

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PHILIPPI JOSE MARASTONI DOS SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO ENTRE A
MISTURA ASFÁLTICA DE CAUQ CONVENCIONAL E RECICLADA**

PATO BRANCO

2021

PHILIPPI JOSE MARASTONI DOS SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO ENTRE A
MISTURA ASFÁLTICA DE CAUQ CONVENCIONAL E RECICLADA**

**COMPARATIVE STUDY OF THE MECHANICAL BEHAVIOR BETWEEN THE
ASPHALTIC MIXTURE OF CONVENTIONAL AND RECYCLED CAUQ**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Jairo Trombetta

PATO BRANCO

2021



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

PHILIPPI JOSE MARASTONI DOS SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO ENTRE A
MISTURA ASFÁLTICA DE CAUQ CONVENCIONAL E RECICLADA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Jairo Trombetta

Data de aprovação: 20/Outubro/2021

Jairo Trombetta

Mestre em Engenharia Civil

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco

Danilo Rinaldi Biscosini

Doutorado em Engenharia Civil

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco

Ney Lyzandro Tabalipa

Doutorado em Engenharia Civil

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco

PATO BRANCO

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelas bênçãos e por me dado forças durante toda minha vida e durante a realização desse trabalho.

Aos meus pais, Florisvaldo e Ednilsa, por todo apoio, carinho e incentivo durante todo meu curso.

Aos meus familiares e colegas por todo apoio, incentivo e ajuda durante os momentos difíceis.

Ao meu orientador, professor Jairo Trombetta por todo apoio e ajuda durante a realização do trabalho.

Ao professor Danilo Rinaldi Bisconsini por toda ajuda prestada.

Aos meus amigos por todo apoio e incentivo durante a realização desse trabalho, em especial ao meu amigo Davi Henrique Cavilion Lapolli por toda ajuda prestada nos ensaios, incentivo e caronas.

Aos técnicos do laboratório por toda ajuda prestada e paciência.

RESUMO

SANTOS, Philipi Jose Marastoni dos. **ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO ENTRE A MISTURA ASFÁLTICA DE CAUQ CONVENCIONAL E RECICLADA**. 2021. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021.

No Brasil as rodovias representam a principal estrutura disponível para o transporte de cargas e passageiros. Com a intensa utilização, grande parte de seu revestimento apresenta elevado grau de degradação exigindo restaurações. A retirada da camada degradada através da fresagem, para posterior reconstituição do revestimento tem gerado elevado volume de resíduos. A possibilidade de reciclagem do material fresado pode se apresentar como alternativa viável técnica e econômica, além de aspectos ambientais. Neste trabalho, buscou-se analisar a utilização do material fresado em uma mistura asfáltica com adição de 20% deste material em dosagem de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) pelo método Marshall. Para isso, foram moldados corpos de prova tanto com utilização de material fresado, como em mistura convencional de CAUQ. Foram analisados parâmetros padronizados, tais como: percentagem de vazios, relação betume/vazios, estabilidade e fluência. Os resultados apontam para uma equivalência de valores de teor de asfalto de projeto no tocante a percentagem de vazios e relação betume/vazios; porém em relação à Estabilidade e da Fluência a mistura reciclada indica a necessidade de ajuste na dosagem indicando que um aumento no teor de asfalto melhoraria estes dois parâmetros. Para um mesmo teor de betume para as duas misturas o estudo indica possibilidade de utilização da mistura reciclada para o revestimento de pavimentos, desde que compondo uma camada intermediária ou de ligação, que é menos solicitada que a camada de rolamento.

Palavras-chave: Mistura asfálticas, dosagem Marshall, Misturas asfálticas recicladas, Agregados fresados.

ABSTRACT

SANTOS, Philipi Jose Marastoni dos. **COMPARATIVE STUDY OF THE MECHANICAL BEHAVIOR BETWEEN THE ASPHALTIC MIXTURE OF CONVENTIONAL AND RECYCLED CAUQ.** 2021. 58 f. TCC (Graduate) - Civil Engineering Course, Academic Department of Civil Construction, Federal Technological University of Paraná, Pato Branco, 2021.

In Brazil, highways represent the main structure available for the transport of cargo and passengers. With intense use, a large part of its coating presents a high degree of degradation requiring restorations. The removal of the degraded layer through milling, for later reconstitution of the coating, has generated a high volume of waste. The possibility of recycling the milled material can be presented as a viable technical and economic alternative, in addition to environmental aspects. In this work, we sought to analyze the use of the milled material in an asphalt mixture with the addition of 20% of this material in Hot Machined Asphalt Concrete (CAUQ) dosage by the Marshall method. For this purpose, specimens were molded using both milled material and a conventional mixture of CAUQ. Standardized parameters were analyzed, such as: percentage of voids, bitumen/void ratio, stability and creep. The results point to an equivalence of design asphalt content values regarding the percentage of voids and bitumen/voids ratio; however, in relation to Stability and Fluency, the recycled mixture indicates the need to adjust the dosage, indicating that an increase in the asphalt content would improve these two parameters. For the same bitumen content for the two mixtures, the study indicates the possibility of using the recycled mixture for pavement coating, provided that it composes an intermediate or connecting layer, which is less required than the rolling layer.

Keywords: Asphalt mix, Marshall dosage, Recycled asphalt mix, Milled aggregates.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de várias camadas.....	14
Figura 2 - Tipos de granulometria.....	15
Figura 3 - Corpo de prova retirado de um pavimento	16
Figura 4 - Ponta de corte da fresadora	17
Figura 5 - Gráfico de Estabilidade x Fluência	27
Figura 6 - Características do Ligante	32
Figura 7 - Rotarex.....	32
Figura 8 - Mistura no Fogareiro.....	33
Figura 9 - Corpo de prova em repouso	34
Figura 10 - Rompimento na EMIC	35
Figura 11 - Curva granulométrica agregados virgens	37
Figura 12 - Curva granulométrica da mistura reciclada e limites da faixa C.....	39
Figura 13 - Método Gráfico de Rutfuchs	40
Figura 14 - Gráfico da mistura convencional de projeto.....	40
Figura 15 - Gráfico da mistura reciclada de projeto	42
Figura 16 - Mistura Convencional - Teor de ligante versus: Gmb (a), Vv (b), VCB (c), VAM (d), RBV (e), DMT (f), Estabilidade (g) e Fluência (h).....	44
Figura 17 – Teor ótimo convencional	45
Figura 18 - Mistura Reciclada - Teor de asfalto versus: Gmb (a), Vv (b), VCB (c), VAM (d), RBV (e), DMT (f), Estabilidade (g) e Fluência (h)	46
Figura 19 – Teor ótimo de ligante mistura reciclada	47
Figura 20 - Mistura Convencional x Reciclada - Teor de asfalto versus: Gmb (a), Vv (b), VCB (c), VAM (d), RBV (e), DMT (f), Estabilidade (g) e Fluência (h) ..	48
Figura 21 - Requisitos de dosagem de concreto asfáltico	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação	20
Tabela 2 - Requisitos específicos para agregado destinado a pavimentação ...	21
Tabela 3 - Massa Específica dos Materiais	31
Tabela 4 - Viscosidade de mistura e compactação Saybolt - Furol (SSF).....	32
Tabela 5 - Granulometria materiais UTFPR.....	37
Tabela 6 - Granulometria Material Fresado	38
Tabela 7 - Teor de Betume Rotarex	39
Tabela 8 - Porcentagem de material utilizado em cada teor de ligante	41
Tabela 9 - Porcentagem de material e ligante presente em 20% de material reciclado.....	42
Tabela 10 - Porcentagem de material adicionado e ligante a cada teor de ligante	42
Tabela 11 - Parâmetros da mistura convencional	43
Tabela 12 - Parâmetros da mistura reciclada.....	45
Tabela 13 - Comparação resultados e exigências norma DNIT 031-ES (2006) ..	49

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DMT	Densidade Máxima Teórica
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
Gmb	Massa Específica Aparente
RAR	Resíduo Asfáltico Reciclado
RBV	Relação Betume-Vazios
VAM	Vazios no Agregado Mineral
Vv	Volume de Vazios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.2 objetivos	12
1.2.1 Objetivo Geral	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.3 justificativa	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Pavimento	14
2.2 Mistura asfálticas	14
2.3 Misturas asfálticas a quente	15
2.3.1 Misturas Asfálticas ReciclADAS	16
2.4 Fresagem	17
2.4.1 Tipos DE reciclagem da Fresagem	18
2.5 Elementos da mistura asfáltica a quente	18
2.5.1 Agregados	19
<u>2.5.1.1 Agregados Recicláveis</u>	<u>19</u>
2.5.1.2 Revestimento asfáltico recuperado	21
2.5.2 Ligante Asfáltico	22
2.5.3 Filer 22	
2.6 Dosagem das misturas asfálticas	23
2.6.1 Dosagem Marshall	23
<u>2.6.1.1 Dosagem de misturas asfálticas recicláveis</u>	<u>24</u>
2.6.2 Dosagem do <i>Asphalt Institute</i>	24
2.7 Determinação das propriedades mecânicas	26
2.7.1 Ensaios convencionais	26
<u>2.7.1.1 Estabilidade marshall</u>	<u>27</u>
2.7.2 Ensaio de módulo	28
2.7.3 Ensaio de ruptura	28
<u>2.7.3.1 Resistência à tração estática</u>	<u>28</u>
<u>2.7.3.2 Vida fadiga</u>	<u>28</u>
2.7.4 Ensaio de deformação permanente	29
2.7.5 Ensaios complementares	29
3 METODOLOGIA	30
3.1 Procedimento Experimental	30
3.2 Materiais Utilizados	30

3.2.1 Agregados	30
3.2.2 Agregados recicláveis	31
3.2.3 Ensaio de granulometria	31
3.2.4 Ligante asfáltico	31
3.3 Dosagem Asphalt Institute	32
3.4 Dosagem Marshall.....	33
3.5 Propriedades Mecânicas	36
4 ANÁLISE DE RESULTADOS	37
4.1 agregados	37
4.1.1 Agregados Reciclados.....	38
4.2 Dosagem Marshall.....	40
4.2.1 Dosagem Convencional	40
4.2.2 Dosagem Reciclado	41
4.2.3 Resultados Marshall	43
<u>4.2.3.1 Resultados da mistura convencional CAUQ.....</u>	<u>43</u>
4.2.3.2 Resultados da mistura reciclada CAUQ	45
4.2.3.3 Comparação de Resultados	47
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
5.1 Conclusões	51
5.2 Trabalhos Futuros	52

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, 61% das cargas transportadas nacionalmente são feitas por meio das rodovias, possuindo assim mais de 61 mil quilômetros só em vias federais pavimentadas. Desde da década de 1950, a matriz de transporte brasileira tem se mantido tendenciosa, com larga vantagem para este modal, cujos custos, muitas vezes, superam aqueles apresentados por outros. (Ipea, 2010)

A maioria das rodovias construídas no Brasil são a base de asfalto, cujo preço, em geral, é inferior ao pavimento em concreto de cimento Portland (CCP). Contudo, as vias asfálticas sofrem deformações constantes dados o clima brasileiro e o peso das cargas transportadas pelos caminhões, o que reduz a vida útil das rodovias. (Ipea, 2010)

Com um mundo que procura outros meios de produções e alternativas mais sustentáveis, se vê como uma das saídas a reciclagem e reutilização de materiais em diversos setores da construção civil sendo nas misturas de concreto asfáltico uma dessas possibilidades.

