umidade Induzida.....	77
Tabela 29: Resultado dos Ensaios de MR e RT .....	78
Tabela 30: Valores Médios de MR e RT .....	79

Tabela 31: Determinação da Estabilidade e Fluência no Teor de Projeto.....	79
Tabela 32: Valores Médios de Estabilidade e Fluência.....	79
Tabela 33: Resultado do Ensaio de RT para determinação do Dano por Umidade Induzida ..	81

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**AASHTO** - American Association of State Highway and Transportation Officials.

**ABNT NBR** - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Norma Brasileira.

**ANP** - Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia.

**CAP** - Cimento Asfáltico de Petróleo.

**CBUQ** - Concreto Betuminoso Usinado à Quente.

**cm** - centímetro (Unidade Comprimento).

**C.M.I** - Empresa Européia de Maquinário Pesado.

**CP** - Corpo-de-Prova.

**Cp** - centipoise (Unidade de Viscosidade).

**°C** - Graus Celsius.

**DCVU** - Departamento de Conservação de Vias Urbanas.

**DERSA** - Desenvolvimento Rodoviário S. A.

**DMT** - Massa Específica Máxima Teórica.

**DNER** - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem.

**DNIT** - Departamento de Infra-Estrutura de Transporte.

**EA** - Equivalente de Areia.

**EUA** - Estados Unidos da América.

**g** - gramas (Unidade de Massa).

**h** - horas (Unidade de Tempo).

**in situ** - no lugar.

**LA** - Abrasão LOS ANGELES.

**LAPAV** - Laboratório de Pavimentação.

**mmHg** - milímetros de mercúrio (Unidade de Pessão).

**MPa** – Megapascal.

**MR** - Módulo de Resiliência.

**mm/s** - milímetros por segundo (Unidade de Velocidade).

**N** - Newton (Unidade de Força).

**NCHRP** - National Cooperative Highway Research Program.

**Pa.s** - Pascal segundos (Unidade de Viscosidade).

**RBV** - Relação Betume/Vazios.

**RRT** - Resistência Retida à Tração.

**RT**- Resistencia à Tração.

**RTu** - Resistência à Tração após ciclo de condicionamento no ensaio de dano por umidade induzida.

**SSF** - Segundos Saybolt-Furol.

**UFRGS** - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**V** - Volume.

**VAM** - Vazios do Agregado Mineral.

**VCB** - Vazios com Betume.

**Vv** - Volume de Vazios.

$\sigma$  - Tensão.

$\varepsilon$  - Deformação.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	18
1.1 Justificativa .....	18
1.2 Objetivo .....	19
2. APRESENTAÇÃO DOS MATERIAIS .....	19
2.1 Agregado Mineral .....	19
2.1.1 Classificação dos Agregados .....	20
2.1.2 Características Importantes dos Agregados .....	22
2.2 Ligante Asfáltico CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) .....	22
2.3 Material Fresado .....	23
2.4 Agente Rejuvenescedor .....	24
3. MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS EMPREGADOS EM MISTURAS ASFÁLTICAS .....	25
3.1 Agregado Mineral .....	25
3.1.1 Análise Granulométrica .....	26
3.1.2 Ensaio de Adesividade .....	29
3.1.3 Ensaio de Índice de Forma .....	30
3.1.4 Ensaio de Sanidade .....	31
3.1.5 Ensaio de Equivalente de Areia .....	32
3.1.6 Ensaio de Resistência à Abrasão .....	33
3.1.7 Ensaio de Absorção .....	34
3.1.8 Ensaio de Massa Específica Real e Aparente .....	35
3.2 Ligante Asfáltico .....	36
3.2.1 Ensaio de Penetração .....	37
3.2.2 Ensaio de Viscosidade .....	38
3.2.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento .....	39
3.2.4 Ensaio de Ductilidade .....	39
3.3 Material Fresado .....	39
3.3.1 Extração do Ligante Asfáltico .....	40
3.4 Mistura Asfáltica .....	42
3.4.1 Dosagem Método Marshall .....	43
3.4.2 Ensaio de Módulo de Resiliência .....	44
3.4.3 Ensaio de Resistência à Tração .....	45
3.4.4 Ensaio de Dano por Umidade Induzida .....	48
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS ENSAIOS REALIZADOS .....	50
4.1 Material Fresado .....	50
4.1.1 Ensaio de refluxo .....	53
4.1.2 Análise Granulométrica .....	55
4.2 Agregado Mineral .....	56
4.2.1 Distribuição granulométrica .....	56

4.2.2	Adesividade .....	57
4.2.3	Índice de Forma .....	59
4.2.4	Sanidade .....	60
4.2.5	Equivalente de Areia.....	60
4.2.6	Resistencia à Abrasão .....	60
4.2.7	Absorção .....	61
4.2.8	Massa Específica Real e Aparente.....	61
4.3	Ligante Asfáltico .....	62
4.3.1	Ensaio de Penetração .....	62
4.3.2	Ensaio de Viscosidade .....	63
4.3.3	Ensaio de Ponto de Amolecimento .....	64
4.3.4	Ensaio de Ductilidade .....	64
4.4	Mistura Asfáltica .....	66
4.4.1	Composição .....	66
4.4.2	Moldagem dos corpos-de-prova no teor de projeto .....	74
4.4.3	Módulo de Resiliência e Resistência à Tração .....	77
4.4.4	Estabilidade e Fluência no Teor de Projeto .....	79
4.4.5	Dano por Umidade Induzida.....	80
5.	CONCLUSÃO .....	82
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

## 1. INTRODUÇÃO

Todo revestimento de pavimentação rodoviária, rígido ou flexível, tem sua vida útil limitada, em especial o alvo desse trabalho, revestimento flexível composto por misturas de Cimento Asfáltico de Petróleo-CAP e agregado, projetado para alcançar um período de serviço (vida útil) de aproximadamente 10 anos. Durante a vida de um pavimento, o CAP do revestimento envelhece por oxidação. Essa oxidação ocorre com maior velocidade nas camadas superficiais, onde existe uma maior exposição a elementos que alteram as características do ligante (Roberts et al., 1996). O efeito da temperatura e das demais condições climáticas nos pavimentos asfálticos causa seu envelhecimento e leva a um enrijecimento da mistura betuminosa. Com o fim da vida útil do pavimento, ou durante ela, faz-se necessária sua substituição ou manutenção, para evitar o acúmulo de capas de revestimentos se sobrepondo umas sobre as outras, o que traz prejuízos às cotas das vias. Diante de tal fato, executa-se a fresagem da capa e, quando necessário, de camadas subjacentes ao revestimento.

Com a escassez de matéria-prima (CAP- produto da destilação do Petróleo e agregado (brita) proveniente do desmonte de rochas) e a crescente e justa preocupação com o meio ambiente, tem-se procurado desenvolver métodos de reaproveitamento de resíduos, entre eles os provenientes de processo de fresagem de pavimentação asfáltica, não apenas da capa de rolamento, mas também das camadas abaixo dela. Não é possível deixar de comentar sobre a questão econômica que se faz também importante, principalmente em momentos de dificuldades de desprender recursos para a manutenção e substituição de pavimentações.

No estudo, desenvolveu-se um projeto de dosagem de mistura asfáltica com o emprego de material fresado na proporção de 30%, se enquadrando à Faixa C do DNIT. Para tanto foram analisados parâmetros de caracterização dos agregados, ligante e material a reciclar, sendo analisada também a mistura em suas características mecânicas para compará-la a uma mistura convencional de CBUQ.

### 1.1 Justificativa

A demanda por insumos para pavimentação só tem crescido, juntamente com o aumento das urbanizações, no sentido contrário, a oferta por esses materiais diminui, tornando-se cada vez mais escasso, no entanto cresce também a conscientização e novas políticas de preservação ambiental. No viés das justificativas para se desenvolver um projeto de reaproveitamento de resíduos de pavimentação, não pode deixar de ser mencionada a questão econômica que envolve



a reciclagem. A quantidade de 30% de resíduos de pavimentação rodoviária (fresados) empregada numa mistura asfáltica, para a constituição de um novo revestimento, mostra-se como uma boa alternativa para começar o estudo. Este projeto, estudou formas de encontrar propriedades e especificações requeridas para que se possa empregar a mistura nas vias de Porto Alegre.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo deste trabalho foi analisar a dosagem (traço) de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), com o emprego de fresado (resíduo da escarificação da camada de revestimento de vias urbanas de Porto Alegre), para chegar a uma mistura asfáltica dentro dos padrões exigidos por norma e comparar com uma dosagem convencional formulada pelo LAPAV (Laboratório de Pavimentação da UFRGS).

## **2. APRESENTAÇÃO DOS MATERIAIS**

O revestimento asfáltico é basicamente formado por agregado mineral e ligante asfáltico, podendo ainda serem introduzidos produtos complementares. Para a dosagem deste trabalho também foi empregado o material fresado, que é formado por agregado mineral e ligante, no entanto o agente rejuvenescedor, que também é muito importante para as misturas com emprego de fresado, não será empregado na dosagem, devido limitações. Neste capítulo apresentar-se-ão os tipos de Agregados, de Ligante Asfáltico, de Material Fresado e as características do Agente Rejuvenecedor.

### **2.1 Agregado Mineral**

Segundo a norma ABNT NBR 9935/2005, o termo agregado é especificado como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassa e de concretos.

Woods (1960) define agregado como sendo uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais usados em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa, etc.

O agregado mineral forma o esqueleto mineral do revestimento asfáltico que associado com o ligante forma uma estrutura capaz de suportar aos esforços impostos pelo tráfego de veículos quando escolhido e aplicado de forma adequada.

### **2.1.1 Classificação dos Agregados**

Bernucci et al. (2006) classificam os agregados para pavimentação segundo sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos.

A classificação quanto à natureza pode ser: natural, artificial e reciclado.

Natural - Inclui todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios.

Os agregados provenientes de rochas naturais pertencem a um de quatro tipos principais, que são ígneos, sedimentares, metamórficos ou areias e pedregulhos:

- a) Rochas ígneas são aquelas que se solidificaram de um estado líquido e apresentam composição química, granulação, textura e modos de ocorrência muito variáveis;
- b) Rochas sedimentares são tipicamente formadas pelo intemperismo e erosão de rochas preexistentes, e seu resultado transportado pela ação da água, vento ou gelo;
- c) Rochas metamórficas ocorrem como resultado de alteração por aquecimento, pressão ou atividade química de rochas ígneas ou sedimentares existentes;
- d) Areias e pedregulhos são agregados naturais, provenientes das rochas de que são originários e dos processos de transporte sofridos antes da deposição.

Artificial - São resíduos de processos industriais, tais como a escória de alto-forno e de aciaria, ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada (CABRAL, 2005) e a argila expandida. O tipo de agregado artificial atualmente mais utilizado em pavimentação são os vários tipos de escórias, subprodutos da indústria do aço.

Reciclado - Nessa categoria estão os provenientes de reuso de materiais diversos. A reciclagem de revestimentos asfálticos existentes vem crescendo significativamente em importância e em alguns países já é a fonte principal de agregados. Destaca-se também a utilização crescente de resíduo de construção civil em locais com ausência de agregados pétreos ou mesmo em áreas urbanas que possuam pedreiras, como forma de reduzir os problemas ambientais de disposição destes resíduos (FERNANDES, 2004).

O segundo critério de classificação dos agregados é o tamanho para o uso em misturas asfálticas: graúdo, miúdo e material de enchimento ou fíler segundo a norma (DNIT 031/2004 – ES).

Graúdo - Material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira n° 10, como as britas, cascalhos, seixos etc.;

Miúdo - Material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. É o material que é retido na peneira de n° 200, mas que passa na de abertura n° 10, como as areias, o pó de pedra etc.;

Material de enchimento (fíler) - Material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, correspondente à peneira de n° 200, como cal hidratada, cimento Portland etc.

O terceiro critério para classificação dos agregados é quanto à distribuição dos grãos. Esse critério, que leva em conta a distribuição granulométrica dos agregados, é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes, incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc.

Entre as mais importantes graduações estão as listadas a seguir, conforme Bernucci et al. (2006):

Agregado de graduação densa ou bem-graduada - Apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima à de densidade máxima;

Agregado de graduação aberta - Apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, resultando em maior volume de vazios;

Agregado de graduação uniforme - Apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita. A curva granulométrica é bastante íngreme;

Agregado com graduação com degrau ou descontínua - Apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar na curva granulométrica correspondente às frações intermediárias.

### **2.1.2 Características Importantes dos Agregados**

Segundo Roberts et al. (1996), são as propriedades físicas dos agregados que determinam principalmente a adequação para o uso em misturas asfálticas e em menor extensão as propriedades químicas.

Conforme Bernucci et al. (2007), são propriedades físicas e mecânicas básicas a resistência, a porosidade e a densidade. Propriedades físico-químicas tais como umidade, adesividade e, em consequência, descolamento da película de asfalto são características da composição e da estrutura dos minerais no agregado, entre outros fatores.

As características importantes dos agregados para os revestimentos asfálticos podem ser resumidas nas seguintes: tamanho e graduação, limpeza, resistência à abrasão, textura superficial, forma da partícula, absorção, adesividade ao ligante asfáltico, sanidade e densidade específica e massa específica.

## **2.2 Ligante Asfáltico CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo)**

Conforme Bernucci et al. (2006), no Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das ruas. A composição dos revestimentos asfálticos é normalmente formada por aproximadamente 5% de ligante e o restante por agregado mineral, no entanto o ligante é responsável por boa parte do custo da mistura asfáltica.

O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. No Brasil, utiliza-se a denominação CAP para designar esse produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. O CAP é um material quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno ou em bissulfeto de carbono.

Os CAPs são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de hétero-átomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Os cimentos asfálticos de petróleos brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio, enquanto os procedentes de petróleos árabes e venezuelanos têm alto teor de enxofre (LEITE, 1999).

A penúltima especificação brasileira de CAP, vigente de 1992 até julho de 2005, separava em duas famílias de ligantes: os especificados por penetração e os especificados pela

viscosidade absoluta. Por penetração, havia quatro classes de asfalto: CAP 30-45, CAP 50-60, CAP 85-100 e CAP 150-200, sendo esses números associados à faixa de penetração obtida no ensaio. Por viscosidade, os asfaltos brasileiros eram subdivididos em três grupos: CAP 7, CAP 20 e CAP 40, sendo esses números associados ao início da faixa de viscosidade de cada classe.

Em julho de 2005 foi aprovada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP) uma nova especificação de CAP para todo o Brasil, em substituição às duas anteriores mostradas. Essa nova especificação baseia-se na faixa de penetração e nos ensaios de ponto de amolecimento, de viscosidade saybolt-furol, de viscosidade brookfield, de índice de suscetibilidade térmica, de ponto de fugor, de solubilidade em tricloroetileno, de ductilidade e de efeito do calor e do ar a 163°C e é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1: Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
<b>Viscosidade Saybolt-Furol</b>							
a 135°C, mín.	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150°C, mín.		90	50	43	36		
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
<b>Viscosidade Brookfield</b>							
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150°C, mín.		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Dutibilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
<b>Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos</b>							
Varição em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Dutibilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín. (*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: Bernucci et al. (2006)

## 2.3 Material Fresado

A fresagem de pavimento foi facilitada na segunda metade da década de 70, quando foi desenvolvido o equipamento de fresagem, simultaneamente na Europa e na América do Norte. O equipamento possibilitou a fresagem em diversas espessuras do revestimento, além de

resultar num material fresado com granulometria adequada. Em 1980 teve início a utilização do equipamento no Brasil, com fresadora de origem americana (Roto-Mill PR-525 da C.M.I), na Via Anchieta, serviço prestado à DERSA - Desenvolvimento Rodoviário S. A. (BONFIM, 2001).

Consolidada, a fresagem de pavimentos asfálticos é uma técnica bastante utilizada no processo de restauração de pavimentos deteriorados e na solução de problemas tipicamente de vias urbanas. Conforme (NASCIMENTO, 2011) essas fresagens podem ser classificadas como:

**Fresagem superficial** - Denominada também de fresagem de regularização, corrige apenas defeitos superficiais no revestimento. O recapeamento não é obrigatório, pois a textura da pista pós fresagem permite rolamento de forma segura, porém vale salientar que não é muito confortável. Contudo, dependendo da densidade dos dentes de corte do cilindro, a superfície após a fresagem pode ser bem mais confortável ao rolamento. Essa técnica pode ser empregada para corrigir defeitos tipo exsudação, deformação plástica e aderência pneu-pavimento.

**Fresagem rasa** - Este processo normalmente é realizado com profundidades de corte em torno de 5cm. É aplicado, principalmente, em vias urbanas, para correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais.

**Fresagem profunda** - Neste processo o corte pode atingir, além da camada de revestimento, as camadas de ligação, de base e até de sub-base do pavimento. Utiliza-se quando da recomposição da estrutura do pavimento, reciclagem com incorporação do revestimento à base.

O processo de remoção do material, para esse trabalho, foi por fresagem a frio, ou seja, executado à temperatura ambiente, ocorrendo a quebra de parte dos agregados, o que proporciona alteração da curva granulométrica do material existente na pista

## 2.4 Agente Rejuvenecedor

Segundo Bernucci et al. (2006), com o passar do tempo, o ligante asfáltico vai perdendo alguns de seus componentes e sofre certo enrijecimento. Uma das técnicas atuais de recuperação da flexibilidade do ligante é a reciclagem a quente ou a frio. Para isso, é utilizado um produto especialmente preparado para funcionar como um repositor de frações maltênicas do ligante envelhecido, chamado agente rejuvenecedor.

Os agentes rejuvenecedores são utilizados em processos de reciclagem a quente, seja em usina ou *in situ*. A Tabela 2 mostra a especificação brasileira dos agentes rejuvenecedores.

**Tabela 2: Especificação Brasileira Para Agentes Rejuvenescedores (DNC 733/97)**

Características	Unidade	Especificações					
		AR1	AR5	AR25	AR75	AR250	AR500
		Mín. Máx.	Mín. Máx.	Mín. Máx.	Mín. Máx.	Mín. Máx.	Mín. Máx.
Viscosidade cinemática, 60°C	cSt	50	176	901	4.501	12.501	37.501
		175	900	4.500	12.500	37.500	60.000
Ponto de fulgor (VAC) <sup>1</sup>	°C	218	218	218	218	218	218
Saturados	% massa	30	30	30	30	30	30
ECA, 163°C (Efeito do calor e do ar)							
Razão viscosidade <sup>2</sup>	–	4	4	4	4	4	4
Variação de massa, máx.	%	4	4	3	3	3	3
Densidade 20/4°C		Anotar	Anotar	Anotar	Anotar	Anotar	Anotar

**Fonte: Bernucci et al. (2006)**

### **3. MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS EMPREGADOS EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

Nesse capítulo especificar-se-ão os métodos para caracterização dos materiais empregados na mistura asfáltica, agregados minerais, ligante asfáltico, material fresado e também os ensaios da mistura asfáltica. Essa caracterização dos materiais é fundamental para o emprego deles na mistura, com a finalidade de obtermos um concreto asfáltico dentro dos padrões e normas exigidos para seu emprego na pavimentação de vias.

