

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura

**APLICABILIDADE DE MISTURAS MORNAS EM  
REVESTIMENTOS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO  
(CPA)**

**Guilherme Ebani Jacques**

Porto Alegre  
2018

GUILHERME EBANI JACQUES

**APLICABILIDADE DE MISTURAS MORNAS EM  
REVESTIMENTOS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO  
(CPA)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil - Construção e Infraestrutura da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre  
2018

Jacques, Guilherme Ebani  
APLICABILIDADE DE MISTURAS MORNAS EM  
REVESTIMENTOS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)  
/ Guilherme Ebani Jacques. -- 2018.  
111 f.  
Orientador: Washington Peres Núñez.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil: construção e  
infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Camada Porosa de Atrito. 2. Misturas  
Asfálticas. 3. Misturas Mornas. I. Núñez, Washington  
Peres, orient. II. Título.

**GUILHERME EBANI JACQUES**

**APLICABILIDADE DE MISTURAS MORNAS EM REVESTIMENTOS  
DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área de Concentração Infraestrutura, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 18 de maio de 2018

Prof. Washington Peres Núñez  
Dr. pela UFRGS  
Orientador

Prof. Carlos Torres Formoso  
Coordenador do PPGCI/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (UFC)**  
PhD pela Texas A&M University

**Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (UFRGS)**  
PhD pela University of Nottingham

**Prof. João Rodrigo Guerreiro Mattos (UNIVATES)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Eng. Marlova Grazziotin Johnston**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

A minha mãe e irmãos por sempre acreditarem em mim.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço minha mãe Laci, por todo o amor, esforço e total dedicação a seus filhos sempre colocando nossos sonhos a frente dos seus e garantindo que tenhamos acesso à educação acima de tudo. Obrigado por sempre acreditar em mim e crer que sempre posso ser ainda melhor.

Aos meus irmãos Annie e Pablo pelo apoio e incentivo nas horas necessárias mesmo quando moramos tão longe um do outro.

Ao meu orientador Washington Perez Núñez por ter me aceitado como orientando, pelo incentivo e auxílio durante os momentos difíceis, sempre disposto a sanar minhas dúvidas relacionadas à análise dos resultados. Obrigado pela confiança e por despertar ainda mais meu interesse pelo mundo da pesquisa.

À Dra. Marlova Johnston por todas as palavras de incentivo ao longo do desenvolvimento dessa pesquisa e ajuda nos momentos em que tudo parecia dar errado.

Aos professores Jorge Augusto Pereira Ceratti e Lélío Antônio Brito pela ajuda durante a pesquisa e conhecimentos transmitidos.

Aos demais professores que transmitiram parte do seu conhecimento durante a realização das disciplinas.

Aos técnicos do LAPAV, Rodrigo e Mateus, por toda a ajuda na execução dos ensaios e esforço nas misturas e moldagens necessárias para a realização da pesquisa.

Aos bolsistas do laboratório, em especial as bolsistas Débora e Eduarda, que me acompanharam desde minha entrada no LAPAV sempre dispostas a ajudar. Obrigado pelos momentos de descontração e risadas. Agradeço também aos bolsistas Douglas E., Ana Luísa, Larissa e Everaldo, e à doutoranda Camila Kern.

Ao Doulgas Mocelin e Gracieli Colpo por toda a ajuda durante a pesquisa, sempre dispostos a tirar dúvidas e encontrar soluções, e por terem me acolhido tão bem no LAPAV.

Agradeço a minha querida colega e amiga Mariana Carretta que me acompanha desde a graduação pelos momentos de cumplicidade, descontração, incertezas e *hangouts* intermináveis

durante o período de disciplinas. Obrigado por sempre estar disposta a me ouvir, me apoiar, acreditar em mim às vezes até mais do que eu mesmo. Sem dúvida alguma minha caminhada pelo mestrado não teria sido a mesma sem te ter ao lado.

Agradeço às minhas amigas Helena Leon e Mariana Chrusciak pela cumplicidade durante as disciplinas do mestrado, longas noites de estudo e risadas.

Agradeço às empresas que forneceram os materiais utilizados no trabalho.

À CAPES e ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado que permitiram minha dedicação exclusiva à pesquisa.

Agradeço a todos que de alguma forma me auxiliaram durante os mais de dois anos de mestrado, sempre dispostos a me aconselhar e emprestar um ombro amigo.

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas  
pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo  
mundo vê.

*Arthur Schopenhauer*

## RESUMO

JACQUES, G. E. **Aplicabilidade de misturas mornas em revestimentos do tipo camada porosa de atrito (CPA)**. 2018. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

A camada porosa de atrito (CPA) é um tipo de revestimento asfáltico com elevado volume de vazios. Por apresentar elevada porosidade, a água da chuva é drenada para dentro do revestimento e escoada por drenos laterais. Entretanto, a distribuição granulométrica mais aberta pode causar escorrimento do ligante asfáltico durante o transporte da mistura. Esta pesquisa objetiva analisar a viabilidade técnica de se produzirem misturas do tipo CPA a temperaturas intermediárias e sem emprego de fibras. A redução das temperaturas de mistura e compactação foi possível por meio da incorporação de um agente surfactante, Evotherm™ P-25. Além do escorrimento, as características mecânicas das CPAs foram avaliadas através dos ensaios Cantabro, Dano por Umidade Induzida, Resistência à Tração por compressão diametral e Módulo de Resiliência. Também foram realizados ensaios de permeabilidade. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos em misturas porosas quentes, usadas como referência. As misturas mornas apresentaram escorrimento satisfatório quando comparadas às respectivas misturas de referência e obtiveram resultados semelhantes no ensaio de perda por abrasão. A retirada das fibras de celulose das misturas usinadas a temperaturas intermediárias aumentou a porcentagem de vazios e a permeabilidade, quando comparadas com as misturas usinadas a quente com fibras de celulose. Todas as misturas estudadas atingiram o mínimo de 80 % resistência à tração retida exigido pela ASTM D7064-(13). Quanto aos resultados de resistência a tração não houve diferença significativa nos valores medidos, sendo as misturas de referência mais rígidas que as misturas mornas. O ensaio de módulo de resiliência nas misturas quente e morna com ligante polimerizado AMP 60/85 apresentou resultados semelhantes, ao passo que a mistura morna com AMP 65/90 apresentou resultado inferior quando comparado à mistura quente de referência. Globalmente, verificou-se a viabilidade de se produzirem camadas porosas de atrito a temperaturas intermediárias com emprego de agente surfactante, o que, além de trazer benefícios ao meio ambiente (pela redução de emissões), favorece a pavimentação asfáltica em regiões de clima frio e/ou localizadas a grandes distâncias de usinas de asfalto.

**Palavras-chave:** *Camada porosa de atrito; escorrimento do ligante; fibras de celulose; misturas mornas.*

## ABSTRACT

JACQUES, G. E. **Aplicabilidade de misturas mornas em revestimentos do tipo camada porosa de atrito (CPA)**. 2018. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

Open-graded friction course (OGFC) is a special type of surface mixture that has a high volume of air voids due to its open aggregate gradation. Because of its high porosity, rain water is drained to the bottom of the layer and directed to side drains. By doing so it increases the tire-pavement contact and reduces the risk of aquaplaning, spray, tire noise and light reflections on the wet surface. However, the open gradation of OGFC can cause binder drainage during transportation of the mixture. Traditionally, OGFC has been produced with HMA with polymer-modified binders with the addition of organic fibers to reduce binder drainage. This research aims to analyze the technical viability of producing OGFC using warm mixes (temperatures 30°C below asphalt concrete) and without cellulose fibers. Reduction of mixing and compaction temperature was possible by adding a surfactant agent, Evotherm™ P-25. Besides binder drainage, mechanical characteristics were evaluated through Cantabro, moisture-induced damage, Indirect Tensile Strength and Resilient Modulus tests. Permeability tests were also performed. Results were then compared to those of hot open graded mixtures, used as reference. Warm mixes showed satisfactory binder drainage results when compared to the hot mixtures used as reference and presented similar values of abrasion loss. The removal of cellulose fibers in warm mixtures proved to increase air voids and permeability when also compared to the HMA with cellulose fibers. All mixtures studied in this research reached the 80% minimum retained tensile strength required by ASTM D7064. Regarding the results of indirect tensile strength there was no significant change in values obtained, with HMA being stiffer than warm mixtures. Resilient modulus tests in hot and warm mixtures with polymer-modified AMP 60/85 binder presented very similar results but the warm mixture with AMP 65/90 binder presented a lower value if compared to the reference hot mixture. Overall, the viability of producing OGFC using WMA with surfactant agent was verified, that besides bringing benefits to the environment (by reducing gas emissions) helps asphalt paving in regions with cold climates or located at long distances from asphalt production plants.

**Keywords:** *Open-Graded Friction Course, binder drainage, cellulose fibers, warm mixtures.*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA .....	21
1.2 OBJETIVOS .....	23
1.2.1 Objetivo geral .....	23
1.2.2 Objetivos específicos .....	23
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	23
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>25</b>
2.1 ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO .....	25
2.1.1 Aderência em pistas molhadas .....	26
2.2 CAMADA POROSA DE ATRITO – CPA .....	28
2.2.1 Utilização de CPA no exterior.....	30
2.2.2 Histórico da utilização de CPA no Brasil.....	30
2.2.3 Vantagens da utilização de CPA .....	32
2.2.3.1 Spray e reflexão .....	34
2.2.3.2 Redução de ruídos .....	36
2.2.4 Desvantagens da utilização de CPA .....	38
2.2.4.1 Escorrimento do ligante asfáltico .....	38
2.2.4.2 Desagregação.....	39
2.2.4.3 Entupimento dos poros .....	39
2.3 PERMEABILIDADE.....	40
2.4 UTILIZAÇÃO E EFEITO DE MODIFICADORES .....	43
2.4.1 Ligante modificado por polímero .....	43
2.4.2 Fibras .....	44
2.5 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS - WMA.....	48
2.5.1 Evotherm™ .....	50
<b>3. MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>52</b>
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA .....	52
3.1.1 Agregados.....	52
3.1.2 Ligantes asfálticos .....	56
3.1.3 Aditivo para mistura morna.....	58
3.1.4 Fibra de celulose.....	58

3.1.5 Misturas asfálticas .....	59
<b>3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>59</b>
3.2.1 Temperaturas de usinagem e compactação .....	60
3.2.2 Método de dosagem ASTM D7064-13 .....	61
3.2.2.1 Seleção dos ligantes asfálticos .....	61
3.2.2.2 Seleção da composição granulométrica .....	61
3.2.2.3 Compactação dos corpos de prova .....	62
3.2.2.4 Definição do teor ótimo de ligante .....	63
3.2.3 Ensaio de escorrimento do ligante asfáltico .....	63
3.2.4 Determinação da porcentagem de vazios das misturas .....	68
3.2.5 Porcentagem de vazios comunicantes .....	68
3.2.6 Ensaio Cântabro .....	69
3.2.7 Ensaio de dano por umidade induzida .....	70
3.2.8 Ensaio de permeabilidade .....	73
3.2.9 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	80
3.2.10 Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral .....	82
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>86</b>
4.1 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	86
4.2 ENSAIO DE ESCORRIMENTO DE LIGANTE – <i>DRAINDOWN</i> .....	87
4.3 PORCENTAGEM DE VAZIOS .....	90
4.4 PORCENTAGEM DE VAZIOS COMUNICANTES .....	92
4.5 ENSAIO CANTABRO .....	93
4.6 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PROJETO DE LIGANTE ASFÁLTICO .....	96
4.6.1 Misturas com AMP 60/85 .....	96
4.6.2 Misturas com AMP 65/90 .....	97
4.7 ENSAIO DE DANO POR UMIDADE INDUZIDA .....	97
4.8 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	99
4.10 ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	100
4.10.1 Análise da qualidade das placas utilizadas no ensaio de permeabilidade .....	102
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>103</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	104

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>106</b>
--------------------------	------------

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de coeficiente de atrito: adesão e histerese. (fonte: Santos, 2004).....	25
Figura 2 - Zonas de contato pneu-pavimento. (fonte: Ferreira, 2001) .....	26
Figura 3 - Princípio de funcionamento da CPA (fonte: VIRGILIIS, 2009) .....	29
Figura 4 - Pavimento completamente poroso. (fonte: Putman e Kline, 2012) .....	29
Figura 5 - CPA no Aeroporto Santos Dumont, RJ (Bernucci et al.,2008) .....	31
Figura 6 - Estudo realizado pelo Departamento de Trânsito da Louisiana. (fonte: Kandhal, 2002) .....	33
Figura 7 - Estudo comparativo de atrito realizado pelo Departamento de Trânsito do Oregon, EUA. (fonte: Kandhal, 2002) .....	33
Figura 8 - Evacuação da água em um revestimento denso. (fonte: GNCSC, 1996 Apud Dumke, 2005).....	34
Figura 9 - Evacuação da água superficial em CPA. (fonte: GNCSC, 1996 Apud Dumke, 2005) .....	35
Figura 10 - Infiltração e percolação em CPA (fonte: GNCSC, 1996 Apud Dumke, 2005) .....	35
Figura 11 - Pavimento com mistura asfáltica densa (esquerda) vs. pavimento com CPA (direita). (fonte: Kandhal, 2002).....	36
Figura 12 - Relação Índice de vazios - Nível de Ruído.....	37
Figura 13 - Nível de ruído nas trilhas de roda interna e externa para diferentes tipos de revestimento (fonte: Kandhal, 2002) .....	37
Figura 14 - Camada porosa dupla. (fonte: Van Bochove (1996) Apud Hamzah e Hardiman (2005)) .....	40
Figura 15 - Poros de mistura drenante (Fonte: Associação das Rodovias do Japão, 1996 Apud Oliveira, 2003).....	41

Figura 16 - Permeâmetro de carga variável sobre o revestimento (fonte: Momm, 2002 Apud Oliveira, 2003).....	42
Figura 17 - Permeâmetro de carga variável para CPs Marshall (fonte: Oliveira, 2003) .....	42
Figura 18 - Permeâmetro de carga constante. (fonte: Di Benedetto et al., 1996 Apud Dumke, 2005).....	43
Figura 19 - Comparação de mistura sem fibras de celulose (esquerda) e com fibras (direita). (fonte: Lyons e Putman, 2013) .....	45
Figura 20 - Evolução na permeabilidade das misturas durante o condicionamento: (a) Controle (com fibras de celulose); (b) Borracha de pneu; (C) WMA (fonte: Putman e Lyons, 2015) ...	46
Figura 21 - Resultados do ensaio de escorrimento (fonte: Afonso et al., 2017) .....	47
Figura 22 - Relação entre o teor de ligante e o escorrimento (fonte: Punith e Veeraragavan, 2011).....	48
Figura 23 - Faixas de temperatura para produção de diferentes misturas asfálticas. (fonte: MOTTA, 2011).....	49
Figura 24 - Frações de agregado mineral utilizadas na dosagem das misturas .....	53
Figura 25 - Curvas granulométricas dos agregados.....	56
Figura 26 - Ensaio de adesividade dos ligantes asfálticos.....	58
Figura 27 - Fibras de celulose Topcel .....	59
Figura 28 - Organização dos ensaios a serem realizados na pesquisa.....	60
Figura 29 - Compactador giratório Superpave .....	63
Figura 30 - Esquema da cesta de escorrimento (Fonte: ASTM D6390-13) .....	64
Figura 31 - Cuba com sistema de aquecimento e pá automática.....	65
Figura 32 - Homogeneização dos materiais para mistura.....	66
Figura 33 - Amostra acondicionada na cesta de abertura 6,3 mm.....	66

Figura 34 - Bandejas com diferentes porcentagens de escoamento após 1 hora.....	67
Figura 35 - (a) Corpo de prova antes do ensaio Cântabro (b) Corpo de prova depois do ensaio Cântabro .....	70
Figura 36 - Corpos de prova submetidos à aplicação de vácuo .....	71
Figura 37 - Corpos de prova submersos para iniciar o ciclo de congelamento .....	72
Figura 38 – (a) Molde utilizado na produção das placas utilizadas no ensaio de permeabilidade (b) Positivo utilizado para usinagem das placas (Colpo, 2014) .....	73
Figura 39 - Uso de papel pardo no positivo para que não ocorresse aderência da massa asfáltica com o molde .....	74
Figura 40 - (a) Misturador alemão utilizado na usinagem da mistura; (b) Agregados, ligante e aditivo na cuba de mistura. ....	75
Figura 41 - Processo de preenchimento do molde com a mistura asfáltica.....	76
Figura 42 - Rolo compactador utilizado na compactação das placas .....	76
Figura 43 - Procedimento de compactação das placas .....	77
Figura 44 - Permeâmetro de carga variável utilizado no ensaio de permeabilidade nas placas de CPA .....	77
Figura 45 - Aplicação de silicone para vedação no anel de borracha rígida do permeâmetro .	78
Figura 46 - Serra utilizada para o corte das placas de CPA .....	79
Figura 47 - Corpo de Prova serrado .....	80
Figura 48 - Esquema do ensaio de compressão diametral (Fonte: Bernucci et al., 2008).....	81
Figura 49 - Ensaio de resistência à tração .....	82
Figura 50 - Corpo de prova posicionado na câmara com temperatura controlada para o ensaio de módulo de resiliência .....	83
Figura 51 - Curvas da composição granulométrica com o uso de cal .....	86

Figura 52 - Curvas da composição granulométrica da Mistura 4 sem cal.....	87
Figura 53 - Resultados dos ensaios de escoamento para misturas com ligante AMP 60/85..	88
Figura 54 - Resultados dos ensaios de escoamento para misturas com ligante AMP 65/90..	89
Figura 55 - Porcentagem de vazios em função do teor de ligante – misturas com AMP 60/85 .....	91
Figura 56 - Porcentagem de vazios em função do teor de ligante para misturas com AMP 65/90 .....	92
Figura 57 - Resultados do ensaio de vazios comunicantes em função do teor de ligante para as misturas estudadas .....	93
Figura 58 - Perda por abrasão em função do teor de ligante para misturas com ligante AMP 60/85 .....	94
Figura 59 - Perda por abrasão em função do teor de ligante em misturas com AMP 65/90 ....	95
Figura 60 - Gráfico da relação porcentagem de vazios x perda por abrasão.....	95
Figura 61 - Resultados do ensaio de Dano por Umidade Induzida para as misturas estudadas .....	98
Figura 62 - Resultados dos ensaios de resistência à tração para as misturas estudadas .....	99
Figura 63 - Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para as misturas estudadas .....	100
Figura 64 - Resultados do ensaio de permeabilidade para as misturas estudadas.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados encontrados pelo Departamento de Trânsito da Pensilvânia.....	32
Tabela 2 - Permeabilidade na Rodovia dos Bandeirantes .....	41
Tabela 3 - Ensaio de aceitação dos agregados .....	53
Tabela 4 - Propriedades dos agregados .....	54
Tabela 5 - Análise granulométrica dos agregados.....	54
Tabela 6 - Análise granulométrica das cales utilizadas.....	55
Tabela 7 - Propriedades químicas das cales utilizadas na pesquisa .....	55
Tabela 8 - Resultados obtidos na caracterização AMP 60/85 .....	56
Tabela 9 - Resultados obtidos na caracterização AMP 65/90 .....	57
Tabela 10 - Resumo das misturas dosadas na pesquisa.....	59
Tabela 11 – Temperaturas, em °C, dos componentes da mistura .....	61
Tabela 12 - Composição da faixa granulométrica .....	62
Tabela 13 - Resumo dos ensaios realizados na pesquisa com número de amostras.....	85
Tabela 14 - Composição granulométrica das misturas com e sem cal .....	87
Tabela 15 - Resultados de vazios comunicantes das misturas estudadas .....	92
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de volumetria e teor de ligante asfáltico dos CPs extraídos das placas.....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMP – Asfalto Modificado por Polímero

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CGS – Compactador Giratório Superpave

CIENTEC -Fundação de Ciência e Tecnologia

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CP – Corpo de Prova

CPA – Camada Porosa de Atrito

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

DUI – Dano por Umidade Induzida

HMA – *Hot Mix Asphalt*

LAPAV – Laboratório de Pavimentação

LVDT – *Linear Variable Differential Transformers*

MR – Módulo de Resiliencia

P - Carga

PG – *Performance Grade*

RT – Resistência à Tração

RRT – Resistência Retida à Tração

SBS – Estireno – Butadieno - Estireno

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

WMA – *Warm Mix Asphalt*

VV – Volume de Vazios

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

A segurança viária é uma questão que tem aumentado em importância, devido ao incremento do tráfego rodoviário. Segundo Asi (2007) mais de um milhão de pessoas perdem a vida em acidentes de trânsito no mundo anualmente. De acordo com Momm (1998), o acidente é fruto de diversas causas interligadas aos usuários, veículos, infraestrutura e circunstâncias particulares. Esse autor coloca que é preciso que se tenha uma aderência adequada ao longo da vida do pavimento, seja em condições secas ou molhadas, para que a segurança dos usuários seja garantida.