Um processo específico muito utilizado em rodovias pode ser o de fresagem, que consiste na retirada de camadas de um pavimento asfáltico, para manutenções superficiais, rasas ou profundas. É uma atividade que gera grandes volumes de resíduos, que geralmente não tem uma reutilização ou destinação adequada. Com uma reutilização desse material ou partes dele em uma nova mistura asfáltica tem-se assim uma redução no custo de novos materiais e um aproveitamento do material retirado.

O desenvolvimento completo e sustentável de um país tem ligação direta com sua infraestrutura de transporte, que tem a capacidade de mover uma nação, conectar pessoas e lugares e impulsionar a economia. E o Brasil – país de extensão continental – não foge a essa máxima. Ocorre, porém, que tem muito a avançar quando o assunto é investimento. Para transportar as riquezas, dependemos (e muito) das rodovias (CNT, 2019).

Com o estudo dessa forma de reutilização da fresagem será analisado seu comportamento em ensaios de dosagem Marshall exigidos pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes) para a sua utilização.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento mecânico da mistura asfáltica com resíduos decorrentes de fresagem em comparação com uma mistura asfáltica de CAUQ (concreto asfáltico usinado a quente) convencional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar se a mistura reciclada atende aos requisitos da dosagem Marshall;
- Verificar as propriedades mecânicas dos corpos-de-prova das misturas asfálticas de CAUQ e recicladas;
- Analisar as propriedades entre os dois tipos de misturas;

1.3 JUSTIFICATIVA

No Brasil as rodovias são forças motrizes de locomoção e transportes, aproximadamente, responsáveis por, 61% da movimentação de mercadorias e 95% da de passageiros (CNT, 2019).

As rodovias tem a necessidade de um controle de manutenção constante de suas vias para um maior aproveitamento de sua vida útil e uma boa qualidade de rolagem para seus transeuntes. Uma das alternativas de manutenção da infraestrutura é a realização da fresagem. Os resíduos dessas fresagens geralmente são descartados de maneira imprópria pela dificuldade de achar locais adequados para a destinação dos mesmos, pode-se fazer assim a reutilização destes materiais em uma mistura asfáltica com o material reciclado da mesma, tanto para uma nova camada ou em manutenções pequenas.

A procura de métodos de construção mais sustentável é uma saída para um mundo que possui materiais limitados, essa alternativa leva a uma saída para a diminuição da extração e utilização de recursos não renováveis.

Em um país que possuem escassez de matéria-prima, há um alto custo na utilização de meios de transporte para a sua locomoção. A adição dos resíduos da fresagem pode diminuir tanto a necessidade de porcentagens de novos materiais utilizados numa mistura asfáltica como a diminuição de material que necessita de um destino apropriado de descarte onde é necessário locais controlados que são legalizados para o recebimento de tal produto.

Apesar do grande volume do material de fresagem que é gerado nas manutenções das malhas rodoviárias, há poucos trabalhos acadêmicos tratando da utilização deste material, o que indica a importância dessa mistura asfáltica com a utilização deste material.

O estudo da viabilidade técnica da reutilização do material de fresagem será baseado em ensaios padronizados pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes) observando o atendimento de requisitos técnicos do material resultante da dosagem Marshall com vistas a utilização em serviços de restauração de pavimentos rodoviários.

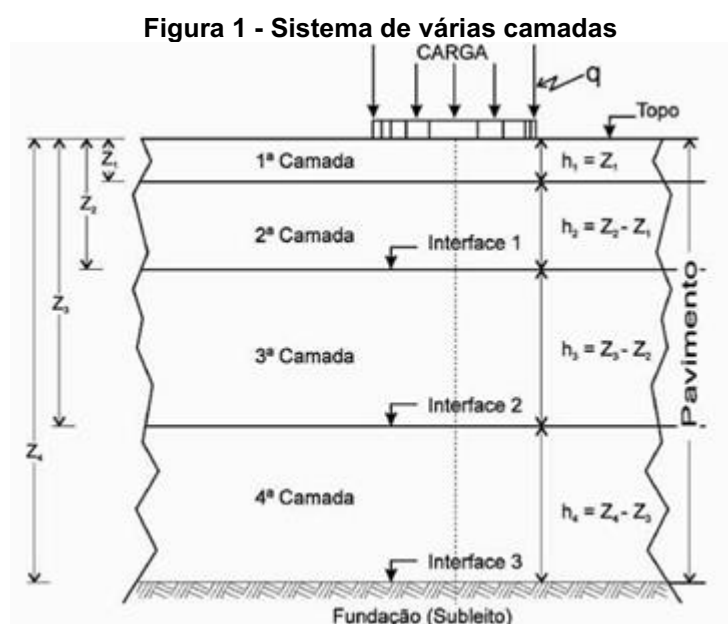
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PAVIMENTO

Segundo Senço (2007) o pavimento é uma estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada, técnica e economicamente, a:

- Resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los;
- Melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando o mais durável a superfície de rolamento.

Consiste em um sistema com diversas camadas (Figura 1) de espessuras pré-definidas que se assenta sobre um semiespaço que possui a função de fundação da estrutura, conhecido como subleito (SENÇO, 2007).



Fonte: Senço, 2007.

2.2 MISTURA ASFÁLTICAS

Segundo Bernucci et al. (2006), as misturas asfálticas consistem em uma mistura de agregados de diferentes tamanhos e cimento asfáltico. Esses revestimentos são identificados quanto ao tipo de ligante: a quente com o uso de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), ou a frio com o uso de EAP (Emulsões asfálticas de Petróleo), sendo esses os mais utilizados no Brasil. O uso de cada tipo depende do

atendimento a certos requisitos como, impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local. Nesta pesquisa foram utilizadas as misturas usinadas a quente do tipo CAUQ.

2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

Um dos tipos mais empregados no Brasil é o concreto asfáltico (CA) também denominado concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ). Essa mistura é feita pela composição de vários agregados de diferentes dimensões e cimento asfáltico, que são aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante (Bernucci et al., 2006).

As misturas asfálticas a quente podem ser subdivididas pela graduação dos agregados e filer, sendo elas a de graduação densa, aberta e descontínua conforme a figura 2, sendo a densa aquela com uma curva granulométrica contínua e bem graduada, com poucos vazios e com agregados menores dimensões que preenchem vazios dos agregados maiores. A distribuição aberta possui uma curva granulométrica uniforme ou seja possui uma falta de agregados menores (dimensões menores que 0.075mm) deixando assim vazios entre os agregados de maiores dimensões. Este tipo de mistura é utilizado quando é de interesse que o pavimento possua a função drenante onde a água entrará nesses vazios e sairá de forma preestabelecida em projeto. A de granulação descontínua possui uma grande proporção de agregados de dimensões maiores em vista dos de dimensões intermediárias. Este tipo de granulação é completada com uma granulação fina com a finalidade de aumentar a resistência do revestimento à deformação permanente (Bernucci et al., 2006) como mostrado na (Figura 2).

Figura 2 - Tipos de granulometria



Figura 4.2 Exemplos de composições granulométricas dos tipos de misturas a quente

Fonte: Bernucci et al. (2006)

A figura 3 mostra as diferentes granulometrias empregadas em um pavimento asfáltico.

Figura 3 - Corpo de prova retirado de um pavimento



Fonte: Bernucci et al. (2006)

2.3.1 MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Quando o pavimento asfáltico está deteriorado estruturalmente é necessário a restauração de sua capacidade de carga que pode ser feita através da aplicação de espessuras adicionais de camadas ou retirada de todo material já existente ou parte do revestimento deteriorado por equipamento especial, a fresadora, executando assim uma nova camada de revestimento no lugar da que foi retirada (Bernucci et al., 2006).

O material gerado no corte pode ser reaproveitado por reciclagem. Segundo Bernucci et al. (2006) se entende por reciclagem de pavimentos

“o processo de reutilização de misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas para produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes remanescentes, provenientes da fresagem, com acréscimo de agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, CAP ou EAP novos, quando necessários, e também com adição de aglomerantes hidráulicos.”

Segundo Bonfim (2000), o material resultante da fresagem de revestimentos asfálticos possui propriedades nobres, assim pode ser reutilizado como material de reciclagem para o desenvolvimento de novos pavimentos.

2.4 FRESAGEM

A fresagem é uma operação de corte feita por máquinas especiais, que retira uma camada ou todas de um revestimento asfáltico existente. É utilizado como forma de restauração da qualidade de rolamento da superfície ou para melhorar a capacidade de suporte do pavimento (Bernucci et al., 2006). Muitas dessas fresadoras funcionam feito por meio de rolos com pontas especiais de cortes com presença de diamantes, chamados de *bits* (Figura 4).

Figura 4 - Ponta de corte da fresadora



Fonte: Bonfim, 2007

2.4.1 TIPOS DE RECICLAGEM DA FRESAGEM

Segundo Bonfim (2000), há diversas maneiras de executar a reciclagem. A constante evolução dos equipamentos e das usinas tem ampliado o número de opções quanto à sua aplicabilidade. Sendo assim a reciclagem da fresagem é classificada de diferentes formas por Bernucci et al. (2006) sendo elas em usina e in situ, podendo ser a quente ou a frio como especificado abaixo:

- Em Usina, a quente ou a frio todo o material fresado é levado de volta para usina para ser utilizada em uma nova mistura asfáltica;
- in situ, a quente ou a frio, quando o material fresado é misturado no próprio local onde foi produzido. A classificação depende do tipo de ligante que foi utilizado no local, seja a quente (CAP) ou a frio (EAP) sendo utilizados equipamentos específicos para esse tipo de procedimento;
- in situ, utilizando a espuma de asfalto que é incorporada ao revestimento antigo como uma parte da base, fazendo o uso ou não de ligantes hidráulicos, para a produção de uma nova base para uma nova mistura asfáltica que será a camada de rolamento da via.

2.5 ELEMENTOS DA MISTURA ASFÁLTICA A QUENTE

A mistura asfáltica é produzida tendo em vista seu comportamento visando as demandas previstas em projeto e o tráfego da via. Geralmente sua composição é feita com agregados, materiais de enchimento, como o fíler, e o ligante asfáltico, também podem ser utilizados outros materiais, como os reciclados como o de fresagem, que será utilizado nesta pesquisa, polímeros ou aditivos, para a obtenção de características buscadas em projeto. Estes materiais são misturados em proporções específicas para que a estrutura final seja compacta e resistente atendendo assim sua demanda prevista.

2.5.1 Agregados

Os agregados são classificados, de acordo com tamanho e distribuição de grãos também e sua natureza, como naturais, artificiais e recicláveis. Segundo a norma da ABNT 9935:2011 pode ser considerado agregado todo material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto.

Segundo Bernucci et al. (2006) para a pavimentação por causa das especificações é necessário um controle do tamanho e graduação utilizada dos agregados, dependendo assim de sua aplicação, buscando uma distribuição granulométrica que atenda sua finalidade.

Além da granulometria nos agregados quando se fala sobre pavimentos asfálticos, sendo eles:

- Resistência à abrasão: devem possuir a habilidade de resistir a quebras, degradação e desintegração;
- Textura superficial: influência na trabalhabilidade, adesividade, resistência ao atrito e ao cisalhamento;
- Forma das partículas: influi na trabalhabilidade, resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e na compactação do agregado;
- Absorção: a porosidade do agregado influencia em quando o mesmo absorve de ligante durante a mistura influenciando assim na coesão da mistura asfáltica;
- Adesividade ao ligante asfáltico;
- Sanidade: resistência à desintegração química;
- Densidade específica/massa específica;

2.5.1.1 Agregados Recicláveis

Segundo a ABNT NBR 15116:2004 os agregados recicláveis são todo material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura.