#### **3.1 Agregado Mineral**

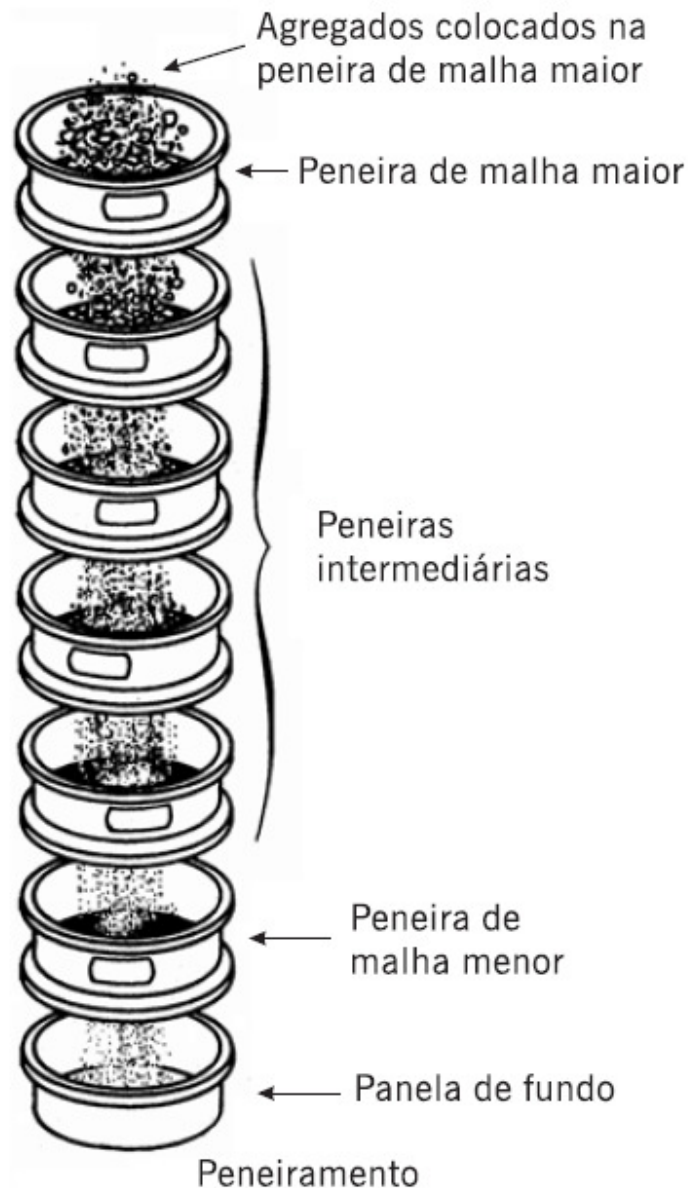
O agregado mineral para ser empregado em misturas asfálticas necessita ser avaliado em uma serie de ensaios de caracterização, entre os principais estão o da análise granulométrica, o de adesividade, o de índice de forma, o de sanidade, o de equivalente de areia, o de resistência à abrasão, o de absorção e o de massa especifica real e aparente.

### 3.1.1 Análise Granulométrica

Na mistura asfáltica, a distribuição granulométrica tem influência nas principais características do revestimento: rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida e etc., conforme Bernucci et al (2006).

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 malha, progressivamente menores, conforme Figura 1.

**Figura 1: Ilustração da Análise por Peneiramento**



Fonte: Bernucci et al (2006)



Os tamanhos de peneiras a serem usadas na análise granulométrica são os mostrados na Tabela 3, conforme norma DNER-ME 035/95.

O procedimento de análise por peneiramento é descrito na norma DNER-ME 083/98. Os resultados são expressos na forma de tabelas ou gráficos como indicado na Figura 2.

A seguir são denominadas as mais importantes graduações, ilustradas na Figura 2.

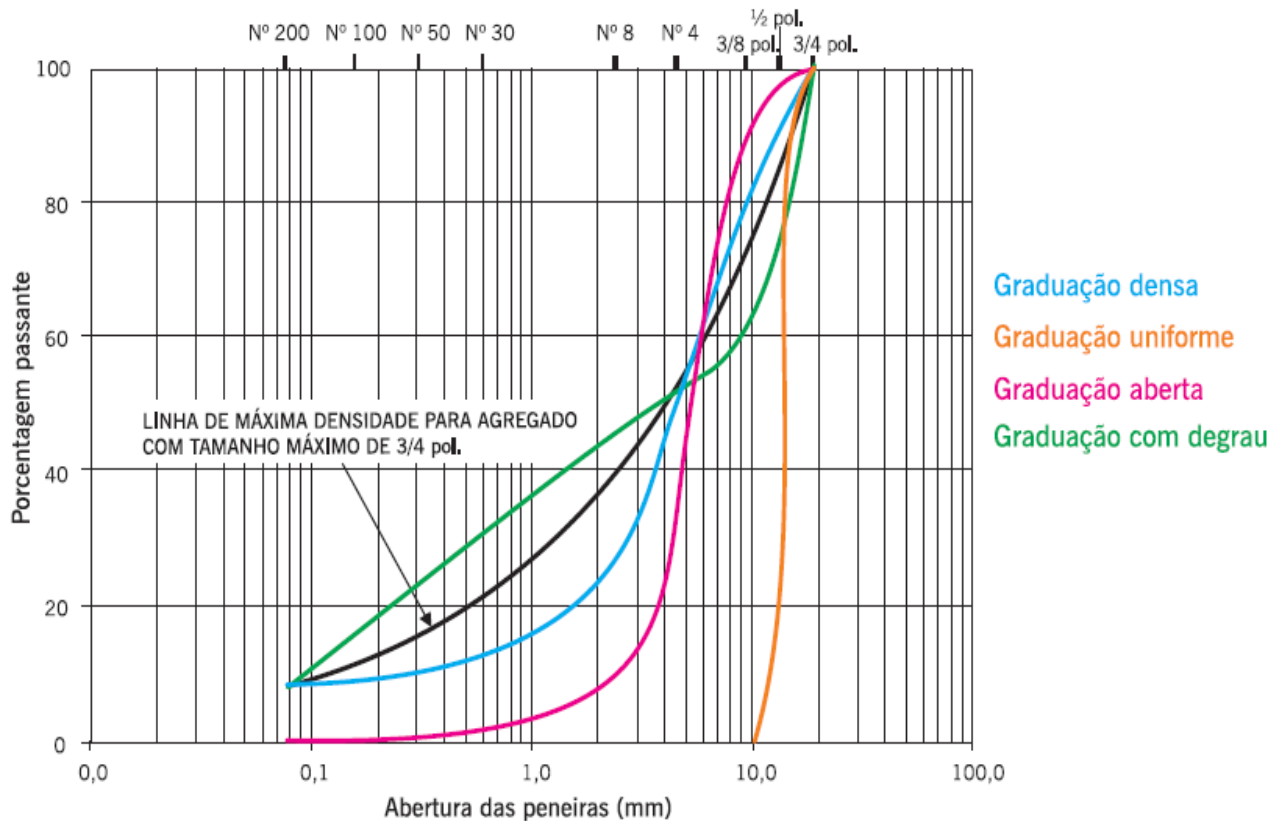
- Agregado de graduação densa ou bem-graduada;
- Agregado de graduação aberta;
- Agregado de graduação uniforme;
- Agregado apresentando graduação com degrau ou descontínua;

**Tabela 3: Dimensões nominais das peneiras segundo o DNER-ME 035/95**

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

Fonte: Bernucci et al. (2006)

**Figura 2: Representação Convencional de Curvas Granulométricas**



Fonte: Bernucci et al. (2006)

O ensaio baseia-se, entre outros procedimentos, na coleta da amostra em campo conforme a DNER-ME 120/97, e cuidadosamente misturada para sua remessa ao laboratório após sua redução conforme DNER-PRO 199/96. No laboratório, é reduzida por quarteamento ou uso de repartidores de amostra nas quantidades indicada na Tabela 4.

**Tabela 4: Massa Mínima por Amostra de Ensaio**

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

Fonte: DNER-ME 083/98

O ensaio pode ser realizado por peneiramento mecânico ou manual. No peneiramento mecânico o procedimento baseia-se nas seguintes etapas:

- Secagem da amostra em estufa a  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  e esfriamento a temperatura ambiente;
- Encaixe das peneiras no agitador na ordem crescente da base ao topo;
- Colocação da quantidade da amostra sobre a peneira superior;
- Realização do peneiramento na série de peneiras especificadas ao caso pertinente, pela agitação mecânica do conjunto;
- O peneiramento deve ser continuado até que não mais que 1% da massa total da amostra passe em qualquer peneira durante 1(um) minuto;
- Pesar com aproximação de 0,1% sobre a massa total, o material retido em cada peneira, juntamente com a porção que por ventura tenha ficado presa nas malhas; O somatório de todas as massas retidas não deve diferir de mais de 0,3% da massa total seca.
- Somam-se as massas retidas em cada peneira e compara-se este total com a massa inicial da amostra seca; havendo diferença superior a 0,5% repita o ensaio.
- Calcular a porcentagem de massa retida em cada peneira em relação à massa total da amostra seca;

### **3.1.2 Ensaio de Adesividade**

Segundo Bernucci et al (2006), os ensaios para determinação das características de adesividade podem ser subdivididos em dois grupos: os que avaliam o comportamento de partículas de agregados recobertas por ligante asfáltico e aqueles que avaliam o desempenho de determinadas propriedades mecânicas de misturas sob a ação da água.

Para este trabalho foi usado o método da DNER-ME 078/94, que consiste em imergir a mistura asfáltica não compactada em água e as partículas cobertas por ligante asfáltico são avaliadas visualmente.

Segundo a DNER-ME 078/94, a amostra previamente preparada e o ligante betuminoso são aquecidos, se necessário, à temperatura especificada. Sobre o agregado coloca-se uma quantidade de ligante e com uma espátula procede-se o completo envolvimento do agregado.

O agregado envolvido com o ligante é colocado sobre uma superfície lisa para que esfrie (cure ou rompa), em seguida é colocado em um frasco de vidro totalmente recoberto com água destilada. O frasco é colocado em estufa à  $40^\circ\text{C}$  e mantido em repouso por 72 horas.

O resultado é anotado como satisfatório quando não houver nenhum descolamento da película betuminosa no fim das 72 horas.

### 3.1.3 Ensaio de Índice de Forma

O índice de forma é avaliado por meio das formas das partículas do agregado, característica essa que tem importância na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e também altera a energia de compactação das misturas. A determinação do índice de forma (f) é caracterizada por ensaio descrito pela DNER-ME 086/94 e tem como parâmetro obter um agregado de forma mais cúbica possível, sendo o índice (f) variável de 0,0 a 1,0 e quanto mais próximo de 1,0 mais cúbica é a partícula, sendo adotado o limite mínimo como  $f=0,5$ , conforme Bernucci et al. (2006). Segue em sequência uma prévia da DNER-ME 086/94.

#### AMOSTRA:

- Proceder-se, inicialmente, à análise granulométrica do material para se conhecer em qual das graduações da Tabela 5 ele se enquadra;
- Escolhida a graduação, selecionam-se as frações de quantidades indicadas na Tabela 5, usando-se as peneiras com crivos de abertura circular.

**Tabela 5: Determinação da Graduação do Material após Análise Granulométrica (DNER-ME 086/94)**

Graduação	Crivos de abertura circular mm		Pesos das frações da amostra g	Crivos redutores correspondentes mm**	
	Passando *	Retido		Crivo I	Crivo II
A	76,0	63,5	3 000	38,0	25,0
	63,5	50,0	3 000	32,0	21,0
	50,0	38,0	3 000	25,0	17,0
	38,0	32,0	3 000	19,0	12,7
B	32,0	25,0	2 000	16,0	10,5
	25,0	19,0	2 000	12,7	8,5
	19,0	16,0	2 000	9,5	6,3
C	19,0	16,0	2 000	9,5	6,3
	16,0	12,7	2 000	8,0	5,3
	12,7	9,5	2 000	6,3	4,2
D	12,7	9,5	1 000	6,3	4,2
	9,5	6,3	1 000	4,8	3,2

\* Tamanho diretriz

\*\* Abertura em tamanhos comerciais

Fonte: DNER-ME 086/94

**ENSAIO:**

- De cada fração, separam-se as partículas retidas no crivo redutor de abertura igual à metade do tamanho diretriz correspondente, anotando-se o seu peso (crivo I);
- O material que passar no primeiro crivo redutor deve ser testado em um segundo crivo redutor de abertura igual 1/3 do tamanho diretriz da fração. Anota-se o peso do material retido neste crivo (crivo II);
- Repetem-se as operações acima com todas as frações que compõem a graduação escolhida.

**RESULTADO:**

- Para cada fração que compõem a graduação determina-se, em relação a seu peso inicial, as percentagens retidas em cada crivo redutor;
- O índice de forma calcula-se pela Expressão (1):

$$f = \frac{P_1 + 0,5P_2}{100n} \quad (1)$$

Onde:

$f$  = índice de forma;

$P_1$  = soma das percentagens retidas nos crivos I, de todas as frações que compõem a graduação;

$P_2$  = soma das percentagens retidas nos crivos II, de todas as frações que compõem a graduação;

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

**3.1.4 Ensaio de Sanidade**

O ensaio de sanidade tem como objetivo determinar a resistência do agregado à desintegração pela ação do tempo. O ensaio é basicamente atacar o agregado com uma solução saturada de sulfato de sódio ou de magnésio em ciclos com duração de 16 a 18 horas, à temperatura de 21°C seguido de secagem. Segundo a norma DNER-ME 089/94, no ensaio deve ser executada a quantidade de ciclos satisfatória, Bernucci et al. (2006) recomendam cinco ciclos e como resultado obter perda inferior a 12% da massa da amostra desse agregado. A norma também instrui a execução de exame qualitativo e registro em duas partes:

- Observação do efeito da ação do sulfato de sódio ou de magnésio e a natureza da ação;
- Contagem do número de partículas afetadas.

De um modo geral, as ações observadas podem ser classificadas como: desintegração, fendilhamento, esmagamento, quebra ou laminagem. Embora, somente para as partículas maiores que 19 mm seja exigido exame qualitativo, recomenda-se fazer o exame das partículas de menor tamanho para que se verifique se há evidência de fendilhamento excessivo.

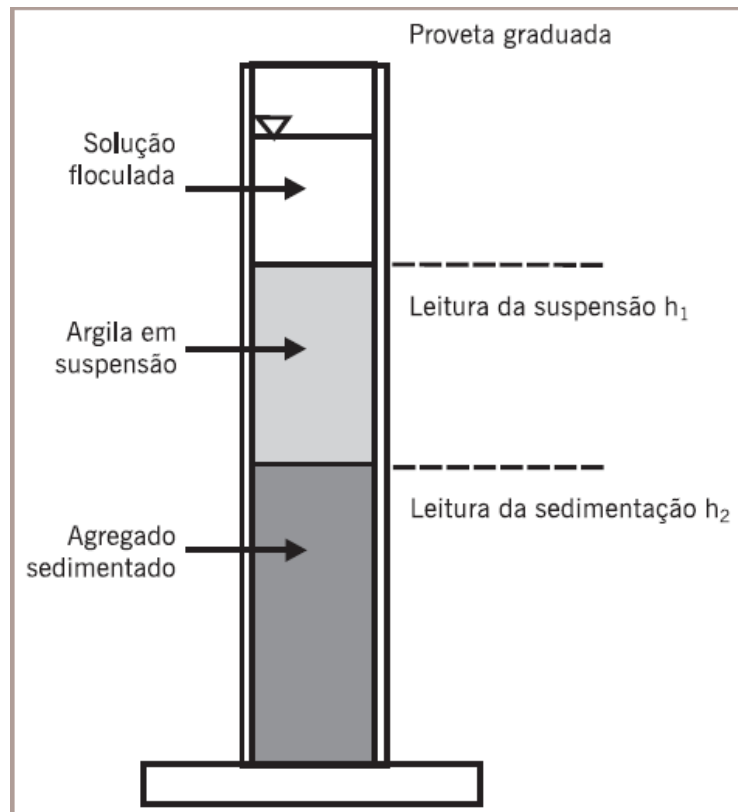
### **3.1.5 Ensaio de Equivalente de Areia**

O material para revestimento asfáltico (agregado) deve conter um grau de limpeza, sendo que alguns materiais presentes nos agregados são impróprios para a pavimentação (matéria orgânica, argila entre outros). Tais materiais podem estar presos à superfície do agregado. O ensaio de equivalente de areia (EA) determina a proporção relativa de materiais do tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdo. O ensaio, executado conforme a DNER-ME 054/97, consiste em colocar em uma proveta, contendo uma solução de cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído, uma amostra de agregados com tamanho inferior a 4,8 mm, por um tempo de 20 minutos, agitar a solução com o agregado por 30 segundos, completar a proveta com a solução até o nível determinado e deixar em repouso por mais 20 minutos.

#### **Análise do resultado:**

- Leitura da altura do material floculado em suspensão ( $h_1$ ), conforme Figura 3;
- Leitura do material sedimentado (agregado) ( $h_2$ ) com a introdução de um bastão padronizado na proveta, conforme Figura 3.

**Figura 3: Esquema para medir parâmetros para determinação do equivalente de areia (EA)**



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2006)

O resultado do equivalente de areia EA é determinado conforme a Expressão (2). Para agregado satisfatório ao uso em concreto asfáltico é necessário EA maior que 55%.

$$EA = \frac{h_2}{h_1} * 100 \quad (2)$$

### 3.1.6 Ensaio de Resistência à Abrasão

O manuseio e a execução da camada de revestimento asfáltico podem acarretar em desgaste do agregado pétreo, além de também existir o desgaste causado pelo tráfego de veículos aos agregados situados nas camadas superiores do revestimento. Para medir a resistência do agregado que será empregado na mistura são executados alguns ensaios, no caso da resistência à abrasão é comum e usual o ensaio de resistência à abrasão LOS ANGELES. No ensaio uma amostra de aproximadamente 5000 g( $m_i$ ) de agregado é submetida a 500 ou 1000 revoluções no interior de um cilindro de um equipamento padronizado. Conforme a granulometria da amostra, é colocado um variado número de esferas no equipamento. Os equipamentos, procedimentos e resultados são detalhados na DNER-ME 035/98, segundo ela

o resultado é avaliado pela redução de massa do agregado retido na peneira 1,7 mm (ABNT n° 12), conforme a Expressão (3):

$$LA = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (3)$$

$LA$  = abrasão LOS ANGELES;

$m_i$  = massa inicial da amostra;

$m_f$  = massa final retida na peneira n° 12 (1,7 mm).

Segundo Bernucci et al. (2006), as especificações brasileiras que envolvem o uso de agregado em camadas de base e revestimento de pavimentos, normalmente limitam o valor de abrasão LOS ANGELES ( $LA$ ) entre 40 e 55%.

### 3.1.7 Ensaio de Absorção

A quantidade (líquida ou fluída) absorvida por um agregado está relacionada à porosidade do material (agregado), e esta medida é fundamental para a determinação da quantidade de ligante asfáltico (CAP) que será empregada na mistura asfáltica.