Sabe-se que a principal função da camada de rolamento utilizando misturas betuminosas densas, do tipo concreto asfáltico, é garantir a impermeabilidade do pavimento. Entretanto, em misturas desse tipo as deformações permanentes (afundamentos nas trilhas de roda) causam a formação de lâmina d'água, o que aumenta o risco de perda de aderência. Segundo Mayora e Piña (2009) essa perda é causada pelo efeito lubrificante da água presente na interface pneu-pavimento.

Misturas asfálticas porosas foram originalmente criadas visando diminuição da derrapagem em pavimentos molhados, na década de 1930. Nielsen (2006) coloca que, nos Estados Unidos, essas misturas já eram utilizadas em pistas de aeroportos e autoestradas na década de 70. A experiência norte-americana, de acordo com o autor, serviu de base para o desenvolvimento do método de dosagem europeu desse tipo de mistura, no começo da década de 80.

A mistura asfáltica porosa ou camada porosa de atrito (CPA) contém poucos ou quase nenhum agregado miúdo (material passante na peneira 4,8 mm) e finos; apresentando, por isso muitos vazios interconectados, que permitem a drenagem da água através da camada.

A retirada da água superficial traz grandes benefícios aos motoristas, tais como a melhoria da aderência na interface pneu-pavimento, a diminuição o risco de hidroplanagem, da projeção de água proveniente dos pneus dos veículos à frente (spray) e da reflexão das luzes dos veículos, além de reduzir os ruídos dos pneus (KANDHAL, 2002).

Apesar de apresentar tais vantagens, a camada de CPA apresenta duas grandes desvantagens: o risco de escorrimento do ligante asfáltico durante o transporte e a desagregação.

Por apresentar uma granulometria aberta, o escorrimento do ligante pode causar sua distribuição na mistura quando aplicada, não assegurando um recobrimento adequado dos agregados o que, conseqüentemente, pode gerar desagregação da camada, ao ser solicitada pelo tráfego (HASSAN; AL-ORAIMI; TAHA, 2005). As alternativas mais utilizadas para mitigar o escorrimento são a incorporação de fibras de celulose nos agregados minerais antes da adição do ligante e o uso de ligantes modificados por polímeros (WURST; PUTMAN, 2013).

A adição de fibras tem-se mostrado eficiente na redução do escorrimento do ligante em misturas porosas, mas seu uso aumenta heterogeneidade da mistura já que sua incorporação é difícil de controlar (COOLEY et al., 2009 Apud WURST; PUTMAN, 2013).

As misturas asfálticas elaboradas a temperaturas intermediárias (ditas “mornas”) surgiram como alternativa sustentável às misturas tradicionais a quente, tipicamente aos concretos asfálticos. Embora a temperatura de incorporação do ligante asfáltico não sofra alteração, os agregados, que constituem cerca de 95% da mistura em peso, são adicionados a temperaturas com redução de até 30 graus. Busca-se reduzir o consumo de energia e da emissão de gases do efeito estufa, assim como melhorar o ambiente de trabalho para os operários (condições de aplicação menos agressivas), sem comprometer o desempenho em campo.

As misturas mornas são obtidas através da adição de agentes orgânicos ou químicos adicionados aos agregados minerais ou diretamente ao ligante antes da mistura, respectivamente. Ainda, pode-se aplicar o asfalto em forma de espuma, resultante da incorporação de água ao betume quente.

Nas últimas duas décadas foram relatados estudos sobre a produção de concretos asfálticos usinados a temperaturas intermediárias. Contudo, são escassos os relatos de estudos envolvendo camadas porosas de atrito elaboradas nessa condição. A pesquisa aqui relatada visou contribuir no preenchimento dessa lacuna no conhecimento.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

A pesquisa relatada neste trabalho teve por objetivo geral analisar a viabilidade técnica de se produzirem misturas do tipo CPA a temperaturas intermediárias, sem adição de fibras; comparando-se, ainda, seu comportamento mecânico e sua permeabilidade com as correspondentes a misturas quentes com fibras de celulose.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos que auxiliaram para se alcançar o objetivo geral:

- a) Estudar misturas asfálticas porosas dosadas utilizando a norma americana ASTM D7064;
- b) Analisar o comportamento de misturas asfálticas quentes com adição de fibras de celulose para redução de escorrimento do ligante asfáltico comparando-os com resultados de misturas asfálticas mornas com adição de agente surfactante e sem fibras de celulose.
- c) Comparar os resultados dos ensaios realizados para análise das propriedades mecânicas das misturas quentes e mornas;
- d) Estudar a influência da retirada das fibras de celulose da mistura através do ensaio de permeabilidade.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos.

No primeiro capítulo foram apresentados o tema da pesquisa, ressaltando sua relevância, os objetivos geral e específico e a organização da dissertação.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre o tema abordado na pesquisa. Dentre os assuntos abordados estão:

- a) uma breve revisão sobre aderência pneu-pavimento e o problema da hidroplanagem;
- b) o conceito de camada porosa de atrito (CPA), vantagens e desvantagens de sua utilização e histórico do emprego de CPA no Brasil e no exterior;
- c) uma breve revisão sobre misturas asfálticas mornas.

No capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados na pesquisa tais como agregados minerais e cales, ligantes asfálticos, fibras e aditivo surfactante. Ainda, constam resultados de caracterização desses materiais, seguidos de um resumo dos ensaios realizados, da exposição dos equipamentos e da apresentação da metodologia de dosagem utilizada para determinação do teor de ligante de projeto.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos em ensaios laboratoriais.

Finalmente, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões obtidas, seguidas de sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

A principal qualidade de serventia de um pavimento é a segurança, garantida por uma aderência satisfatória entre os pneus dos veículos e o revestimento asfáltico.

De acordo com Souza et al. (1994) a aderência na interface pneu-pavimento é influenciada pela qualidade da área de contato e pela presença ou não de água. Ainda, colocam que a aderência depende da força de atrito resultante entre as duas superfícies. A intensidade da força de atrito é proporcional ao coeficiente de atrito e à intensidade da força normal desenvolvida entre as duas superfícies.

Quando se estuda o coeficiente de atrito entende-se que o mesmo é resultante dos fenômenos de adesão e histerese, conforme Figura 1.

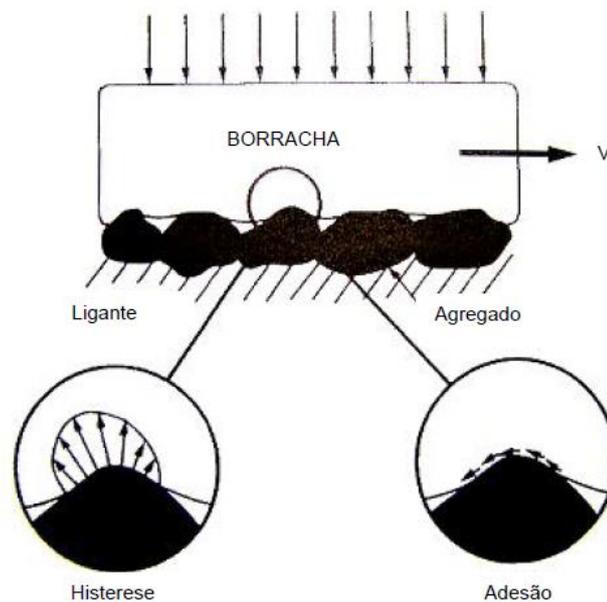


Figura 1 - Esquema de coeficiente de atrito: adesão e histerese. (fonte: Santos, 2004)

O coeficiente de atrito por adesão, ou adesão molecular, é a parcela de atrito que depende da natureza dos materiais em contato ou dos vínculos moleculares (forças de van der Waals). Em

se tratando de pistas secas a adesão é a principal componente responsável pelo atrito sofrendo uma redução significativa quando há água na superfície do pavimento (FERREIRA, 2002; APS, 2006; LUGÃO, 2008).

A parcela de atrito por histerese é resultante da perda de energia da borracha da banda de rodagem do pneu quando ela se deforma, sendo ocasionada pelo contato com as rugosidades da superfície. Essa parcela não é afetada consideravelmente pela presença de água (FERREIRA, 2002; LUGÃO, 2008).

O coeficiente de atrito depende de diversos fatores, tais como (MOMM, 1998; MEURER FILHO, 2001): presença de água; adesão; Histerese; Temperatura do ambiente e do pneu; Velocidade de deslocamento; textura da superfície (megatextura, macrotextura e microtextura); tipo e condição do pavimento; natureza e estado dos pneus; capacidade de drenagem; presença de contaminantes na pista.

### 2.1.1 Aderência em pistas molhadas

À medida que um veículo trafega em uma superfície na presença de lamina d'água a evacuação acontece a partir de três zonas, conforme Figura 2.

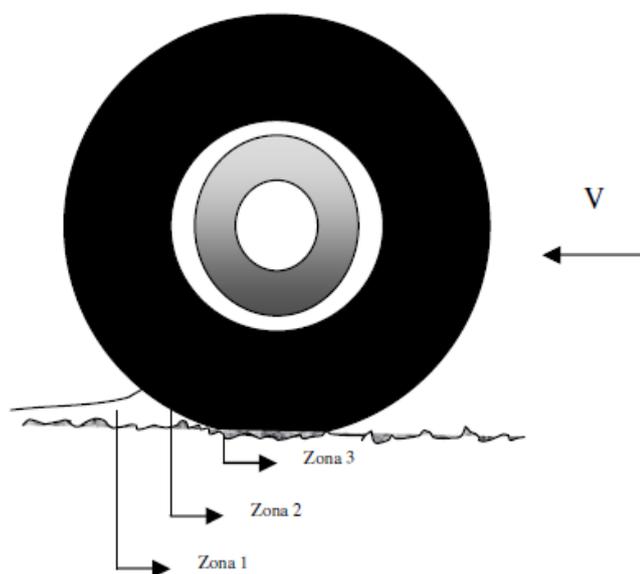


Figura 2 - Zonas de contato pneu-pavimento. (fonte: Ferreira, 2001)

A zona de penetração ou zona molhada localiza-se imediatamente à frente da zona onde ocorre o contato do pneu e apresenta pouca ou nenhuma força de atrito. As características e volume de

água dessa zona dependem da velocidade na qual o veículo trafega, da pressão de inflação dos pneus e da drenagem na interface pneu pavimento. Por se tratar de uma região onde ocorre acúmulo de água, a evacuação da mesma torna-se essencial para a prevenção do fenômeno de hidroplanagem.

A segunda zona de contato chama-se zona de transição ou intermediária. Compreende a região onde o volume de água fica comprimido e o filme de água deve ser rompido para que se inicie o contato seco entre a borracha do pneu e o pavimento. Nessa zona pode ocorrer o fenômeno de viscoplanagem caso o filme de água não seja completamente rompido pelo pneu.

A terceira zona é a de contato seco, onde há uma evacuação completa da água e o contato entre a borracha do pneu e a aspereza dos agregados do revestimento asfáltico é estabelecido gerando as forças de atrito.

O escoamento da água presente na região de contato do pneu com o pavimento requer um determinado tempo. Esse tempo é função da macrotextura e da microtextura que o pavimento oferece. A macrotextura e os sulcos do pneu tem a função de permitir que boa parte da água da Zona 1 seja drenada. A capacidade de drenagem do pavimento é função direta da graduação dos agregados, do projeto da mistura, da camada de rolamento e do grau de polimento da superfície e dos agregados (APS, 2006).

Segundo Aps (2006), a microtextura da camada de revestimento é responsável por romper a película de água que permanece na Zona 2. O rompimento da película reestabelece o contato do pneu com o pavimento.

Um estudo realizado por Wambold (1986) *apud* Aps (2006) analisou 500 casos de acidentes, em pistas molhadas, mostrou que os pavimentos nos locais dos acidentes apresentavam pequena macrotextura, os valores de coeficiente de atrito eram baixos e a velocidade dos veículos, imediatamente antes dos acidentes, eram altas.

#### 2.1.1.1 Hidroplanagem

A ocorrência de hidroplanagem se dá quando há contato molhado na interface pneu pavimento, ou seja, quando há a formação de uma lâmina d'água es espessura superior à 1 mm (MOMM, 1998).

A hidroplanagem caracteriza-se pela perda total de contato do pneu com a superfície do pavimento a uma dada velocidade devido ao acúmulo de água no revestimento. Ferreira (2002) coloca que quando há ocorrência de hidroplanagem as forças exercidas pelo pneu foram superadas pelas forças exercidas pela água. Também, a velocidade crítica varia de acordo com a espessura da lâmina d'água na superfície do pavimento.

A camada porosa proporciona uma superfície livre de hidroplanagem até mesmo em períodos de chuva prolongada onde a estrutura porosa pode ficar saturada. Isso ocorre devido à capacidade de dissipação da pressão sob os pneus na superfície porosa.

## 2.2 CAMADA POROSA DE ATRITO – CPA

Misturas asfálticas porosas são utilizadas em diversas aplicações na pavimentação desde camadas de rolamento a camadas responsáveis pela captação da água para formação de reservatórios ou recarga de aquíferos (VIRGILIIS, 2009; MANSOUR e PUTMAN, 2013).

Quando a finalidade é servir como uma camada de desgaste, a mistura asfáltica porosa recebe o nome de camada porosa de atrito (CPA), ou seja, uma camada sem função estrutural colocada sobre uma estrutura convencional de asfalto denso ou concreto de cimento Portland, conforme Figura 3 (PINHEIRO, 2004).

Segundo Kandhal (2002) nessa configuração a água da chuva penetra na camada porosa verticalmente e é drenada até as laterais da camada. A remoção da água superficial aumenta a segurança da rodovia além de filtrar contaminantes da superfície (BARRETT et al., 2006).

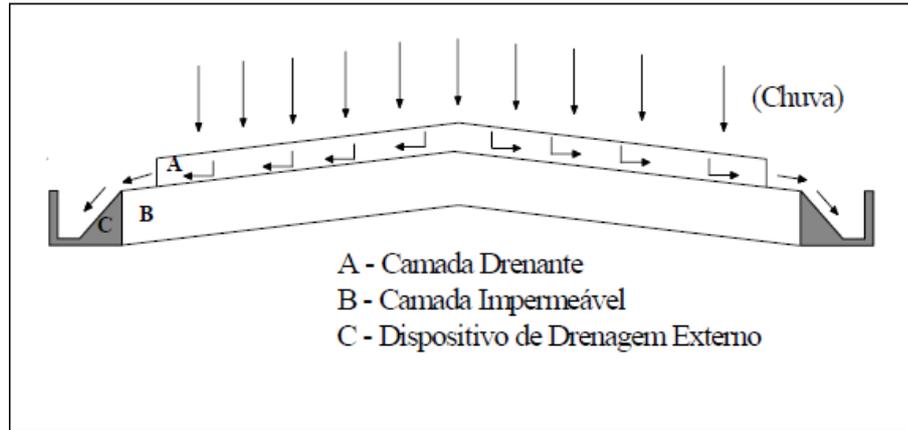


Figura 3 - Princípio de funcionamento da CPA (fonte: VIRGILIIS, 2009)

A configuração apresentada na Figura 3 é a mais indicada pois segundo Klenzendorf (2011) a integridade estrutural do pavimento é comprometida caso a estrutura seja completamente porosa, conforme Figura 4.

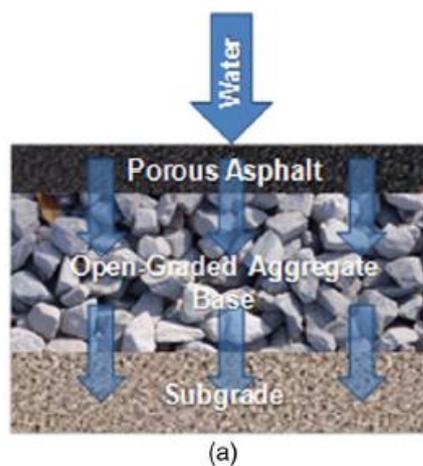


Figura 4 - Pavimento completamente poroso. (fonte: Putman e Kline, 2012)

A mistura que dá origem a CPA é formada pelo ligante asfáltico, aditivos e uma fração granulométrica onde predomina a utilização de agregados graúdos. Sendo assim, a mistura apresenta uma estrutura bastante permeável e com índice de vazios entre 15% e 20% (MANSOUR e PUTMAN, 2013). No entanto, tanto a norma brasileira DNER-ES 386/99

quanto a americana ASTM D7064-13 exigem que um mínimo de 18% de vazios seja atingido sendo na norma brasileira estipulado o valor máximo de 25%.

O ligante asfáltico utilizado na composição das misturas porosas deve ser modificado por polímero SBS de acordo com a Especificação de Serviço 386 do DNER (DNER, 1999). A norma americana ASTM D7064 não estipula que o ligante utilizado deve ser modificado, mas coloca que misturas que utilizam tais ligantes apresentaram desempenho superior (ASTM, 2008). Wurst e Putman (2013) justificam a utilização de ligante modificado por polímero SBS com o fato de tal ligante ser o mais utilizado nos Estados Unidos em camadas porosas de atrito.

### 2.2.1 Utilização de CPA no exterior

De acordo com uma pesquisa realizada pelo NCAT (*National Center for Asphalt Technology*) alguns estados norte-americanos que utilizam CPA dizem ter obtido resultados excelentes no que diz respeito à segurança (aumento do atrito na superfície) e durabilidade (KANDHAL, 2002).

No estado de Oregon a mistura se tornou a preferida devido aos bons resultados obtidos desde a década de 1970. A malha rodoviária utilizando CPA chega mais de 3000 km. Já na Geórgia, a utilização é obrigatória em todas as rodovias interestaduais (KANDHAL, 2002).

Na Europa, a camada porosa de atrito é comumente utilizada em países como Alemanha, Holanda, França, Itália, Reino Unido, Espanha, Suíça e Áustria. Em 1992, a Alemanha apresentava malha federal de aproximadamente 400 mil m<sup>2</sup>. Mesmo apresentando idade de oito anos, as misturas se mostravam em ótimas condições no ano em questão. Na Holanda o principal objetivo para a implantação da camada porosa de atrito foi a redução do ruído dos veículos (KANDHAL, 2002).

Diferentemente da mistura utilizada nos Estados Unidos, na Europa ela apresenta um índice de vazios superior sendo dosada com uma granulométrica mais grossa.

### 2.2.2 Histórico da utilização de CPA no Brasil

Assim como internacionalmente, no Brasil algumas obras utilizam camadas porosas de atrito. Pode-se citar o Aeroporto Santos Dumont (RJ), o Aeroporto Internacional Tancredo Neves (MG), a Rodovia dos Imigrantes e a Rodovia Presidente Dutra.

O Aeroporto Internacional Tancredo Neves em Minas Gerais foi o primeiro aeroporto no país a utilizar em sua pista uma camada porosa de atrito. A execução da mesma seguiu as recomendações da DIRENG com a utilização da faixa B. A granulometria constitui-se basicamente de material passante na peneira nº 1/2” e retido na peneira nº 4 (ARAÚJO, 1994).

Em 1999 foi executado, na pista principal do Aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro, um pavimento superposto e sobre o mesmo foi colocada uma camada porosa de atrito em 923 metros centrais da pista. Para que a pista mantivesse o coeficiente mínimo de atrito de 0,61 a mesma teve de ser renovada nos pontos de maior uso no ano de 2003 devido à ocorrência de colmatação dos vazios e consequentemente houve perda da capacidade drenante (BERNUCCI et al., 2008).