A utilização desse tipo de agregado reciclável para a pavimentação deve atender a norma e ser classificado como classe A que são os “resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem” e seguir as especificações da NBR 15116:2004, (visto na tabela 1).

Tabela 1 - Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação

Propriedades	Agregado reciclado classe A		Normas de ensaios	
	Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Composição granulométrica	Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		ABNT NBR 7181	
Dimensão máxima característica	≤ 63 mm		ABNT NBR NM 248	
Índice de forma	≤ 3	-	ABNT NBR 7809	-
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm	Entre 10% e 40%		ABNT NBR 7181	
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas características ¹⁾	2	Anexo A	Anexo B
	Materiais não minerais de características distintas ¹⁾	3	Anexo A	Anexo B
	Sulfatos	2	ABNT NBR 9917	

¹⁾ Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Fonte: NBR 15116 (2004)

O agregado reciclável também deve ser avaliado de acordo com sua capacidade de suporte e expansibilidade e classificado quando ao seu emprego final na estrutura da pavimentação de acordo com NBR 15116:2004, (na tabela 2).

Tabela 2 - Requisitos específicos para agregado destinado a pavimentação

Aplicação	ISC (CBR) %	Expansibilidade %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para execução de base de pavimento ¹⁾	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada

¹⁾ Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2 tf (80 kN) no período de projeto.

Fonte: NBR 15116 (2004)

Segundo a ABNT NBR 15116:2004, o material reciclável que não atender aos requisitos da tabela 2 podem ser estabilizados granulometricamente, ou pela adição de cimento Portland ou cal hidratada, conforme a NBR 15115 (ABNT, 2004).

2.5.1.2 Revestimento asfáltico recuperado

Denominado como RAR, é o material proveniente de fresagens tanto a quente como frio, dos pavimentos asfálticos.

O RAR pode ser proveniente das etapas do processo de fresagem e para uma utilização futura é necessário o cuidado para não haver a contaminação desse material por outros em sua composição.

Segundo Silva (2011), há receio na utilização dos RAR pois agregados virgens podem ter melhor desempenho na resistência que as misturas com revestimento asfáltico recuperado.

O material reciclado a ser recuperado deve ser submetido a ensaios de caracterização, como sua granulometria e a quantidade de asfalto presente no material.

2.5.2 Ligante Asfáltico

No Brasil o ligante asfáltico que é resultado da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo é denominado de CAP (Cimento Asfáltico do Petróleo). (Bernucci et al. (2006).

O CAP pode ser classificado neste caso por ensaio de penetração descrito na norma da ABNT NBR 6576:2007 pode ser classificado em quatro classes CAP 30-45, CAP 50-60, CAP 85-100 e CAP 150-200 também pode ser classificado de acordo a sua viscosidade absoluta. Os CAP modificados em suas especificas possuem normas que devem ser atendidas quanto do uso do polímero sintético composição.

As propriedades físicas dos ligantes são adquiridas por meio de ensaios, sendo os principais:

- Ensaio de penetração;
- Ensaio de viscosidade;
- Ensaio de ponto de amolecimento;
- Ensaio de ductilidade;
- Ensaio de durabilidade;
- Ensaio de ponto de fulgor;
- Ensaio de massa específica e densidade relativa;

Entre outros ensaios que podem realizados dependendo da composição modificada utilizada no ligante.

2.5.3 Fíler

O fíler é utilizado nas misturas asfálticas com a finalidade de enchimento, suprimindo assim a falta de agregados de granulação graúda ou miúda da composição. O material de enchimento (fíler) é definido por norma como material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura, finalmente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 0,075 mm de abertura de malha quadrada (DNER-EM 367/97). A composição deste material pode ser composto por de cimento Portland, pó de calcário, cal hidratada, pó de pedra, cinza volante ou outros compostos minerais que apresentam as características especificadas na norma.

2.6 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A dosagem de uma mistura asfáltica segundo Bernucci et al. (2006 p.205) é feita através de “*procedimentos experimentais, de um teor dito “ótimo” de ligante, utilizando uma faixa granulométrica predefinida.*” A definição deste teor pode ser considerada complexa. Também é possível que esse termo tenha sido escolhido por analogia ao teor ótimo de umidade de um solo, que, para uma determinada energia, é função somente da massa específica.

No Brasil e no mundo o método de dosagem mais utilizado é denominado de método Marshall, onde o mesmo se faz com o uso da compactação por impacto. Pela norma brasileira essa dosagem é especificada pela DNER-ME 43/95. O teor de projeto de ligante asfáltico pode variar dependendo do método de dosagem utilizado, e é função de parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros (Bernucci et al. 2006).

2.6.1 Dosagem Marshall

Segundo a norma DNER-ME 43/95 tem o objetivo de determinar a estabilidade e a fluência de misturas betuminosas usinadas a quente, utilizando o aparelho Marshall. A metodologia segue certo procedimento, para a geração de seus parâmetros, sendo:

- 1) Determinar as massas específicas dos agregados e do cimento asfáltico de petróleo (CAP);
- 2) Definir a faixa granulométrica a ser utilizada para a mistura;
- 3) Escolha da composição dos agregados, de forma a enquadrar a sua mistura nos limites da faixa granulométrica escolhida;
- 4) Escolha das temperaturas de mistura e de compactação, a partir d curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido;
- 5) Adoção teores (T, em %) de asfalto para os diferentes corpos-de-prova que iram ser moldados. A cada teor deve ter no mínimo 3 corpos.
- 6) Após o resfriamento e a desmoldagem dos corpos-de-prova, é obtido as dimensões de diâmetro e altura, com elas se determina as massas seca (MS) e submersa em água (MSsub) de cada corpo-de-prova. A

partir desses dados é possível obter a massa específica aparente dos corpos-de-prova (G_m), que comparando com a massa específica máxima teórica (DMT), permite obter as relações volumétricas típicas da dosagem.

- 7) Após as medidas volumétricas, os corpos-de-prova são submersos em banho-maria a 60°C por 30 a 40 minutos ou na estufa por 2 horas a uma temperatura de 60°C. Retira-se cada corpo-de-prova que são colocados imediatamente dentro do molde de compressão que por meio da prensa Marshall podemos obter os parâmetros mecânicos como de estabilidade e fluência.

2.6.1.1 Dosagem de misturas asfálticas recicláveis

As misturas recicláveis a quente possuem uma diversidade de métodos de dosagem que podem ser definidos por seguintes aspectos: procedimentos de ensaio, definição de agregado fresado (com ou sem o ligante envelhecido), parâmetros necessários para a definição do teor do ligante novo e percentual de fresado a ser reaproveitado. O termo ligante novo refere-se ao ligante, com ou sem agente rejuvenescedor (AR) misturado, que é adicionado ao fresado para devolver ao ligante suas características iniciais. No Brasil é utilizado uma mistura de AR com cimento asfáltico virgem para o ligante novo (Bernucci et al. 2006).

Para esta pesquisa será utilizado o método de dosagem do Asphalt Institute que utiliza a dosagem Marshall para as novas misturas depois análise no ligante do revestimento fresado.

2.6.2 Dosagem do *Asphalt Institute*

A dosagem do Asphalt Institute faz o uso da metodologia Marshall para a dosagem, fazendo o uso de seus procedimentos para a análise dos agregados do material reciclado, procurando assim o enquadramento da granulometria do material final da mistura nas faixas determinadas nas especificações de projeto e avaliação do

ligante presente no material utilizado para a determinação de ligante novo e se necessário utilização de agentes rejuvenescedores.

O método de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente (MARQ) do Asphalt Institute (1995) consiste das seguintes etapas:

1) Determinação da granulometria dos agregados deste fresado a partir de amostras passadas pelo Rotarex, verificar o teor e a viscosidade do asfalto no material reciclável. Assim é calculado uma combinação entre os agregados da fresagem sem o ligante envelhecido com o os agregados novos se atendem a especificação vigente e se encaixa na faixa granulométrica C do DNIT.

2) A expressão 1 estima a quantidade aproximada de ligante que será utilizada:

$$PI = 0,035 a + 0,045 b + K \times c + F \quad (1)$$

Onde:

PI = demanda aproximada de ligante (combinação de envelhecido e novo) para a mistura reciclada, % em massa da mistura;

a = percentual de agregado mineral retido na peneira 2,36mm (N° 8);

b = percentual de agregado mineral passando na peneira 2,36mm e retido na peneira 0,075mm (N° 200);

c = percentual de agregado mineral passando na peneira 0,075mm;

K = constante, função da quantidade de agregado c que passa na peneira 0,075mm (0,15 para c entre 11 e 15%, 0,18 para c entre 6 a 10% e 0,20 para c igual ou menor que 5%);

F = fator de absorção dos agregados com valores entre 0 e 2%. No caso da ausência deste dado, o valor de 0,7 é sugerido.

3) Estimativa do percentual de ligante novo na mistura. A quantidade de ligante a ser incorporada é expressa como uma porcentagem da massa da mistura, conforme a expressão 1.1:

$$Pln = \frac{(100^2 - rPlf)Plt}{100(100 - Plf)} - \frac{(100 - r)Plf}{100 - Plf} \quad (1.1)$$

Onde:

Pln = percentual de ligante novo (cimento asfáltico novo + AR) na mistura reciclada;

r = percentual em massa de agregado novo com relação ao agregado total da mistura reciclada;

P_{lt} = teor de ligante (combinação de envelhecido e novo) da mistura reciclada em porcentagem;

P_{lf} = teor de ligante do material fresado em porcentagem.

4) Seleção da consistência do ligante novo. Inicialmente determina-se a porcentagem de ligante a ser incorporado em relação à quantidade total de ligante asfáltico na mistura:

$$R = \frac{100P_{lf}}{P_{lt}} \quad (1.2)$$

5) Realiza-se então o procedimento de dosagem Marshall convencional e determina-se o teor de projeto da mistura. Para o Asphalt Institute, o teor de projeto é aquele que apresenta um $V_v = 4\%$.

Este método de dosagem tem como alvo misturas asfálticas em que a quantidade de material fresado fique entre de 10 a 70%. Em misturas asfálticas recicladas onde a porcentagem de fresado utilizado seja igual ou inferior a 20%, o método considera que a mistura reciclada tenha a mesma consistência que a misturas nova incorporada, dispensando assim uma determinação da viscosidade do asfalto presente na mistura reciclada.

2.7 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A determinação das propriedades mecânicas da mistura é necessária para saber o comportamento do revestimento e se atende a todos critérios para evitar defeitos decorrentes de uma má dosagem. Os ensaios realizados para obter essas propriedades são os convencionais, módulo, ruptura, deformação permanente e os complementares.

2.7.1 Ensaios convencionais

Esta pesquisa se limita a utilização do ensaio convencional de estabilidade marshall.