Agregados naturais e/ou britados muito porosos não são indicados para comporem concretos asfálticos, devido ao alto consumo do ligante. Contudo em determinadas localidades, devido à escassez de materiais, faz-se necessário o uso de materiais com elevada absorção.

A absorção pode ser determinada pela DNER-ME 081/98, e o ensaio consiste basicamente em imergir o agregado durante 24 h e determinar a relação entre a diferença da massa de agregado saturado superfície seca  $m_h$  e a massa do agregado seco em estufa  $m_s$  e a massa de agregado seco em estufa  $m_s$  conforme a Expressão (4):

$$a = \frac{m_h - m_s}{m_s} * 100 \quad (4)$$

$a$  = absorção do agregado, em porcentagem;

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

$m_s$  = massa ao ar do agregado seco em estufa, em g.



### 3.1.8 Ensaio de Massa Específica Real e Aparente

A definição de massa específica, segundo Pinto (2000), é a relação entre a quantidade de matéria (massa) e seu volume.

No estudo de agregados são definidas três designações de massa específica: real, aparente e efetiva. A DNER-ME 081/98, assim como a ABNT NBR NM 53/2009, especificam os métodos de ensaios para determinar as massas específicas.

A massa específica real ( $G_{sa}$ ) é determinada pela relação entre a massa seca ( $m$ ) da amostra e seu volume, conforme a Expressão (5):

$$G_{sa} = \frac{m}{m - m_a} = \frac{\text{massa seca}}{\text{volume}} \quad (5)$$

$G_{sa}$  = massa específica real;

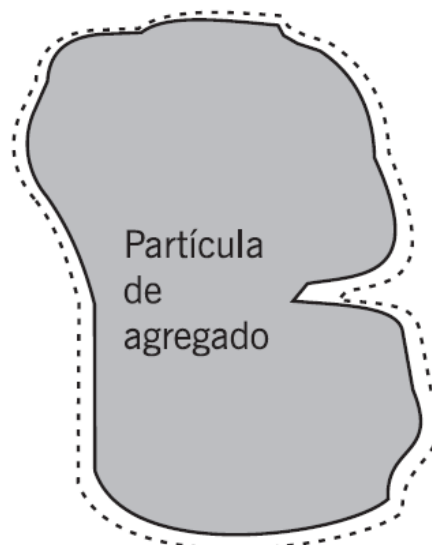
$m$  = massa ao ar da amostra seca;

$m_a$  = massa em água da amostra;

$m - m_a$  = volume.

Conforme o Asphalt Institute (1989), esse parâmetro considera somente o volume da partícula do agregado e não inclui o volume de qualquer poro ou capilaridade, conforme a Figura 4.

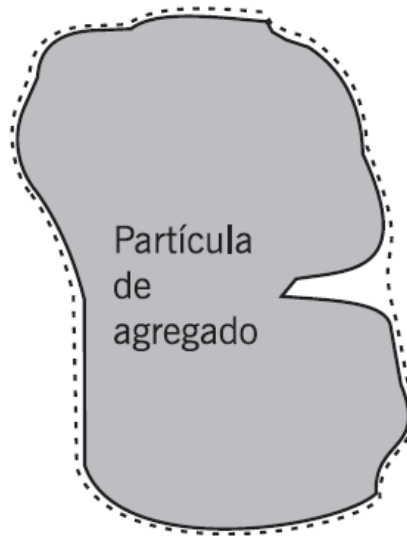
**Figura 4: Esquema de Partícula de Agregado na Determinação da  $G_{sa}$**



Fonte: Bernucci et al. (2006)

A massa específica aparente ( $Gsb$ ) é determinada considerando o material como um todo, sem descontar os poros, considerando-se a forma aparente do agregado. Para sua determinação divide-se a massa seca do agregado pelo volume aparente, conforme a Figura 5.

**Figura 5: Esquema de Partícula de Agregado na Determinação da  $Gsb$**



Fonte: Bernucci et al. (2006)

A Expressão (6) determina o valor da massa específica aparente ( $Gsb$ ):

$$Gsb = \frac{m_s}{m_s - m_a} = \frac{\text{massa seca}}{\text{volume aparente}} \quad (6)$$

$Gsb$  = massa específica aparente;

$m_s$  = massa na condição superfície saturada seca (SSS);

$m_a$  = massa em água da amostra;

$m_s - m_a$  = volume aparente.

A massa específica efetiva é determinada quando se trabalha com misturas asfálticas com teor de ligante conhecido o que não é o caso em estudo.

### 3.2 Ligante Asfáltico

Conforme já mencionado no capítulo 2.2, o ligante empregado na pesquisa será o Cimento Asfáltico de Petróleo (designado simplesmente como CAP). Sua obtenção é a partir

de processos de refinamento do petróleo cru. Os principais ensaios para caracterização, segundo (ANP, 2005) são: Ensaio de Penetração, Ensaio de Viscosidade brookfield, Ensaio de Ponto de Amolecimento e Ensaio de Ductilidade.

### 3.2.1 Ensaio de Penetração

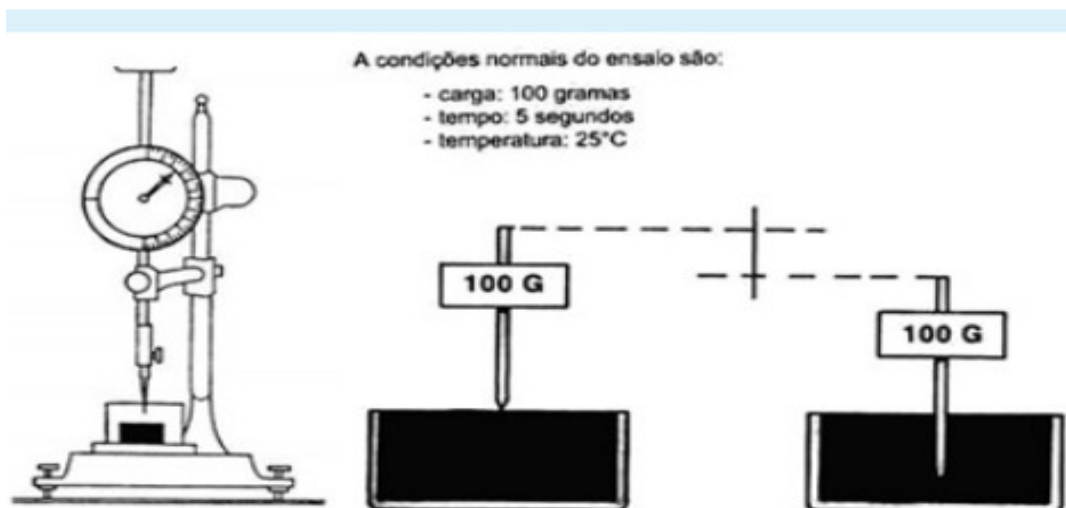
O ensaio de penetração é realizado para determinar a dureza ou consistência relativa do CAP e ele é padronizado pela ABNT NBR 6576/98 e DNIT 155/2010 ME. No ensaio, uma agulha padronizada com massa de 100g penetra na amostra de ligante por 5 segundos, à temperatura padronizada de 25°C, conforme a Figura 6. Devem ser realizadas três medidas de penetração por amostra, distantes entre si e da borda do recipiente em pelo menos 10 mm, sendo que a média das três deve ser anotada e aceita se estiver conforme a Tabela 6.

**Tabela 6: Critérios para Adoção de Resultados Ensaio de Penetração**

<b>Penetração (0,1 mm)</b>	<b>Diferença máxima entre o valor mais alto e valor mais baixo das determinações (0,1 mm)</b>
0 até 49	2
50 até 149	4
150 até 249	12
250 até 500	20

Fonte: DNIT 155/2010 ME

**Figura 6: Esquema do Ensaio de Penetração**



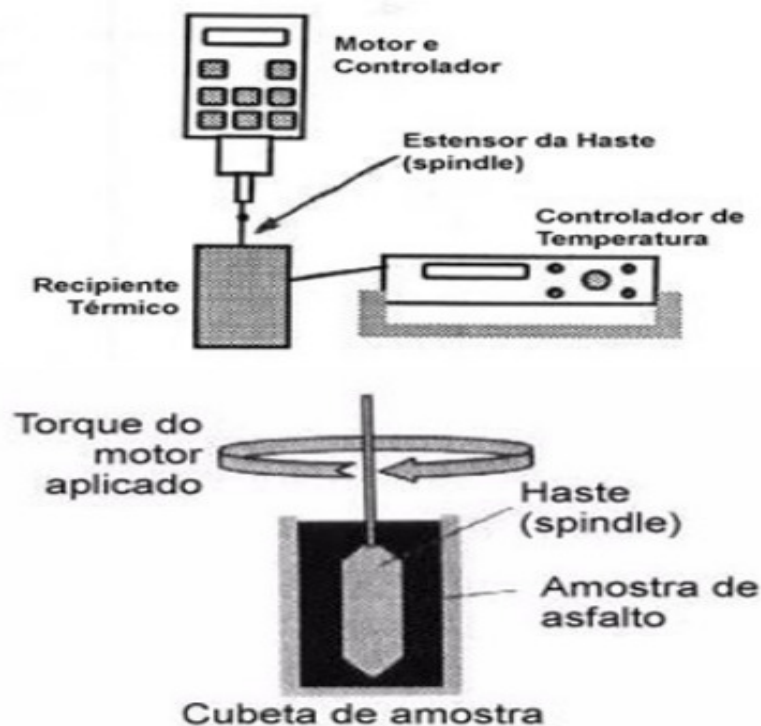
Fonte: Adaptado da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto

### 3.2.2 Ensaio de Viscosidade

O ensaio de viscosidade tem como objetivo principal determinar o estado de fluidez do CAP para diversas temperaturas de aplicação. No Brasil, ainda é muito empregado o ensaio de viscosidade Saybot-Furol, padronizado pela ABNT NBR 06576/98. O ensaio consiste em anotar o tempo em segundos que uma amostra de 60 cm<sup>3</sup> de CAP flui totalmente através de um orifício (FUROL) a uma dada temperatura. O tempo registrado é o padrão de medida de viscosidade, expresso em Segundos Saybolt-Furol (SSF).

É possível avaliar a viscosidade com o viscosímetro rotacional que nos EUA é popularmente conhecido como Brookfield e também muito empregado na Europa. No Brasil, há laboratórios que dispõe do equipamento que permite a obtenção de um gráfico temperatura-viscosidade para projetos de mistura asfáltica, consistindo o procedimento em depositar o CAP em uma câmara com temperatura controlada e inserir um eixo que possui rotação e velocidade angular especificada. Baseado no torque exigido para a rotação, é determinada a viscosidade expressa em centipoise (Cp), já no sistema internacional é o pascal segundos (Pa s) a unidade da viscosidade. O centipoise é equivalente ao milipascal e 1.000 cP = 1 Pa.s. O ensaio segue a ABNT NBR 15184, conforme esquema da Figura 7.

Figura 7: Esquema Viscosímetro Brookfield



Fonte: Adaptado da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto

### **3.2.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento**

O ensaio de ponto de amolecimento é uma técnica arbitrária para a obtenção da temperatura na qual o CAP torna-se fluido, sendo o ensaio conhecido como “anel e bola”. A técnica consiste em colocar duas bolas de aço, com dimensão e peso especificados, em uma amostra de material confinado em anéis metálicos padronizado, dois conjuntos (cada conjunto anel e bola) são colocados dentro de um banho com taxa controlada de 5°C/minuto. O resultado do ensaio (a temperatura) é anotado para cada conjunto ao tocar o fundo do recipiente e não deve diferir de 2°C, caso difira deve-se refazer o ensaio, que é normatizado pela ABNT NBR 6560/2000.

### **3.2.4 Ensaio de Ductilidade**

A ductilidade é a capacidade de um material se alongar na forma de filamentos. O ensaio de ductilidade é a extensão de pequenas amostras de CAP, moldadas em formato de gravata borboleta, e é realizado com a amostra em banho, à temperatura de 25°C, preso em suas duas extremidades e velocidade constante de 5 cm/minuto. A ductilidade é dada pelo alongamento antes da ruptura e normatizada pela ABNT NBR 6293/2001.

## **3.3 Material Fresado**

O processo de remoção do material por fresagem a frio, é executado à temperatura ambiente, ocorrendo a quebra de parte dos agregados, o que proporciona alteração da curva granulométrica do material existente na pista, A fresagem a frio, como é classificada, pode ser realizada com equipamento, conforme a Figura 8.

**Figura 8: Equipamento de Fresagem**

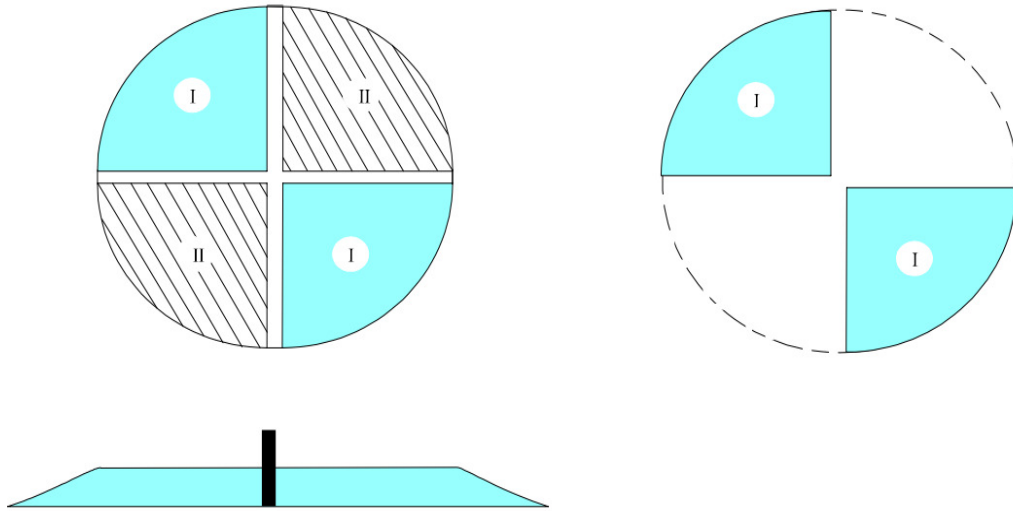


**Fonte: Prefeitura Municipal de Porto Alegre**

Para caracterizar o material fresado deve-se primeiro realizar o peneiramento na peneira #3/4 (19,1 mm), a parte retida na peneira é descartada e o restante (a parte passante) é submetido à análise granulométrica do fresado ainda com o CAP

### **3.3.1 Extração do Ligante Asfáltico**

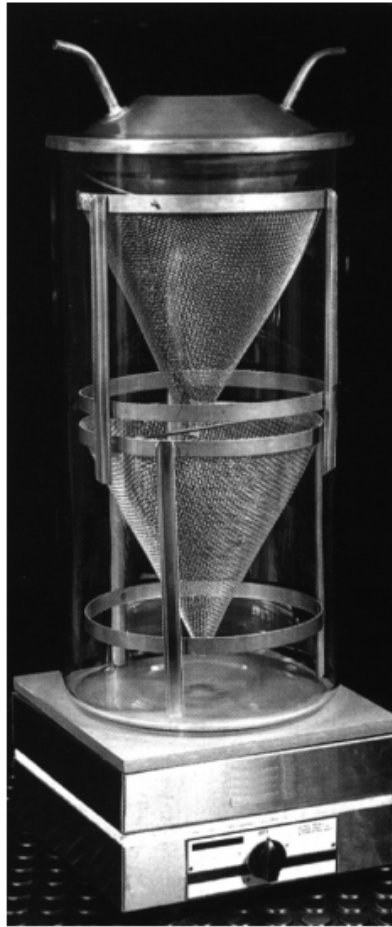
Para se chegar ao teor de projeto de ligante, precisou-se saber qual o teor de ligante presente na amostra de fresado. O procedimento para a verificação do CAP presente na amostra de fresado foi a extração do ligante pelo método do Refluxo, no entanto antes de se extrair o ligante da amostra precisou-se fazer a redução por quarteamento, conforme norma DNER-PRO 199/96. A norma consiste basicamente em colocar a amostra em uma superfície limpa e plana para que não haja perda de material e/ou contaminação, homogeneizar o material com uma pá (pelo menos três vezes), na última vez formar um cone com a pilha, achata-lo até formar um tronco de cone, dividi-lo em quatro partes, conforme a Figura 9, e após juntar as partes opostas, então repetir o processo até obter o tamanho ideal.

**Figura 9: Divisão da Amostra por Quarteamento**

**Fonte: DNER-PRO 199/96**

Com a amostra no tamanho ideal, executa-se a extração do ligante pelo método do Refluxo, conforme norma DAER/RS-EL 213/01. Tal norma consiste basicamente em aquecer a amostra em estufa à temperatura entre 105°C e 110°C até poder desmanchá-la totalmente com uma colher, colocar o filtro de papel nos dois cones de tela, pesar a amostra com aproximação de 1 g “peso inicial da amostra”, colocar metade em cada cone, introduzir no recipiente de vidro o conjunto de armação e cone inferior, derramar o solvente sobre a amostra até nível indicado, colocar a armação e o cone superior sobre o conjunto inferior, colocar o recipiente de vidro sobre o aquecedor elétrico, iniciar o fluxo de água no condensador, ajustar reostato do aquecedor e o fluxo de água através do condensador, prosseguir com o ensaio até que as gotas de solvente que caem do cone de papel sejam translúcidas como a água. A Figura 10 representa o conjunto empregado na extração por refluxo.