Figura 5 - CPA no Aeroporto Santos Dumont, RJ (Bernucci et al.,2008)

Na Rodovia dos Imigrantes, importante ligação entre a cidade de São Paulo e Santos, houve, em 1998, uma restauração entre os quilômetros 11,5 e 30 com a utilização de CPA com 5 cm de espessura (BERNUCCI et al., 2008).

Próximo a São Paulo, a Rodovia Presidente Dutra apresentava, em 1998, condições precárias em uma extensão de 3 quilômetros que incluía bombeamento de material da base, buracos e trincamento generalizado. Após a fresagem do revestimento existente e recomposição do greide com caimento de 3% uma camada com 2 cm de microrevestimento asfáltico a frio foi executada seguida de outra camada de 4 cm de mistura porosa.

### 2.2.3 Vantagens da utilização de CPA

No quesito segurança há uma melhora no atrito da interface pneu pavimento em condições molhadas se comparadas estruturas com misturas asfálticas densas e com placas de cimento Portland. Um estudo realizado em países como Estados Unidos e Canadá e na Europa corroboram essa característica e acrescenta que houve, também, uma redução nos acidentes de trânsito (KANDHAL, 2002).

Brunner (1975) apud Kandhal (2002) realizou na Pensilvânia estudos para comparação de desempenho entre CPA e misturas densas utilizando diferentes fontes de agregado. Os resultados são expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados encontrados pelo Departamento de Trânsito da Pensilvânia

<b>Tipo de pavimento</b>	<b>Coefficiente de atrito – 30 mph</b>	<b>Coefficiente de atrito – 40 mph</b>
<b>CPA com granito</b>	74	73
<b>CPA com dolomita</b>	71	70
<b>HMA densa com granito</b>	68	60
<b>HMA densa com dolomita</b>	65	57

(Fonte: adaptado de Brunner, 1975 Apud Kandhal, 2002)

O Departamento de Trânsito da Louisiana comparou os *Friction Number* de misturas densas e camadas porosas em velocidades que variaram de 20 a 60 mph. Os resultados são mostrados na Figura 6.

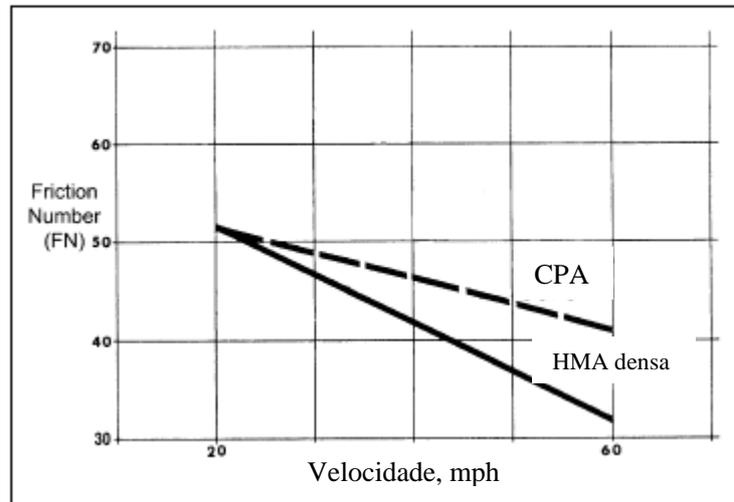


Figura 6 - Estudo realizado pelo Departamento de Trânsito da Louisiana. (fonte: Kandhal, 2002)

O Departamento de Trânsito de Oregon, nos Estados Unidos, comparou os valores de atrito de misturas porosas, densas e pavimentos de concreto de cimento Portland em condições molhadas sob velocidades que variavam entre 64 e 88 km/h. A Figura 7 mostra que de todas as misturas estudadas a que obteve o pior resultado foi o pavimento com concreto de cimento Portland. O revestimento denso e a camada porosa de atrito obtiveram resultados parecidos, mas segunda apresentou uma variação menor de coeficiente de atrito se comparada à camada densa (KANDHAL, 2002).

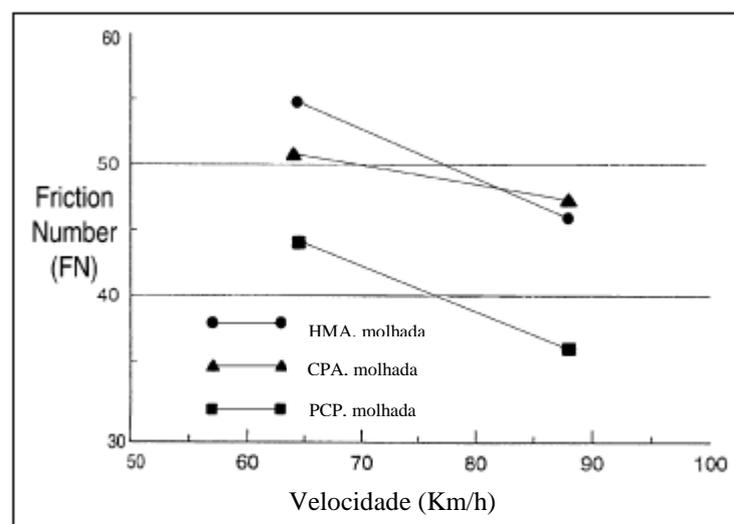


Figura 7 - Estudo comparativo de atrito realizado pelo Departamento de Trânsito do Oregon, EUA. (fonte: Kandhal, 2002)

Ainda, na França um estudo foi realizado em uma rodovia onde 52 acidentes de trânsito haviam sido reportados entre 1979 e 1985. No período que seguiu a colocação da camada porosa de atrito, em 1985, até 1989 não houve registros de acidentes de trânsito (CHAIGNON, 1993).

### 2.2.3.1 Spray e reflexão

Trafegar em rodovias sob tempo chuvoso diminui a visibilidade do motorista devido ao “spray” (projeção de água) proveniente dos veículos a frente e pela reflexão. A situação pode chegar ao ponto onde o motorista não consegue mais enxergar a rodovia a frente. Esse fenômeno acontece quando há água livre na superfície do pavimento, ocorrência constante em pavimentos com misturas asfálticas densas.

Nas misturas densas a evacuação da água depende basicamente dos canais das esculturas dos pneus e da macroestrutura do revestimento sendo o restante da água levantada e projetada pelos pneus, conforme Figura 8.

De acordo com Momm (1998), o escoamento da água proveniente das chuvas em uma camada de revestimento denso dependerá da capacidade de drenabilidade da água superficial por entre as suas rugosidades.

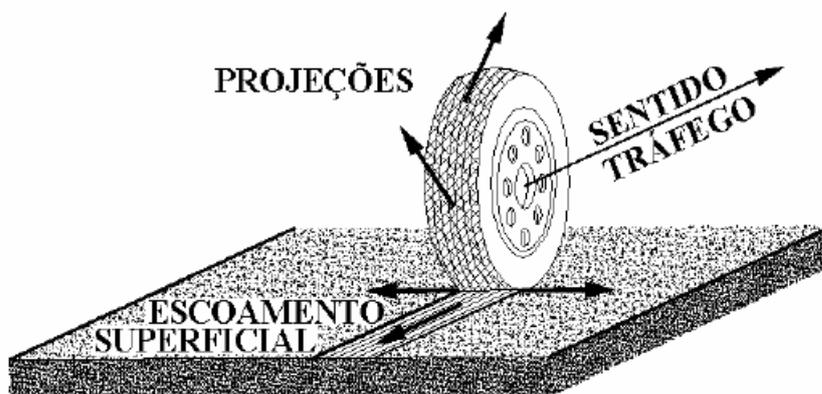


Figura 8 - Evacuação da água em um revestimento denso. (fonte: GNCSC, 1996 Apud Dumke, 2005)

A camada porosa, quando utilizada acima da camada estrutural de mistura densa, drena a água vinda da chuva para fora da rodovia diminuindo a presença de água superficial. A Figura 9 mostra como a infiltração vertical elimina a projeção de gotículas de água. Entretanto, GNCSC

(1996) Apud Dumke (2005) salienta que a drenagem no bordo da camada somente ocorrerá se a drenagem na saída for assegurada.

A Figura 10 mostra um esquema após a infiltração vertical da água através dos vazios comunicantes da camada porosa de atrito. Nota-se que a metade superior da camada fica insaturada diferentemente da metade inferior da mesma. Após atingir a camada estrutural densa inicia-se o processo de percolação da água para as laterais do pavimento. Daí a importância da presença de drenos nas laterais.

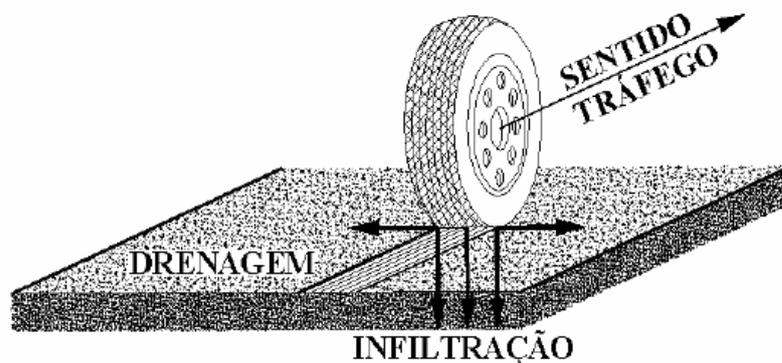


Figura 9 - Evacuação da água superficial em CPA. (fonte: GNCSC, 1996 Apud Dumke, 2005)



Figura 10 - Infiltração e percolação em CPA (fonte: GNCSC, 1996 Apud Dumke, 2005)

A Figura 11 mostra a diferença entre um pavimento contendo camada porosa e outro com mistura convencional densa.



Figura 11 - Pavimento com mistura asfáltica densa (esquerda) vs. pavimento com CPA (direita). (fonte: Kandhal, 2002)

Segundo Wurst e Putman (2013) e Pinto (1999) Apud Oliveira (2003) outro benefício da retirada da água sobre o revestimento asfáltico é a diminuição da reflexão das luzes dos veículos na camada pois não há espelhamento o que acarreta uma melhor visualização da sinalização horizontal durante a noite.

#### 2.2.3.2 Redução de ruídos

O movimento do pneu faz com que o ar seja empurrado e sugado na parte da frente e atrás, respectivamente. Esse movimento causa ruídos de alta frequência. Segundo Kandhal (2002) na estrutura da camada porosa de atrito o ar é empurrado para dentro da estrutura diferentemente dos revestimentos asfálticos densos onde o ruído é refletido para os arredores.

O desempenho de uma camada porosa na redução de ruídos é influenciada pelo seu índice de vazios, espessura e granulometria. Em estudo realizado pelo NCAT, em quatro estados americanos diferentes, foi comprovado que ao aumentar os vazios da estrutura o nível de ruído diminuiu linearmente, conforme Figura 12 (HANSON, 2004).

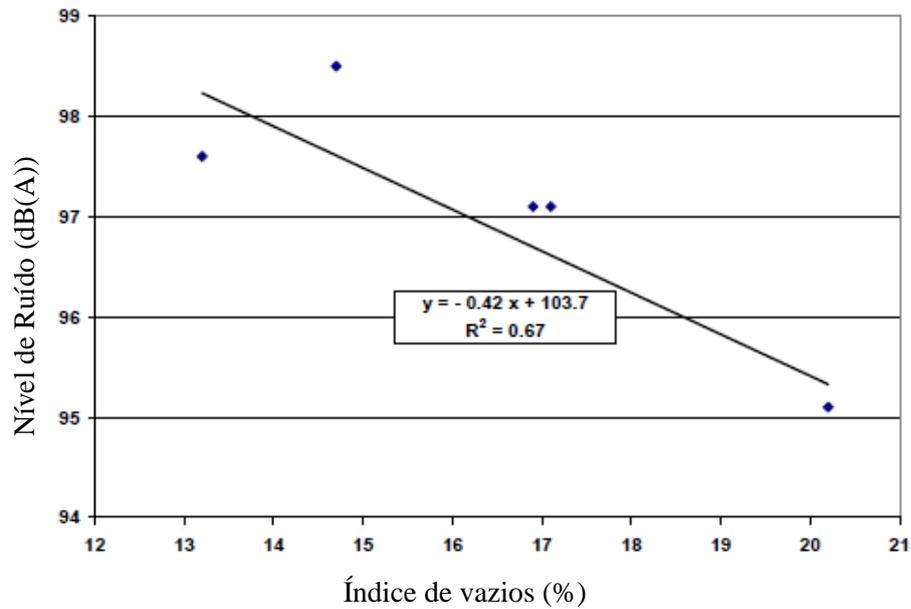


Figura 12 - Relação Índice de vazios - Nível de Ruído

Diversos estudos foram realizados para a determinação da redução de ruído nas estruturas de CPA. A Figura 13 mostra os níveis de ruído em cinco tipos diferentes de pavimento.

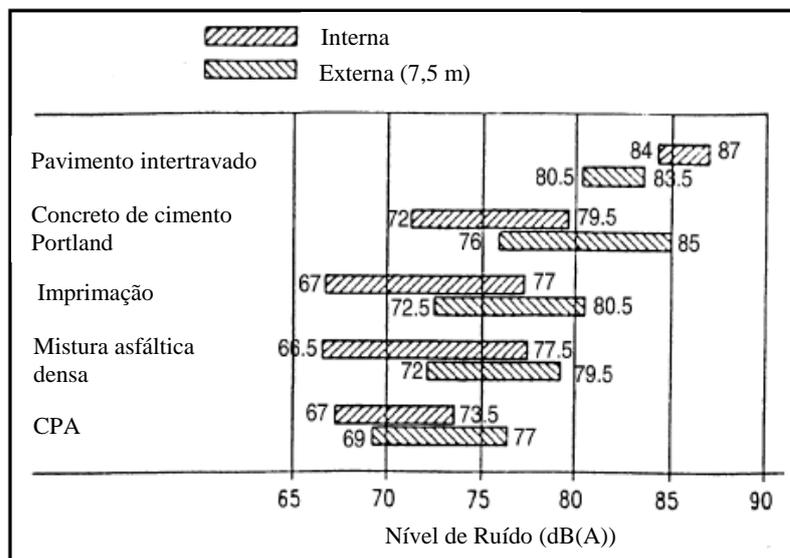


Figura 13 - Nível de ruído nas trilhas de roda interna e externa para diferentes tipos de revestimento (fonte: Kandhal, 2002)

## 2.2.4 Desvantagens da utilização de CPA

O uso da camada porosa de atrito traz consigo algumas desvantagens que afetam seu desempenho: o escorrimento do ligante asfáltico (em inglês, *draindown*), o desprendimento de agregados, ou *raveling* em inglês, a colmatação dos poros e a manutenção necessária durante o período de inverno.

### 2.2.4.1 Escorrimento do ligante asfáltico

O escorrimento do ligante asfáltico acontece devido ao seu uso excessivo e à falta de finos na mistura asfáltica. O termo *draindown* refere-se ao excesso do ligante que se deposita na superfície da camada de asfalto denso (HUBER, 2000).

Segundo Hamzah, Hasan e Ven (2012) geralmente o escorrimento do ligante acontece durante a produção, armazenamento e transporte da mistura e se torna bem mais acentuado quando há excesso de ligante, como citado anteriormente.

Um grande problema do escorrimento do ligante durante o transporte da usina até o local de aplicação da mistura é a distribuição heterogênea do ligante na mistura como um todo. Em estudo realizado por Huber (2000) notou-se que o escorrimento do ligante durante a produção resulta em áreas do pavimento com pouco ligante, levando posteriormente à desagregação, ao passo que algumas partes apresentam certa impermeabilidade pelo alto volume de ligante.

Segundo Putman e Lyons (2015) o escorrimento do ligante durante a produção e transporte já é um fenômeno bastante estudado. Entretanto, há teorias de que o escorrimento do ligante pode ocorrer após sua aplicação ao longo do tempo. Essa teoria foi corroborada por um estudo realizado por Ferguson (2005) Apud Putman e Lyons (2015) e por inúmeros outros estudos realizados em estacionamentos com vida útil entre 6 e 22 anos.

Huber (2000) também verificou que nos períodos de temperaturas mais elevadas ocorria o escorrimento do ligante convencional até a metade inferior da camada.

Putman e Lyons (2015) colocam que a ocorrência de escorrimento a longo prazo, além de acarretar a perda gradual da permeabilidade, pode criar uma maior probabilidade de desagregação na superfície do revestimento poroso. Isso ocorre, pois, o filme de ligante envolvendo o agregado, ao escorrer, se torna mais fino e oxida em uma maior velocidade tornando-se rígido.

#### 2.2.4.2 Desagregação

O fenômeno de *raveling* ocorre quando partículas de agregado se soltam da superfície asfáltica. A desagregação acontece devido ao alto índice de vazios conectados da estrutura da camada porosa que permitem que o ar e água entrem na camada causando um envelhecimento precoce do ligante, transformando-o em um material mais rígido. O envelhecimento precoce é a raiz dos problemas encontrados em estruturas de camada porosa de atrito (KANDHAL et al., 1998 Apud WURST; PUTMAN, 2013).

O fenômeno de desprendimento de agregado pode ser dividido em dois tipos: coesivo (clima quente) e adesivo (clima frio). O envelhecimento do ligante aumenta a resistência da camada ao desprendimento coesivo, porém diminui substancialmente a resistência em climas frios, consequentemente, ao desprendimento adesivo (MO et al., 2009 Apud WURST; PUTMAN, 2013).

#### 2.2.4.3 Entupimento dos poros

Para Suresha et al. (2008) o desempenho da camada porosa de atrito depende principalmente da sua permeabilidade. O entupimento dos vazios da mistura asfáltica é considerado por Dietz (2007) como o fenômeno que mais causa deterioração do desempenho da estrutura. Huber (2000) coloca que esse fenômeno faz com que a estrutura perca suas propriedades de drenabilidade e redução de ruídos.

O entupimento dos poros ocorre principalmente pelo transporte de partículas de areia trazidos pelos veículos ou pelo escoamento da água das chuvas, porém pode acontecer devido à deterioração dos materiais, como o mastique (NIELSEN, 2007 Apud SURESHA, 2008).

Nielsen (2007) notou que o entupimento evolui de acordo com a idade do pavimento e que se torna mais acentuado entre as trilhas de roda e em locais com pouco ou nenhum tráfego.

Para minimizar a colmatação dos poros da camada porosa de atrito por detritos e afins, foi desenvolvida uma camada com granulometria mais fina no topo, criando uma espécie de peneira onde os detritos de maior diâmetro ficariam presos, conforme Figura 14. A camada com granulometria grossa ficaria então protegida desses detritos (HAMZAH E HARDIMAN, 2005).

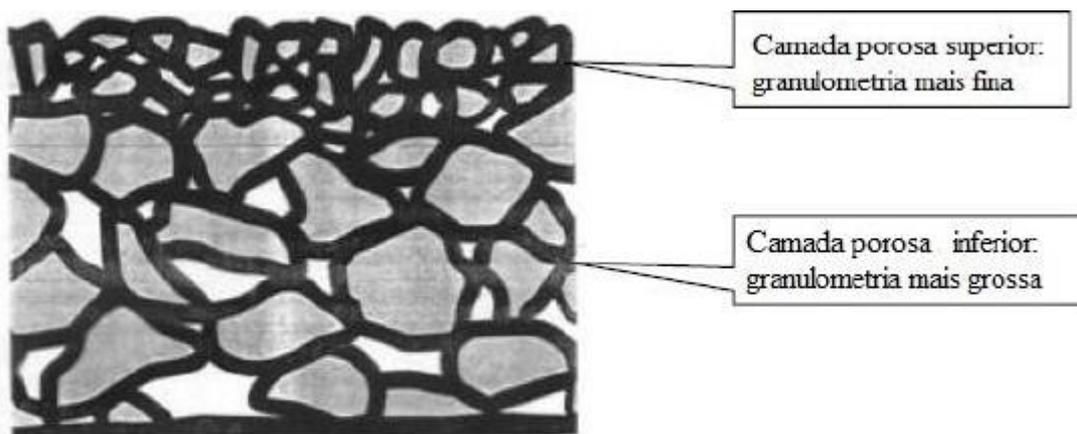


Figura 14 - Camada porosa dupla. (fonte: Van Bochove (1996) Apud Hamzah e Hardiman (2005))

### 2.3 PERMEABILIDADE

A permeabilidade é a característica principal de uma camada porosa de atrito sendo proporcional ao índice de vazios da mistura asfáltica.