2.7.1.1 Estabilidade marshall

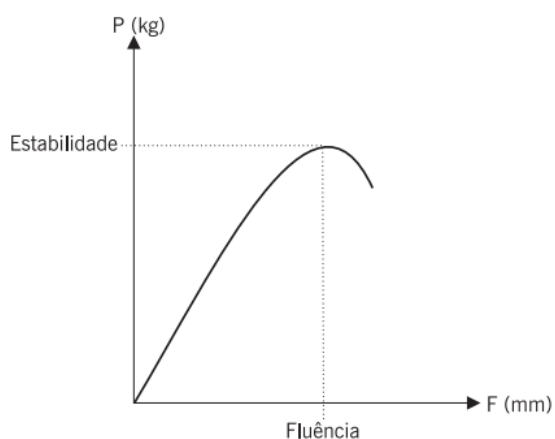
De acordo com a DNER-ME 43/95 a obtenção dos dados seguem a seguintes etapas:

- 1) O ensaio é realizado a partir de um corpo-de-prova de 100mm de diâmetro e 63,5mm de altura denominado de corpo-de-prova Marshall que sofre uma aplicação de uma carga de compressão com uma temperatura de 60°C e a taxa de carregamento de 5cm/minuto.
- 2) A carga é aplicada no corpo-de-prova por meio de cabeçotes curvos padronizados, onde a parte superior é fixa e a inferior se desloca conforme sua taxa, a carga se comporta de forma crescente para manter a taxa especificada.
- 3) A aplicação da carga se mantém até a perda de estabilidade do material que pode ser causada por deslocamentos ou a quebra dos agregados. A carga máxima até essa perda é chamada de estabilidade Marshall expressada em forma de unidade de força que no Brasil é usualmente utilizada como kgf ou em N em normas recentes.

O deslocamento vertical total do prato corresponde ao ponto onde foi atingida a carga máxima, sendo denominado de fluência, expressa em unidade de deslocamento no Brasil é utilizado em mm (Bernucci et al. 2006).

A utilização dos resultados mostra o comportamento da dosagem feita em um gráfico de força aplicada por deslocamento, (a figura 5):

Figura 5 - Gráfico de Estabilidade x Fluência



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

2.7.2 Ensaio de módulo

O ensaio de módulo analisa a rigidez do material, de modo que possa apresentar uma resposta estrutural da mistura. Os ensaios deste tipo mais utilizados no Brasil são o de módulo de resiliência (MR) que tem como objetivo medir o deslocamento vertical máximo que o pavimento pode sofrer sem comprometer seu comportamento estrutural.

2.7.3 Ensaio de ruptura

2.7.3.1 Resistência à tração estática

Consiste na aplicação de forças concentradas diametralmente que são opostas ao cilindro que gerando tensões de tração perpendiculares ao longo do diâmetro do corpo de prova, este ensaio foi desenvolvido no Brasil pelo Professor Lobo Carneiro (Bernucci et al. 2006).

2.7.3.2 Vida fadiga

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura ou vida de serviço. A primeira se refere ao número total de aplicações de uma certa carga necessária à fratura completa da amostra. O ensaio laboratorial de vida

de fadiga tradicionalmente realizado no país para definição do número de repetições de carga é feito por compressão diametral à tensão controlada (Bernucci et al. 2006).

2.7.4 Ensaio de deformação permanente

É um dos defeitos mais comuns em pavimentos podendo ocorrer no revestimento ou em suas subcamadas. No revestimento a consistência do ligante ou a volumetria da mistura pode acarretar neste tipo de defeito e nas subcamadas é efeito de uma má compactação. Os ensaios usuais para estudar essa deformação pode ser feito por *creep* estático e *creep* dinâmico ou por simuladores de tráfego (Bernucci et al. 2006).

2.7.5 Ensaios complementares

Além dos ensaios convencionais os complementares mais utilizados no Brasil o desgaste cântabro e o de perda de umidade induzida que fornecem informações importantes não obtidas a partir dos ensaios mecânicos convencionais.

3 METODOLOGIA

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento mecânico da fase experimental desse trabalho tem como foco o estudo do comportamento da mistura convencional e reciclada.

Após a obtenção da granulometria de ambos materiais foi traçado um curva granulométrica para verificação do atendimento à granulometria da faixa C da especificação ES 031 do DNIT (2006a) para a composição dos agregados do concreto asfáltico usinado a quente.

Para a dosagem da mistura convencional foi utilizada a dosagem Marshall e a correção do material reciclável a partir do método de dosagem do *Asphalt Institute* e continuação da dosagem pelo método de dosagem Marshall,

Para a determinação de dosagem Marshall com o teor de asfalto 4%,5% e 6%, foram moldados 5 corpos-de-prova para cada mistura para a verificação mecânica. Os corpos-de-prova foram projetados a partir das recomendações feitas pela DNER – ME 043 (1995).

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Agregados

Foram utilizados agregados brita 1, brita 0, pedrisco e filer, neste caso o cimento Portland disponível na UTFPR, foram utilizados de acordo com a norma DNER – ME 083 (1995) quanto a peneiramento e classificação da faixa granulométrica de acordo com a DNIT – ES 031 (2006).

A pesquisa contempla foco no comportamento mecânico das misturas. Devido a falta de tempo hábil não foram realizados os ensaios para as caracterização dos agregados sendo utilizado de dados de trabalhos anteriores feitos na instituição com os mesmos agregados.

Tabela 3 - Massa Específica dos Materiais

Material	Brita 3/8"	Pedrisco	Pó de Pedra	Fíler (Cimento)
Massas Específicas Reais, g/cm ³	2,659	2,67	2,76	2,52

Fonte: Atividades acadêmicas na disciplina de Pavimentação

3.2.2 Agregados recicláveis

Os materiais foram provenientes de resíduos de fresagem feitas na região de Pato Branco, disponibilizados pela prefeitura da cidade. Passou por classificação de suas características a partir do método do *Asfalt Institute*.

3.2.3 Ensaio de granulometria

Os ensaios para determinação das faixas granulométricas foram feitos por meio de peneiras disponíveis no laboratório da Universidade sendo elas as de: 25mm; 19mm; 12,5mm; 9,5mm; 4,75mm (n.4); 2mm (n.10); 0,425mm (n.40); 0,177mm (n.80) e 0,075mm (n.200), tanto para o material novo quanto para o reciclado. Assim temos a granulometria do material foi verificada quanto às especificações das faixas recomendadas pela norma do DNIT 031 – ES (2006), tendo por base a faixa C por ser uma das utilizadas.

3.2.4 Ligante asfáltico

Utilizou-se o cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70 disponível no laboratório da universidade. Foi feita a tentativa de classificar o CAP na máquina de viscosidade da universidade, onde a mesma apresentou algumas avarias e não foi possível completar os ensaios, portanto foi feita uma busca bibliográfica para o comportamento característico do CAP 50/70.

Tabela 4 - Viscosidade de mistura e compactação Saybolt - Furol (SSF)

CAP 50/70		
Características	Faixas de Viscosidade (SSF)	Faixas de Temperatura (°C)
Mistura	75-95	149-155
Compactação	125-155	137-142

Fonte: Adaptado de Reis (2012)

A partir dos dados de Reis (2012) foi escolhido para o trabalho a temperatura de 150 (°C) para a mistura e 140 (°C) para a compactação dos corpo-de-prova. A densidade do material (figura 6) utilizada foi obtida de trabalho realizado por Misturini (2017).

Figura 6 - Características do Ligante

Propriedade	CAP 50/70
Densidade (g/cm ³)	1,014
Massa Específica (g/cm ³)	1,011

Fonte: Misturini (2017)

3.3 DOSAGEM ASPHALT INSTITUTE

O Ensaio de extração de betume foi realizado pelo uso da Rotarex disponibilizada pela empresa Hiperpav de Pato Branco (PR), com a usina presente em Vitorino (PR) para a retirada do ligante envelhecido da mistura. Foi seguido a norma DNER-ME 053/94 para a realização do ensaio (figura 7).

Figura 7 - Rotarex



Fonte: Autoria Própria

Após isso foi feito o cálculo do teor de ligante presente no material de fresagem, por meio dos resultados da granulometria do material reciclado e o material novo utilizado na mistura, utilizando o método de dosagem *Asphalt Institute*.

3.4 DOSAGEM MARSHALL

Foi realizado neste trabalho a dosagem Marshall regulamentada pela norma DNER – ME 043 (1995), fazendo uso do ensaio Marshall para os corpos de prova com agregados recicláveis e para os corpos de prova convencionais, ensaios realizados nos laboratórios da UTFPR – Pato Branco.

A partir das curvas granulométricas obtidas, pelo método gráfico de Rutfuchs, foram determinadas as percentagens de agregados, combinadas para se adequar a média da faixa C estabelecida pelo DNIT. Os agregados da mistura foram quarteados, secos e ajustados para cada teor de CAP.

Nesta pesquisa foram feitos 5 corpo de prova (CP), com 1200g cada nas dosagens 4%, 5% e 6% de teor de asfaltos. Feita a mistura para cada dosagem, as amostras foram colocadas em estufa e aquecidas (10-15°C) acima da temperatura do ligante de 150°C. A mistura do ligante com os agregados foi feita por aquecimento de um fogareiro e uma panela controlando a temperatura da mistura (Figura 9).

Figura 8 - Mistura no Fogareiro



Fonte: Autoria Própria

A mistura foi retirada do fogareiro e colocada no molde com a temperatura acompanhada por termômetro até 140°C. Após atingir a temperatura desejada foi moldada com 15 pressões de espátulas e em seguida no mesmo molde, com o soquete, foram aplicados 75 golpes em cada face. Com o CP formado (Figura 9) logo após a moldagem foi feita a extração do corpo de prova e deixado em repouso para o resfriamento.

Figura 9 - Corpo de prova em repouso



Fonte: Autoria Própria

Com os Corpos de prova moldados, foram determinadas as dimensões conforme a norma DNER-ME 043/95, assim como sua densidade aparente.

Na sequência foi procedido o rompimento dos corpos de prova para obtenção dos parâmetros de estabilidade e fluência, utilizando-se a prensa de carga "Emic" do laboratório da universidade. (Figura 10).

Figura 10 - Rompimento na EMIC



Fonte: Autoria Própria

Para determinação da Densidade Máxima Teórica (DMT), foi utilizada a Equação (2.1)

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%Asf}{GAsf} + \frac{\%AgGf}{GagG} + \frac{\%AgM}{GAgM} + \frac{\%f}{Gf}} \quad (2.1)$$

Onde: % *Asf*, *AgG*, *AgM*, *f* = Porcentagens de ligante, agregados graúdos, agregados miúdos e filer, respectivamente.

GAsF, *AgG*, *AgM*, *Gf* = Massas específicas de ligante, agregados graúdos, agregados miúdos e filer.

Em seguida foram calculados os demais parâmetros, conforme as Equações (2.2 a 2.6)

Massa específica aparente da mistura (*Gmb*):

$$Gmb = \frac{Ms}{Ms - Msub} \times 0,9971 \quad (2.2)$$

Onde: *Ms* e *Msub* são as massas secas e massa submersa do CP.

Porcentagem de Volume de vazios (*Vv*):

$$Vv = \frac{DMT - Gmb}{DMT} \times 100 \quad (2.3)$$

Vazios cheios com betume (VCB):

$$VCB = \frac{Gmb \times \%Asf}{GAsf} \quad (2.4)$$

Volume do Agregado Mineral (VAM):

$$VAM = Vv + VCB \quad (2.5)$$

Relação betume/vazios (RBV):

$$RBV\% = \frac{VAM - Vv}{VAM} \times 100 \quad (2.6)$$

3.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os corpos de prova foram levados a estufa por 2 horas a uma temperatura de 60°C para o posterior rompimento de acordo com DNER- ME 043/95.