**Figura 10: Extrator por Refluxo**



**Fonte: DAER/RS-EL 213/01**

### **3.4 Mistura Asfáltica**

No experimento que foi realizado, mistura asfáltica com o emprego de fresado, foi aplicada à dosagem do Asphalt Institute (MARQ). Esse método consiste em seguir os passos da dosagem Marshall convencional para misturas, com emprego de materiais novos, e algumas etapas para análise do CAP, presente no material fresado. Conforme segue abaixo:

1. Determina-se a granulometria do material fresado, o teor e viscosidade do ligante presente nesse material. Com a granulometria do material, após a extração do betume, é feita a composição com o agregado novo para se obter a distribuição dentro da faixa especificada para o estudo;
2. Estima-se a quantidade aproximada de ligante total necessária à mistura;
3. Estima-se a quantidade de ligante novo+AR para a mistura;
4. Determina-se a consistência do ligante novo a ser empregado;



5. Realiza-se por fim o procedimento de dosagem Marshall convencional para determinação do teor de projeto da mistura.

### 3.4.1 Dosagem Método Marshall

A utilização da dosagem Marshall de misturas asfálticas a quente é executada há muito tempo, sendo seu emprego compatível com a dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente (MARQ) do Asphalt Institute (1995) que foi usada para o presente estudo. O procedimento resumidamente consiste dos seguintes passos:

1. Determinação das massas específicas reais do CAP e dos agregados;
2. Seleção da faixa granulométrica dos agregados de acordo com a mistura asfáltica;
3. Escolha da composição de agregados dentro dos limites da faixa granulométrica escolhida (para o estudo Faixa C do DNIT);
4. Escolha das temperaturas da mistura e compactação (curva viscosidade-temperatura do ligante);
5. Emprego dos teores de ligante para os diferentes grupos de corpos de prova (CP), a partir de um teor central T em % compõe-se mais quatro teores, ( $T \pm 0,5\%$  e  $T \pm 1,0\%$ ), totalizando cinco teores e molda-se no mínimo três CP para cada teor;
6. A partir dos teores de ligante nas misturas de cada grupo de CP, determina-se o percentual em massa dos agregados;
7. Após moldagem dos corpos de prova, é feito o resfriamento e desmoldagem para obter o diâmetro e altura de cada CP e determina-se sua massa seca ( $M_S$ ) e submersa em água ( $M_{Sub}$ );
8. Com as massas específica real ( $G_i$ ) e a % de agregados e ligante, calcula-se a massa específica máxima teórica (DMT);
9. Realiza-se o cálculo dos parâmetros para cada CP, volume do corpo de prova (V) e massa específica aparente da mistura ( $G_{mb}$ ) e então o cálculo do volume de vazios  $V_v$ , vazios com betume VCB, vazios do agregado mineral VAM e relação betume/vazios RBV;
10. Após as medidas dos corpos de prova, esses são submersos em banho-maria, à temperatura de  $60^\circ\text{C}$ , por 30 a 40 minutos, e então, por meio de uma prensa Marshall, são medidos os seguintes parâmetros:
  - Estabilidade: carga máxima que o CP resiste antes da ruptura;
  - Fluência: deslocamento vertical do CP com a aplicação da carga máxima.

A escolha do teor de projeto pode ser determinada de diferentes formas, para o estudo, a escolha se deu pelo volume de vazios  $V_v$  que é especificada em 4% ou média das especificações.

### 3.4.2 Ensaio de Módulo de Resiliência

Conforme Baldo (2007), as constantes elásticas (parâmetros) empregadas habitualmente e mais pesquisadas para formalização de análises de sistemas de camadas são o módulo de elasticidade e o módulo de resiliência, capacidade do material não resguardar deformações depois de cessada a ação da carga, dos materiais de pavimentação, bem como, seus respectivos coeficientes de Poisson, este para a consideração dos efeitos advindos da Lei de Hooke generalizada. Classicamente *resiliência* é definida como energia armazenada num corpo deformado elasticamente que é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. O ensaio de módulo de resiliência ( $M_r$ ) tem como finalidade apresentar o resultado dos esforços de interação carga-estrutura com suas consequências sobre a deformação e ocorrência de campo e gradiente de tensões nas camadas dos pavimentos.

O módulo de resiliência ( $M_r$ ) dos materiais de pavimentação é determinado normalmente em laboratório ou em campo. Para este estudo sua determinação foi em laboratório e experimentalmente consiste na relação entre tensão aplicada ( $\sigma$ ) e a respectiva deformação ( $\epsilon$ ) sofrida, conforme a Expressão (7):

$$M_r = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (7)$$

O ensaio de módulo de resiliência ( $M_r$ ), no Brasil, segue a norma do DNIT 135/2010-ME, que consiste basicamente nos passos abaixo:

1. Moldar corpos-de-prova ou remover do pavimento por extração em formato cilíndrico, com dimensões entre 3,50 cm e 6,50 cm de altura e diâmetro de  $10 \pm 0,2$  cm;
2. Prender o quadro-suporte, por meio de duas garras, nas faces extremas do corpo-de-prova cilíndrico, que deve estar apoiado em sua superfície cilíndrica segundo uma geratriz;
3. Colocar o corpo-de-prova na base da prensa, apoiado no friso côncavo inferior;
4. Assentar o pistão de carga com o friso superior em contato com o corpo-de-prova, diametralmente oposto ao friso inferior;

5. Fixar e ajustar os transdutores LVDT, de modo a obter o registro no microcomputador, no início da escala linear dos mesmos.

O resultado pode ser calculado com os valores obtidos no ensaio pela Expressão (8):

$$M_r = \frac{F}{100\Delta H} * (0,9976\mu + 02692) \quad (8)$$

Onde:

$M_r$  = módulo de resiliência, em mPa;

$F$  = carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova, em N;

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente registrada no microcomputador, para aplicação da carga (F), em cm;

$H$  = altura do corpo-de-prova, em cm;

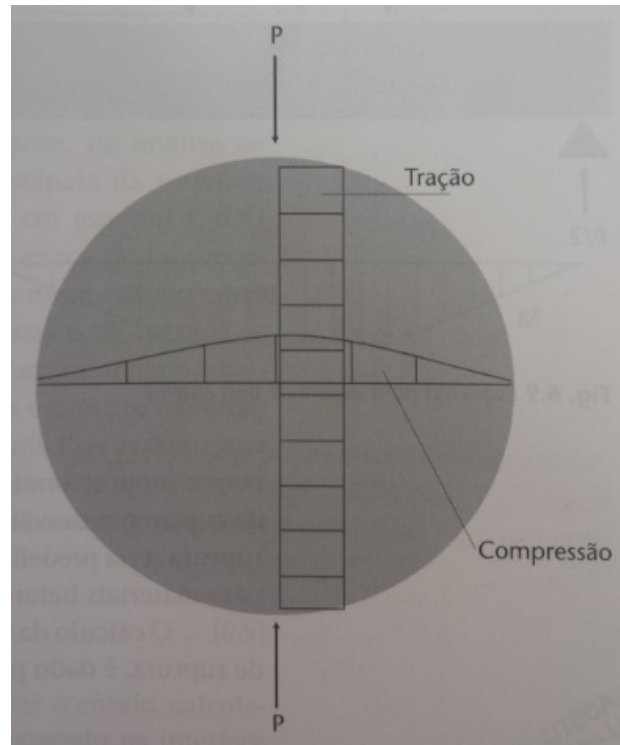
$\mu$  = coeficiente de Poisson.

### 3.4.3 Ensaio de Resistência à Tração

Os efeitos dos esforços externos aplicados pelas rodas dos veículos ou cargas estáticas sobre a estrutura dos pavimentos dependerão do material constituinte da camada e as solicitações ocorridas nessas camadas podem ser simplificadas por: pressões ou tensões verticais (compressão vertical), flexão (dobramento), confinamento (compressão horizontal) e cisalhamento resultado das pressões verticais.

Segundo Baldo (2007), a resistência de um material diz respeito à medida do valor da força ou pressão que causa sua ruptura, ou seja, que impõe um nível de deformação de ruptura no material. Para a determinação da resistência de materiais em pavimentação são empregados vários ensaios, para este estudo (mistura asfáltica CBUQ) foi aplicado o ensaio de resistência à compressão diametral em misturas asfálticas ou Brazilian Test, proposto pelo Prof. Luís Fernando Lobo Carneiro, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, na década de 1950, empregado em mistura de concreto de cimento Portland. Esse ensaio é bastante empregado para a medida da resistência à tração indireta de amostras de concreto asfáltico. O corpo-de-prova sofre uma compressão vertical na direção diametral devido à carga aplicada e devido à mesma carga, tração na direção horizontal conforme a Figura 11.

**Figura 11: Arranjo do Ensaio de Compressão Diametral**



Fonte: Adaptado de Baldo (2007)

O ensaio de resistência à tração (RT) para misturas asfálticas é determinado pela norma DNIT 136/2010-ME e segue basicamente os seguintes passos:

**Equipamentos:**

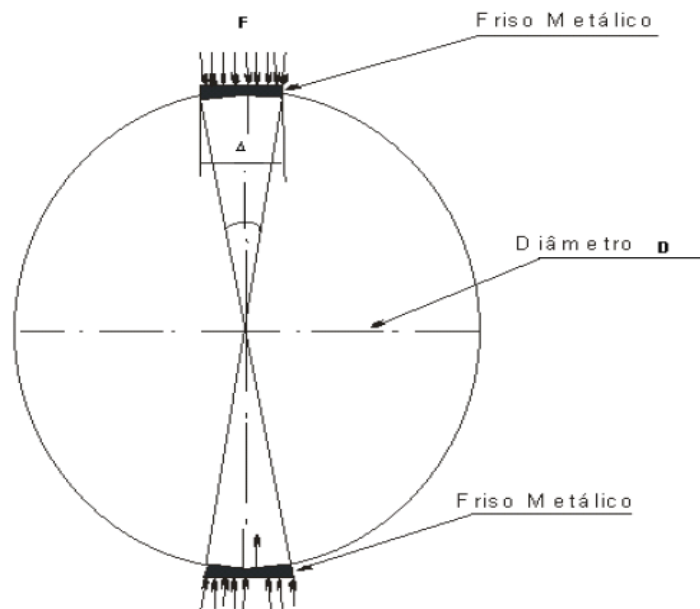
1. Prensa Mecânica com sensibilidade inferior ou igual a 19,60 N, embolo movimentando-se com velocidade de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s;
2. Estufa capaz de manter a temperatura entre 25° C e 60° C;
3. Sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura em torno de 25° C;
4. Paquímetro.

**Amostra:**

O corpo-de-prova destinado ao ensaio pode ser obtido diretamente na pista, por extração, por meio de sonda rotativa, ou moldado em laboratório (Marshall), de forma cilíndrica, com altura entre 3,50 cm e 6,50 cm e diâmetro de  $10 \pm 0,2$  cm.

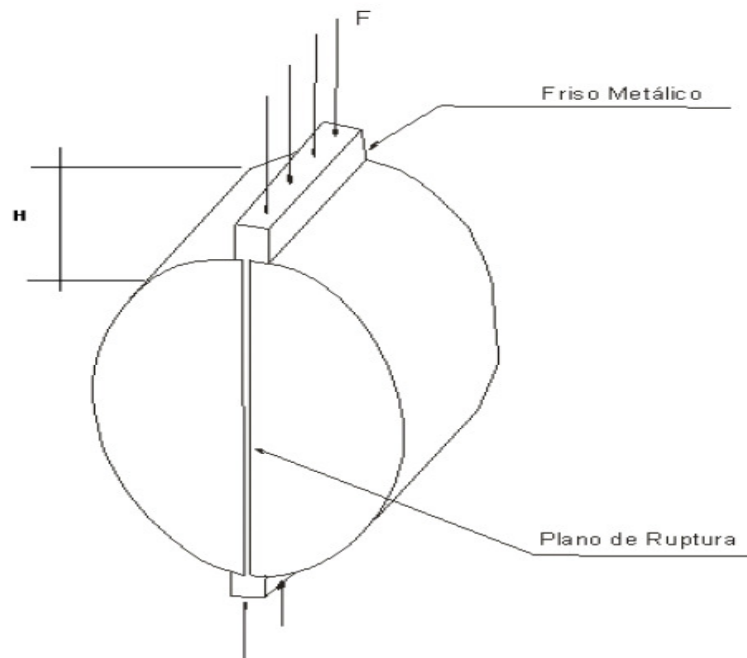
**Ensaio:**

1. Medir a altura (H) do corpo-de-prova com paquímetro, em quatro posições equidistantes. Adotar como altura o valor da média aritmética das quatro leituras;
2. Medir o diâmetro (D) do corpo-de-prova com o paquímetro, em três posições paralelas. Adotar como diâmetro o valor da média aritmética das três leituras;
3. Colocar o corpo-de-prova na estufa ou sistema de refrigeração, por um período de 2 (duas) horas, de modo a se obter a temperatura específica de  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Após esse período, o corpo de prova é colocado com sua superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos, curvos em uma das faces, com comprimento igual ao do corpo-de-prova, conforme ilustram as Figuras 12 e 13. Ajustar os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão, capaz de manter a posição do corpo-de-prova;
4. Aplicar a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical;
5. Anotar o valor da carga de ruptura (F).

**Figura 12: Ensaio de Compressão Diametral de Corpo-de-Prova Cilíndrico**

Fonte: DNIT 136/2010-ME

**Figura 13: Ensaio de Compressão Diametral de Corpo-de-Prova Cilíndrico**



Fonte: DNIT 136/2010-ME

**Resultado:**

O valor da Resistência é calculado com a Expressão (9):

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (9)$$

Onde:

$\sigma_R$  = resistência à tração, em mPa;

F = carga de ruptura, em N;

D = diâmetro do corpo-de-prova, em cm;

H = altura do corpo-de-prova, em cm.

### 3.4.4 Ensaio de Dano por Umidade Induzida

O dano por umidade nos pavimentos asfálticos causa problemas não só de desempenho como na vida de serviço dos pavimentos. Ele na verdade, destaca possíveis inconvenientes na adesividade do ligante-agregado. Existem inúmeros ensaios para a determinação do dano causado pela umidade em misturas asfálticas, sendo classificados em duas categorias: realizados em misturas não compactadas e em misturas compactadas. Os testes de avaliação de

misturas compactadas são os mais representativos das condições reais e dos problemas relacionados a adesividade.

Segundo Bernucci et al. (2006), o teste de sensibilidade à ação deletéria da água mais usado no Brasil segue o procedimento descrito em AASHTO T 283 e ABNT NBR 15617/2015, baseado no trabalho de R.P. Lottman (NCHRP Project 4-08), e em um trabalho posterior realizado por D.G. Tunnicliff e R.E. Root (NCHRP Project 10-17) (Epps et al., 2000; Moura, 2001). Conforme esse procedimento, os corpos-de-prova podem ser preparados seguindo o método Marshall e é descrito conforme o procedimento que segue:

**Procedimento:**

1. Moldar seis CPs similares com 1.200 g de mistura asfáltica na faixa de projeto e teor de ligante asfáltico de projeto, com vazios de  $7 \pm 0,5\%$ ;
2. Separar um primeiro conjunto de três corpos-de-prova, colocando-os dentro de sacos plásticos para proteção e imersão em banho de água à  $25^{\circ}\text{C}$  por  $2 \pm 1$  h;
3. Separar um segundo conjunto de três desses CPs, colocando-os em um recipiente com água destilada e aplicando-se vácuo a uma pressão de 250 – 650 mmHg, por 5 a 10 minutos, a fim de obter grau de saturação dos vazios entre 70 e 80% de água;
4. Envolver os CPs em filme plástico e colocar cada CP dentro de um saco plástico com 10 ml de água adicionais, vedando-os em seguida; colocar o segundo conjunto de três CPs para congelamento ( $-18^{\circ}\text{C}$ ) por um período mínimo de 16 h;
5. Imergir este conjunto de três CPs em um banho de  $60^{\circ}\text{C}$ , por um período de  $24 \pm 1$  h, retirando-se os CPs dos sacos plásticos e do filme logo após a imersão;
6. Retirar o conjunto de três CPs do banho à  $60^{\circ}\text{C}$  e imergi-los em um banho à  $25^{\circ}\text{C}$  por um período de  $2 \pm 1$  h;
7. Realizar ensaio de resistência à tração no primeiro conjunto de três CPs não-condicionados (RT) e no segundo conjunto de três corpos-de-prova após todo ciclo de condicionamento (RTu);
8. Calcular a resistência à tração retida por umidade induzida, que é a razão entre RTu e RT.

## **4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS ENSAIOS REALIZADOS**

Depois da apresentação dos materiais e dos métodos a serem empregados para sua caracterização, visando desenvolver o projeto, apresentar-se-ão os ensaios realizados e os resultados obtidos. Seguindo uma ordem, primeiramente foram analisados e realizados ensaios com o material fresado, com o agregado mineral, com o ligante asfáltico e com a mistura, o que determinou o teor de projeto, além de ensaios para a determinação das propriedades do projeto.

### **4.1 Material Fresado**

Para a realização deste trabalho o material fresado foi recolhido no depósito da Prefeitura Municipal de Porto Alegre, sendo proveniente de uma via da cidade, a Av. Nilópolis, no Bairro Petrópolis, com autorização de um dos responsáveis pelo Departamento de Conservação de Vias Urbanas do município (DCVU), Eng.º Carlos André Matos.

O processo de remoção do material foi por fresagem a frio, sendo executado à temperatura ambiente, ocorrendo a quebra de parte dos agregados, o que proporciona alteração da curva granulométrica do material existente na pista. Para realizar os experimentos com o material, foi necessário, num primeiro momento, fazer sua classificação, pois o modo como ele foi extraído acarreta em uma mistura com algumas partes indesejáveis, como grumos de asfalto-agregado.

Portanto, para se chegar ao teor de projeto da mistura precisou-se determinar algumas propriedades do material fresado empregado. O primeiro passo para analisar o material foi passá-lo na peneira # 3/4, o que ficou retido foi descartado e o restante (o material passante) foi reduzido com redutores de amostra, conforme as Figuras 14 e 15.



**Figura 14: Redução da amostra**



**Fonte: Próprio autor**

**Figura 15: Amostra reduzida**



**Fonte: Próprio autor**

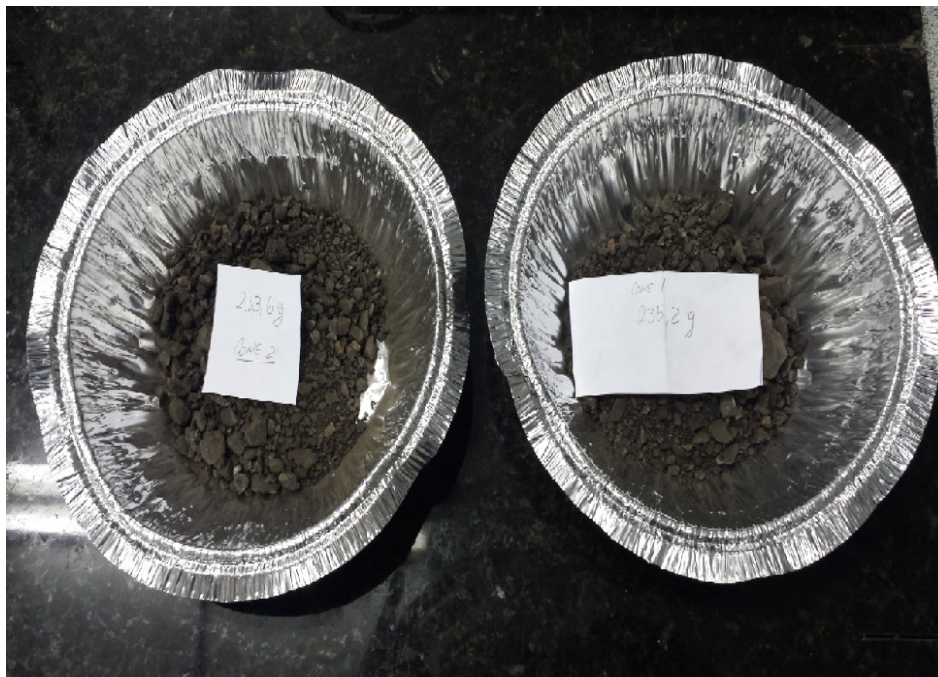
Depois da redução da amostra, a primeira parte foi separada e reservada, a segunda porção foi reduzida por quartearamento, visando realizar o ensaio de refluxo, conforme as Figuras 16 e 17.