Os poros de uma mistura drenante, Figura 15, podem ser classificados em (ASSOCIAÇÃO DAS RODOVIAS DO JAPÃO, 1996 Apud OLVEIRA, 2003):

- a) Poros efetivos: são aqueles que contribuem efetivamente para a passagem da água através da estrutura. São também chamados de vazios comunicantes e garantem o desague no exterior do pavimento (MEURER E FILHO, 2001);
- b) Poros semi-efetivos: auxiliam no armazenamento de água, porém não garantem a passagem;
- c) Poros ineficazes: não contribuem nem para o armazenamento ou passagem de água.

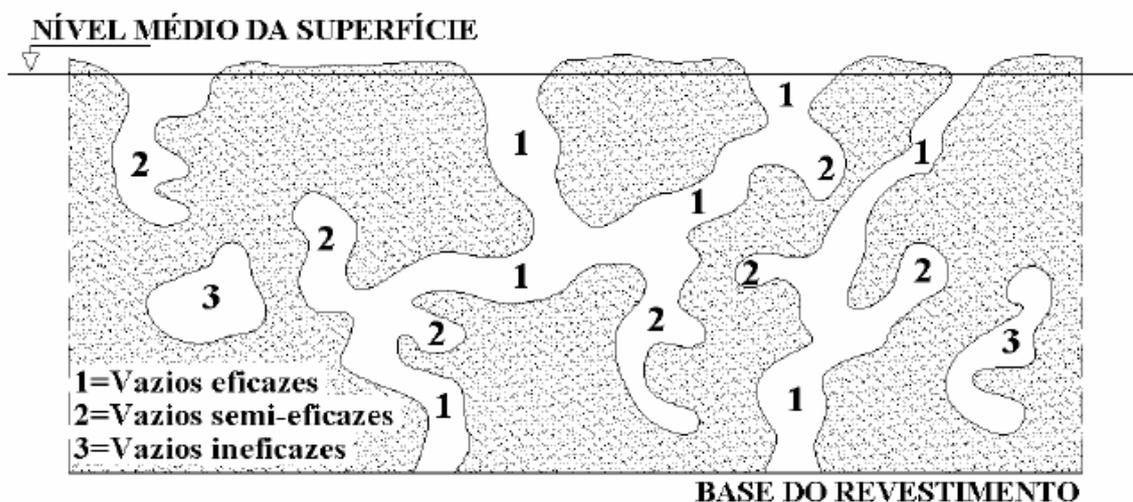


Figura 15 - Poros de mistura drenante (Fonte: Associação das Rodovias do Japão, 1996 Apud Oliveira, 2003)

O principal problema que afeta a permeabilidade de uma CPA é a colmatação ou entupimento dos poros, que se torna inevitável com o passar do tempo devido ao depósito de detritos na superfície ou à densificação devido ao tráfego (OLIVEIRA, 2003; PUNITH E VEERARAGAVAN, 2011).

Um estudo realizado na Rodovia dos Bandeirantes, conforme Tabela 2, mostra que a diminuição da permeabilidade foi bastante intensa do primeiro para o segundo ano, ao passo que nos períodos seguintes se manteve constante ou com diminuição bem menos acelerada (NASCIMENTO e REIS, 1999 Apud OLIVEIRA, 2003).

Tabela 2 - Permeabilidade na Rodovia dos Bandeirantes

Ano	Permeabilidade média ( $10^{-2}$ cm/s)
1992	30
1993	15
1994	15
1995	12

Fonte: (Nascimento e Reis, 1999 apud Oliveira, 2003)

Dentre os instrumentos utilizados para a determinação da permeabilidade destacam-se os permeômetros campo e de laboratório que podem ser de carga hidráulica variável ou constante.

O permeômetro de carga variável funciona com um regime transitório permitindo que um volume conhecido e pré-estabelecido de água escoe em uma determinada área do pavimento.

A Figura 16 mostra um permeâmetro de carga variável utilizado na determinação da permeabilidade sobre a camada de revestimento e a Figura 17 um utilizado para obtenção da permeabilidade em um corpo de prova com dimensões Marshall, em laboratório.



Figura 16 - Permeâmetro de carga variável sobre o revestimento (fonte: Momm, 2002 Apud Oliveira, 2003)



Figura 17 - Permeâmetro de carga variável para CPs Marshall (fonte: Oliveira, 2003)

Permeômetros automáticos de carga constante (Figura 18) funcionam através de equipamentos como um compressor de ar comprimido, bomba centrífuga e um conjunto eletrônico para medir a o débito de água em uma carga hidráulica constante de 1,5 metros.

A normalização do ensaio utilizando esse equipamento é de acordo com a norma francesa NF-P-98-254-4.

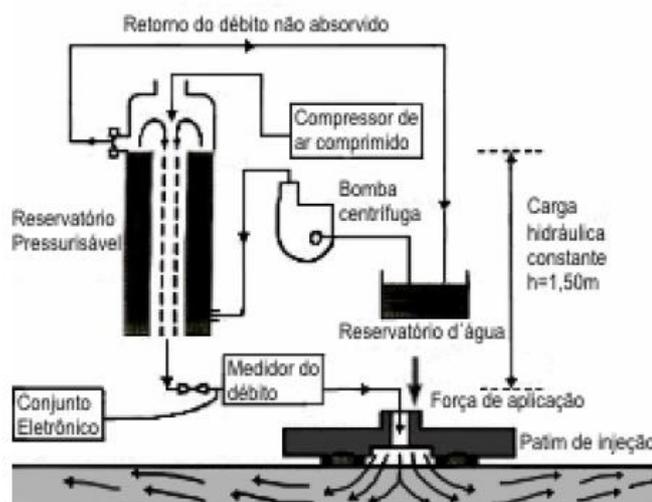


Figura 18 - Permeômetro de carga constante. (fonte: Di Benedetto et al., 1996 Apud Dumke, 2005)

## 2.4 UTILIZAÇÃO E EFEITO DE MODIFICADORES

Dada a estrutura aberta, as misturas asfálticas porosas estão mais suscetíveis aos agentes que deterioram sua estrutura. Uma das maneiras para melhorar o desempenho destas misturas é a incorporação de aditivos às mesmas. Os mais utilizados são as fibras minerais, sintéticas ou orgânicas e a incorporação de polímeros ao ligante asfáltico.

### 2.4.1 Ligante modificado por polímero

As primeiras gerações de misturas asfálticas porosas eram produzidas com altos teores de ligantes asfálticos para uma melhor adesividade com os agregados. Hoje em dia, no entanto, há o uso de ligantes modificados por polímeros que melhoram características como elasticidade, adesividade com os agregados e susceptibilidade térmica (HIRSCH, 2008 Apud AFONSO, 2017).

Especialmente em misturas drenantes o ligante asfáltico contribui no comportamento mecânico do aglomerado final evitando a desagregação devido à ação do tráfego. A maior parte dos danos causados em uma mistura drenante é causada pelo deslocamento do ligante na interface com o agregado (DUMKE, 2005).

Segundo Airey, (2002) os modificadores de ligante asfáltico podem ser divididos em duas grandes categorias: plastômeros e elastômeros. Os primeiros modificam os ligantes através da formação de uma estrutura tridimensional dura e rígida para resistir a deformações. Já os elastômeros possuem uma alta resposta elástica e resistem a deformações permanentes pois esticam-se e voltam para a sua posição inicial. O principal plastômero utilizado é o EVA (*Ethylene Vinyl Acetate* ou Etileno Acetato de Vinila), utilizado para melhorar a trabalhabilidade do asfalto e melhorar a deformação do mesmo, e o polímero SBS (estireno-butadieno- estireno) é o elastômero de uso mais difundido.

Polacco et al. (2004) acrescentam uma terceira categoria de polímeros: polímeros reativos. Segundos autores sua reatividade se dá pela presença de grupos funcionais que se ligam às moléculas de asfalto.

Embora o uso de aditivos proporcione muitos benefícios, há também a desvantagem do aumento considerável dos custos das obras rodoviárias. Dito isso, alguns estudos são realizados para que materiais provenientes de rejeitos sejam utilizados como aditivos tais como vidro, rejeito de polímero e plástico.

#### 2.4.2 Fibras

A incorporação de fibras nas misturas asfálticas porosas é realizada para mitigar o escorrimento do ligante asfáltico durante a produção, armazenamento e transporte da mistura. Inúmeros estudos foram realizados ao longo dos anos para determinar a melhoria nas propriedades das misturas utilizando fibras minerais, de celulose e, também, as fibras sintéticas como polipropileno e polietileno.

As fibras de celulose são bastante utilizadas para a finalidade de diminuir o escorrimento pois a disponibilidade é alta e o custo é relativamente baixo. Além disso, podem ser recicladas, são biodegradáveis e possuem propriedades físicas e mecânicas interessantes (AFONSO et al., 2017).

Lyons e Putman (2013) realizaram um estudo utilizando três aditivos estabilizadores ( fibras de celulose, polímero SBS e borracha de pneu) em misturas com ligante asfáltico PG 64-22, com diferentes aditivos, para determinar a influência desses aditivos na mistura. A Figura 19 mostra os resultados obtidos nos ensaios de escorrimento do ligante asfáltico. Nota-se que, na mistura convencional sem as fibras os únicos teores de ligante que apresentaram escorrimento menos que 0,3% foram 4,5 % e 5 % ao passo que na mistura com adição de 0,3 % de fibras de celulose teores de ligante de até 6,5% apresentaram escorrimento próximo de zero. Ainda, a adição de fibras aumentou a resistência da mistura no ensaio de dano por umidade induzida em 11 % provavelmente devido à diminuição da porosidade.

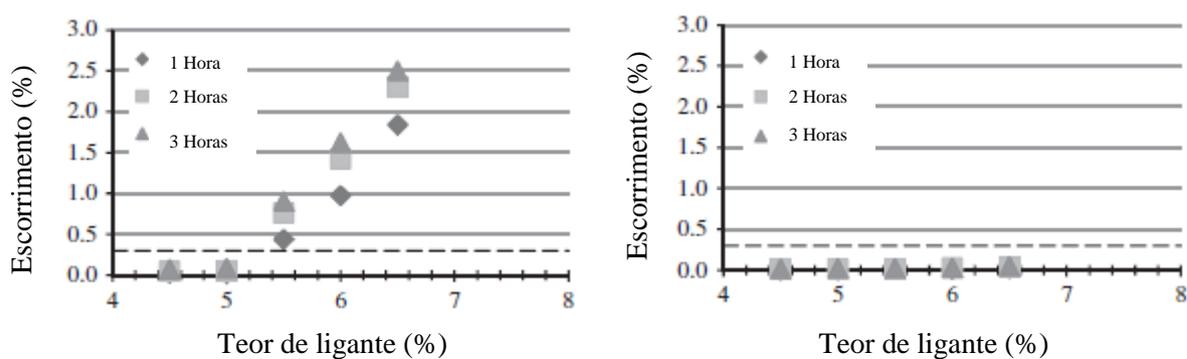


Figura 19 - Comparação de mistura sem fibras de celulose (esquerda) e com fibras (direita). (fonte: Lyons e Putman, 2013)

Hassan e Al-Jabri (2005) estudaram o efeito da adição de duas fibras orgânicas (celulose): fibras de palmeira e têxteis, combinadas com polímero SBR, em misturas abertas. Os resultados encontrados mostraram que as misturas contendo fibras de palmeira e um teor de 5 % de polímero SBR e a mistura contendo fibra têxtil e 6,5 % de polímero SBR foram as únicas a satisfazer os critérios impostos pelo método de dosagem NCAT.

Putman e Lyons (2015) analisaram o escorrimento do ligante a longo prazo em misturas porosas contendo fibras de celulose, borracha de pneus e com Evotherm 3G. Após moldados utilizando o CGS foram obtidos os valores de porosidade e permeabilidade dos corpos de prova. Na sequência os mesmos foram colocados na estufa para condicionamento a uma temperatura de 60°C. Em intervalos de 14 dias os corpos de prova eram retirados da estufa e os valores de porosidade e permeabilidade obtidos novamente. Esse procedimento perdurou por 84 dias pois os autores queriam capturar o ponto no qual a permeabilidade atingisse um valor constante. Conforme se observa na Figura 20 a permeabilidade das misturas decresceu significativamente

até os 56 dias quando houve um nivelamento. Os autores ressaltam que nenhum valor de porosidade decresceu a um valor inferior a 122 m/dia indicando que o entupimento dos poros de misturas porosas não se deve somente ao escoamento a longo prazo. Ainda, constataram que as fibras de celulose da mistura de controle não tiveram nenhuma influência sobre o escoamento a longo prazo das misturas.

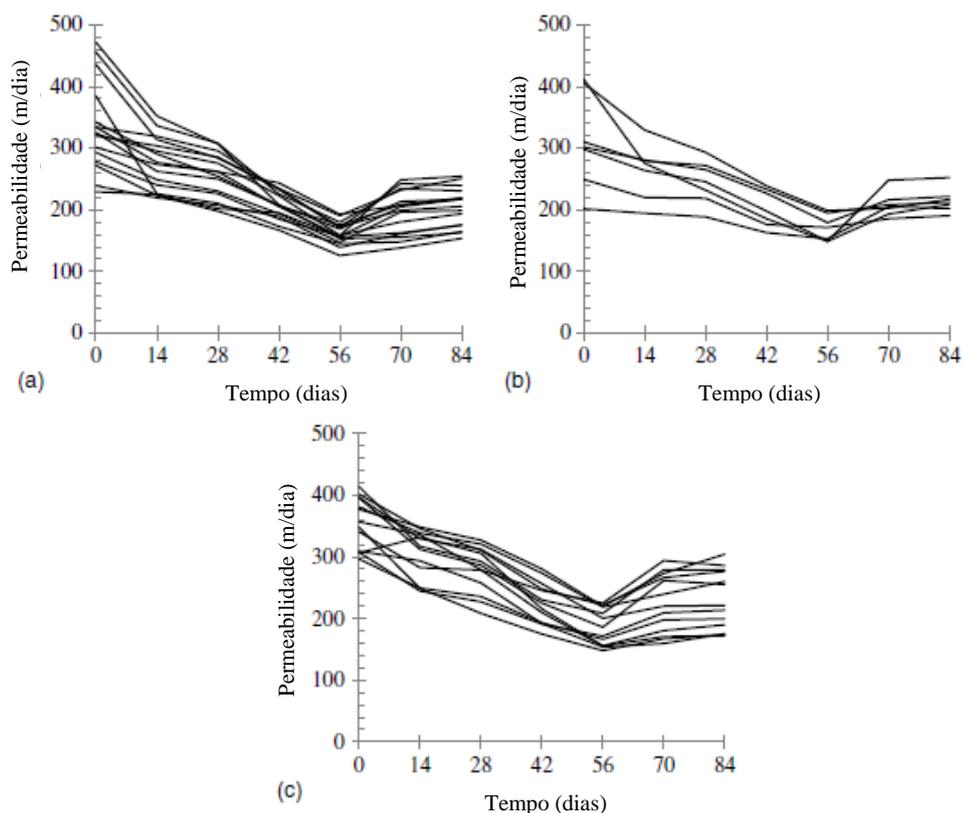


Figura 20 - Evolução na permeabilidade das misturas durante o condicionamento: (a) Controle (com fibras de celulose); (b) Borracha de pneu; (C) WMA (fonte: Putman e Lyons, 2015)

Afonso et al. (2017) realizaram estudos utilizando ligante asfáltico AMP 45/80 (Elaster BM-3b) para prever o desempenho da adição de fibras de celulose no escoamento do ligante. Para a realização da pesquisa duas misturas porosas com fibras foram utilizadas: fina (PA-1) e graúda (PA-2). O teor de fibras variou de 0%, 0,2%, 0,4% e 0,5% para teores de ligante de 5,1% e 5,2% para misturas com granulometria graúda e fina, respectivamente. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 21. Nota-se que em ambas as misturas o escoamento diminui com o

aumento no teor de fibras. Ainda, a mistura com granulometria graúda apresentou escorrimento sempre superior ao da mistura com granulometria fina. A justificativa apresentada foi de que a menor superfície específica dos agregados e uma curva granulométrica descontínua foram responsáveis pelos resultados superiores.

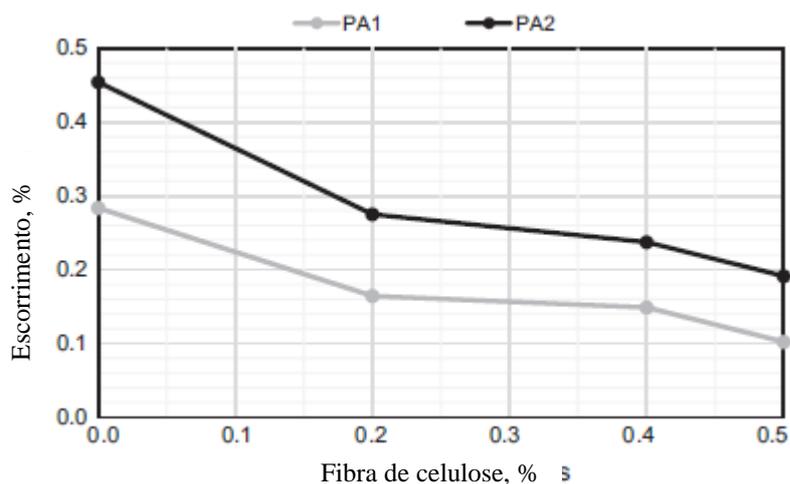


Figura 21 - Resultados do ensaio de escorrimento (fonte: Afonso et al., 2017)

Punith e Veeraragavan (2011) verificaram a viabilidade da utilização de fibras de polietileno recicladas de sacolas plásticas de uso doméstico para a redução do escorrimento do ligante asfáltico. Na pesquisa foram analisados teores de ligante PG 60/70, muito utilizado na Índia, em teores que variaram de 4,5 % a 6 %. A Figura 22 mostra os resultados encontrados para o ensaio de escorrimento. Nota-se que o com o aumento do teor de asfalto o escorrimento do ligante aumenta sendo que a mistura contendo fibras de polietileno apresenta valores mais baixos que a mistura sem as fibras.

Os autores ainda avaliaram o desempenho das misturas nos ensaios de abrasão, resistência à tração, fadiga, dano por umidade induzida e deformação permanente. Todos os resultados das misturas com fibras de polietileno mostraram uma melhora de desempenho quando comparadas às misturas sem fibras.

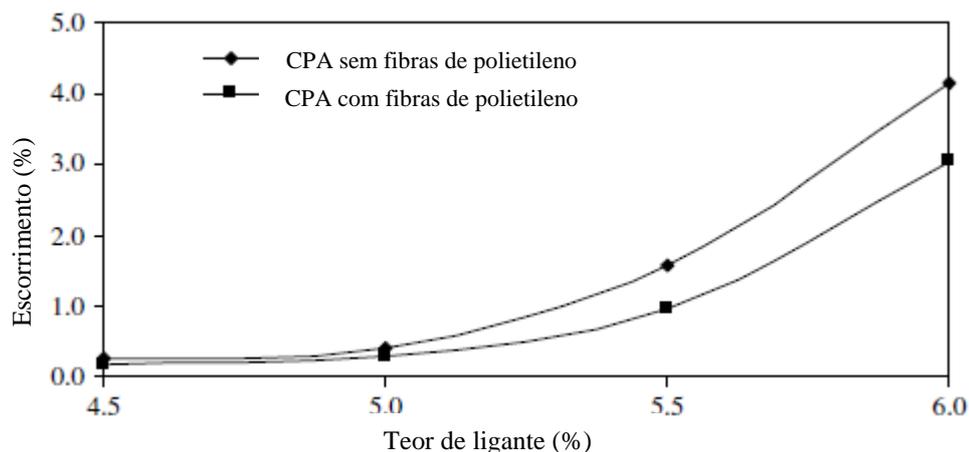


Figura 22 - Relação entre o teor de ligante e o escorrimento (fonte: Punith e Veeraragavan, 2011)

## 2.5 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS - WMA

A usinagem, aplicação e manutenção de misturas asfálticas são os principais meios de poluição da indústria de infraestrutura de transporte mesmo com o declínio da produção anual de misturas. Sendo assim, as misturas asfálticas mornas entram em cena possibilitando a usinagem de misturas asfálticas a temperaturas de até 30°C mais baixas que misturas quentes tradicionais, conforme Figura 23 (RUBIO et al., 2012; ALI et al., 2014; ALMEIDA-COSTA; BENTA, 2016).