Para a verificação das propriedades mecânicas em vista da máquina de rompimento Marshall do laboratório está com defeito, foram realizados os rompimentos dos CPs na EMIC da universidade (Figura 10), seguindo as prescrições da DNER- ME 043/95 onde prescreve a velocidade de deslocamento da prensa em 5cm por minuto, e o corpo de prova colocado em suporte próprio para o ensaio à compressão diametral.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 AGREGADOS

Na tabela 5 é apresentado o resultado da curva granulométrica dos agregados disponíveis na UTFPR.

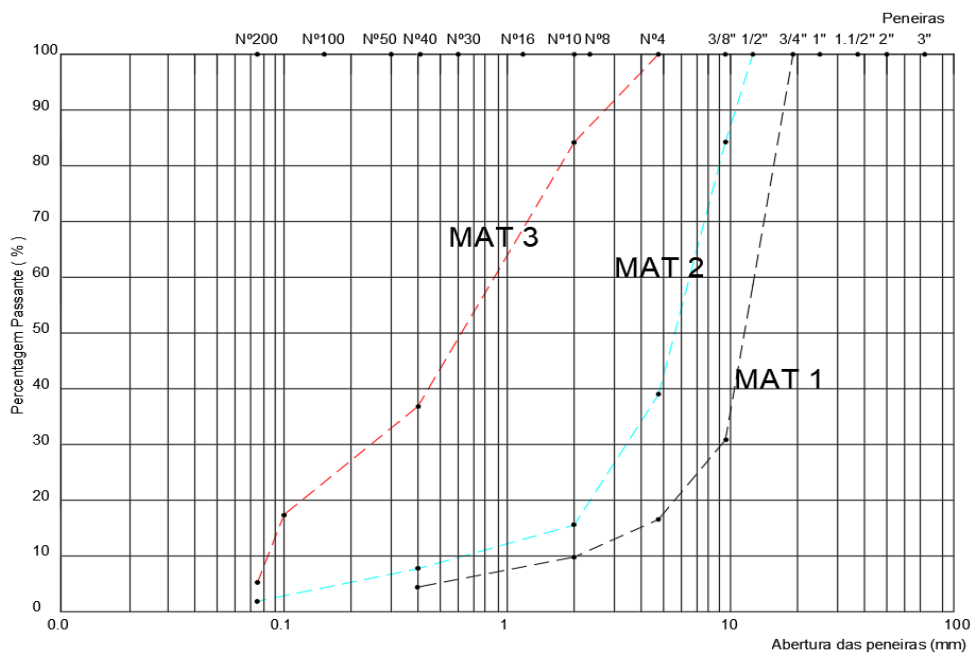
Tabela 5 - Granulometria materiais UTFPR

Material	Brita 3/4	Pedrisco	Pó de Pedra
ASTM	Passante(%)	Passante(%)	Passante(%)
3/4"	100	100	100
1/2"	58,06	100	100
3/8"	29,84	84,13	100,00
Nº4	15,32	38,10	100
Nº10	8,47	14,29	84,19
Nº40	3	6,35	35,97
Nº 80	0	1,19	16,21
Nº200	0	0,4	3,76
FUNDO	0	0	0

Fonte: Autoria Própria

Utilizando os dados da tabela 5 foi plotado o gráfico representado na figura 12.

Figura 11 - Curva granulométrica agregados virgens



Fonte: Autoria Própria

Onde MAT 1, MAT 2 e MAT3 são respectivamente, brita $\frac{3}{4}$ ", pedrisco e pó de pedra.

4.1.1 Agregados Reciclad

A análise foi feita após a extração do betume e o cálculo da porcentagem de betume presente na mistura.

Tabela 6 - Granulometria Material Fresado

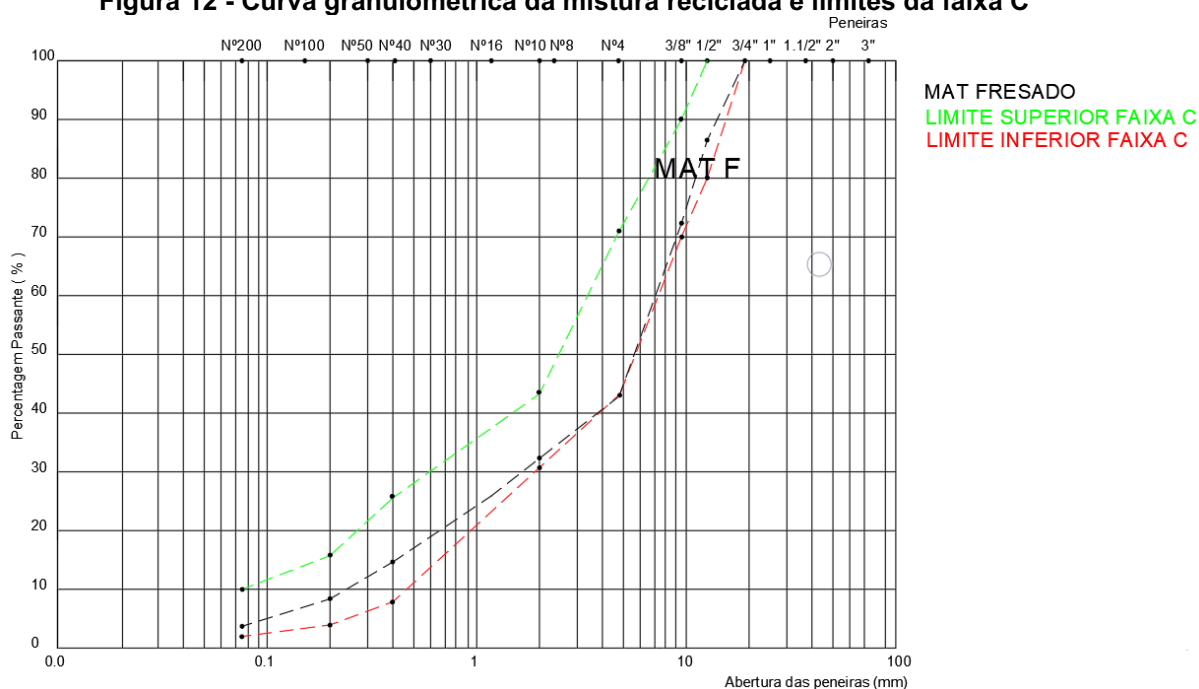
ASTM	Retido (%)	Passante (%)
3/4"	0	100
1/2"	12,11	87,89
3/8"	26,50	73,50

Nº4	56,41	43,59
Nº10	73,66	26,34
Nº40	85,10	14,9
Nº 80	91,50	8,5
Nº200	96,24	3,76
FUNDO	100	0

Fonte: Autoria Própria

A partir desses dados foi feito gráficos por meio do Excel para uma melhor visualização da curva e dos limites da faixa C do DNIT.

Figura 12 - Curva granulométrica da mistura reciclada e limites da faixa C



Fonte: Autoria Própria

O material fresado foi colocado no Rotarex (figura 12) e com a utilização de Percloroetileno como solvente foi feito a extração do betume, obtendo-se a taxa de teor de betume no material fresado conforme a tabela 6 abaixo.

Tabela 7 - Teor de Betume Rotarex

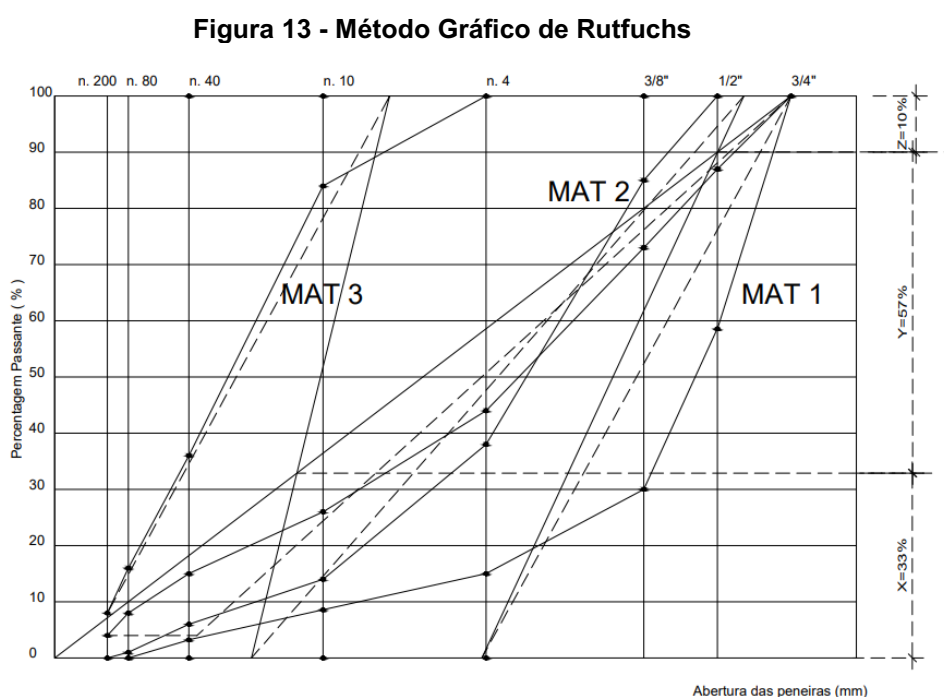
Ensaio Rotarex	
Teor de Betume	4,57%

Fonte: Autoria Própria

4.2 DOSAGEM MARSHALL

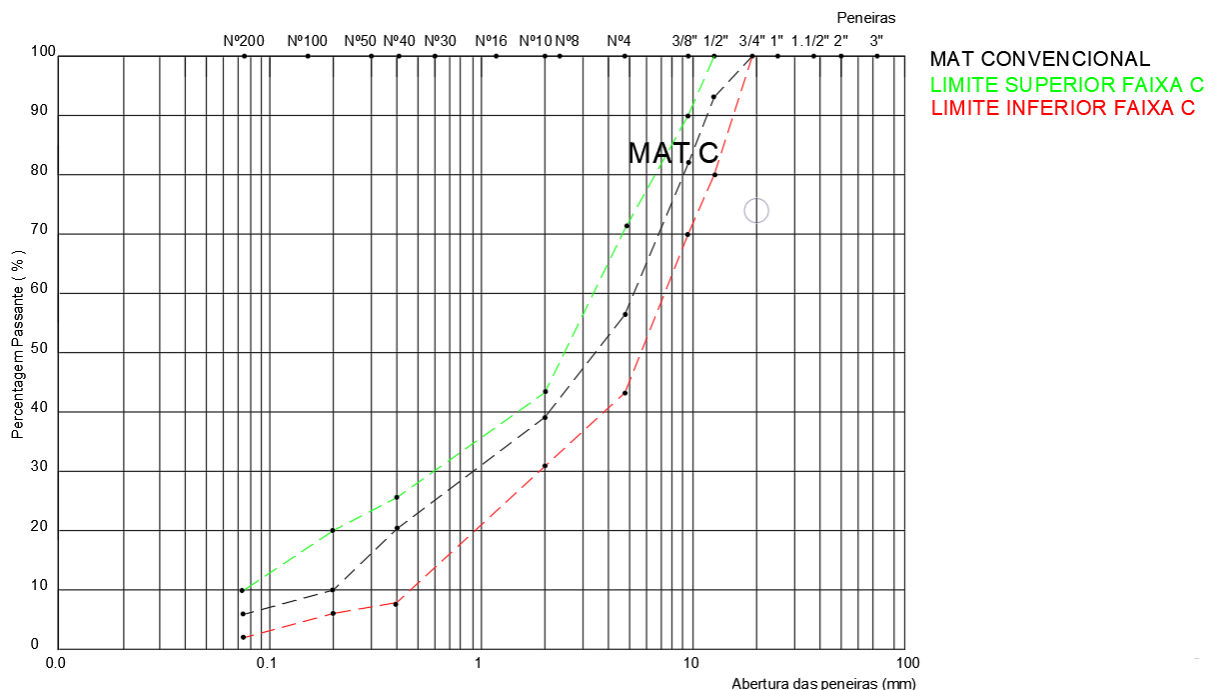
4.2.1 Dosagem Convencional

O percentual de cada material na composição do agregado para a dosagem convencional foi determinado através da aplicação do método gráfico de Ruthfuchs, conforme demonstrado na figura 14, abaixo.