**Figura 16: Redução da amostra para refluxo**



Fonte: Próprio autor

**Figura 17: Amostra para refluxo**



Fonte: Próprio autor

#### 4.1.1 Ensaio de refluxo

O ensaio executado para determinação do teor de ligante, presente no material fresado, foi o Refluxo, pois devido a restrições, como insuficiência de informações e limitações do laboratório, não foi possível realizar a recuperação do ligante presente no material fresado, tornando fases como determinação da viscosidade e penetração do CAP envelhecido impossíveis de realizar, e sem esses ensaios não é possível determinar a quantidade e qual AR utilizar. Salienta-se que também que foi realizado contato com as empresas distribuidoras de ligante asfáltico, contudo a informação foi a de que o material é pouco produzido e sua obtenção junto às distribuidoras é bastante complicada. Finalizando, foi decidido realizar o experimento com o emprego do CAP 50/70, de agregado virgem e com o emprego de fresado, sem adicionar o AR.

O ensaio de Refluxo partiu da redução da amostra, conforme as Figuras 14 e 15, e da separação para colocação nos cones, em porções de 233,6 g e 235,2 g. Após toda preparação do material, ele foi colocado nos cones de filtro de papel, específico para o ensaio, foi montada a estrutura metálica, os cones de tela e colocados dentro do recipiente de vidro, inserindo o solvente, em seguida foram posicionados na plataforma de aquecimento, foi ajustada a temperatura da plataforma e também o fluxo de água que passa pelo sistema para condensação do solvente. O sistema se manteve em funcionamento por cinco dias, no horário das 9 h às 17 h, e foi considerado satisfatório quando a solução solvente, que passava e pingava no cone inferior, era translúcida. As Figuras 18 e 19 ilustram as fases do ensaio.

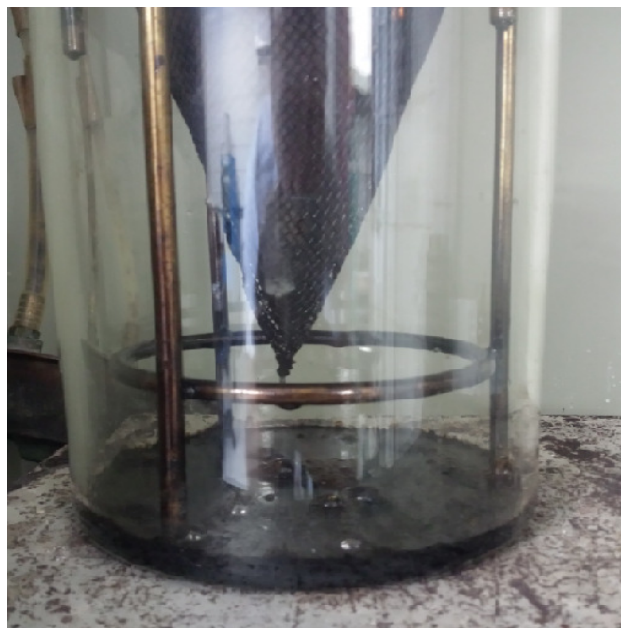


**Figura 18: Início do ensaio de refluxo**



**Fonte: Próprio autor**

**Figura 19: Fim do ensaio solução pingando translúcida**



**Fonte: Próprio autor**

Depois da secagem das amostras, foi removido o material dos cones, pesado e calculada a porcentagem média de ligante na amostra, obtendo o valor médio entre os dois cones de 3,9% de CAP.

#### 4.1.2 Análise Granulométrica

Foi realizada a análise granulométrica do material com e sem o CAP. Com a primeira parte do material reservado na redução inicial, foi realizada a granulometria com o ligante presente na amostra, utilizando as peneiras da Faixa C do DNIT. Para a análise granulométrica do material sem o CAP, foi usado o agregado do ensaio de refluxo, conforme a Figura 20 (fresado após ensaio para extração do ligante).

**Figura 20: Material fresado após extração do ligante**



**Fonte: Próprio autor**

A distribuição granulométrica dos materiais pode ser verificada na Tabela 7, que evidencia que o material passou a ter uma distribuição granulométrica mais fina, o que já era esperado, tendo em vista que após o ensaio de refluxo houve a ausência ou redução de grumos de agregado-ligante. Também é possível observar no material, após o ensaio de extração do CAP, que o agregado apresenta uma certa heterogeneidade, não sendo composto somente por basalto, mas também por granito, conforme a Figura 20. Tal fato pode estar vinculado a sua extração de uma via urbana, a qual possui remendos e talvez alguma camada sobreposta, muitas vezes sem registro.

**Tabela 7: Granulometria material fresado**

PENEIRAS		FRESADO SEM REFLUXO		FRESADO COM REFLUXO	
Série ASTM	Abertura (mm)	% Retido	% Passante	% Retido	% Passante
3/4"	19,1	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	5,69	94,31	3,91	96,09
3/8"	9,5	3,80	90,50	2,10	93,99
Nº 4	4,8	20,65	69,85	14,62	79,36
Nº 10	2	31,70	38,15	28,48	50,88
Nº 40	0,42	27,56	10,59	26,56	24,32
Nº 80	0,18	6,97	3,62	8,03	16,29
Nº200	0,075	2,59	1,03	5,25	11,04

Fonte: Próprio autor

## 4.2 Agregado Mineral

O agregado mineral que será empregado no estudo foi fornecido pelo LAPAV, sendo de origem basáltica e oriundo da Central de Britagem TRS, localizado na BR 290, km 30, na cidade de Santo Antônio da Patrulha-RS.

Conforme informado no capítulo 3.1, o agregado mineral usado no projeto trata-se de um material empregado em outros trabalhos desenvolvidos pelo LAPAV, fato que facilitou o desenvolvimento da mistura, visto que já haviam sido realizados alguns ensaios do agregado. Os resultados dos ensaios de granulometria, de índice de forma, de equivalente de areia, de resistência à abrasão, de absorção, de massa real e aparente foi fornecido por Guilherme Ebani Jacques, doutorando da UFRGS e membro do LAPAV, bem como é apresentado o ensaio de sanidade para o material conforme Mocelin (2018), o qual utilizou o mesmo agregado. O ensaio de adesividade foi realizado pelo autor deste projeto em conjunto com os técnicos do laboratório e os resultados apresentar-se-ão a seguir.

### 4.2.1 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica segue com as peneiras da Faixa C do DNIT, conforme a Tabela 8.

Tabela 8: Granulometria do Agregado

PENEIRAS		% PASSANTE		
Série ASTM	Abertura (mm)	3/4"	3/8"	PÓ
3/4"	19,10	97,32	100	100
1/2"	12,70	31,39	100	100
3/8"	9,50	5,83	98,81	100
n 4	4,76	1,37	11,76	94,63
n 10	2,00	1,36	2,91	59,15
n 40	0,42	1,32	2,68	24,89
n 80	0,18	1,25	2,55	16,96
n 200	0,07	1,07	2,23	11,65

Fonte: Adaptado de Guilherme Ebani Jacques

#### 4.2.2 Adesividade

O ensaio de adesividade foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 078/94. O procedimento seguiu da etapa de separação de uma amostra de 500 g do agregado, retido na peneira # 1/2, e colocado em estufa para secagem por 2 horas. Após a secagem, foi realizada a mistura do agregado com o ligante 50/70, colocando-a em bandeja com superfície preparada para que não grudasse e deixando-a até a cura, conforme as Figura 21 e 22. Após o período de cura, o material foi colocado em recipiente e coberto com água, então foi colocado em estufa à 40°C, por 72 horas, e decorrido o tempo estipulado, foi realizada a análise do material, verificando-se que a amostra não passou no teste, tendo partes da película de ligante descolada do agregado conforme a Figura 23. Devido a não conformidade do resultado do ensaio, foi realizado novo teste, o qual repetiu os passos do primeiro, contudo sendo incorporado à mistura 2% de Cal Dolomítica, verificando-se então a conformidade do ensaio com a película de ligante não se desprendendo do agregado conforme a Figura 24.



**Figura 21: Adesividade sem cal**



**Fonte: Próprio autor**

**Figura 22: Adesividade com cal**



**Fonte: Próprio autor**



**Figura 23: Sem cal (descolamento)**



**Fonte: Próprio autor**

**Figura 24: Com cal (sem descolamento)**



**Fonte: Próprio autor**

### **4.2.3 Índice de Forma**

Para chegar ao Índice de Forma, partiu-se primeiro para a determinação da graduação do agregado, baseado na distribuição granulométrica do material em peneiras com crivo de abertura circular, o qual se enquadrou na graduação C. Após separou-se a quantidade em massa para cada fração, conforme determinação mínima, e posteriormente testou-se no crivo I, anotando-se o peso do material retido, depois testando-se no crivo II o material passante no

crivo I, e anotando-se o peso retido, chegou-se ao Índice de Forma  $f=0,847$ , conforme Tabela 9, estando acima do limite mínimo  $f=0,5$ .

**Tabela 9: Ensaio de Índice de Forma**

Grad.	Circular		Peso amostra (g)	Total Inicial (g)	Crivo I			Crivo II			Índice de forma (f)
	Passante	Retido			Abertura (mm)	Retido (g)	% Retida	Abertura (mm)	Retido (g)	% Retida	
C	19,0	16,0	2000	2396,6	9,5	1598,2	66,69	6,3	727,1	30,34	0,847
	16,0	12,7	2000	2639,4	8	1800,7	68,22	5,3	777,9	29,47	
	12,7	9,5	2000	2086,4	6,3	1656,8	79,41	4,2	410,4	19,67	

Fonte: Adaptado de Guilherme Ebani Jacques

#### 4.2.4 Sanidade

O ensaio de Sanidade foi elaborado por Mocelin (2018), que também trabalhou com o agregado da Mineradora TRS e seguiu a norma DNER-ME 089/94, sendo que o resultado obtido de perda foi de 5,30% para todas as frações do agregado, inferior ao máximo recomendado de 12%.

#### 4.2.5 Equivalente de Areia

O ensaio de equivalente de areia seguiu a DNER-ME 054/97 e o resultado foi extraído da média de três amostra ensaiadas, apresentando  $EA=83,99\%$ , acima do considerado satisfatório que é de 55%, conforme a Tabela 10.

**Tabela 10: Equivalente de Areia**

Amostra	$L_{argila}$	$L_{areia}$	Equivalente de areia (EA)	Equivalente de areia médio (EAmédio)
1	9,4	7,4	78,72	83,99
2	9,4	7,9	84,04	
3	9,25	8,25	89,19	

Fonte: Adaptado de Guilherme Ebani Jacques

#### 4.2.6 Resistência à Abrasão

O ensaio de abrasão “LOS ANGELES” seguiu a norma DNER-ME 035/98, determinando a massa das amostras conforme as graduações B e C de 5010,9 g e 5008,4 g respectivamente. O material foi lavado e secado à 110°C, peneirado para obter as quantidades

conforme as frações de cada graduação e então separada a quantidade de cada fração e juntada até obter a massa da amostra inicial. Após o procedimento de preparação do material a ser ensaiado, este foi colocado junto com as cargas abrasivas (11 esferas com carga de 4584 g para graduação B e de 8 esferas com carga de 3330 g para graduação C) e ambos foram rotacionados 500 vezes. Após o término das rotações, o material foi peneirado na peneira de 1,7 mm, lavado e posto a secar à 110°C, por três horas, então foi pesada sua massa retida na peneira. Os resultados obtidos foram uma redução de massa de 8,54% para graduação B e de 8,70% para graduação C, ambas abaixo do limite definido como sendo de 40% a 50%, conforme a Tabela 11, contendo os resultados do ensaio.

**Tabela 11: Ensaio de Abrasão “LOS ANGELES”**

Amostra	Grad.	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (%)
1	B	5010,9	4583,2	8,54%
2	C	5008,4	4572,8	8,70%

Fonte: Adaptado de Guilherme Ebani Jacques

#### 4.2.7 Absorção

O ensaio de absorção é de suma importância, tendo em vista que o custo da mistura asfáltica está diretamente ligado ao consumo de ligante, portanto é necessário verificar-se o quanto desse ligante será absorvido pelo agregado. O ensaio para determinar a absorção seguiu a norma DNER-ME 081/98, consoante o seguinte: foi lavada a amostra, secada à 110°C até a constância do peso, imersa em água destilada por 24 horas, retirada da imersão e secada superficialmente para obter massa superfície seca saturada (S<sub>ss</sub>), colocada novamente em estufa à 110°C até secar e pesada novamente para obter a massa seca. O resultado obtido segue conforme a Tabela 12.

#### 4.2.8 Massa Específica Real e Aparente

Os ensaios para determinação das massas específicas real e aparente seguiram a norma DNER-ME 081/98, assim como a ABNT NBR NM 53/2009, e consistiram em: lavar a amostra, seca-la à 110°C até a constância do peso e então imergi-la em água destilada por 24 horas, medir sua massa totalmente imersa (pesagem hidrostática), retirar da imersão e secar

superficialmente para obter massa superfície seca saturada (S<sub>ss</sub>), colocar novamente em estufa à 110°C até secar e pesar mais uma vez para obter massa seca, o resultado segue conforme a Tabela 12.

**Tabela 12: Ensaio de Absorção**

Amostra	Peso imerso após 24h imerso (g)	Peso superfície seca (g)	Peso ar após 24h estufa (g)	ABS%	Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	1279,8	2027,9	2009,6	0,91	2,746	2,678
1	1373,1	2173	2147,7	1,18	2,765	2,677

Fonte: Adaptado de Guilherme Ebani Jacques

### 4.3 Ligante Asfáltico

Para o estudo foi usado o CAP 50-70, fornecido ao laboratório pela Greca Asfaltos. O ligante asfáltico empregado no projeto chegou ao laboratório no início dos ensaios, desse modo não havia nenhum trabalho/pesquisa com o material, portanto sua caracterização foi realizada pelos técnicos do LAPAV e acompanhada pelo autor deste projeto. A caracterização do CAP partiu do seu quarteamento e da redução da amostra, seguida dos principais ensaios especificados pela (ANP, 2005) que são: Ensaio de Penetração, Ensaio de Viscosidade brookfield, Ensaio de Ponto de Amolecimento e Ensaio de Ductilidade.

#### 4.3.1 Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração seguiu a norma DNIT 155/2010 ME e consistiu em: aquecer a amostra de CAP à temperatura de 90 °C, então vertê-lo no recipiente apropriado para realizar o ensaio, colocá-lo em banho à temperatura de 25 °C, durante 60 minutos, retirando do banho e colocando no equipamento apropriado para realizar o ensaio. Foram executadas 3 penetrações, obtendo média = 58,33 mm, dentro do especificado para o CAP 50/70, conforme a Figura 25.

**Figura 25: Ensaio de Penetração**

Fonte: Próprio autor

#### 4.3.2 Ensaio de Viscosidade

O ensaio de viscosidade foi realizado no viscosímetro rotacional Brookfield, seguindo a norma ABNT NBR 15184, e se obteve para as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C os respectivos torques de 16,4%, 18% e 13,5%, os respectivos valores de viscosidade de 360 Cp, 180 Cp e 68 Cp, por conseguinte dentro das especificações para o CAP 50/70. Segue Figura 26 (execução do ensaio de viscosidade).

**Figura 26: Execução do Ensaio de Viscosidade**

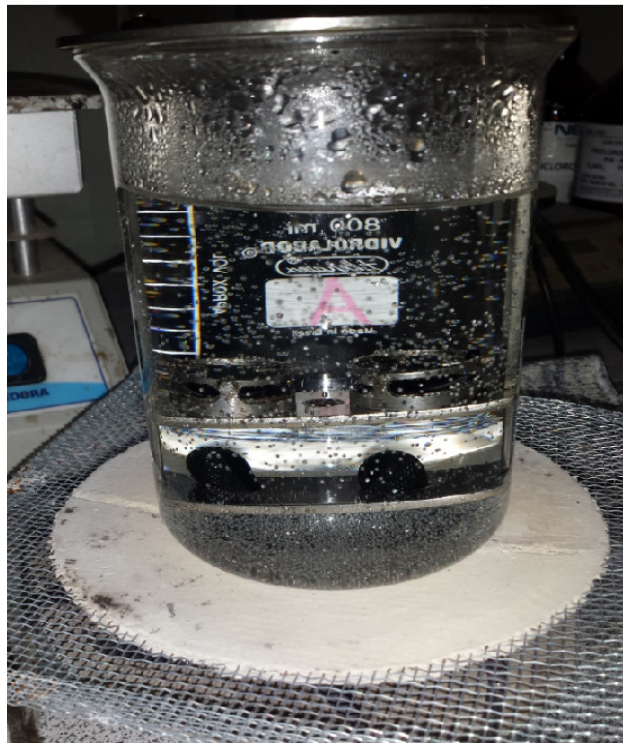
Fonte: Próprio autor



### 4.3.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento foi executado seguindo a norma ABNT NBR 6560/2000 e consistiu em: colocar dois conjuntos de anel e bola em banho, com taxa controlada de 5°C/minuto, anotando-se o valor da temperatura ao toque do fundo do recipiente de cada conjunto, obtendo os valores de 46°C e 46,5°C para cada conjunto, resultando na média=46,25°C, por conseguinte de acordo com o limite mínimo que é de 46°C. Segue Figura 27.

Figura 27: Ensaio de Ponto de Amolecimento



Fonte: Próprio autor

### 4.3.4 Ensaio de Ductilidade

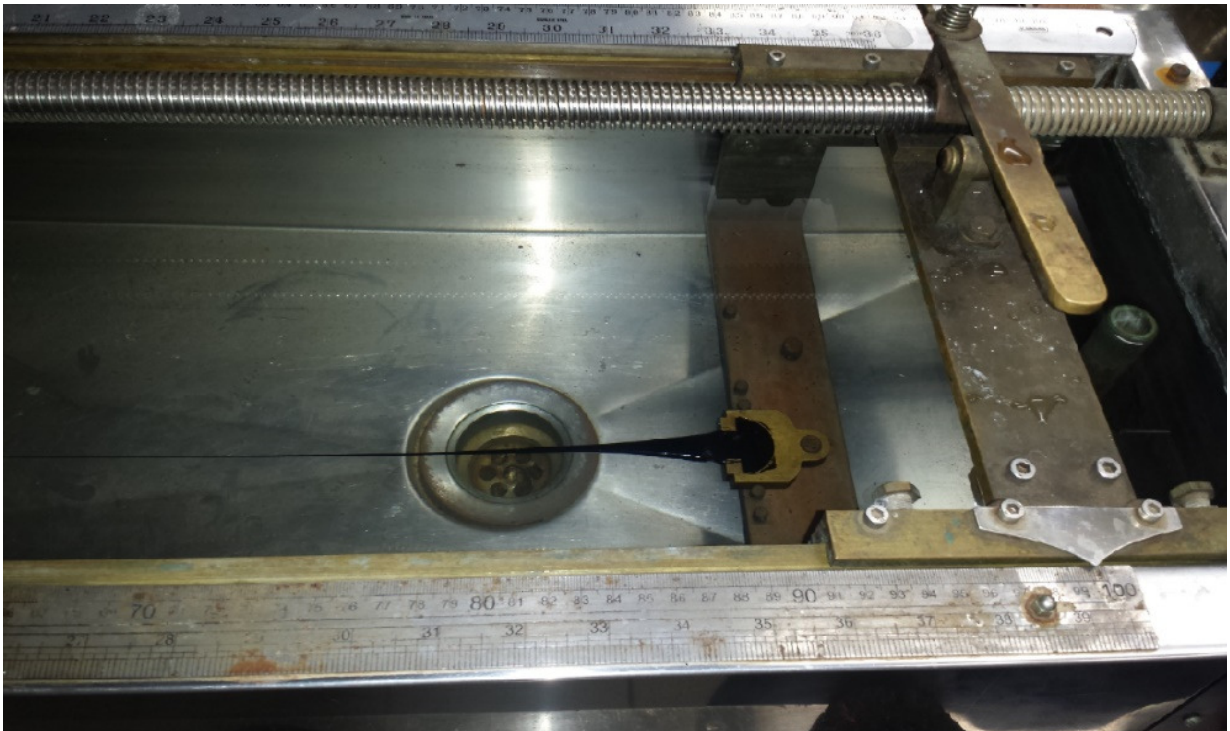
O ensaio de ductilidade foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 6293/2001 e consistiu em: moldar três amostras de CAP no formato de gravata borboleta, conforma a Figura 28 e então ensaia-las em banho com temperatura de 25°C e velocidade de 5cm/minuto. Consoante a Figura 29, o resultado foi considerado satisfatório, tendo em vista que as amostras não se romperam após percorrer 100 cm, sendo considerado como parâmetro mínimo 60 cm.