A temperatura de usinagem mais baixa garante uma menor emissão de gases do efeito estufa (15% - 45% menos que misturas quentes). Além disso, essas misturas reduzem a viscosidade do ligante asfáltico através da adição de aditivos químicos ou orgânicos ou adição de água ao ligante sob temperatura e pressão controladas. A redução na viscosidade do ligante permite uma cobertura adequada do agregado durante a mistura a temperaturas mais baixas (ALI et al., 2014; SARGAND et al., 2012).

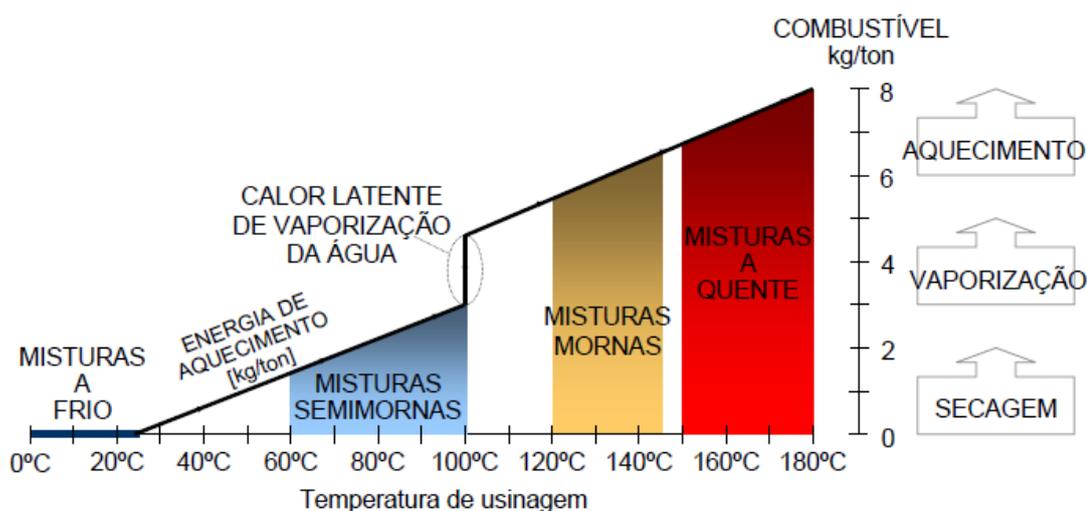


Figura 23 - Faixas de temperatura para produção de diferentes misturas asfálticas. (fonte: MOTTA, 2011)

As tecnologias existentes para misturas mornas podem ser agrupadas em aditivos orgânicos, químicos e processos de espuma de asfalto (VAITKUS et al., 2009).

- a) Aditivos orgânicos: adicionados ao misturador juntamente com todos os agregados minerais;
- b) Aditivos químicos: adicionados ao ligante antes da mistura no misturador;
- c) Espuma de asfalto é criada quando água é adicionada ao betume aquecido;
- d) Ainda, espuma de asfalto pode ser criada adicionando-se zeólita natural ou sintética durante a usinagem da mistura.

De acordo com Behl et al. (2013) e Almeida-costa e Benta (2016), além dos benefícios imediatos como a redução do consumo de combustível e da emissão de gases, as misturas mornas ainda apresentam vantagens como a habilidade de reabrir o tráfego de veículos mais cedo, maiores distâncias de transporte, uso mais intensivo de asfalto reciclado e a possibilidade de aplicação das misturas em condições meteorológicas mais frias. Para Hurley e Prowell (2006) Apud Wurst e Putman (2013) as misturas mornas têm a vantagem de reduzir o envelhecimento do ligante durante a produção melhorando o desempenho quanto ao trincamento e degradação.

Vaitkus et al. (2009), em trabalho realizado para análise do uso de WMA na Lituânia, coloca que a redução das emissões de gases melhora o ambiente de trabalho melhorando assim, a saúde dos trabalhadores.

Em estudo realizado para avaliar o desempenho de dois pavimentos construídos utilizando misturas mornas na Índia Behl et al. (2013) chegaram à conclusão de que as estruturas com revestimento asfáltico morno apresentaram resultados iguais ou superiores aos das estruturas de controle, construídas com mistura asfáltica quente. As avaliações foram baseadas em ensaios de deflexão com viga Benkelman, irregularidade com o “Bump Integrator” e retirada de amostras em campo para avaliação em laboratório com ensaios de estabilidade Marshall, *Creep* estático e módulo de resiliência.

Entretanto, além de apresentar vantagens, as misturas asfálticas mornas apresentam algumas desvantagens dentre as quais pode-se citar (RUBIO et al., 2012):

- a) Alto custo devido à reticência do uso pelas empreiteiras;
- b) Falta de dados sobre o desempenho a longo prazo;
- c) Maior susceptibilidade à umidade devido às baixas temperaturas;
- d) Problemas envolvendo adesividade e cobrimento.

### 2.5.1 Evotherm<sup>TM</sup>

Agentes surfactantes na forma líquida apresentam um aumento no uso devido à sua praticidade. O agente surfactante Evotherm<sup>TM</sup> foi o primeiro a ser utilizado nos Estados Unidos e era fornecido como emulsão de alto resíduo sendo conhecido por Evotherm ET.

O aditivo, que age na interface entre o ligante e agregado causando melhor lubrificação, foi desenvolvido para promover adesividade, recobrimento, compactação e trabalhabilidade de misturas asfálticas produzidas a uma temperatura reduzida (D’ANGELO et al., 2008; MOCELIN et al., 2017).

O Evotherm<sup>TM</sup> 3G é uma tecnologia que não utiliza água para a produção de misturas mornas. É um aditivo proveniente de óleos naturais de plantas que é misturado ao asfalto antes de sua

adição aos agregados (MOCELIN, 2015; NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011).

### **3. MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Este capítulo apresenta primeiramente os materiais utilizados nesta pesquisa bem como os resultados dos ensaios de caracterização dos mesmos realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS.

Ainda, é feita uma apresentação da metodologia de dosagem das misturas asfálticas empregada na pesquisa citando-se quais os procedimentos adotados na escolha dos agregados e ligantes asfálticos. Por fim, há um breve resumo de cada ensaio realizado para atingir o objetivo proposto no trabalho.

#### **3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA**

Nos itens a seguir serão apresentados os resultados das caracterizações dos ligantes asfálticos utilizados na pesquisa bem como dos agregados pétreos e das cales calcítica e dolomítica. Os ensaios foram realizados seguindo procedimentos contidos nas normas citadas para cada ensaio laboratorial. Dessa forma, os procedimentos em detalhes não serão expostos.

##### **3.1.1 Agregados**

Os agregados utilizados na pesquisa são de origem basáltica em três frações, conforme Figura 24. A pedra localiza-se na região metropolitana de Porto Alegre no km 30 da BR-290/RS.

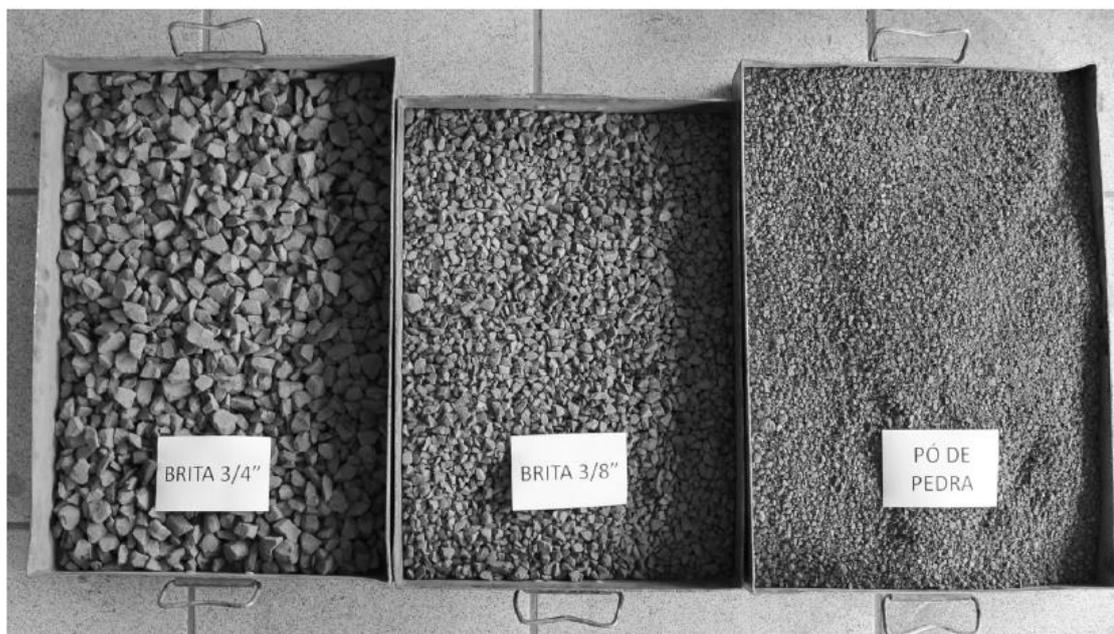


Figura 24 - Frações de agregado mineral utilizadas na dosagem das misturas

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização necessários para aceitação do uso do mesmo na mistura. A Tabela 4 mostra os resultados de ensaios de densidade e absorção para cada fração utilizada.

Tabela 3 - Ensaios de aceitação dos agregados

Propriedade	Norma	Especificação ASTM	Resultado		
			3/4"	3/8"	Pó
Abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98	$\leq 30 \%$	8,6 %	-	-
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97	$\geq 45 \%$	-	-	84%
Partículas longas e achatadas 5:1	ASTM D4791-05	$\leq 10 \%$	3,42%	7,3%	-

Tabela 4 - Propriedades dos agregados

<b>Material</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>
<b>3/4"</b>	Absorção (%)	DNER-ME 195/97	0,91
	Massa específica real (kg/m <sup>3</sup> )		2,746
	Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )		2,678
<b>3/8"</b>	Absorção (%)	DNER-ME 081/98	1,18
	Massa específica real (kg/m <sup>3</sup> )		2,765
	Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )		2,677
<b>Pó</b>	Absorção (%)		2,2
	Massa específica real (kg/m <sup>3</sup> )	DNER-ME 084/95	2,829

A escolha do uso do agregado basáltico foi feita pelo fato de já serem conhecidas as suas características e o desempenho do mesmo. Além do mais, agregados basálticos são utilizados com frequência em obras rodoviárias.

Além dos agregados pétreos, para melhorar a adesividade do ligante asfáltico ao agregado, cal calcítica é adicionada às misturas já que possui maior quantidade de hidróxido de cálcio. Para a mistura morna com AMP 65/90 utilizou-se cal dolomítica para verificação da influência da das diferentes cales no escorrimento da mistura.

A Tabela 5 e Tabela 6 mostram o resultado da análise granulométrica dos agregados e, posteriormente, a Figura 25 ilustra as curvas das frações de agregados.

Tabela 5 - Análise granulométrica dos agregados

<b>PENEIRA</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>BRITA 3/4</b>	<b>BRITA 3/8</b>	<b>PÓ DE PEDRA</b>
<b>3/4"</b>	<b>19,10</b>	97,32	100	100
<b>1/2"</b>	<b>12,70</b>	31,39	100	100
<b>3/8"</b>	<b>9,50</b>	5,80	98,81	100
<b>n 4</b>	<b>4,76</b>	1,37	11,76	94,63
<b>n 10</b>	<b>2,00</b>	1,36	2,91	59,15
<b>n 40</b>	<b>0,42</b>	1,32	2,68	24,90
<b>n 80</b>	<b>0,18</b>	1,25	2,55	16,97
<b>n 200</b>	<b>0,07</b>	1,08	2,23	11,65

Tabela 6 - Análise granulométrica das cales utilizadas

<b>PENEIRA</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>CAL CALCÍTICA</b>	<b>CAL DOLOMITICA</b>
<b>3/4"</b>	<b>19,10</b>	100	100
<b>1/2"</b>	<b>12,70</b>	100	100
<b>3/8"</b>	<b>9,50</b>	100	100
<b>n 4</b>	<b>4,76</b>	100	100
<b>n 10</b>	<b>2,00</b>	100	100
<b>n 40</b>	<b>0,42</b>	100	100
<b>n 80</b>	<b>0,18</b>	99,21	97
<b>n 200</b>	<b>0,07</b>	89,92	84,14

Na Tabela 7, é apresentada a composição química das cales utilizadas nesta pesquisa. Os resultados foram fornecidos pela CIENTEC.

Tabela 7 - Propriedades químicas das cales utilizadas na pesquisa

<b>Propriedade</b>	<b>Cal Calcítica</b>	<b>Cal Dolomítica</b>
<b>Oxido de cálcio total (CaO), %</b>	72,2	37,2
<b>Óxido de cálcio disponível (CaO disp.), %</b>	68	18
<b>Óxido de magnésio (MgO), %</b>	0,6	25,4
<b>Resíduos insolúveis, %</b>	0,9	7,2
<b>Perda ao fogo (1000 C), %</b>	24,9	29,3

(Fonte: Barros, 2017)

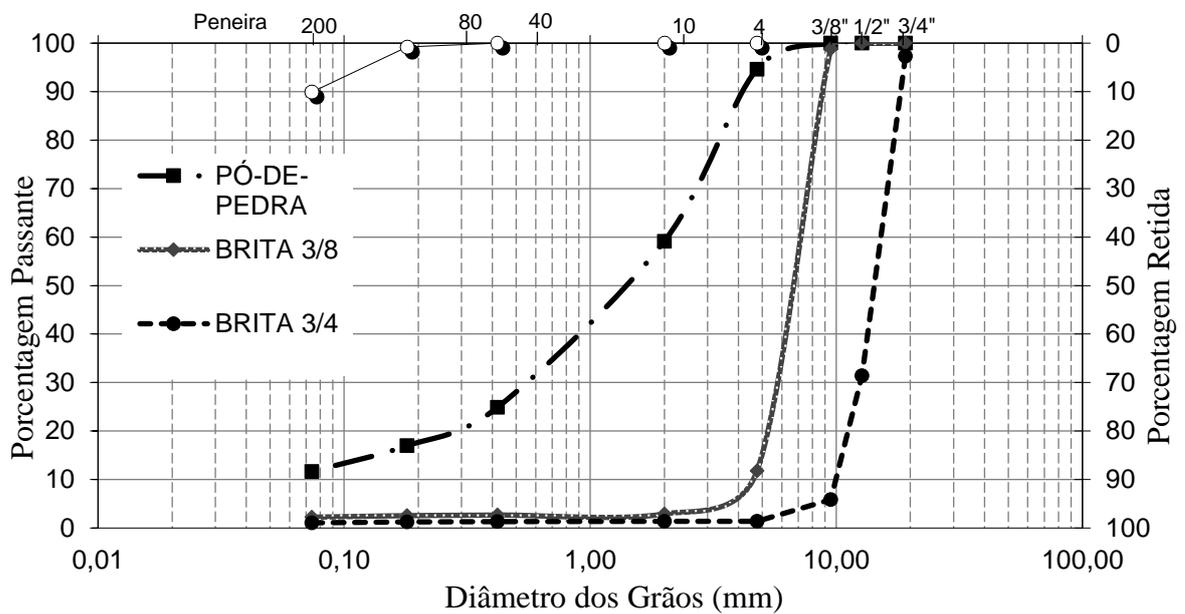


Figura 25 - Curvas granulométricas dos agregados

### 3.1.2 Ligantes asfálticos

Para a elaboração desse trabalho são utilizados dois tipos de ligantes asfálticos, ambos modificados por polímero: AMP 60/85 e AMP 65/90.

Na caracterização dos ligantes a serem utilizados foram realizados os ensaios de viscosidade Brookfield, densidade, ponto de amolecimento, recuperação elástica e penetração. Os resultados podem ser vistos na Tabela 8 e na Tabela 9. Todos os ensaios foram realizados no LAPAV.

Tabela 8 - Resultados obtidos na caracterização AMP 60/85

Ensaio	Norma	Especificação ANP	AMP 60/85	Com 0,4% Evotherm
<b>Viscosidade Brookfield (cP)</b>	135 °C	NBR 15184	3000 máx.	1168
	150 °C		2000 máx.	591
	177 °C		1000 máx.	220
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	NBR 6296	-	1,01	1,003

<b>Ponto de amolecimento (°C)</b>	NBR 6560	60 min	66	64
<b>Penetração (0.1 mm)</b>	NBR 6576	40 - 70	58	55
<b>Recuperação elástica à 25 °C (%)</b>	NBR 15086	85 min	93	93

Tabela 9 - Resultados obtidos na caracterização AMP 65/90

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	<b>Especificação ANP</b>	<b>AMP 65/90</b>	<b>Com 0,4% Evotherm</b>	
<b>Viscosidade Brookfield (cP)</b>	NBR 15184	135 °C	3000 máx.	1433	1440
		150 °C	2000 máx.	705	707
		177 °C	1000 máx.	273	269,5
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	NBR 6296	-	1,00	1,00	
<b>Ponto de amolecimento (°C)</b>	NBR 6560	65 min	76	79	
<b>Penetração (0.1 mm)</b>	NBR 6576	40 - 70	59	73	
<b>Recuperação elástica à 25 °C (%)</b>	NBR 15086	90 min	97	96	

Observou-se que o ligante AMP 65/90 com aditivo surfactante apresentou um valor no ensaio de penetração que vai além do limite máximo permitido pelas normas da ANP (Agência Nacional de Petróleo). Como não existe uma especificação para ligantes com aditivo incorporado, optou-se por utilizar o ligante na pesquisa mesmo que este esteja levemente acima da faixa de trabalho proposta pela especificação de ligantes puros.

Além dos ensaios citados acima, foi realizado o ensaio de adesividade do ligante asfáltico ao agregado. A Figura 26 mostra o resultado após a imersão por 72h em água a 40 °C. Percebe-se que, para ambos os ligantes, a adesividade foi satisfatória.



Figura 26 - Ensaio de adesividade dos ligantes asfálticos

### 3.1.3 Aditivo para mistura morna

Para as duas misturas mornas que serão utilizadas na pesquisa será incorporado 0,4 % de agente surfactante Evotherm™ P-25 em relação ao peso do ligante. O percentual de Evotherm utilizado é uma recomendação do fornecedor do material e a incorporação do aditivo é realizada antes da usinagem das misturas, após o aquecimento do ligante.

### 3.1.4 Fibra de celulose

Com o intuito de mitigar o escoamento excessivo do ligante asfáltico nas misturas foi utilizada a fibra de celulose Topcel (Figura 27) doadas pela empresa Betunel, com filial na cidade de Canoas/RS.

As fibras são peletizadas, conforme Figura 27, feitas de celulose natural e reciclada e, de acordo com o fabricante, são desenvolvidas para uso na produção de asfalto. São produzidas sem a adição de betume ou aditivos.

Nesta pesquisa, as fibras de celulose serão utilizadas somente nas misturas quentes a uma taxa de 0,3 % do peso total da mistura (agregados + ligante). As misturas mornas serão feitas sem a adição das mesmas.



Figura 27 - Fibras de celulose Topcel

### 3.1.5 Misturas asfálticas

Para esta pesquisa foram dosadas quatro misturas asfálticas sendo as misturas usinadas a quente, com 0,3% de fibra de celulose, as misturas de controle. Além destas, duas misturas em temperaturas intermediárias, ou mornas, foram dosadas sem a adição de fibras. A Tabela 10 apresenta um resumo das misturas utilizadas na pesquisa.