Onde MAT 1, MAT 2 e MAT 3 sendo brita 3/8", pedrisco e pó de pedra respectivamente. X, Y e Z as porcentagens de materiais utilizados na mistura sem a correção com fíler sendo respectivamente pó de pedra, pedrisco e brita 3/8". Observou-se que com a mistura dos materiais acima, o agregado resultante apresentava insuficiência de finos. Com isso, optou-se pela adição de um fíler, neste caso o cimento portland. Para a determinação do percentual de fíler a adicionar foi aplicado o método do Instituto de asfalto, 1º caso - para dois materiais, que resultou na adição de 11,83% de cimento Portland sendo considerado um percentual alto de adição.

Figura 14 - Gráfico da mistura convencional de projeto



Fonte: Autoria Própria

A partir da granulometria definida para o agregado foi calculado a porcentagem de materiais utilizados para cada teor de ligante (tabela 8):

Tabela 8 - Porcentagem de material utilizado em cada teor de ligante

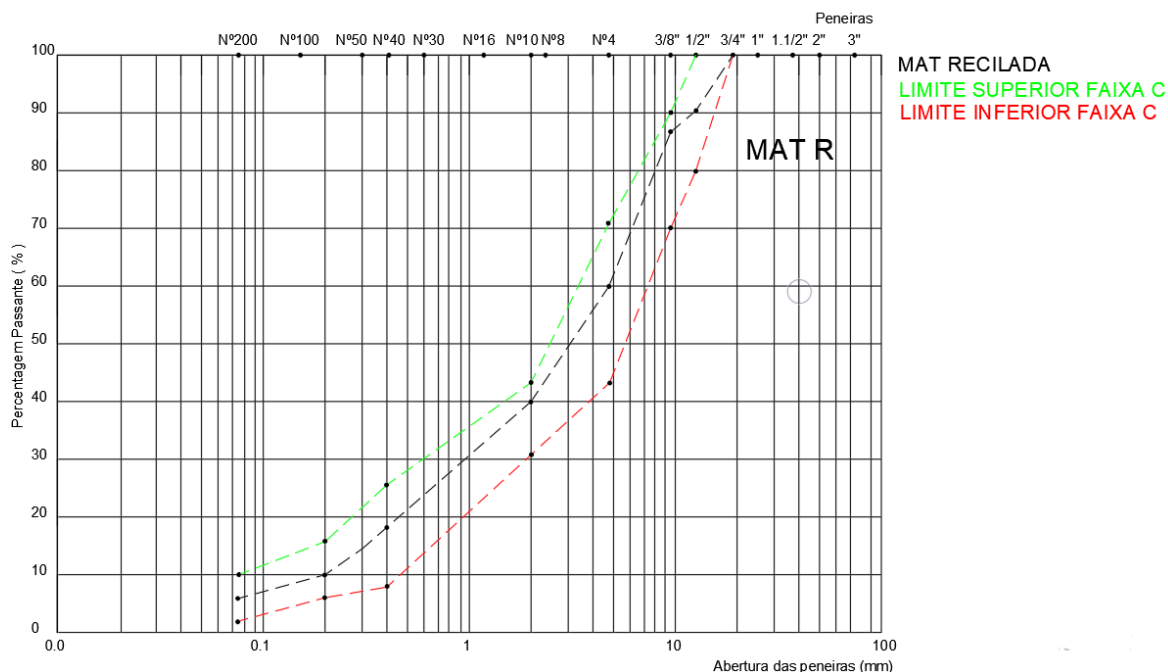
Teor de Ligante	Brita 3/4" (%)	Pedrisco (%)	Pó de Pedra (%)	Filer Cimento (%)
4%	8,47	42,32	33,86	11,36
5%	8,38	41,88	33,51	11,24
6%	8,29	41,44	33,15	11,12

Fonte: Autoria Própria

4.2.2 Dosagem Reciclado

Com a dosagem da mistura reciclada definida em 20% de material reciclado e recalculando na frações da mistura verificou-se o atendimento a mistura de projeto final se encaixando na faixa C (Figura 15):

Figura 15 - Gráfico da mistura reciclada de projeto



Sabendo desse comportamento granulométrico e tendo por base a quantidade de material presente em 20% do material reciclado em cada mistura (Tabela 9) foi calculado a porcentagem dos materiais virgens utilizados na mistura (Tabela 10). Observou que a mistura reciclada necessita de um teor de filler adicionado inferior ao tradicional.

Tabela 9 - Porcentagem de material e ligante presente em 20% de material reciclado

Teor de Asfalto	Agregados Reciclados (%)	Ligante Envelhecido (%)
4%	19,086	0,914
5%	19,086	0,914
6%	19,086	0,914

Fonte: Autoria Própria

Tabela 10 - Porcentagem de material adicionado e ligante a cada teor de ligante

Teor de Ligante	Brita 3/4" (%)	Pedrisco (%)	Pó de Pedra (%)	Filler Cimento (%)	Ligante Novo (%)
4%	6,78	33,9	27,13	9,1	3,086
5%	6,7	33,46	26,77	8,98	4,09
6%	6,61	33,02	26,42	8,86	5,09

Fonte: Autoria Própria

4.2.3 Resultados Marshall

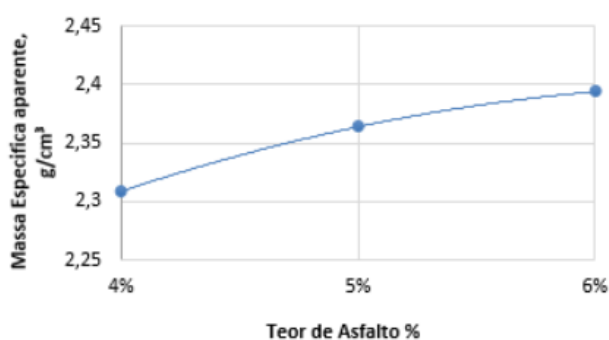
4.2.3.1 Resultados da mistura convencional CAUQ

Após a realização dos ensaios foi calculado a média dos valores obtidos para cada teor de betume, sendo o resultado apresentado na tabela 11.

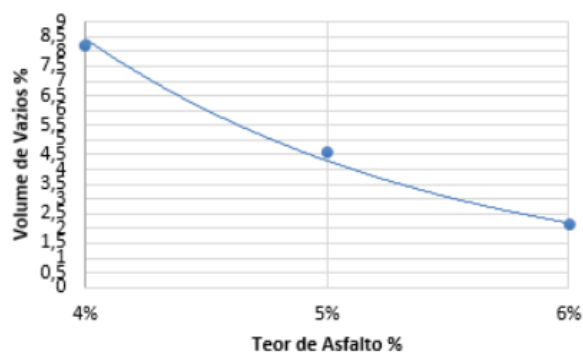
Propriedades	4,0	5,0	6,0
Teor de asfalto %	4,0	5,0	6,0
DMT (g/cm ³)	2,51	2,47	2,44
Gmb média (g/cm ³)	2,31	2,36	2,39
Vv (%)	8,19	4,56	2,13
VCB (%)	9,1	9,32	9,44
VAM (%)	17,29	13,88	11,57
RBV (%)	52,65	67,15	81,58
Estabilidade (Kgf)	1122,41	1696,41	1313,88
Fluencia (mm)	14,48	16,4	18,24

Fonte: Autoria Própria

Com os resultados da tabela 11 foram plotados gráficos pelo Excel:



(a)



(b)

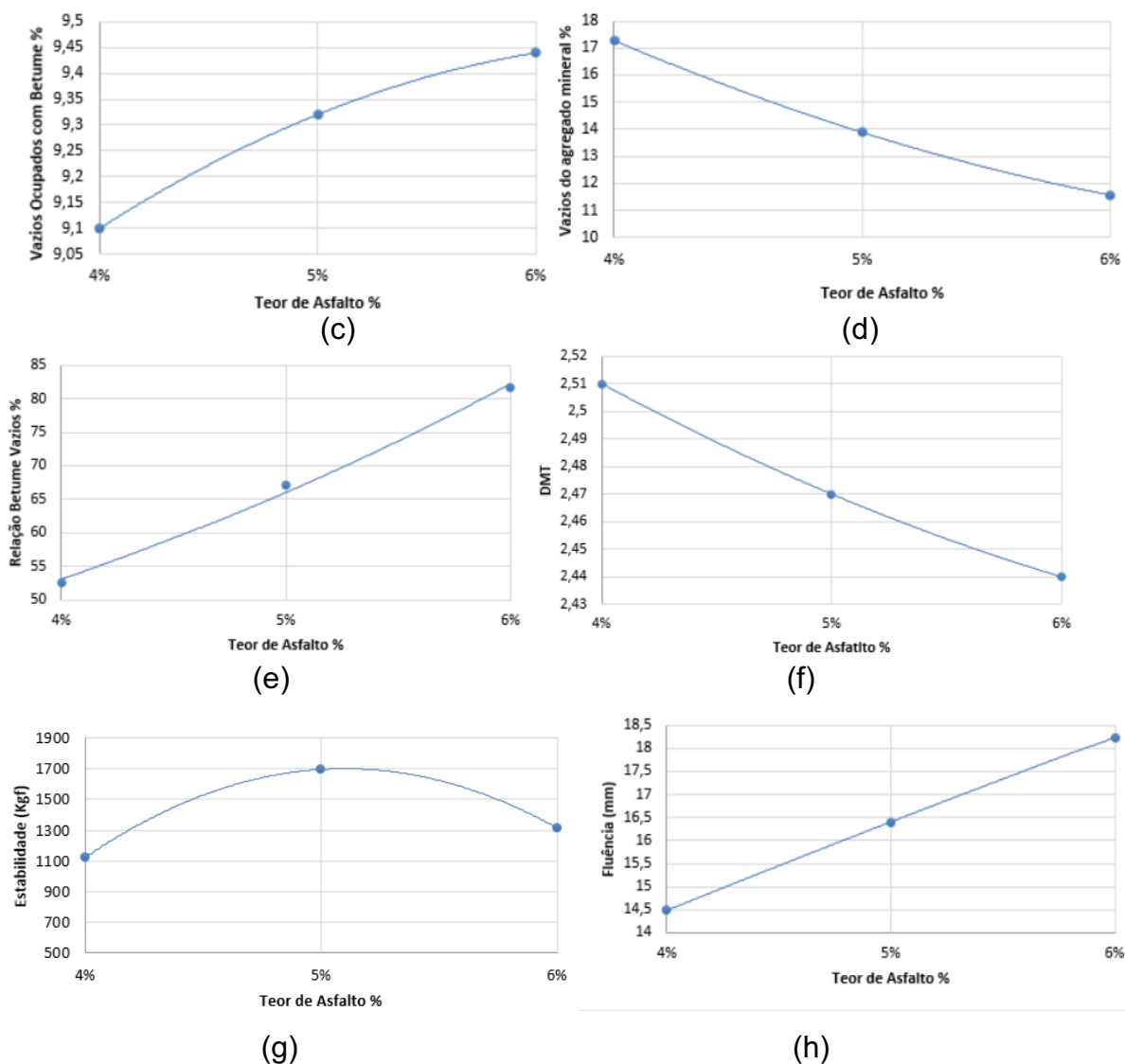
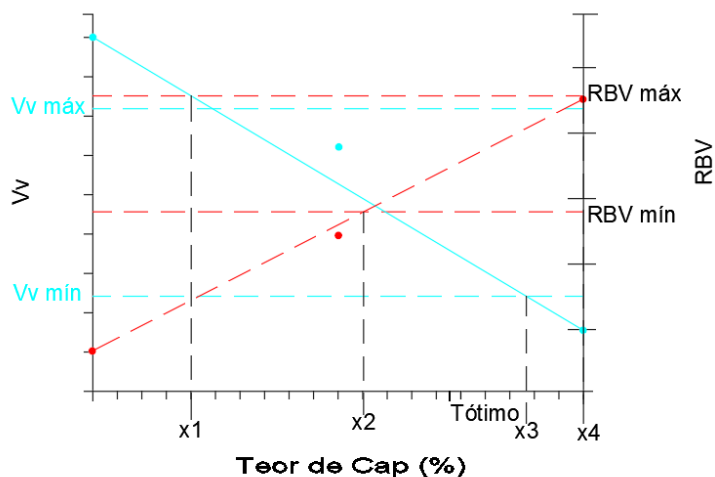