**Figura 28: Amostra moldada para ensaio de Ductilidade**



**Fonte: Próprio autor**

**Figura 29: Fim do ensaio de Ductilidade de uma das Amostras**



**Fonte: Próprio autor**

## 4.4 Mistura Asfáltica

### 4.4.1 Composição

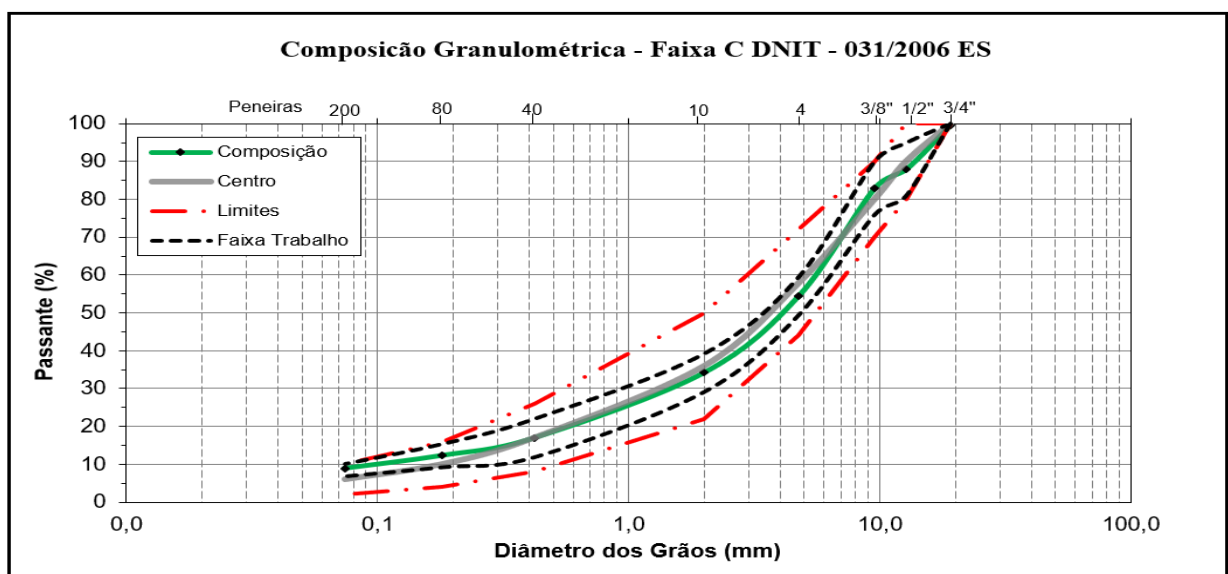
Depois de realizar os ensaios relacionados aos materiais que irão compor a mistura, os quais são considerados fundamentais, partiu-se para a análise e formulação da composição granulométrica. Nesta composição foi fixado 30% de material fresado e ajustado à mistura densa, dentro da Faixa C DNIT, com o emprego de 2% de Cal Dolomítica, 16% de Brita 3/4", 25% de Brita 3/8" e 27% de Pó, resultando em uma curva granulométrica conforme Tabela a 13 e a Figura 30.

Tabela 13: Composição da Mistura

COMPOSIÇÃO DA MISTURA							
% Mistura		16%	25%	27%	30%	2%	30%
PENEIRA	mm	BRITA 3/4	BRITA 3/8	PÓ	FRESADO	CAL DOLOMÍTICA	FRESADO SEM REFLUXO
3/4"	19,1	15,6	25,0	27,0	30,0	2,0	30,0
1/2"	12,7	5,0	25,0	27,0	28,8	2,0	28,3
3/8"	9,50	0,9	24,7	27,0	28,2	2,0	27,2
n 4	4,76	0,2	2,9	25,6	23,8	2,0	21,0
n 10	2,00	0,2	0,7	16,0	15,3	2,0	11,4
n 40	0,42	0,2	0,7	6,7	7,3	2,0	3,2
n 80	0,18	0,2	0,6	4,6	4,9	1,9	1,1
n 200	0,074	0,2	0,6	3,1	3,3	1,7	0,3
	frações	BRITA 3/4	BRITA 3/8	PÓ	FRESADO	CAL	
	%	16%	25%	27%	30%	2%	
<b>TOTAL</b>						<b>100%</b>	

Fonte: Próprio autor

Figura 30: Curva Composição da Mistura



Fonte: Próprio autor



Após a definição da composição da mistura, foi calculada a quantidade de material em massa que compôs os corpos-de-prova, conforme a Tabela 13. Num primeiro momento foi estimado o peso do corpo-de-prova em 1200 g (agregado+cal), outro ponto a salientar é que na composição foi utilizada a granulometria do material fresado após o refluxo (somente o agregado). Na separação e na mistura do material foi utilizada a granulometria do material fresado com o CAP envelhecido, conforme coluna (Peso Agre+Cap) da Tabela 14, totalizando 1214,6 g de material a ser separado para moldar os CPs.

**Tabela 14: Peso em massa dos materiais que compõe a mistura**

PESO DO CORPO DE PROVA (g):		1200									
PESO POR FRAÇÃO											
	PENEIRA	% Retido	Pesos (g)	Correção	Acum. 1 CP	4 CP's					
BRITA 3/4	3/4"	0,43	5,1	0	0	0					
	1/2"	10,55	126,6	132	132	527					
	3/8"	4,09	49,1	53	184	738					
	n 4	0,71	8,6	0	184	738					
BRITA 3/8	3/8"	0,30	3,6	0	184	738					
	n 4	21,76	261,2	287	471	1886					
	n 10	2,21	26,6	0	471	1886					
	n 40	0,06	0,7	0	471	1886					
PÓ	3/8"	0,00	0,0	0	471	1886					
	n 4	1,45	17,4	0	471	1886					
	n 10	9,58	115,0	142	613	2452					
	n 40	9,26	111,1	112	725	2899					
	n 80	2,18	26,2	26	751	3004					
	n 200	1,54	18,5	19	770	3078					
	Pas 200	3,87	46,5	46	816	3264	% Retido	Pesos (g)	Peso Agre+Cap	Acum. 1 CP	4 CP's
FRESADO	3/4"	0,00	0,0	0	816	3264	0,00	0,0	0,0	816	3264,0
	1/2"	1,17	14,1	14	830	3320	1,71	20,5	21,3	837	3349,3
	3/8"	0,63	7,6	8	838	3351	1,14	13,7	14,2	852	3406,3
	n 4	4,39	52,6	53	890	3561	6,20	74,3	77,4	929	3715,7
	n 10	8,55	102,5	103	993	3971	9,51	114,1	118,8	1048	4190,8
	n 40	7,97	95,6	96	1088	4354	8,27	99,2	103,3	1151	4603,8
	n 80	2,41	28,9	29	1117	4469	2,09	25,1	26,1	1177	4708,2
	n 200	1,58	18,9	19	1136	4545	0,78	9,3	9,7	1187	4747,0
	Pas 200	3,31	39,7	40	1176	4704	0,31	3,7	3,9	1191	4762,4
FILER(%)	n 80	0,06	0,7	0	1176	4704				1191	4762,4
	n 200	0,26	3,1	0	1176	4704				1191	4762,4
	Pas 200	1,68	20,2	24	1200	4800				1214,6	4858,4
TOTAL(%)		100,00	1200,0	1200	1200	4800				1214,6	4858,4

Fonte: Próprio autor

A metodologia empregada foi a Marshall e consistiu em determinar o teor de projeto para o ligante, partindo-se de um valor central de 5% e mais quatro valores de ( $\pm 0,5\%$  e  $\pm 1\%$ ), resultando nos valores de 4%, 4,5%, 5%, 5,5% e 6%, sendo esses valores o total de ligante (soma do novo com o envelhecido). A Tabela 15 ilustra os valores em massa e porcentagem de material para cada teor a ser ensaiado: Porcentagem de CAP Envelhecido (presente nos 30% de fresado); Peso de CAP Envelhecido em (g); Peso de Agregado Virgem+Fíler; Peso de Agregado

Fresado (após refluxo); Peso Total do Corpo-de-Prova; Peso Total de CAP; Peso de CAP Novo; Porcentagem de CAP Novo.

**Tabela 15: Peso e porcentagem de materiais que compõe a mistura para cada teor**

<b>5% CAP</b>	<b>5,00</b>
PORC. CAP. ENVEL (NOS 30% FRES) %	3,90
PESO CAP. ENVELHECIDO (g)	14,61
PESO AGREG. VIRGEM+FILER	840,00
PESO AGREG. FRESADO	360,00
PESO. APROX. CP. TOTAL 5%	1263,16
PESO TOTAL CAP (g)	63,16
PESO. CAP. NOVO (g)	48,55
PORC. CAP. NOVO (%)	3,84
<b>4,5% CAP</b>	<b>4,50</b>
PORC. CAP. ENVEL (NOS 30% FRES) %	3,90
PESO CAP. ENVELHECIDO (g)	14,61
PESO AGREG. VIRGEM+FILER	840,00
PESO AGREG. FRESADO	360,00
PESO. APROX. CP. TOTAL 4,5%	1256,54
PESO TOTAL CAP (g)	56,54
PESO. CAP. NOVO (g)	41,93
PORC. CAP. NOVO (%)	3,34
<b>4% CAP</b>	<b>4,00</b>
PORC. CAP. ENVEL (NOS 30% FRES) %	3,90
PESO CAP. ENVELHECIDO (g)	14,61
PESO AGREG. VIRGEM+FILER	840,00
PESO AGREG. FRESADO	360,00
PESO. APROX. CP. TOTAL 4%	1250,00
PESO TOTAL CAP (g)	50,00
PESO. CAP. NOVO (g)	35,39
PORC. CAP. NOVO (%)	2,83
<b>5,5% CAP</b>	<b>5,50</b>
PORC. CAP. ENVEL (NOS 30% FRES) %	3,90
PESO CAP. ENVELHECIDO (g)	14,61
PESO AGREG. VIRGEM	840,00
PESO AGREG. FRESADO	360,00
PESO. APROX. CP. TOTAL 5,5%	1269,84
PESO TOTAL CAP (g)	69,84
PESO. CAP. NOVO (g)	55,23
PORC. CAP. NOVO (%)	4,35
<b>6% CAP</b>	<b>6,00</b>
PORC. CAP. ENVEL (NOS 30% FRES) %	3,90
PESO CAP. ENVELHECIDO (g)	14,61
PESO AGREG. VIRGEM	840,00
PESO AGREG. FRESADO	360,00
PESO. APROX. CP. TOTAL 6%	1276,60
PESO TOTAL CAP (g)	76,60
PESO. CAP. NOVO (g)	61,99
PORC. CAP. NOVO (%)	4,86

Fonte: Próprio autor

Seguindo a metodologia, foram separadas 20 bandejas com material, sendo 15 para moldar os CPs (3 CPs para cada teor) e 5 para a Massa Específica Máxima Medida (1 para cada teor). Após a separação, o material agregado+fresado foi colocado em estufa à 163°C, o ligante à 153°C (temperatura na qual o ligante apresenta a viscosidade para mistura com agregado). A mistura foi executada em cuba própria, à temperatura de 143°C e colocada em estufa à 163°C (temperatura de compactação) por 2 h, visando a cura/rompimento. Decorrido o tempo determinado, o material foi colocado nos moldes e levado ao compactador para aplicar 75 golpes de cada lado do CP. Depois da moldagem dos CPs eles ficaram em repouso por 12 h e posteriormente foram retirados dos moldes e aferidas suas medidas de altura, de diâmetro, de peso seco, de peso submerso e de peso saturado superfície seca, conforme a Tabela 16. Também foi realizado o ensaio para determinação da Massa Específica Máxima Medida DMM ou Gmm, o resultado segue conforme a Tabela 17 e o gráfico conforme a Figura 31.

**Tabela 16: Volumetria e Massa Específica Aparente**

Resultados dos Ensaio de Volumetria							
Ligante [%]	Identif.	Dimensões		Det. Da Densidade			Massa Espec. Apar Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]
	nº CP	h CP (cm)	d CP (cm)	Peso AR (g)	P. Imeroso (g)	Sup. Seca (g)	
4,0%	1	6,52	10,2	1191,1	688,3	1204	2,303
	2	6,67	10,2	1231,1	716,2	1244,4	2,324
	3	6,47	10,2	1195,8	693,7	1207,6	2,320
4,5%	4	6,46	10,2	1198,3	698,7	1211,6	2,330
	5	6,25	10,2	1196,9	697	1199,9	2,373
	6	6,24	10,2	1186,5	682,9	1189,9	2,333
5,0%	7	6,37	10,2	1203,8	704,8	1210,9	2,372
	8	6,36	10,2	1203,4	705,7	1210,9	2,375
	9	6,29	10,2	1201,3	703,3	1207,4	2,376
5,5%	10	6,29	10,2	1202,9	706,2	1204,8	2,406
	11	6,29	10,2	1201	699,1	1203,4	2,375
	12	6,38	10,2	1199,4	697,7	1202,7	2,368
6,0%	13	6,33	10,2	1201,9	699,8	1203,8	2,378
	14	6,35	10,2	1199,9	695,2	1201,7	2,362
	15	6,46	10,2	1203,5	694,3	1207,6	2,338

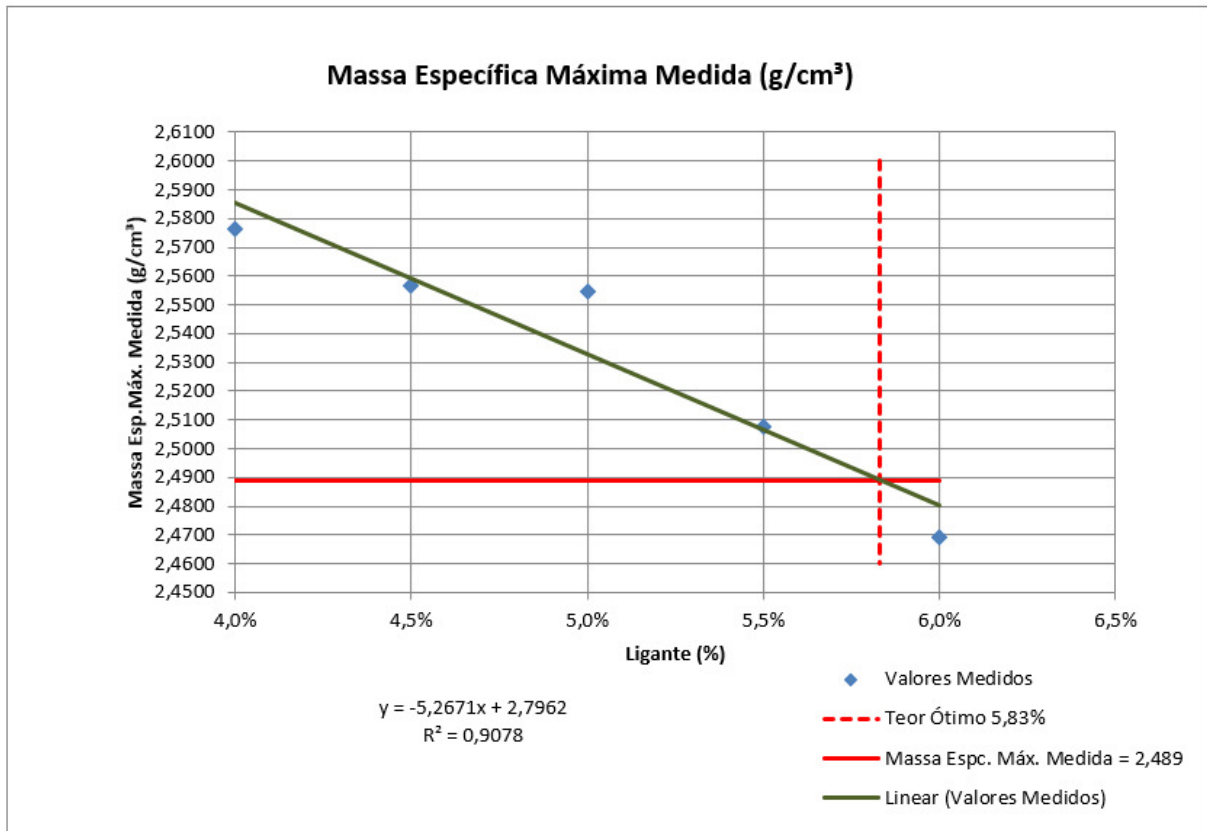
Fonte: Próprio autor

Tabela 17: Resultado do Ensaio de Massa Espec. Máxima Medida

Resultados do Ensaio RICE (Massa Espec. Maxima Medida)				
Ligante [%]	Amostra Seca (g)	Massa Kit + Amostra + Água (g)	Massa kit + Água (g)	Gmm [g/cm <sup>3</sup> ]
4,0%	1239,1	7676,7	6917,2	2,5761
4,5%	1246,4	7677,5	6917,2	2,5566
5,0%	1242,2	7674,6	6917,2	2,5549
5,5%	1253,6	7672,3	6917,2	2,5075
6,0%	1259,9	7668,3	6917,2	2,4690

Fonte: Próprio autor

Figura 31: Gráfico Gmm em Função do Teor de Ligante



Fonte: Próprio autor

Com a determinação da Massa Específica Aparente (Gmb) e da Massa Específica Máxima Medida Gmm foi então calculado o Volume de Vazios (Vv), de Vazios do Agregado Mineral (VAM) e da Relação Betume/Vazios (RBV), conforme a Tabela 18.