Tabela 10 - Resumo das misturas dosadas na pesquisa

<b>Mistura</b>	<b>Ligante asfáltico</b>	<b>Aditivo</b>
<b>Mistura 1 - 60/85 HMA-F</b>	AMP 60/85	0,3 % - Fibra de celulose
<b>Mistura 2 - 60/85 WMA</b>	AMP 60/85	0,4% - Evotherm
<b>Mistura 3 - 65/90 HMA-F</b>	AMP 65/90	0,3 % - Fibra de celulose
<b>Mistura 4 - 65/90 WMA</b>	AMP 65/90	0,4% - Evotherm

## 3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A Figura 28 apresenta a organização dos ensaios realizados durante a pesquisa para analisar as propriedades mecânicas e hidráulicas das misturas.

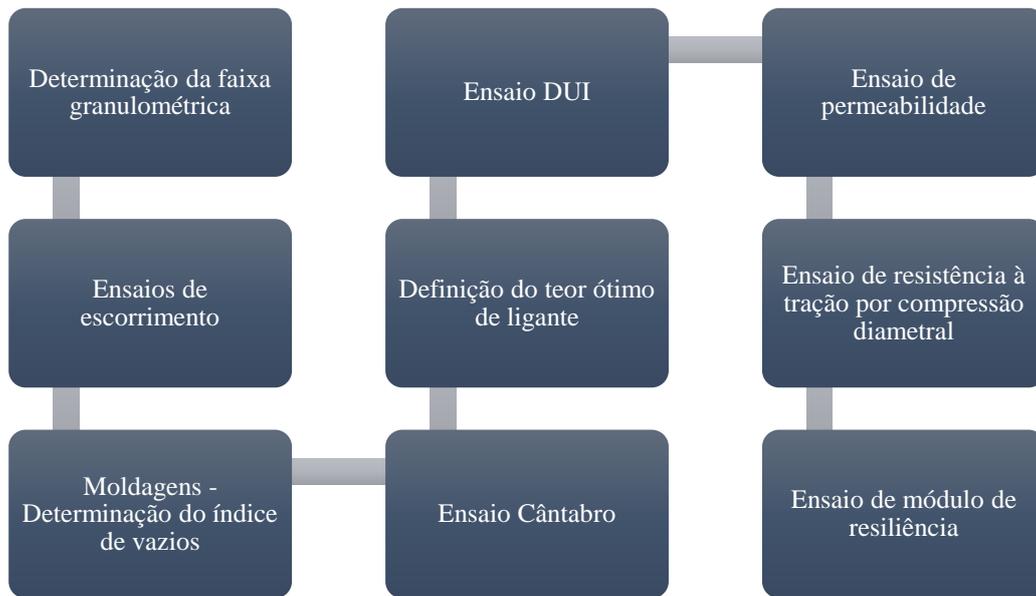


Figura 28 - Organização dos ensaios a serem realizados na pesquisa

### 3.2.1 Temperaturas de usinagem e compactação

De acordo com a norma ASTM D7064 para a maioria das misturas utilizando ligantes não modificados as temperaturas de usinagem e compactação são as necessárias para atingirem uma viscosidade de  $0,00017 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $0,00028 \text{ m}^2/\text{s}$ , respectivamente.

Entretanto para misturas que utilizam ligantes modificados por polímero ou asfalto borracha as temperaturas de usinagem e compactação são as definidas pelo fornecedor do ligante. Nas misturas mornas, uma redução de  $30^\circ\text{C}$  na temperatura dos agregados e de compactação deve ser aplicada devido à utilização de agente surfactante. A Tabela 11 apresenta as temperaturas dos ligantes indicadas pelo fornecedor bem como as temperaturas do agregado e de usinagem da mistura.

Tabela 11 – Temperaturas, em °C, dos componentes da mistura

<b>Mistura asfáltica</b>	<b>Ligante</b>	<b>Agregado</b>	<b>Temperatura de usinagem e compactação</b>
<b>Mistura 1 - 60/85 HMA-F</b>	165	175	155
<b>Mistura 2 - 60/85 WMA</b>		145	125
<b>Mistura 3 - 65/90 HMA-F</b>	170	180	160
<b>Mistura 4 - 65/90 WMA</b>		150	130

### 3.2.2 Método de dosagem ASTM D7064-13

A metodologia de dosagem de camada porosa de atrito da ASTM 7064-13 consiste em utilizar o compactador giratório Superpave para encontrar o teor ótimo de ligante asfáltico baseando-se nas propriedades volumétricas da mistura no que diz respeito ao índice de vazios e na presença de contato entre as partículas.

#### 3.2.2.1 Seleção dos ligantes asfálticos

De acordo com a ASTM D7064 a seleção do ligante asfáltico utilizado na mistura asfáltica aberta deve ser feita levando em consideração o clima e o desempenho esperado da mistura. Ainda, a especificação diz que o uso de ligantes modificados é permitido desde que apresente um PG (Performance Grade = grau de desempenho) maior que 95.

Como a especificação dos ligantes brasileiros não se dá pela utilização de graus de desempenho, a seleção dos ligantes utilizados na pesquisa foi feita levando em consideração os ligantes modificados por polímero mais utilizados no Brasil, não sendo de acordo com a especificação ASTM D7064.

#### 3.2.2.2 Seleção da composição granulométrica

A definição da composição granulométrica seguindo a ASTM D7064 é feita a partir de três composições distintas. Para cada composição escolhida um teor de ligante entre 6 e 6,5% deve ser utilizado e, no mínimo, dois corpos de prova devem ser compactados no CGS. De acordo com a norma, a granulometria ótima é aquela que garante contato entre as partículas dos agregados.

Apesar da norma utilizada possuir sua própria metodologia para obtenção da granulometria das misturas, optou-se por utilizar a faixa V da norma DNER – ES 386/99, conforme Tabela 12.

Essa decisão tem como base o fato de que procura-se adequar as misturas à realidade brasileira em que a faixa V é comumente utilizada.

Tabela 12 - Composição da faixa granulométrica

<b>Peneira de malha quadrada</b>		<b>% passante em peso</b>
<b>ABNT</b>	<b>Abertura, mm</b>	<b>Faixa V</b>
<b>3/4"</b>	19	100
<b>1/2"</b>	12,5	70 - 100
<b>3/8"</b>	9,5	50 - 80
<b>N 4</b>	4,8	18 - 30
<b>N 10</b>	2	10 - 22
<b>N 40</b>	0,42	6 - 13
<b>N 80</b>	0,18	-
<b>N 200</b>	0,075	3 - 6

(fonte: adaptado de DNER-ES 386/99)

### 3.2.2.3 Compactação dos corpos de prova

A compactação dos corpos de prova é realizada através de um compactador giratório Superpave (Figura 29). Após misturadas as amostras devem ser envelhecidas de acordo com a AASHTO R30. O envelhecimento é realizado colocando-se as misturas na estufa pelo período de duas horas na temperatura de compactação, previamente definida.

Depois de envelhecidas as amostras são levadas ao molde do compactador onde serão compactadas por amassamento através de 50 giros do mesmo.



Figura 29 - Compactador giratório Superpave

#### 3.2.2.4 Definição do teor ótimo de ligante

Definidos os ligantes asfálticos que serão utilizados e a granulometria dos agregados parte-se para a determinação do teor de ligante de projeto da mistura através da avaliação de, no mínimo, três teores de ligante com incrementos de 0,5%. Baseando-se no desempenho de cada teor de asfalto nos ensaios de escorrimento do ligante e índice de vazios obtém-se o teor ótimo. Ainda, o ensaio de abrasão cântabro pode ser levado em consideração na tomada de decisão. Nesta pesquisa os resultados do ensaio de abrasão Cantabro foram levados em consideração na definição do teor ótimo de ligante asfáltico.

#### 3.2.3 Ensaio de escorrimento do ligante asfáltico

O ensaio de escorrimento do ligante asfáltico é realizado de acordo com a ASTM D6390. O ensaio consistiu em colocar uma amostra de mistura asfáltica não compactada de aproximadamente  $1200 \pm 200\text{g}$  em uma cesta, com dimensões especificadas em norma, conforme Figura 30, sobre uma bandeja.

A norma do ensaio requer que, no mínimo, duas amostras sejam utilizadas para cada teor de ligante. Sendo assim, as amostras desse ensaio foram misturadas separadamente para que se evitasse a distribuição desigual de finos em cada cesta utilizada no ensaio. Optou-se por esse modelo de mistura pois quando misturadas juntas, às vezes, notou-se uma variação significativa dos resultados entre uma amostra e outra de um mesmo teor.

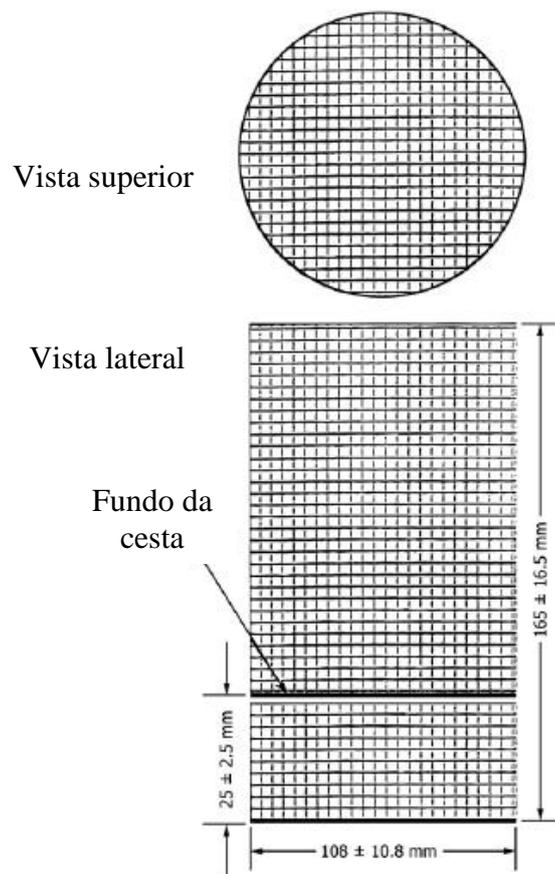


Figura 30 - Esquema da cesta de escoamento (Fonte: ASTM D6390-13)

As amostras do ensaio de escoamento foram obtidas utilizando-se uma cuba misturadora com capacidade para 10 kg equipada com um sistema de aquecimento e uma pá giratória automática, conforme Figura 31. Apesar do sistema contar com a pá misturadora, a mesma não pode ser utilizada pois a quantidade de material não era suficiente para que ocorresse a correta homogeneização da mistura. Sendo assim, os agregados e ligante foram misturados manualmente após serem colocados na cuba.



Figura 31 - Cuba com sistema de aquecimento e pá automática

As frações dos agregados minerais, exceto os finos, eram adicionados à cuba juntamente com as fibras de celulose (para as misturas do tipo HMA). Posteriormente à adição das fibras misturava-se o material por alguns segundos para que houvesse a quebra dos pellets e a mistura da fibra aos agregados graúdos. A fração fina era então adicionada à cuba e ocorria a homogeneização das frações dos agregados evitando a perda de material fino.

Após a mistura dos agregados, o ligante asfáltico era adicionado à cuba. A Figura 32 mostra o processo de mistura dos agregados e, posteriormente a adição do ligante asfáltico. O processo de mistura era realizado até que fosse visível que todas as partículas de agregado e fibras, nas misturas quentes, estivessem cobertas por ligantes asfáltico.



Figura 32 - Homogeneização dos materiais para mistura

Depois de misturadas, as amostras foram colocadas em cestas confeccionadas com malha de abertura 6,3 mm, conforme Figura 33. O conjunto era colocado em estufa pelo período de  $1h \pm 5 \text{ min}$  na temperatura de usinagem da mistura.



Figura 33 - Amostra acondicionada na cesta de abertura 6,3 mm

A norma coloca que o ensaio deve também ser realizado em uma temperatura 10°C acima da temperatura de usinagem para prever uma possível mudança de temperatura na usina. Entretanto, a realização do ensaio para a segunda temperatura não é prática comum em trabalhos acadêmicos, como foi constatado durante a revisão da literatura. Sendo assim, optou-se por realizar o ensaio apenas na temperatura de usinagem dado que as condições de mistura no laboratório são controladas.

Ao final do período retira-se o conjunto da estufa e pesa-se a bandeja com o ligante escorrido da cesta, caso haja. A Figura 34 mostra as bandejas após o tempo de permanência das amostras na estufa para diferentes teores de ligante asfáltico.

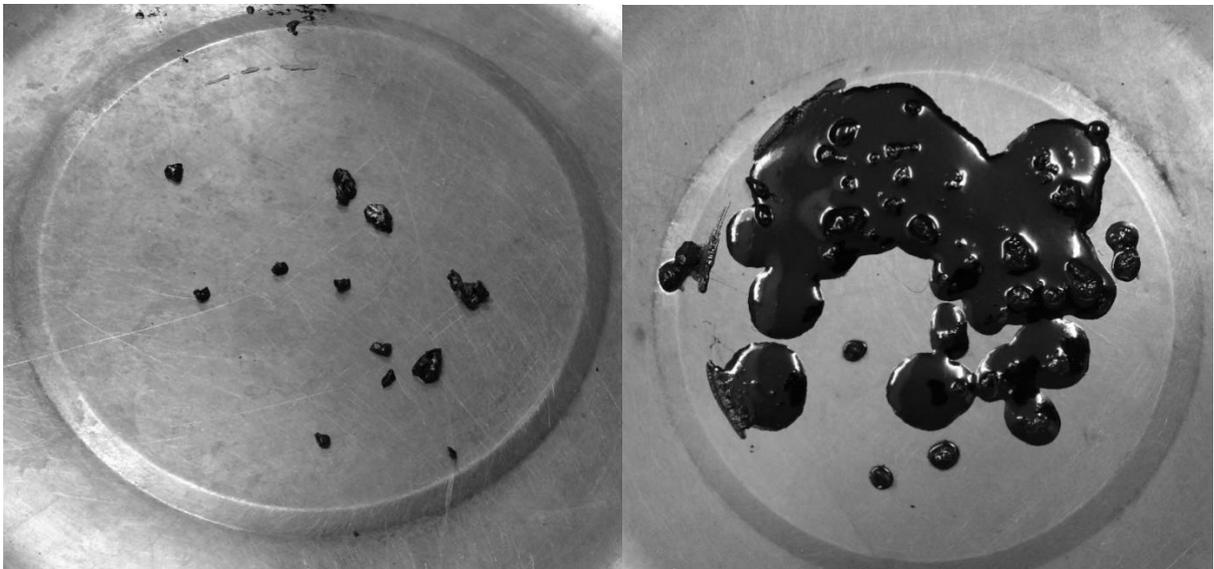


Figura 34 - Bandejas com diferentes porcentagens de escorrimento após 1 hora

O cálculo do escorrimento é dado pela equação 1.

$$\text{Escorrimento (\%)} = \frac{(D-C)}{(B-A)} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

A: Peso da cesta vazia;

B: Peso da cesta contendo a amostra;

C: Massa da bandeja;

D: Massa da bandeja contendo o material escorrido.

Um escorrimento máximo de 0,3% é aceito pela ASTM D7064 para misturas porosas.

### 3.2.4 Determinação da porcentagem de vazios das misturas

A obtenção de um índice de vazios suficiente é indispensável para assegurar a capacidade de drenagem de uma camada porosa de atrito. Embora a forma do agregado e o teor de asfalto contribuam nesse quesito, a granulometria dos agregados é um fator importante e afeta o índice de vazios (LIU E CAO, 2009).

O cálculo do índice de vazios da mistura é realizado utilizando a equação 2. De acordo com a norma ASTM D7064 um índice de 18 %, no mínimo, deve ser atingido.

$$V_v = 100 \times \left( 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (2)$$

Onde:

$V_v$ : índice de vazios (%);

$G_{mb}$ : densidade aparente da mistura compactada;

$G_{mm}$ : densidade máxima medida da mistura.

A determinação da densidade aparente da mistura compactada foi determinada através do método de ensaio DNER-ME 117/94. Já a densidade máxima medida da mistura foi encontrada utilizando-se o ensaio Rice.

Primeiramente, os corpos de prova são pesados ao ar e após são envolvidos com fita adesiva e pesados novamente. Após aplicação da fita adesiva o corpo de prova é envolvido em um filme de parafina e pesado novamente. Na sequência, obtém-se o peso do corpo de prova com fita e parafina submerso em água a 25°C.

### 3.2.5 Porcentagem de vazios comunicantes

A porcentagem de vazios comunicantes de uma mistura porosa é de grande valia dado que mostra a eficácia da mistura no que diz respeito à permeabilidade. Como citado anteriormente,

são os vazios contínuos da mistura que fazem com que haja a percolação de água ao longo da espessura de revestimento CPA.

Para a determinação do índice de vazios comunicantes das misturas analisadas neste trabalho, foram adotados os procedimentos da Associação das Rodovias do Japão (1996) Apud Oliveira (2003).

Primeiramente os corpos de prova foram medidos com um paquímetro (altura e diâmetro) para que o volume dos mesmos possa ser determinado. Os corpos de prova são pesados ao ar ( $M_{AR}$ ) e posteriormente submersos em água por um minuto ( $M_{CPi}$ ). Calcula-se então o volume dos agregados e poros independentes ( $V_{AG+Pi}$ ), em  $cm^3$ , através da equação 3.

$$V_{AG+Pi} = \frac{M_{AR} - M_{CPi}}{\rho_{\text{água}}} \quad (3)$$

Depois de obter o volume de agregados e poros isolados calcula-se o percentual de vazios comunicantes através da equação 4.

$$P_{Vcom} = \left( \frac{V_{CP} - V_{AG+Pi}}{V_{CP}} \right) \times 100 \quad (4)$$

### 3.2.6 Ensaio Cântabro

Segundo Fonseca (1998), o ensaio Cântabro tem como objetivo a perda por desgaste da camada de rolamento.

A norma reguladora do ensaio no Brasil é a especificação DNER – ME 383/99 que consiste em pesar o corpo de prova e anotar seu peso e depositar o mesmo dentro do equipamento Los Angeles sem as esferas de aço. O corpo de prova é então submetido a 300 revoluções a uma velocidade que pode variar de 30 a 33 rpm à uma temperatura de 25°C.

O CP é retirado do tambor, conforme Figura 35(a), após as revoluções e pesado novamente. A diferença entre o peso inicial e o final dá a perda por abrasão que o corpo de prova sofreu. O cálculo do desgaste é feito a partir da equação 5.

$$A = \left( \frac{P - P'}{P} \right) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

A: desgaste por abrasão Cântabro, com aproximação de 1%;

P: peso do corpo de prova não submetido ao ensaio;

P': peso do corpo de prova após a realização do ensaio.



(a)

(b)

Figura 35 - (a) Corpo de prova antes do ensaio Cântabro (b) Corpo de prova depois do ensaio Cântabro

A ASTM D7064 coloca o ensaio Cântabro como opcional por não ser um procedimento muito utilizado nos Estados Unidos. No entanto a perda por abrasão em corpos de prova não condicionados não deve exceder 20%.

### 3.2.7 Ensaio de dano por umidade induzida

O ensaio de dano por umidade induzida (DUI) é realizado de acordo com a norma AASHTO T283.

O ensaio é realizado com seis corpos de prova com dimensões de 100x63,5mm. Destes, três formam o subgrupo de controle e são imersos em água por 2 horas a 25 °C e os outros três são o subgrupo condicionado, submetidos a ciclos de congelamento e descongelamento de 16 horas a -18°C e 24 horas a 60°C, respectivamente. Ao final dos ciclos todas as amostras são ensaiadas para determinação da resistência à tração indireta.

Algumas modificações devem ser feitas no ensaio já que a norma cobre somente ensaios em misturas com índice de vazios de 7%. As modificações apresentadas pela ASTM D7064 são:

- Conduzir o ensaio com cinco ciclos de congelamento e descongelamento ao invés de um;
- Compactar os corpos de prova com 50 giros no CGS;
- Aplicar vácuo de 87,8 kPa durante 10 minutos para saturar o corpo de prova a qualquer nível de saturação (Figura 36);



Figura 36 - Corpos de prova submetidos à aplicação de vácuo

- Submergir os corpos de prova em água durante os ciclos de congelamento para manter a saturação (Figura 37).