Figura 16 - Mistura Convencional - Teor de ligante versus: Gmb (a), Vv (b), VCB (c), VAM (d), RBV (e), DMT (f), Estabilidade (g) e Fluência (h)

Para o teor ótimo de ligante foi feito um gráfico baseado no livro do Bernucci et al., 2006 para a mistura convencional foi plotado com os resultados obtidos dos ensaios e as especificações da norma (Figura 21), sendo feito com as variáveis de Teor de asfalto *versus* Vv e RBV conforme a figura 17.

Figura 17 – Teor ótimo convencional



Fonte: Autoria Própria

Onde $x_1 = 4,4\%$, $x_2 = 5,1\%$, $x_3 = 5,8\%$ e $x_4 = 6\%$ são os teores de ligante dos limites da norma, se baseando nisso foi obtido o percentual de aproximadamente $5,5\%$ sendo a média entre x_2 e x_3 .

4.2.3.2 Resultados da mistura reciclada CAUQ

Após feitos os cálculos do ensaio Marshall também para a mistura reciclada foram constatados os seguintes dados a serem avaliados na tabela 12:

Tabela 12 - Parâmetros da mistura reciclada			
Propriedades			
Teor de asfalto %	4,0	5,0	6,0
DMT (g/cm ³)	2,54	2,49	2,44
Gmb média (g/cm ³)	2,17	2,33	2,40
Vv (%)	14,54	6,48	1,63
VCB (%)	8,57	9,19	9,49
VAM (%)	23,11	15,68	11,12
RBV (%)	37,08	58,65	85,30
Estabilidade (Kgf)	850	944,81	1280,8
Fluência (mm)	10,92	12,48	14,48

Fonte: Autoria Própria

Com os resultados da tabela 12 foram plotados gráficos pelo Excel:

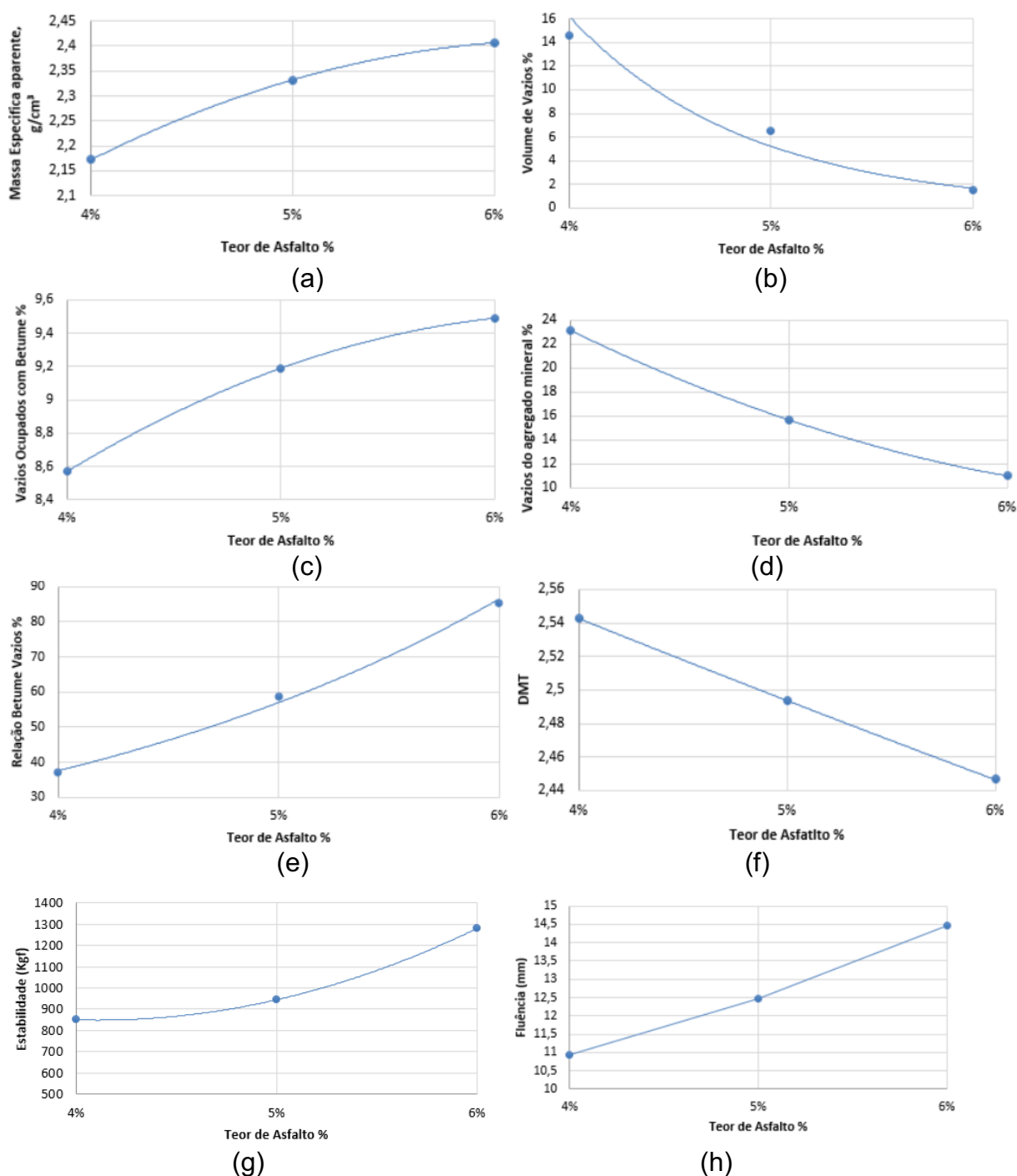
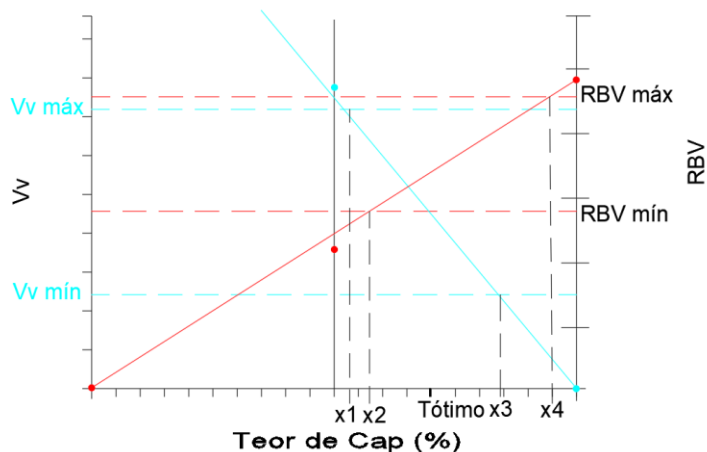


Figura 18 - Mistura Reciclada - Teor de asfalto versus: Gmb (a), Vv (b), VCB (c), VAM (d), RBV (e), DMT (f), Estabilidade (g) e Fluência (h)

Para o teor ótimo de ligante da mistura reciclada também foi feito plotado um gráfico com os resultados obtidos dos ensaios e as especificações da norma (Figura 21), sendo feito com as variáveis de Teor ótimo *versus* Vv e RBV conforme a figura 20.

Figura 19 – Teor ótimo de ligante mistura reciclada

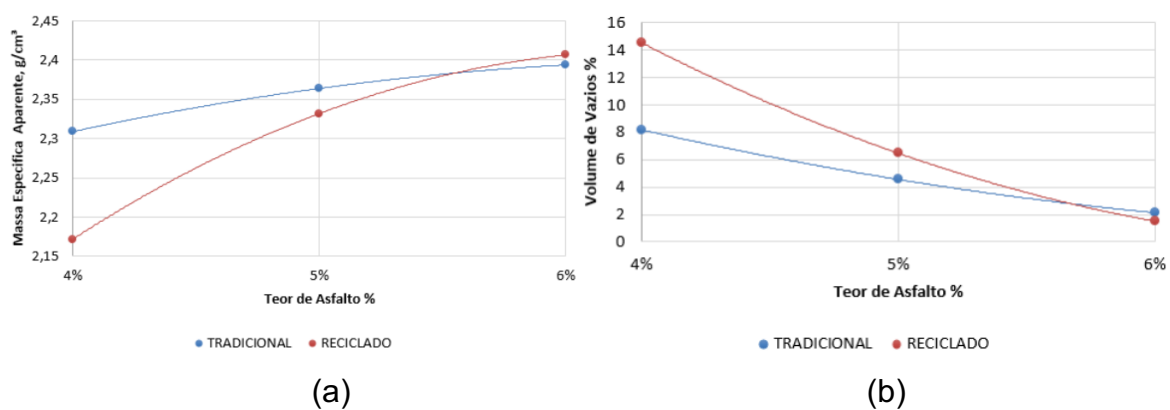


Fonte: Autoria Própria

Onde $x_1 = 5,1\%$, $x_2 = 5,2\%$, $x_3 = 5,6\%$ e $x_4 = 5,9\%$ são os teores de ligante dos limites da norma, se baseando nisso foi obtido o percentual de aproximadamente $5,4\%$ sendo a média entre x_2 e x_3 .