Tabela 18: Parâmetros Calculados do CPs para cada Teor

Valores Médios					
Teor	Gmb	Gmm	Vv	VAM	RBV
4,0%	2,316	2,5761	10,11%	19,3%	47,7%
4,5%	2,345	2,557	8,26%	18,8%	56,0%
5,0%	2,374	2,555	7,07%	18,9%	62,6%
5,5%	2,383	2,507	4,97%	18,0%	72,4%
6,0%	2,359	2,469	4,45%	18,5%	76,0%

Fonte: Próprio autor

Determinados os parâmetros pertinentes dos CPs, foram então realizados os ensaios de Estabilidade e de Fluência que consistiram em: colocar os corpos-de-prova em banho, à temperatura de 60°C, durante 30 minutos, então rompê-los na Prensa Marshall, sendo colhidas as medidas inicial e final da Fluência e o valor da Estabilidade no rompimento do CP. Visualizam-se os resultados conforme a Tabela 19. Também foram apresentados os valores médios de Vv, VAM, RBV, Massa Específica Aparente (MEA) em t/m<sup>3</sup>, Estabilidade e Fluência, conforme a Tabela 20. A Figura 32 ilustra os gráficos plotados a partir dos parâmetros medidos e calculados, assim como o valor de teor de projeto adotado. O teor de projeto adotado para o estudo foi de 5,83%, tal valor escolhido teve como base os dados de volume de vazios (Vv) e de estabilidade. Quando da revisão bibliográfica, estipulava-se um valor de Vv a ser adotado de 4%, no entanto, analisando-se a estabilidade dos CPs rompidos, verificou-se que ao adotarmos o valor de Vv de 4% o teor de projeto seria de 6,15% e a estabilidade seria de 542 kgf, embora ela estivesse dentro do mínimo estabelecido, que é de 500 kgf, seria um valor bastante baixo. Então, ao adotar-se o teor de 5,83% (que é a soma do ligante envelhecido+ligante novo, sendo a porcentagem de ligante novo de 4,68% do total de material empregado) estimou-se, pela curva do teor versus Vv, que se teria um valor de Vv=4,6% e estabilidade de 687 kgf. Em comparação com (MENSCH, 2017), que usou o mesmo agregado e ligante 50/70 para um teor de 5,3% e Vv de 3,95%, o projeto apresentou uma razão entre o percentual de ligante novo empregado na mistura com fresado e o teor presente na mistura de referência de (MENSCH, 2017) de 88%, embora o Vv fosse diferente.

Tabela 19: Determinação da Estabilidade e Fluência

Ligante [%]	Nº do CP	Altura [cm]	Fluência [mm]		Estabilidade [mm]	Fator Correção	N	Fluência
			Inicial	Final				
4,0%	1	6,52	4,53	6,28	0,42	0,982	972,44	7,00
	2	6,67	4,25	6,24	0,36	0,945	802,39	7,96
	3	6,47	4,4	6,19	0,37	0,993	866,46	7,16
4,5%	4	6,46	4,48	6,66	0,29	0,996	681,19	8,72
	5	6,25	4,19	6,51	0,57	1,052	1413,46	9,28
	6	6,24	3,7	5,5	0,38	1,055	944,78	7,20
5,0%	7	6,37	4,6	7,11	0,39	1,020	938,13	10,04
	8	6,36	4,37	6,24	0,4	1,023	965,17	7,48
	9	6,29	4,04	6,44	0,33	1,042	810,86	9,60
5,5%	10	6,29	4,85	6,88	0,33	1,042	810,44	8,12
	11	6,29	4,47	6,39	0,35	1,041	858,88	7,68
	12	6,38	4,65	6,64	0,25	1,017	599,36	7,96
6,0%	13	6,33	4,46	6,69	0,28	1,030	679,65	8,92
	14	6,35	5,05	7,34	0,27	1,026	652,84	9,16
	15	6,46	4,72	7,24	0,25	0,997	587,68	10,08
		Constante=	2357,57	(kgf/mm)				

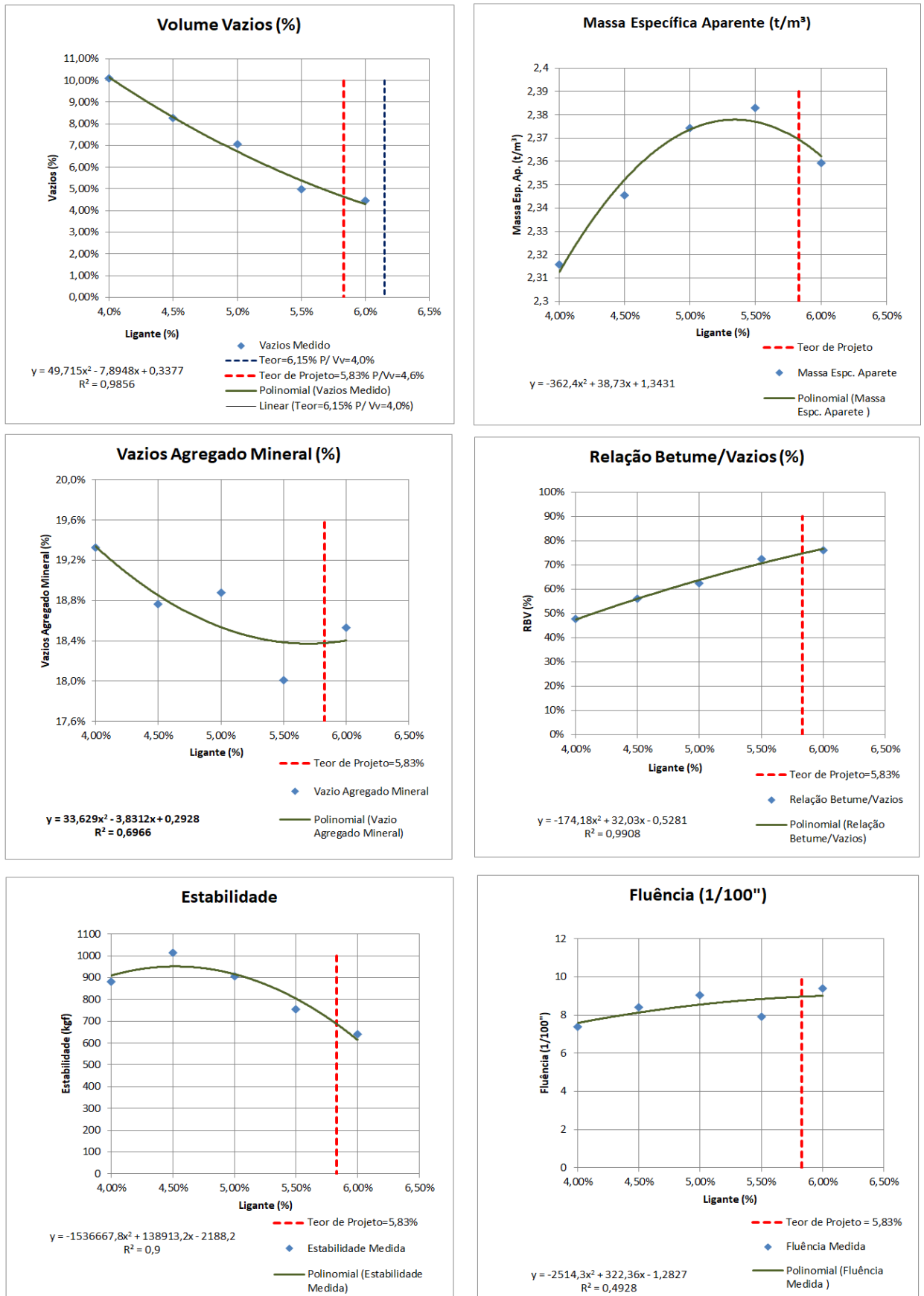
Fonte: Próprio autor

Tabela 20: Determinação valores médios dos parâmetros medidos e calculados

Valores Médios						
Ligante [%]	Vazios [%]	VAM [%]	RBV [%]	MEA [t/m <sup>3</sup> ]	Estabilidade [kgf]	Fluência [1/100"]
4,0%	10,11%	19,3%	47,7%	2,32	880,4	7,37
4,5%	8,26%	18,8%	56,0%	2,35	1013,1	8,40
5,0%	7,07%	18,9%	62,6%	2,37	904,7	9,04
5,5%	4,97%	18,0%	72,4%	2,38	756,2	7,92
6,0%	4,45%	18,5%	76,0%	2,36	640,1	9,39

Fonte: Próprio autor

Figura 32: Gráficos dos parâmetros medidos e calculados em função do teor de ligante



Fonte: Próprio autor



#### 4.4.2 Moldagem dos corpos-de-prova no teor de projeto

Com o teor de projeto definido, foi moldada uma série de corpos-de-prova, 4 com o teor de projeto e 75 golpes de cada lado, para ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração, e outros 9 com o teor de projeto e diferentes números de golpes, para construir uma curva de volume de vazios versus número de golpes. Os materiais foram pesados conforme as Tabelas 21 e 22, e para esses CPs foi estipulado o peso de agregado+cal de 1160 g, visando minimizar a perda de materiais finos.

Tabela 21: Peso em massa dos materiais que compõe a mistura

PESO DO AGREGADO CORPO DE PROVA:		1160									
PESO POR FRAÇÃO											
	PENEIRA	% Retido	Pesos (g)	Correção	Acum. 1 CP	4 CP's					
BRITA 3/4	3/4"	0,43	5,0	0	0	0					
	1/2"	10,55	122,4	127	127	509					
	3/8"	4,09	47,4	51	178	713					
	n 4	0,71	8,3	0	178	713					
BRITA 3/8	3/8"	0,30	3,5	0	178	713					
	n 4	21,76	252,4	278	456	1823					
	n 10	2,21	25,7	0	456	1823					
	n 40	0,06	0,7	0	456	1823					
PÓ	3/8"	0,00	0,0	0	456	1823					
	n 4	1,45	16,8	0	456	1823					
	n 10	9,58	111,1	137	593	2370					
	n 40	9,26	107,4	108	701	2802					
	n 80	2,18	25,3	25	726	2904					
	n 200	1,54	17,9	18	744	2975					
	Pas 200	3,87	44,9	45	789	3155	% Retido	Pesos (g)	Peso Agre+Cap	Acum. 1 CP	4 CP's
FRESADO	3/4"	0,00	0,0	0	789	3155	0,00	0,0	0,0	789	3155,2
	1/2"	1,17	13,6	14	802	3210	1,71	19,8	20,6	809	3237,7
	3/8"	0,63	7,3	7	810	3239	1,14	13,2	13,8	823	3292,7
	n 4	4,39	50,9	51	861	3442	6,20	71,9	74,8	898	3591,9
	n 10	8,55	99,1	99	960	3839	9,51	110,3	114,8	1013	4051,1
	n 40	7,97	92,4	92	1052	4209	8,27	95,9	99,8	1113	4450,3
	n 80	2,41	27,9	28	1080	4320	2,09	24,2	25,2	1138	4551,2
	n 200	1,58	18,3	18	1098	4394	0,78	9,0	9,4	1147	4588,8
	Pas 200	3,31	38,4	38	1137	4547	0,31	3,6	3,7	1151	4603,7
FILER(%)	n 80	0,06	0,7	0	1137	4547				1151	4603,7
	n 200	0,26	3,0	0	1137	4547				1151	4603,7
	Pas 200	1,68	19,5	23	1160	4640				1174	4696,5
TOTAL(%)		100,00	1160,0	1160	1160	4640				1174	4696,5

Fonte: Próprio autor

Tabela 22: Peso e porcentagem de materiais que compõe a mistura para teor de projeto

5,83% CAP	5,83
PORC. CAP. ENVEL (NOS 30% FRES) %	3,90
PESO CAP. ENVELHECIDO (g)	14,12
PESO AGREG. VIRGEM + CAL	812,00
PESO AGREG. FRESADO	348,00
PESO. APROX. CP. TOTAL 6,83%	1231,81
PESO TOTAL CAP (g)	71,81
PESO. CAP. NOVO (g)	57,69
PORC. CAP. NOVO (%)	4,68

Fonte: Próprio autor



Após a realização das misturas e da moldagem dos CPs, foi aguardado o período de 12 h de repouso, então foi realizada a desmoldagem e a aferição das medidas de altura, de diâmetro, de peso ao ar, de peso submerso, de peso saturado superfície seca, para então determinar a Massa Específica Aparente Gmb, conforme a Tabela 23. Com base na determinação da Massa Específica Máxima Medida (Gmm) em função do teor de ligante, conforme a Figura 31, para o teor de projeto de 5,83% de ligante tem-se uma  $Gmm=2,489 \text{ g/cm}^3$ , a qual é usada para determinar o Volume de Vazios (Vv), de Vazios do Agregado Mineral (VAM) e da Relação Betume/Vazios (RBV). Os CPs 1 a 9 foram moldados para determinação do Volume de Vazios em função do número de golpes, que é expresso na Tabela 24, e os CPs 10 a 13 foram moldados para os ensaios de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração, conforme a Tabela 25.

**Tabela 23: Volumetria e Massa Específica Aparente**

Resultados dos Ensaios de Volumetria								
Ligante [%]	Número de Golpes	Identif.	Dimensões		Det. Da Densidade			Gmb [g/cm³]
		n° CP	h CP (cm)	d CP (cm)	Peso AR (g)	P. Imerso (g)	Sup. Seca (g)	
5,83%	16	1	6,7	10,2	1199,3	683,3	1218,8	2,233
	16	2	6,97	10,2	1198,9	682,1	1220	2,222
	18	3	6,71	10,2	1197,6	683,3	1215	2,246
	18	4	6,76	10,2	1198,4	684,3	1216,2	2,247
	20	5	6,61	10,2	1199,1	685,6	1211,4	2,274
	20	6	6,68	10,2	1199,4	684,3	1211,4	2,269
	22	7	6,46	10,2	1198,7	695	1206,1	2,339
	22	8	6,43	10,2	1198	687,9	1203,2	2,318
5,83%	24	9	6,65	10,2	1199,5	685	1211,2	2,273
	75	10	6,21	10,2	1200,5	698,3	1201,6	2,378
	75	11	6,14	10,2	1200,7	702	1201,3	2,398
	75	12	6,30	10,2	1203,1	695,1	1204,1	2,357
	75	13	6,29	10,2	1202	697	1203,2	2,368

Fonte: Próprio autor

**Tabela 24: Parâmetros em função do N° de golpes**

Valores para Curva N° de Golpes por Vv							
n° CP	Teor	N° golpes	Gmb	Gmm	Vv	VAM	RBV
1	5,8%	16	2,233	2,4890	10,28%	23,2%	55,8%
2	5,8%	16	2,222	2,4890	10,71%	23,6%	54,6%
3	5,8%	18	2,246	2,4890	9,77%	22,8%	57,1%
4	5,8%	18	2,247	2,4890	9,74%	22,8%	57,2%
5	5,8%	20	2,274	2,4890	8,64%	21,8%	60,4%
6	5,8%	20	2,269	2,4890	8,84%	22,0%	59,8%
7	5,8%	22	2,339	2,4890	6,05%	19,6%	69,2%
8	5,8%	22	2,318	2,4890	6,87%	20,3%	66,2%
9	5,8%	24	2,273	2,4890	8,68%	21,9%	60,3%

Fonte: Próprio autor

Tabela 25: Parâmetros e Valores médios para ensaios de MR e RT

Valores parâmetros para MR, RT							
nº CP	Teor	Nº golpes	Gmb	Gmm	Vv	VAM	RBV
10	5,83%	75	2,378	2,489006	4,45%	18,2%	75,6%
11	5,83%	75	2,398	2,489006	3,66%	17,6%	79,1%
12	5,83%	75	2,357	2,489006	5,31%	19,0%	72,0%
13	5,83%	75	2,368	2,489006	4,87%	18,6%	73,8%
Valores Médios					4,57%	18,35%	75,15%

Fonte: Próprio autor

Apesar de alguns valores do Vv serem diferentes do previsto, como o do CP 11 (abaixo do esperado) e o do CP 12 (acima do esperado), na média o valor ficou bem próximo do esperado, conforme a Tabela 25. Para os CPs, com diferentes números de golpes, que foram moldados visando chegar a um valor de Vv num intervalo de 6% a 8% (para o ensaio de Dano por Umidade Induzida), foram adotados os CPs 7 e 8, com 22 golpes como parâmetro, conforme a Tabela 24. Com base nos valores obtidos nos CPs 7 e 8, foram moldados mais 6 CPs, com 22 golpes, com a finalidade de chegar ao Vv entre 6% e 8%. Juntamente com os CPs de 22 golpes, foram moldados 3 CPs com 75 golpes, no teor de projeto, para análise de Estabilidade e de Fluência, conforme a Tabela 26. O resultado dos parâmetros de Vv, VAM e RBV dos 9 CPs são apresentados nas Tabelas 27 e 28.