Figura 37 - Corpos de prova submersos para iniciar o ciclo de congelamento

O dano por umidade induzida é dado pela relação entre a resistência à tração por compressão diametral do corpo de prova do subgrupo condicionado e a resistência do subgrupo de controle, conforme equação 6.

$$RRT = \frac{RT_C}{RT_{SC}} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

RRT – resistência retida à tração (%);

$RT_C$  – resistência à tração média dos corpos de prova condicionados (Mpa);

$RT_{SC}$  – resistência à tração média dos corpos de prova sem condicionamento (Mpa).

De acordo com a ASTM D7064, uma relação mínima de 80% deve ser atingida. Apesar da ASTM D7064 colocar que o ensaio deva ser realizado com cinco ciclos de congelamento e descongelamento, optou-se por realizar o ensaio com apenas um ciclo.

### 3.2.8 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade para os corpos de prova utilizados nessa pesquisa será realizado utilizando um permeâmetro de carga variável sobre placas de camada porosa de atrito moldadas no Laboratório de Pavimentação da UFRGS.

Para a realização do ensaio de permeabilidade foi necessário a moldagem de placas de concreto asfáltico em um molde metálico com 588,44 mm de comprimento, 691,4 mm de largura e 80 mm de altura com um positivo com as dimensões mostradas na Figura 38.

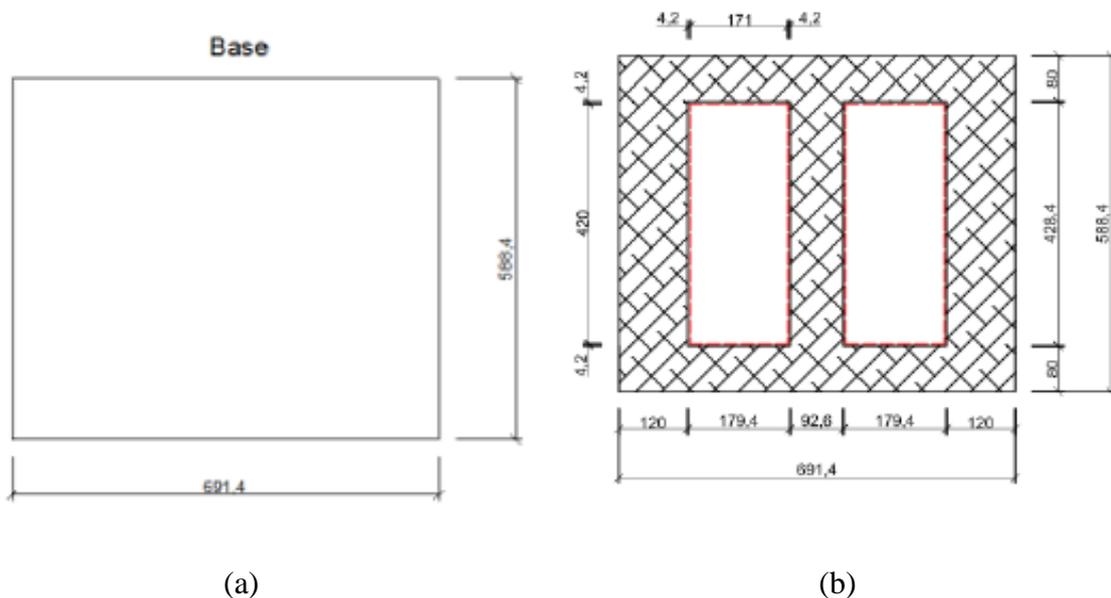


Figura 38 – (a) Molde utilizado na produção das placas utilizadas no ensaio de permeabilidade (b) Positivo utilizado para usinagem das placas (Colpo, 2014)



Para que não ocorresse aderência da massa asfáltica com o positivo, o mesmo foi coberto com um molde feito de papel pardo, para que a retirada da placa fosse facilitada, conforme



Figura 39 - Uso de papel pardo no positivo para que não ocorresse aderência da massa asfáltica com o molde

#### 3.2.8.1 Produção da mistura para as placas

A produção das misturas asfálticas para a moldagem das placas seguiu as características de projeto de dosagem utilizadas na moldagem dos corpos de prova com dimensões Marshall no compactador. A quantidade de material necessária para o preenchimento do molde foi obtida através da densidade máxima medida de cada mistura.

Assim como na moldagem dos corpos de prova, os agregados e o ligante foram aquecidos nas suas respectivas temperaturas e adicionados ao misturador de laboratório *Laboratory Mixer - Infratest*, conforme Figura 40.



(a)



(b)

Figura 40 - (a) Misturador alemão utilizado na usinagem da mistura; (b) Agregados, ligante e aditivo na cuba de mistura.

Após a mistura, a massa asfáltica foi pesada em uma balança eletrônica para que o peso necessário fosse colocado no interior do molde. Este processo foi realizado o mais rápido possível para evitar que não houvesse perda de temperatura da mistura antes que a compactação fosse realizada. Durante o preenchimento do molde com a massa asfáltica tomou-se cuidado para que o mesmo fosse completamente preenchido com a mistura, sem que apresentasse espaços vazios. O processo de preenchimento do molde é mostrado na Figura 41.



Figura 41 - Processo de preenchimento do molde com a mistura asfáltica

### 3.2.8.2 Compactação das placas

Para a compactação das placas foi utilizado um rolo compactador composto de tambores de aço, conforme Figura 42.



Figura 42 - Rolo compactador utilizado na compactação das placas

A compactação era realizada até o momento em que o material ficasse no nível do molde, conforme Figura 43.



Figura 43 - Procedimento de compactação das placas

Após a compactação, as placas permaneceram nos moldes até que atingissem o completo resfriamento para que a retirada das mesmas do molde fosse realizada de forma correta.

### 3.2.8.3 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado utilizando-se um permeâmetro de carga variável, mostrado na Figura 44. O equipamento é constituído de um tubo de acrílico com uma abertura na face inferior e possui um anel de borracha rígida na área de contato com o pavimento

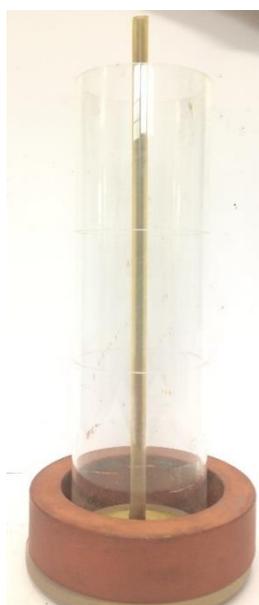


Figura 44 - Permeâmetro de carga variável utilizado no ensaio de permeabilidade nas placas de CPA

Devido à macrotextura irregular da superfície da placa, o anel de borracha rígida não foi capaz de fazer com que a água percolasse exclusivamente na abertura inferior do permeâmetro. Na primeira tentativa de ensaio grande parte da água escoava pela superfície da placa. Sendo assim,

optou-se por utilizar silicone no anel de vedação para que a água fosse forçada a percolar pela placa quando o tampão fosse retirado. A aplicação do silicone era feita como mostrado na Figura 45 e o conjunto era deixado em repouso por 24 horas.



Figura 45 - Aplicação de silicone para vedação no anel de borracha rígida do permeâmetro

Para realização do ensaio, com o tampão posicionado na abertura do permeâmetro, primeiramente enchia-se o tubo de acrílico até a marca superior. Após o tampão era retirado e o cronômetro acionado para obter o tempo que a água levava para atingir a segunda marca, mais abaixo.

Sendo as dimensões do permeâmetro conhecidas, calcula-se a permeabilidade através da equação 7.

$$k = \frac{V}{(a \times t)} \quad (7)$$

Onde:

k: Permeabilidade vertical, em cm/s;

V: Volume de água escoado, em cm<sup>3</sup>;

a: Área da seção transversal, em cm<sup>2</sup>;

t: Tempo para o fluxo entre as duas marcas, em segundos;

Segundo a ASTM D7064-13 uma permeabilidade de 100 m/dia (0,116 cm/s) ou superior é recomendada.

#### 3.2.8.4 Controle de qualidade das placas

Com o intuito de verificar a representatividade das placas moldadas para o ensaio de permeabilidade, foram realizados ensaios de volumetria e extração de ligante asfáltico, para obtenção do teor de asfalto das misturas.

Para realização da volumetria das placas foi necessário que as mesmas fossem serradas. Optou-se por realizar esse procedimento diante da incapacidade de realizar o ensaio de volumetria na placa inteira, devido às suas grandes dimensões e peso. A serragem foi executada com auxílio de uma serra com disco, conforme Figura 46.



Figura 46 - Serra utilizada para o corte das placas de CPA

As placas foram cortadas em quatro corpos de prova, sendo que a porcentagem de vazios foi obtida para cada corpo de prova. Ainda, foram retiradas duas amostras de aproximadamente 250g cada para a obtenção do teor de ligante asfáltico. A Figura 47 mostra a aparência de um dos corpos de prova após o corte.



Figura 47 - Corpo de Prova serrado

### 3.2.9 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Segundo Medina e Mota (2015), o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi originalmente desenvolvido para determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland e vem sendo utilizado para determinar a resistência à tração indireta de misturas asfálticas desde 1980.

É comumente referido como “ensaio brasileiro” e consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram tensões de tração perpendiculares ao diâmetro, conforme Figura 48 (BERNUCCI et al., 2008). O ensaio é padronizado pela ABNT NBR 15087/2012 e DNER-ME 136/2010.

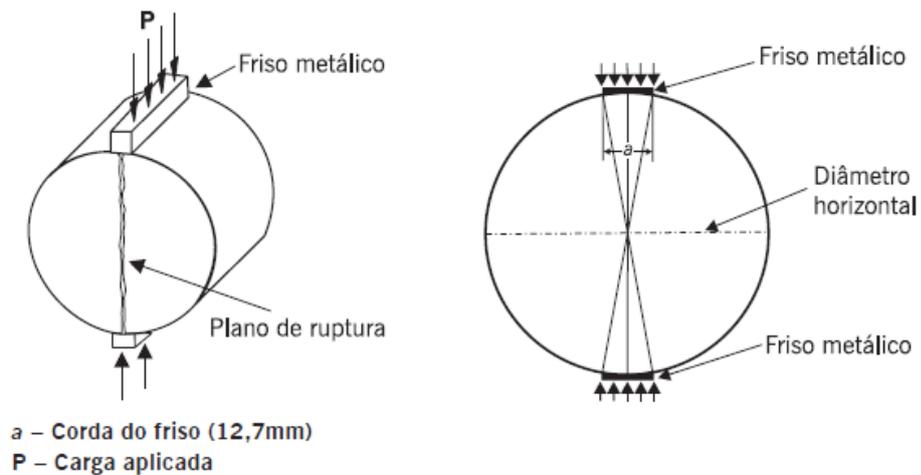


Figura 48 - Esquema do ensaio de compressão diametral (Fonte: Bernucci et al., 2008)

A resistência à tração é dada pela equação 8.

$$\sigma = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (8)$$

Onde:

$\sigma$ : Tensão de tração (MPa);

F: Carga de compressão de ruptura (N);

D: Diâmetro da amostra (cm);

H: Altura da amostra (cm).

Previamente ao ensaio, o corpo de prova deve ser mantido por, no mínimo, 4 horas apoiado sobre uma geratriz com temperatura controlada de 25°C. Ao término desse período o CP é colocado em um dispositivo centralizador e levado à prensa, conforme Figura 49.



Figura 49 - Ensaio de resistência à tração

A carga é aplicada a uma velocidade de 0,8 mm/s até a ruptura da amostra, caracterizada pela separação das duas metades do CP, que possui dimensões de 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura.

### 3.2.10 Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral

No ensaio de compressão diametral de cargas repetidas há a deformação do corpo de prova devido à aplicação de uma carga, que causa compressão na vertical e tração na horizontal transversal ao plano de aplicação da carga. Mede-se, então, o deslocamento recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada e a uma dada temperatura (BERNUCCI et al., 2008; MEDINA E MOTTA, 2015).

A norma utilizada para a realização do ensaio de módulo de resiliência é a norma DNIT 135/2010 – ME que coloca o MR como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação resiliente sofrida pelo CP.

O equipamento utilizado no ensaio funciona no interior de uma câmara com temperatura controlada, conforme Figura 50, sendo composto de um pistão que aplica carregamentos

dinâmicos no CP com a ajuda de um dispositivo pneumático anexado a um regulador de frequência.



Figura 50 - Corpo de prova posicionado na câmara com temperatura controlada para o ensaio de módulo de resiliência

Os corpos de prova utilizados para o ensaio de módulo de resiliência devem ser compactados com dimensões Marshall. O ensaio é realizado a 25°C com carregamento dinâmico com 0,1s de carga e 0,9s de descanso. Ainda, as deformações são medidas utilizando-se um LVDT. O cálculo é realizado utilizando a equação 9.

$$MR = \frac{P_{cíclica}}{|\Delta H_{inst}|t} \times (0,27 + \mu_{inst}) \quad (9)$$

Onde:

MR: Módulo de resiliência do ciclo do ensaio, em MPa;

$P_{cíclica}$ : Carga cíclica, em N;

$\Delta H_{inst}$ : deslocamento horizontal instantâneo, em mm;

t: altura do corpo de prova, em mm;

$\mu_{inst}$ : coeficiente de Poisson.

Segundo Bernucci et al. (2008), o coeficiente de Poisson independe do tipo de carregamento, mas é variável com a temperatura. Os autores colocam o valor de 0,3 como sendo um valor comum no Brasil.

A Tabela 13 mostra um resumo da quantidade de CPs moldados na pesquisa.

Tabela 13 - Resumo dos ensaios realizados na pesquisa com número de amostras

<b>Ensaio</b>	<b>60/85 - HMA com fibras</b>	<b>60/85 - WMA sem fibras</b>	<b>65/90 - HMA com fibras</b>	<b>65/90 - WMA sem fibras<sup>1</sup></b>	
<b>Escorrimento</b>	10	10	10	30	
<b>Parâmetros volumétricos</b>	15	15	15	15	
<b>Ensaio Cantabro<sup>2</sup></b>					
<b>Ensaio Cantabro condicionado</b>	3	3	3	3	
<b>Dano por Umidade Induzida (DUI)</b>	6	6	6	6	
<b>Resistencia à Tração (RT)</b>	3	3	3	3	
<b>Módulo de Resiliência (MR)<sup>3</sup></b>	3	3	3	3	
<b>Permeabilidade</b>	1	1	1	1	
<b>Total de amostras com dimensão Marshall</b>	39	39	39	59	<b>176</b>
<b>Total de placas</b>	1	1	1	1	<b>4</b>

1 – Compreende 10 corpos de prova com cal calcítica, 10 com cal dolomítica e 10 sem adição de cal.

2 – Os corpos de prova utilizados para o ensaio Cantabro foram os mesmos utilizados para a determinação dos parâmetros volumétricos da mistura correspondente.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo todos os resultados obtidos durante a pesquisa são abordados juntamente com sua análise. Primeiramente, é apresentada a curva granulométrica das misturas seguida dos resultados de ensaios de escorrimento, Cantabro, porcentagem de vazios e vazios comunicantes; além dos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e resistência à tração. São também expostos os resultados dos ensaios de permeabilidade e dano por umidade induzida das quatro misturas estudadas.

### 4.1 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

O traço da mistura foi composto de 45% de brita  $\frac{3}{4}$ ", 35% de brita  $\frac{3}{8}$ ", 18% de pó-de-pedra e 2% de cal calcítica. Como pode ser analisado na Figura 51, o traço atende aos limites impostos à faixa V pela norma DNER-ES 386/99.

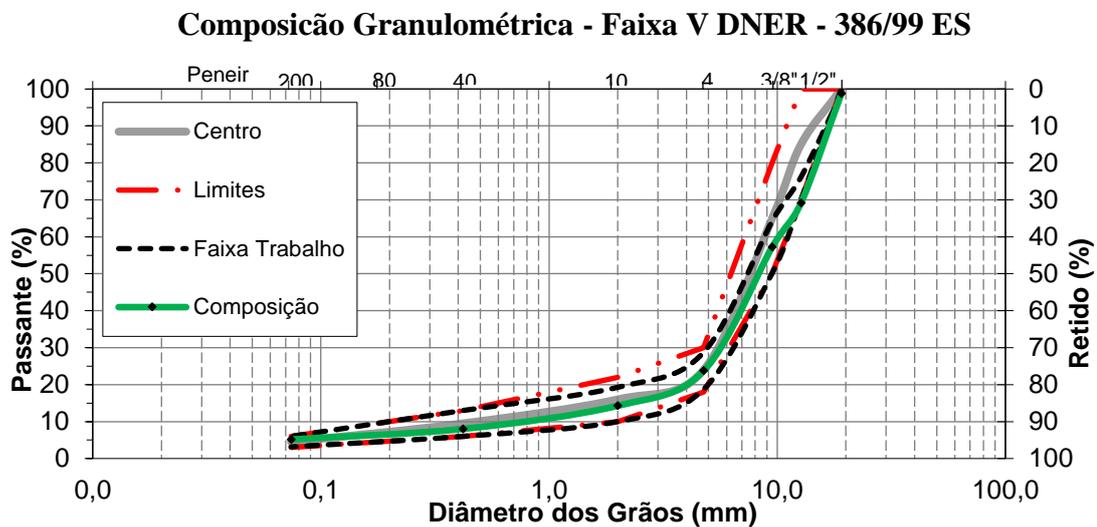


Figura 51 - Curvas da composição granulométrica com o uso de cal

Para a mistura 4 foi necessário o ajuste da curva granulométrica visto que o uso da cal não se mostrou vantajoso. A Figura 52 mostra a curva granulométrica da composição com 45% de brita  $\frac{3}{4}$ ", 32% de brita  $\frac{3}{8}$ ", 23% de pó-de-pedra.

### Composição Granulométrica - Faixa V DNER - 386/1999 ES

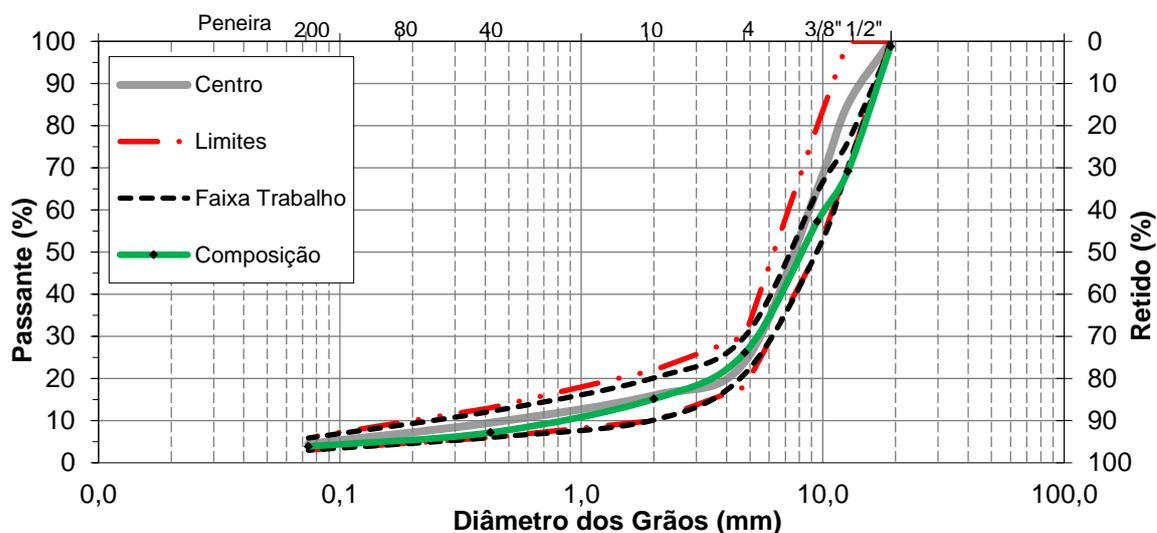


Figura 52 - Curvas da composição granulométrica da Mistura 4 sem cal

A Tabela 14 mostra a faixa de trabalho permitida pela especificação de serviço DNER 386/99. Ainda, na mesma tabela, pode ser vista a composição granulométrica de projeto utilizada para as misturas com cal e para a mistura sem o uso da cal. Percebe-se que, com a retirada da cal houve um decréscimo na presença de materiais finos como os retidos nas peneiras de número 40 e 200.