4.2.3.3 Comparação de Resultados

Com os resultados das tabelas 11 e 12 foram feitos gráficos no excel e plotados para a comparação dos resultados obtidos:



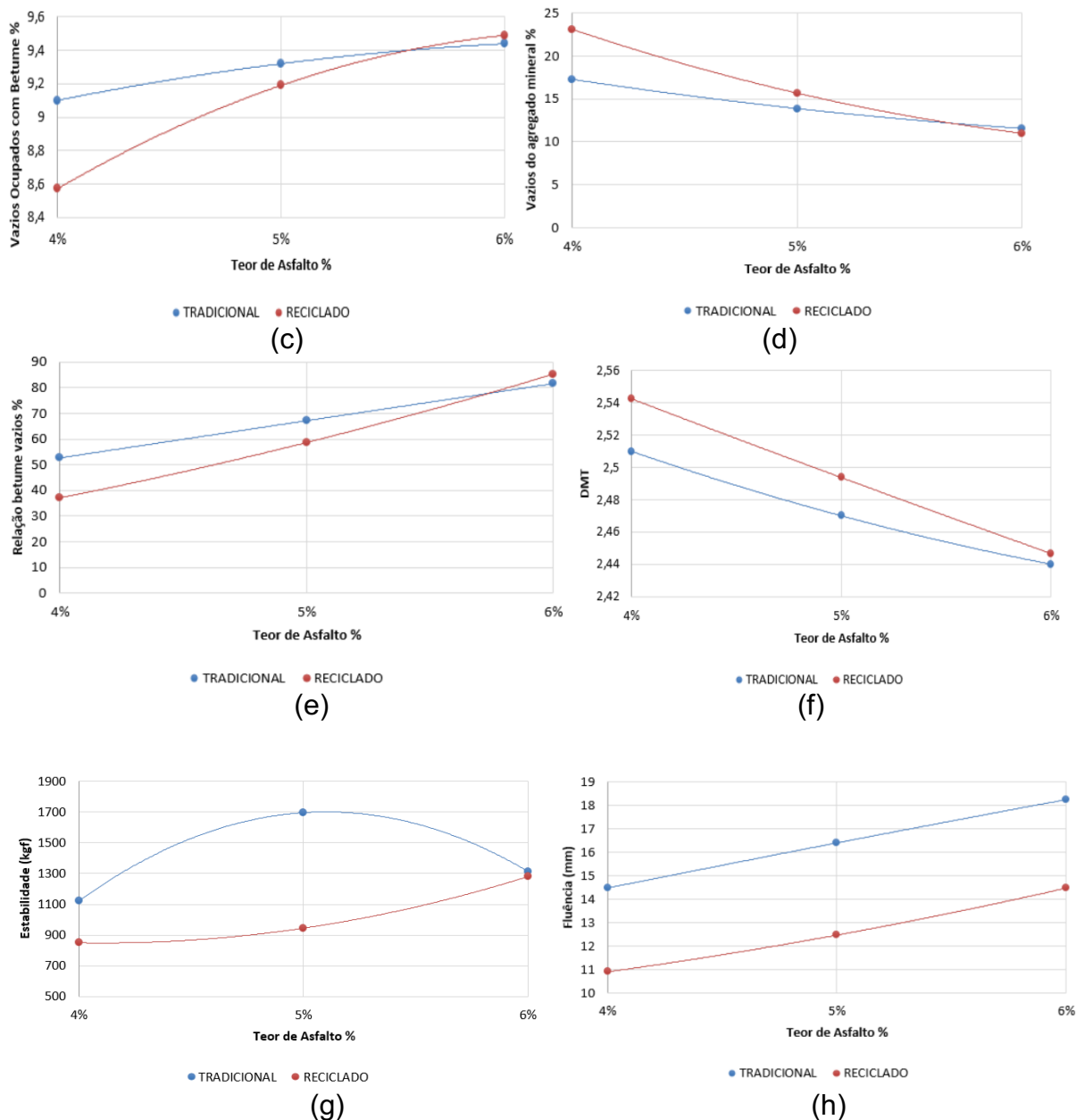


Figura 20 - Mistura Convencional x Reciclada - Teor de asfalto versus: Gmb (a), Vv (b), VCB (c), VAM (d), RBV (e), DMT (f), Estabilidade (g) e Fluência (h)

Com relação dos resultados apresentados nas figura 20 e 21 acima e tabela 13 abaixo, pode-se observar que:

Com relação ao parâmetro da relação betume vazios (RBV) o teor ótimo de asfalto de 5,5% para a mistura convencional e de 5,4% para a mistura reciclada satisfaz a condição (RBV entre 75 e 82) para as duas misturas; no parâmetro de Percentagem de vazios, também é atendido na condição (Vv entre 3 e 5) de norma (figura 21) para as duas misturas.

Na análise da Estabilidade e Fluência observa-se comportamentos bem mais distintos. A estabilidade na mistura convencional apresenta um comportamento típico de misturas asfálticas onde há uma elevação do valor até um certo percentual de asfalto e decresce com a adição de mais betume; já na mistura reciclada, para os teores de asfalto ensaiados apresenta valores crescente, indicando que a estabilidade máxima seria alcançada caso se adiciona-se mais betume. De qualquer forma, os teores ensaiados apresentaram valores de estabilidade acima do mínimo preconizado pela norma DNIT 031- ES. Com relação a Fluência a mistura reciclada apresenta valores (Tabela 13) menores indicando ser uma material que pode ter menor resistência a fadiga tendendo a apresentar fissuras mais rapidamente.

Figura 21 - Requisitos de dosagem de concreto asfáltico

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

Fonte: Norma DNIT 031/2006 - ES

Tabela 13 - Comparação resultados e exigências norma DNIT 031-ES (2006)

Parâmetros	Valores de referência- ES 031 (DNIT, 2006b)	Mistura Convencional			Mistura Reciclada		
		Marshall			Marshall		
Método de dosagem	-	Marshall			Marshall		
Teor de ligante asfáltico (%)	-	4%	5%	6%	4%	5%	6%
Vv (%)	3 a 5	8,19	4,56	2,13	14,54	6,48	1,51
RBV (%)	75 a 82	52,65	67,15	81,58	37,08	58,65	85,3
VAM (%)	-	17,29	13,88	11,57	23,11	15,68	11
Estabilidade (kgf)	>500	1122,41	1696,41	1313,88	850	944,814	1280,8
Fluência (mm)	-	14,48	16,4	18,24	10,92	12,48	14,48
	-	2,309	2,364	2,394	2,172	2,332	2,4066

Massa específica
aparente (g/cm³)

DMT (g/cm ³)	-	2,51	2,47	2,44	2,5425	2,4937	2,4466
--------------------------	---	------	------	------	--------	--------	--------

Fonte: Autoria Própria

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Este estudo demandou várias atividades práticas ligadas a área de pavimentação. Devido a limitações do laboratório da UTFPR algumas atividades tiveram que ser desenvolvidas em laboratório externo e alguns índices considerados de outros estudos. Entretanto, se mostrou muito valioso na obtenção de conhecimento aplicação de conceitos teóricos e as respectivas comparações.

Já o material proveniente da fresagem apresenta características da granulometria que está dentro da faixa C do DNIT, e o teor de ligante presente na mistura reciclada de 4,57% mostrou-se coerente com a literatura onde este teor de ligante fica entre 4,5% e 9%.

A dosagem e moldagem dos corpos de prova foi feita com 3 misturas distintas com teores de asfalto de 4%, 5% e 6%, contando com 5 corpos de prova de cada mistura, sendo os valores finais decorrentes das médias obtidas entre o resultados dos corpos de prova de cada mistura. Para a mistura convencional as dosagens mostraram-se coerentes, uma vez que o teor de projeto se localiza entre o menor e o maior valor testado. Já na mistura reciclada o percentual de vazios e relação betume/vazios o teor de projeto situa-se também dentro da faixa testada, como mostrado nas figuras 17 e 19; na análise da estabilidade há uma tendência de crescimento com a adição de maiores teores de betume e, com relação a fluência apesar dos valores obtidos estarem dentro de limites preconizados, estes valores situam-se próximo ao mínimo. Esta situação pode indicar que a mistura reciclada apresente fadiga e conseqüente mente fissuração em um período de utilização menor quando comparado com um pavimento executado com a mistura convencional.

Quanto as dosagens e ao ensaio de estabilidade, as dosagens foram feitos em intervalos maiores de 1% de teor de asfalto e não de 0,5% como recomenda a norma, assim chegando a uma dosagem ótima de 5,5% para convencional e de 5,4% para reciclada. Nos ensaios de estabilidade a mistura convencional mostrou que suporta uma carga máxima de ruptura maior do que as misturas recicladas.

As duas misturas atenderam aos requisitos Marshall com os teores testados, sendo que a reciclada apresentou um comportamento mecânico similar à

convencional nos teores de 6% de asfalto com aproximadamente 2% de teor de cimento a menos na mistura e 0,1% menos de teor de ligante no teor ótimo encontrado, podendo assim apresentar um menor custo em sua utilização. E a condição de pouca fluência da mistura reciclada com teores menores de asfalto aponta para um possível melhor desempenho, para esta mistura, caso utilizada como camada de ligação onde as solicitações são menores que na camada de rolamento.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

- Estudo do comportamento de ambas misturas no teor ótimo de ligante;
- Estudo do comportamento do material reciclado com maiores teores de ligante asfáltico;
- Ensaio complementares para verificar o comportamento de ambas misturas em outros ensaios como o de fadiga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9935: Agregados – terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6576: Materiais Asfálticos –Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007.

ASPHALT INSTITUTE (1989) The Asphalt Handbook. Manual series nº 4, Lexington, KY, USA.

ASPHALT INSTITUTE (1995) Asphalt Hot-mix Recycling. Manual series nº 20, Lexington, KY, USA.

ASPHALT INSTITUTE (1995) Mixing Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-mix Types. Manual series nº 2, Lexington, KY, USA.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros: Petrobrás: ABEDA, Rio de Janeiro, 2006. 475p.

Bonfim, Valmir. Fresagem de pavimentos asfálticos. Valmir Bonfim. – 3ª edi. rev. e atual. – São Paulo: Exceção Editorial, 2007.

Batista, R. S. RECICLAGEM DO RESÍDUO PELA FRESAGEM DO CONCRETO ASFÁLTICO. Monografia de especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

COMUNICADOS DO IPEIA. Série – Eixos do desenvolvimento Brasileiro. 2010. Disponível em:<
http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5305/1/Comunicados_n52_Rodovias.pdf> . Acesso em: 20 ago. 2020. pag 9- introdução. , 10

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE; SERVIÇO SOCIAL DE TRANSPORTE; SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM DE TRANSPORTE. Pesquisa CNT de Rodovias 2019: Relatório Gerencial. Brasília: Cnt, 2019. 389 p. Disponível em: . Acesso em: 20 ago. 2020.

CUNHA, Célia Melo. Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem. 2010. Tese de Doutorado. INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA.

DNER ME 043: Misturas Betuminosas à quente – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995b, 11p.

DNER ME 083: Agregados – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998a, 5p.

DNER ES 034: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2005, 13p.

DNIT ES 031: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006, 14p.

Senço, Wlastermiler de, 1929 - Manual de técnicas de pavimentação: volume 1 / Wlastermiler de Senço . -- 2. ed. ampl. — São Paulo: Pini, 2007.

MISTURINI, Natália. **ESTUDO COMPARATIVO DE MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS COM DIFERENTES FÍLERES**. 2017. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

REIS, Rafael Marçal Martins de. **INVESTIGAÇÃO DE CAMPO E LABORATÓRIO SOBRE REVESTIMENTO ASFÁLTICO ULTRA DELGADO**. 2012. 320 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SILVA, A. H. M. **Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.