Tabela 26: Volumetria e Massa Específica Aparente

Resultados dos Ensaio de Volumetria								
Ligante [%]	Número de Golpes	Identif.	Dimensões		Det. Da Densidade			Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]
		nº CP	h CP (cm)	d CP (cm)	Peso AR (g)	P. Imerso (g)	Sup. Seca (g)	
5,8%	75	1'	6,04	10,2	1197,1	711,4	1197,6	2,455
	75	2'	6,16	10,2	1200,5	709,2	1201,3	2,432
	75	3'	6,10	10,2	1199,5	709,4	1200,1	2,437
5,8%	22	4'	6,29	10,2	1195	698	1196,9	2,388
	22	5'	6,45	10,2	1198,8	693,2	1205,2	2,335
	22	6'	6,40	10,2	1198,4	692,7	1201,7	2,348
	22	7'	6,82	10,2	1199,2	698	1212	2,326
	22	8'	6,46	10,2	1196	690,7	1200,6	2,339
	22	9'	6,54	10,2	1202,7	692,3	1208,5	2,323

Fonte: Próprio autor

Tabela 27: Parâmetros e Valores médios para ensaios Estabilidade e Fluência

Valores parâmetros para Estabilidade e Fluência							
n° CP	Teor	N° golpes	Gmb	Gmm	Vv	VAM	RBV
1'	5,83%	75	2,455	2,48901	1,37%	15,6%	91,2%
2'	5,83%	75	2,432	2,48901	2,27%	16,4%	86,1%
3'	5,83%	75	2,437	2,48901	2,07%	16,2%	87,2%
Valores Médios					1,90%	16,07%	88,20%

Fonte: Próprio autor

Tabela 28: Parâmetros para ensaio de Dano por Umidade Induzida

Valores para Dano por Umidade Induzida							
n° CP	Teor	N° golpes	Gmb	Gmm	Vv	VAM	RBV
4'	5,8%	22	2,388	2,4890	4,05%	17,9%	77,4%
5'	5,8%	22	2,335	2,4890	6,20%	19,7%	68,6%
6'	5,8%	22	2,348	2,4890	5,68%	19,3%	70,6%
7'	5,8%	22	2,326	2,4890	6,54%	20,0%	67,4%
8'	5,8%	22	2,339	2,4890	6,04%	19,6%	69,2%
9'	5,8%	22	2,323	2,4890	6,66%	20,1%	66,9%

Fonte: Próprio autor

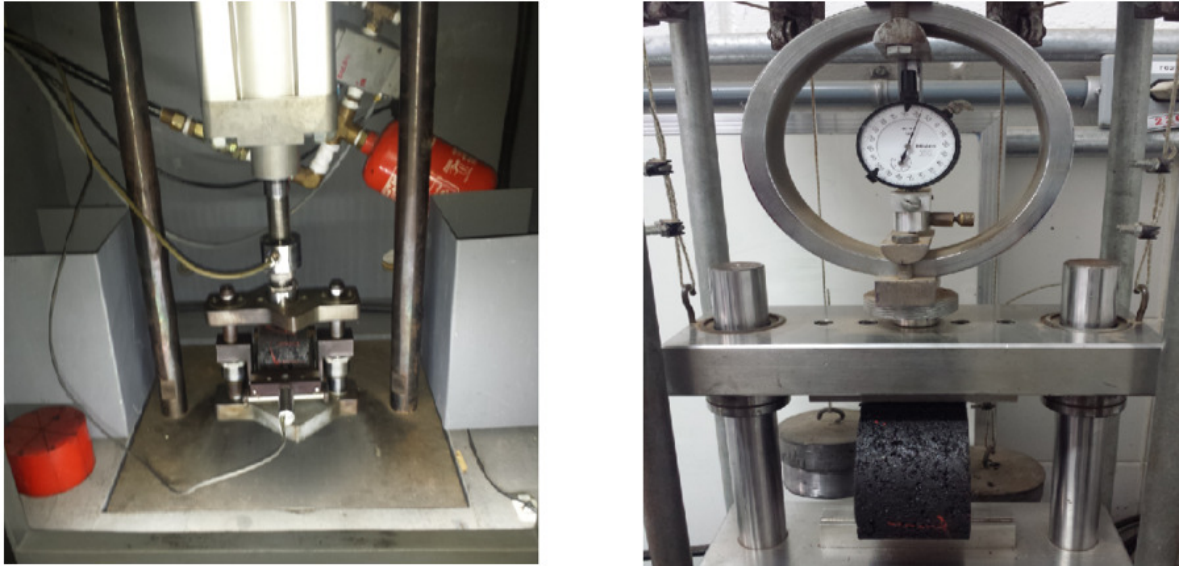
Com o término da confecção dos corpos-de-prova e da determinação de seus parâmetros pertinentes à realização dos ensaios, foram então separados os CPs 7 e 8, da Tabela 24, e os CPs 5', 7', 8' e 9', da Tabela 28, para o ensaio de Dano por Umidade Induzida. Para os ensaios de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração foram separados os CPs 10 a 13, da Tabela 25. Os corpos-de-prova que foram moldados para os ensaios de Estabilidade e de Fluência, apesar de estarem com Vv fora do esperado, conforme a Tabela 27, foram separados para os ensaios.

#### 4.4.3 Módulo de Resiliência e Resistência à Tração

Os ensaios de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração seguiram as normas DNIT 135/2010-ME e DNIT 136/2010-ME, respectivamente. Para a análise, os CPs foram condicionados à 25°C, durante 4 h, sendo que o primeiro corpo-de-prova submetido ao ensaio foi o CP 10, o qual foi colocado na prensa, ajustado e fixado os transdutores LVDT para dar início. Foram aplicados 75 ciclos de carga no valor de 15 % da carga de ruptura estipulada como de 0,5 mPa, e os 60 primeiros ciclos foram para ajuste, a partir de então foi realizada a média a cada 5 ciclos e apresentado o valor do módulo como MR<sub>1</sub>, MR<sub>2</sub>, MR<sub>3</sub>, o CP foi então girado 90° e o procedimento repetiu-se, então foram anotados os valores de MR<sub>4</sub>, MR<sub>5</sub>, MR<sub>6</sub>, conforme

a Figura 33. O resultado do Módulo de Resiliência foi a média dos 6 valores medidos ( $MR_{méd}$ ). Depois de finalizado o ensaio de MR, o CP foi submetido ao ensaio de Resistência à Tração RT, conforme a Figura 33. Os valores dos ensaios seguem conforme a Tabela 29.

**Figura 33: Imagem dos Ensaio de MR e RT**



**Fonte: Próprio autor**

**Tabela 29: Resultado dos Ensaio de MR e RT**

Ensaio de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração (RT) valores em Mpa												
CP ID	Altura (cm)	Diâm. (cm)	MR <sub>1</sub>	MR <sub>2</sub>	MR <sub>3</sub>	MR <sub>4</sub>	MR <sub>5</sub>	MR <sub>6</sub>	MR <sub>méd</sub>	MR <sub>desv</sub>	Leitura	RT
10	6,21	10,20	8204	8003	7960	7619	7422	7464	7779	321	757	1,53
11	6,14	10,20	6092	6043	5993	6109	6012	5964	6036	57	718	1,47
12	6,30	10,20	5536	5463	5457	5943	5961	5988	5725	264	587	1,17
13	6,29	10,20	5978	6000	6004	5712	5700	5678	5845	163	625	1,25

**Fonte: Próprio autor**

Para o ensaio do primeiro CP, não se conhecia o valor da Resistência à Tração, portanto estipulou-se um valor abaixo do valor mínimo definido por norma, aplicando-se apenas 0,5 mPa para o ensaio de MR. Após o ensaio, o CP foi rompido e foi encontrado o valor de Resistência à Tração de 1,53 mPa, então o valor encontrado para o MR do CP foi desconsiderado, sendo utilizado apenas o valor da Resistência à Tração. Os valores médios obtidos nos ensaios seguem conforme a Tabela 30. Um ponto verificado foi o de que os CPs 12 e 13, com Vv de 5,31% e 4,87%, respectivamente, tiveram a resistência à tração mais baixa que os CPs 10 e 11, com Vv de 4,45% e 3,66%, respectivamente. Tal fato indicou que a resistência à tração mais baixa nos CPs 12 e 13 poderiam estar vinculadas ao Volume de Vazio mais

elevado. Em comparação com (MENSCH, 2017), que apresentou, em seu estudo, MR para mistura com o mesmo agregado e ligante, o valor médio de 6956 mPa, o MR médio na mistura com fresado ficou em 5869 mPa, condizendo com a mistura de referência. Também em comparação com (MENSCH, 2017), que apresentou RT de 1,07 mPa, a resistência à tração na mistura com fresado mostrou-se satisfatória, na média=1,35 mPa e superior ao definido como mínimo de 0,65 mPa, segundo norma DNIT 031/2006, Faixa C DNIT.

**Tabela 30: Valores Médios de MR e RT**

<b>Média dos Ensaio MR e RT</b>	
<b>Módulo Resiliência MR (MPa)</b>	<b>5869</b>
<b>Resistência à Tração RT (MPa)</b>	<b>1,35</b>

Fonte: Próprio autor

#### 4.4.4 Estabilidade e Fluência no Teor de Projeto

Para obter valores de Estabilidade e Fluência mais precisos, foram realizados ensaios dos CPs 1' a 3', no teor de projeto, seguindo a norma DNER-ME 043/95. A determinação do parâmetro Vv apresentou valores abaixo do esperado, conforme Tabela 27, que na média ficaram em 1,90%, portanto mais baixo que o estimado, que era de 4,6%. Os resultados da Estabilidade e Fluência são apresentados na Tabela 31 e os valores médios na Tabela 32.

**Tabela 31: Determinação da Estabilidade e Fluência no Teor de Projeto**

Ligante [%]	Nº do CP	Altura [cm]	Fluência [mm]		Estabilidade [mm]	Fator Correção	N [kgf]	Fluência [1/100"]
			Inicial	Final				
5,83%	1'	6,04	3,15	7,03	0,52	1,112	1363,81	15,52
	2'	6,16	4,25	7,5	0,61	1,077	1549,06	13,00
	3'	6,10	3,55	7,08	0,5	1,095	1290,27	14,12
Constante=			2357,6	(kgf/mm)				

Fonte: Próprio autor

**Tabela 32: Valores Médios de Estabilidade e Fluência**

<b>Valores Médios</b>		
Teor	Estabilidade [kgf]	Fluência [1/100"]
5,83%	1401,050	14,213

Fonte: Próprio autor



#### 4.4.5 Dano por Umidade Induzida

O ensaio seguiu o procedimento descrito em AASHTO T 283 e ABNT NBR 15617/2015, o qual basicamente consistiu em: (após a moldagem dos CPs com Vv entre 6% e 8%) separar um primeiro grupo de 3 CPs e deixá-los aguardando, submeter um segundo grupo de 3 CPs à saturação entre 55% e 80% de seus vazios, após essa etapa, acondicioná-los em sacos impermeáveis com acréscimo de 10 ml de água, levá-los a congelamento por 16 h, conforme a Figura 34, e decorrido o período determinado, os CPs foram colocados em banho à temperatura de 60°C, durante 24 h, conforme a Figura 34. Passadas as 24h, os CPs foram colocados em banho à 25°C, durante 2 h, juntamente com o primeiro grupo de 3 CPs, para então serem levados à prensa e realizados os ensaios de RT, os resultados seguem conforme a Tabela 33.

**Figura 34: Imagem condicionamento 16h à -18°C e banho 24h à 60°C**



Fonte: Próprio autor

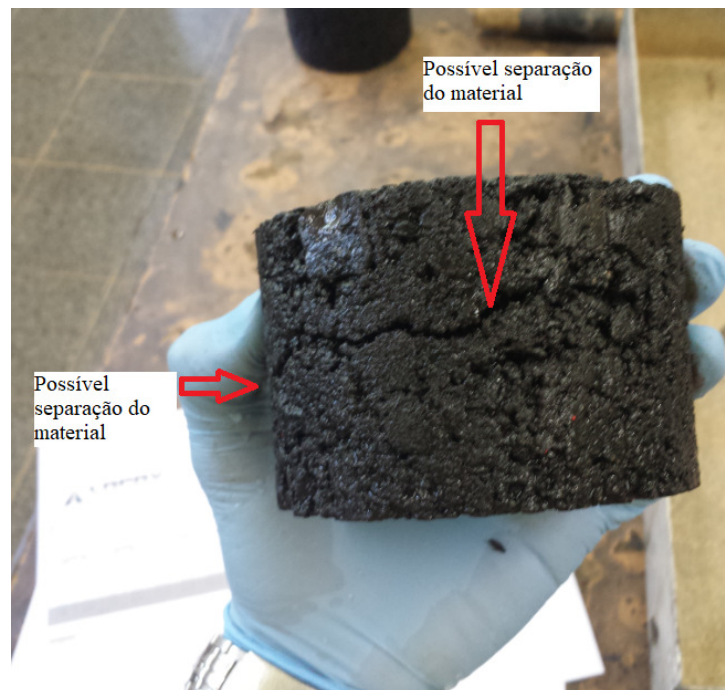
Tabela 33: Resultado do Ensaio de RT para determinação do Dano por Umidade Induzida

Dano por Umidade Induzida															
Identificação		Geometria		Pesos			D aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Dmáx medida (g/cm <sup>3</sup> )	Vazios vv (%)	RRT			Resistência à Tração		
% CAP	Nº CP	h (cm)	d(cm)	Seco (g)	Imerso(g)	Sss (g)				Grupo	Leitura	Rt (Mpa)	S/COND	COND	
5,8%	7	6,46	10,20	1198,70	695,00	1206,10	2,339	2,489	6,0	<u>S</u>	<u>35</u>	0,80	0,7970		
5,8%	8	6,43	10,20	1198,00	687,90	1203,20	2,318	2,489	6,9	<u>C</u>	<u>36</u>	0,82		0,8236	
5,8%	5'	6,45	10,20	1198,80	693,20	1205,20	2,335	2,489	6,2	<u>S</u>	<u>39</u>	0,89	0,8895		
5,8%	7'	6,82	10,20	1199,20	698,00	1212,00	2,326	2,489	6,5	<u>C</u>	<u>25</u>	0,54		0,5393	
5,8%	8'	6,46	10,20	1196,00	690,70	1200,60	2,339	2,489	6,0	<u>S</u>	<u>39</u>	0,89	0,8881		
5,8%	9'	6,54	10,20	1202,70	692,30	1208,50	2,323	2,489	6,7	<u>C</u>	<u>39</u>	0,88		0,8773	
<u>C</u>	Conicionados														
<u>S</u>	Sem Condicionamento														
											Valor Médio		0,8582	0,7467	
											RRT =		87%		

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 33 também foi apresentada a relação entre a Resistência à Tração Condicionada (RTu) e a Resistência à Tração (RT), que é a Resistência Retida à Tração (RRT), no percentual de 87%. Bernucci et al. (2006) definem como aceitável uma RRT maior que 70%. Um ponto a destacar no ensaio foi de que o único CP que apresentou um valor de RTu mais baixo foi o CP 7', sendo que esse corpo-de-prova tinha uma peculiaridade “uma rachadura/separação”, possivelmente ocorrida ao virar o CP no compactador, conforme a Figura 35.

Figura 35: Possível separação do material ao virar o CP no compactador



Fonte: Próprio autor

## 5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento desse projeto necessitou de uma série de ensaios, desde a caracterização do material empregado até a análise de propriedades mecânicas da mistura.

Os ensaios de caracterização dos agregados apresentaram parâmetros dentro das especificações determinadas por norma, apenas um ensaio, o de adesividade, apresentou uma desconformidade, que foi sanado com o emprego de cal dolomítica à mistura. Os ensaios de caracterização do ligante foram desenvolvidos pelos técnicos e bolsistas do LAPAV e foram acompanhados pelo autor do projeto, estando todos dentro das especificações apresentadas nas normas.

A análise do material fresado fez-se somente por meio do refluxo e granulometria do agregado após extração do betume, pois devido a limitação do laboratório, não foi possível fazer a recuperação do ligante e assim determinar suas características para então realizar o emprego do agente rejuvenescedor.

Para o desenvolvimento da mistura havia sido determinado que o teor de ligante estaria vinculado ao Vv de 4%, no entanto, ao adotar esse volume de vazios, a mistura teria uma estabilidade muito baixa, de apenas 542 kgf, embora dentro do limite mínimo de 500 kgf. Optou-se então por um Vv de 4,6% e estabilidade de aproximadamente 687 kgf, e o teor para esses parâmetros definidos ficou em 5,83% de total de ligante (novo+envelhecido).

O ensaio de Módulo de Resiliência apresentou um valor bastante elevado, contudo já era esperado, devido ao emprego do material fresado com ligante envelhecido, que possui um elevado grau de rigidez.

O ensaio de Resistência à Tração também se mostrou satisfatório, com valor médio de 1,35 mPa, contudo se verificou que dentro das amostras (CPs) ensaiadas houve uma certa discrepância, com valor máximo de 1,53 mPa para o CP 10 e de 1,17 mPa para o CP 12.

O ensaio de Estabilidade e Fluência no teor de projeto foi o que se mostrou fora do esperado, pois os resultados obtidos para o Vv dos CPs moldados para o ensaio apresentaram a primeira inconsistência, valor médio de 1,9%. Posteriormente, o valor da estabilidade de 1401 Kgf medida também causou estranheza, pois ao analisar os valores obtidos com Vv supôs-se que houve erro na dosagem do ligante, no entanto acompanhando-se a curva da estabilidade em função do teor de ligante o valor da estabilidade deveria ser bastante baixa e não elevada, como se apresentou. A única alteração ocorrida na moldagem dos CPs foi a troca do Técnico que realizou a mistura e as acomodou nos moldes. Os golpes aplicados nos CPs foram os 75, sempre contados manualmente, para conferir com o contador eletrônico do compactador.



O ensaio de Dano por Umidade Induzida foi executado rigorosamente conforme a norma e apresentou um valor bastante satisfatório de RRT igual a 87%. Apenas um CP apresentou valor de RTu baixo, nesse CP, conforme a Figura 35, houve um tipo de “rachadura/separação” que possivelmente foi ocasionada no momento da virada para aplicação dos golpes no outro lado.

De modo geral, a mistura com fresado apresenta valores aceitáveis para aplicação em vias urbanas, que não sejam de tráfego muito intenso e pesado, na cidade de Porto Alegre. Contudo, a mistura apresentou uma grande variabilidade, possivelmente relacionada a grande heterogeneidade do material fresado. Analisando-se os resultados e visando o uso mais intenso e maior gama de aplicação em vias mais importantes da cidade, fica explícita a necessidade de mais estudos sobre o emprego de material fresado em misturas asfálticas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T-283: resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage. Washington, USA, 1989.
- ABEDA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6293: materiais betuminosos: determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 2001.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6560: materiais betuminosos: determinação do ponto de amolecimento: método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2000.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6576: materiais betuminosos: determinação da penetração. Rio de Janeiro, 1998.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935: agregados: terminologia. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15184: materiais betuminosos: determinação da viscosidade em temperatura elevada usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15617/2015: Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- ANP - AGENCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIO COMBUSTÍVEIS.
- ASPHALT INSTITUTE. Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types. Manual serie n. 2, 1995.
- ASPHALT INSTITUTE. The asphalt handbook. Manual serie n. 4 (MS-4), 1989.
- BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica – materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros. 1ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2006.

- BONFIM, V. Fresagem de pavimentos asfálticos. 1. ed. São Paulo: Fazenda Arte, 2001.
- CABRAL, G.L.L. Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação. 2005. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.
- DAER - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DAER/RS-EL 213/01: Determinação do teor de asfalto de misturas betuminosas utilizando o extrator de refluxo.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 035/95: peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 1995.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 083/98: agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 120/97: coleta de amostras de agregados. Rio de Janeiro, 1997.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-PRO 199: redução de amostras de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 078/94: agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 035/98: agregados: determinação da abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 081/98: agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 086/94: agregados: determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 089/94: agregados: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 054/97: equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT - 031/2004 – ES: pavimentos flexíveis: concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2004.

- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT - 031/2006 - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 155/2010 ME: – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2010.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 136/2010-ME: Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2010.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 135/2010-ME: Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 2010.
- EPPS, J.A.; SEBAALY, P.E.; PENARANDA, J.; MAHER, M.R.; MCCANN, M.B.; HAND, A.J. Compatibility of a test for moisture-induced damage with Superpave volumetric mix design. NCHRP Report, n. 444, Washington, 2000.
- FERNANDES, C.G. Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação. 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- LEITE, L.F.M. Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros. 1999. 266 f Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- MENSCH, N.G. Análise viscoelástica de misturas asfálticas quentes e mornas. 2017. Dissertação (Mestrado) – UFRGS – Porto Alegre, 2017.
- MOCELIN, D.M. Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico. 2018. Dissertação (Mestrado) – UFRGS – Porto Alegre, 2018.
- MOURA, E. Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas. 2001. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- NASCIMENTO, M.V.; Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Recicladas. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. – Campina Grande, 2011.

- PINTO, C.S. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D-Y.; KENNEDY, T.W. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. 2. ed. Lanham, Maryland: Napa Research and Education Foundation, 1996.
- Site da Prefeitura Municipal de Porto Alegre. [www.portoalegre.rs.gov.br](http://www.portoalegre.rs.gov.br)
- WOODS, K.B. Highway engineering handbook. New York: McGraw Hill, 1960.