Tabela 14 - Composição granulométrica das misturas com e sem cal

Peneira	Abertura (mm)	Limites	Centro da faixa	Faixa de Trabalho		Mistura sem cal	Mistura com cal
3/4"	19,1	100	100	100,0	98,8	98,8	98,8
1/2"	12,7	90-100	85	70,0	76,1	70,8	70,8
3/8"	9,50	78-92	65	50,2	64,2	57,2	57,2
n 4	4,76	28-42	24	21,1	30,0	26,1	23,8
n 10	2,00	14-24	16	10,1	20,1	15,1	14,3
n 40	0,42	8-17	10	6,0	12,2	7,2	8,0
n 200	0,074	2-7	5	3,0	5,9	3,9	5,2

## 4.2 ENSAIO DE ESCORRIMENTO DE LIGANTE – *DRAINDOWN*

O ensaio de escorrimento foi realizado na temperatura de usinagem das misturas, sendo as misturas HMA com fibras e as WMA sem fibras de celulose.

Analisando a Figura 53, nota-se que o valor de escorrimento da mistura 2 é, na maioria dos casos, levemente superior ao da mistura 1. A análise dos resultados mostra que misturas mornas são capazes de apresentar resultados satisfatórios quando comparadas com misturas quentes utilizando fibras de celulose, ultrapassando o limite máximo de 0,3% imposto pela ASTM D7064 apenas no teor de 6,5%.

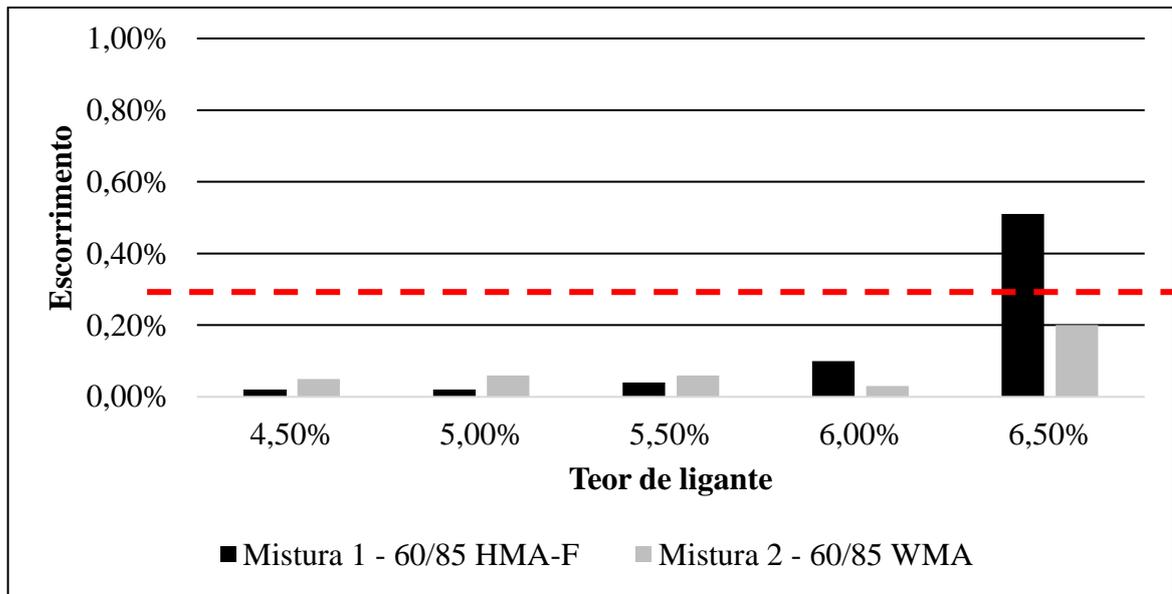


Figura 53 - Resultados dos ensaios de escorrimento para misturas com ligante AMP 60/85

A Figura 54 mostra os resultados obtidos para os ensaios de escorrimento na mistura quente com fibra de celulose utilizando-se o ligante AMP 65/90. Nota-se uma semelhança com o ligante AMP 60/85 onde há um escorrimento próximo de zero nos primeiros teores seguido de um leve aumento até 5,5%. Nos dois últimos teores o valor atinge o pico no teor de 6,5%, mostrando que há excesso de ligante mesmo após a absorção de parte do mesmo pelas fibras de celulose adicionadas à mistura.

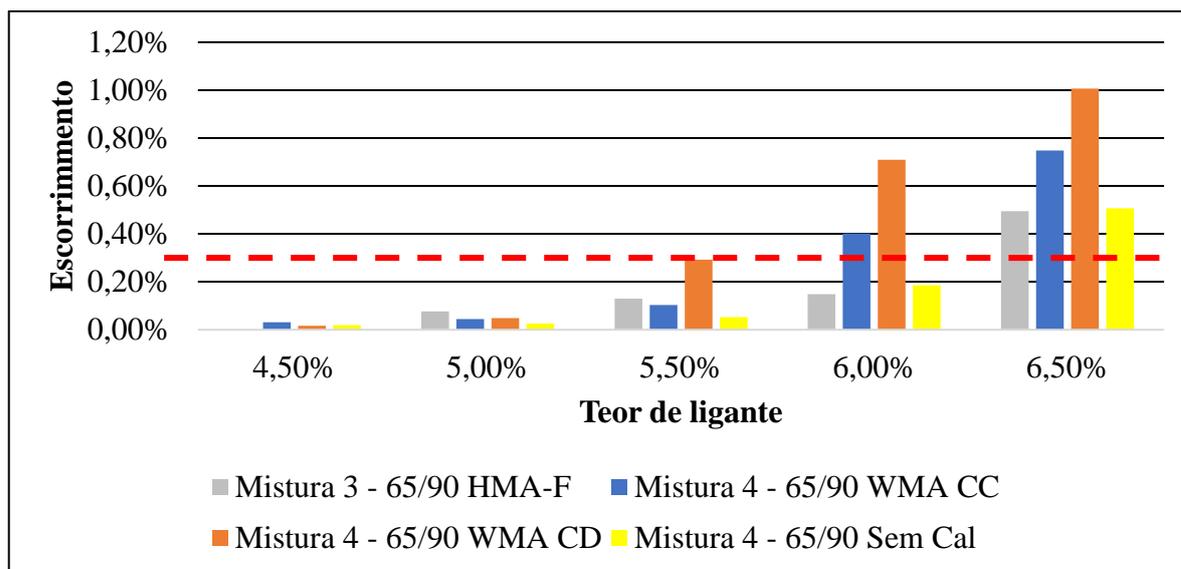


Figura 54 - Resultados dos ensaios de escorrimento para misturas com ligante AMP 65/90

Inicialmente a Mistura 4, dosada com ligante AMP 65/90, apresentava a mesma composição granulométrica que a Mistura 2, dosada com AMP 60/85 e utilizando cal calcítica. Entretanto, quando comparados, os valores de escorrimento nos teores de ligante mais altos observou-se uma tendência de piora nos resultados das misturas com ligante AMP 65/90.

Sendo assim, uma investigação foi feita para constatar se a cal calcítica utilizada na mistura tinha alguma influência na piora dos resultados de um ligante que, por ser mais viscoso, deveria apresentar valores de escorrimento inferiores ao do AMP 60/85. Para tal, duas misturas foram dosadas: em uma substituiu-se a cal calcítica pela cal dolomítica sem alteração nas frações granulométricas e na outra não se adicionou qualquer cal e ajustou-se a curva granulométrica, para que houvesse semelhança entre a mesma e as correspondentes às composições com cal.

Novamente analisando a Figura 54 nota-se que com o uso da cal dolomítica não houve alteração significativa nos valores de escorrimento nos teores de 4,5% e 5%. Entretanto, houve considerável aumento dos valores de escorrimento do teor de 5,5% a 6,5% quando comparados com os valores apresentados com a cal calcítica.

Também, ainda comparando os resultados com a mistura com cal calcítica, a retirada da cal da mistura morna fez com que os valores de escorrimento diminuíssem nas amostras com teores de ligante de 4,5% a 6,5%, porém nos teores de 6% e 6,5% o desempenho apresentado foi inferior ao observado na mistura Mistura 2, com ligante AMP 60/85 e cal calcítica (Figura 53).

Os resultados obtidos mostram que o uso de cal calcítica em misturas mornas abertas com AMP 60/85 é viável, porém a utilização de cales em misturas mornas do tipo CPA quando o ligante empregado é o AMP 65/90 não apresenta vantagem, possivelmente devido a algum tipo de reação que ocorre entre as cales, o agente surfactante e o polímero utilizado para modificar o ligante. Sendo assim, optou-se por adotar a composição sem incorporação de cal na mistura 4.

Uma hipótese levantada para justificar os valores inferiores de escorrimento da Mistura 4 sem cal, em relação aos resultados da mesma mistura com as cales, foi a de que a modificação da curva granulométrica com maior teor de pó de pedra tenha influenciado nos resultados dos ensaios. Entretanto, por mais que o teor de pó de pedra tenha sido ajustado de 18% para 23%, não houve um aumento na quantidade de finos na mistura. Conforme pode ser visto na Tabela 14, as quantidades de agregados das peneiras de número 40 e 200 são inferiores na mistura sem cal, quando comparados à mistura com cal.

Após a realização dos ensaios e análise dos resultados obtidos, optou-se por adotar a mistura sem cal para a Mistura 4, dosada com AMP 65/90.

### 4.3 PORCENTAGEM DE VAZIOS

A determinação da porcentagem de vazios de uma camada porosa de atrito é de extrema importância já que suas propriedades estão diretamente ligadas a essa propriedade. Misturas do tipo camada porosa de atrito devem possuir uma porcentagem de vazios de, no mínimo, 18% de acordo com a ASTM D7064. Os resultados podem ser vistos na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e, posteriormente, nos gráficos da Figura 55 e da Figura 56.

Mistura	Teor de asfalto, %				
	4,5	5	5,5	6	6,5
Mistura 1 - 60/85 HMA-F	19,51	19,03	19,25	18,55	-
Mistura 2 - 60/85 WMA	20,4	20,4	19,2	19,69	18,2
Mistura 3 - 65/90 HMA-F	19,49	19,95	18,95	18,18	-
Mistura 4 - 65/90 WMA	21	20,1	20,4	20	-

A Figura 55 mostra os resultados obtidos para a porcentagem de vazios dos teores de asfalto estudados nesta pesquisa para as misturas quente e morna dosadas com AMP 60/85. Uma rápida

análise revela que todos os teores estudados atingem o mínimo de 18% de vazios exigidos pela norma utilizada para a dosagem da mistura com valores variando de 18,8% a 19,8% para a mistura quente e de 19,4% a 21,6% para a mistura morna

Pela análise do gráfico pode-se constatar a influência que as fibras têm nessa propriedade fazendo com que a porcentagem de vazios das misturas aumente com a sua retirada e sua substituição pelo agente surfactante.

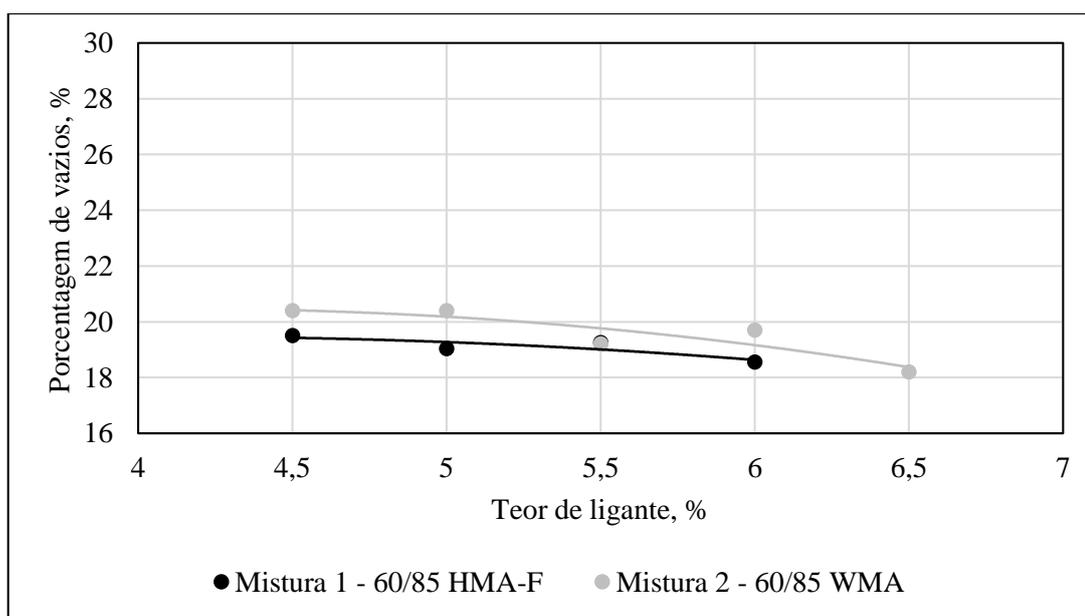


Figura 55 - Porcentagem de vazios em função do teor de ligante – misturas com AMP 60/85

A Figura 56 mostra os resultados de porcentagem de vazios para os corpos de prova dosados com AMP 65/90. Pela análise da mesma nota-se um comportamento bastante semelhante ao observado na Figura 55 com ligante AMP 60/85 evidenciando ainda mais que a retirada das fibras aumenta a porosidade da mistura asfáltica.

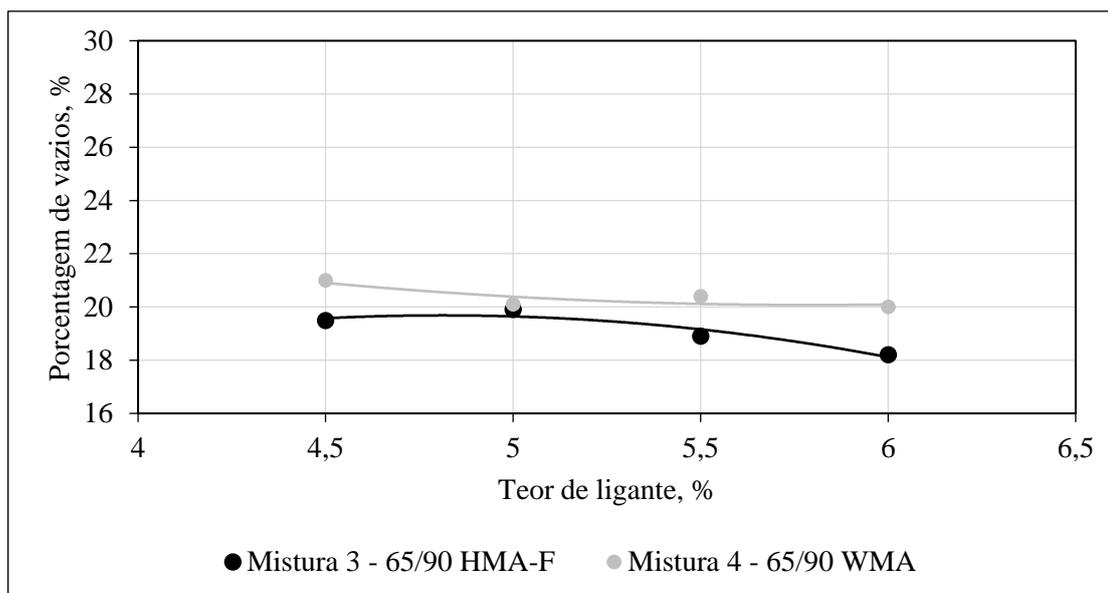


Figura 56 - Porcentagem de vazios em função do teor de ligante para misturas com AMP 65/90

#### 4.4 PORCENTAGEM DE VAZIOS COMUNICANTES

A Tabela 15 mostra os resultados obtidos no ensaio para a determinação dos vazios comunicantes das quatro misturas. Os vazios comunicantes são importantes, pois são eles que garantem uma percolação satisfatória da água através da camada porosa de atrito.

Tabela 15 - Resultados de vazios comunicantes das misturas estudadas

Teor de ligante	Vazios comunicantes			
	Mistura 1 - 60/85 HMA-F	Mistura 2 - 60/85 WMA	Mistura 3 - 65/90 HMA-F	Mistura 4 - 65/90 WMA
4,5%	14,8%	16,1%	18,3%	19,2%
5%	14,6%	18,1%	17,3%	19,1%
5,5%	13,2%	15,8%	17,2%	19,0%
6%	13,0%	16,5%	15,4%	16,9%
6,5%	-	14,9%	-	-

Pela análise da Figura 57 nota-se uma redução dos vazios comunicantes das misturas quente e morna com o teor de ligante, o que já era esperado. Além disso, a tendência é de as misturas

mornas sem as fibras apresentarem porcentagem de vazios comunicantes superior aos correspondentes às misturas quentes de referência.

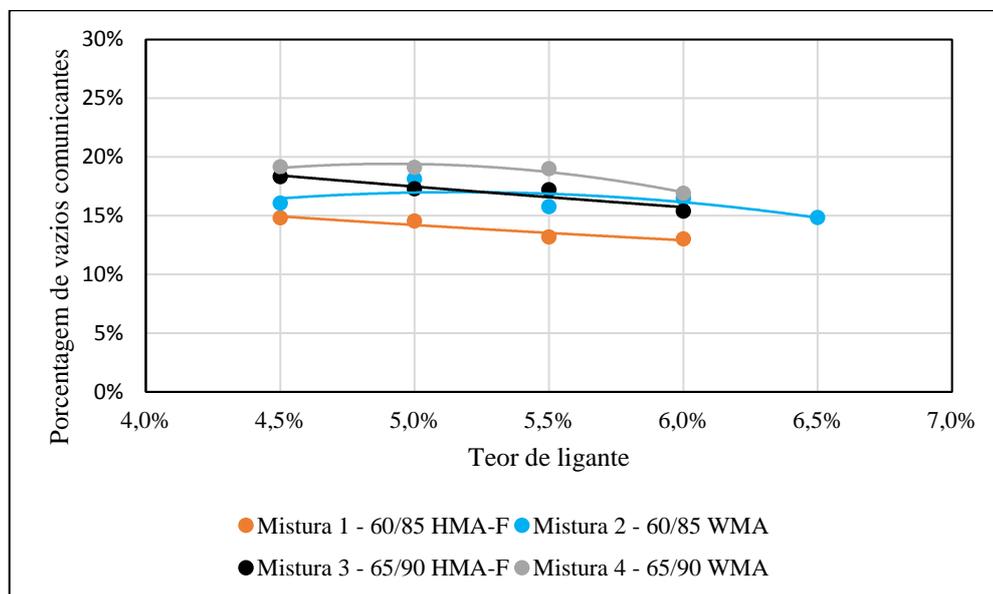


Figura 57 - Resultados do ensaio de vazios comunicantes em função do teor de ligante para as misturas estudadas

Quando comparamos os resultados obtidos no ensaio de porcentagem de vazios com os encontrados no ensaio de porcentagem de vazios comunicantes das misturas, podemos ver que a diferença entre os valores é pequena, sendo mais expressiva nas misturas 1 e 2. Isso mostra que os vazios nas quatro misturas são, praticamente, todos comunicantes o que garantiria um escoamento satisfatório da água através da camada.

#### 4.5 ENSAIO CANTABRO

O ensaio de abrasão Cantabro foi realizado para avaliar o potencial de desagregação das misturas asfálticas estudadas. Cada ponto representa a média aritmética de, no mínimo, três corpos de prova submetidos ao ensaio no tambor.

A Figura 58 mostra os resultados obtidos nos ensaios de abrasão da mistura, quente e morna, com ligante AMP 60/85 com teores de ligante variando de 4,5% a 6,5%. De maneira geral observa-se um decréscimo da perda por abrasão à medida que o teor de ligante asfáltico aumenta.

Nota-se que, exceto pelo teor de ligante de 4,5%, todos os outros teores estudados conduzem a perda por abrasão inferior aos 20%, sugerida pela ASTM D7064 como sendo limite máximo para a perda por abrasão em corpos de prova não condicionados.

Quando se comparam os resultados de ambas as misturas se percebe que na mistura morna há uma predominância de valores de perda por abrasão superiores aos obtidos pela mistura quente; salvo no teor de 5,5% para o qual os valores são muito próximos.

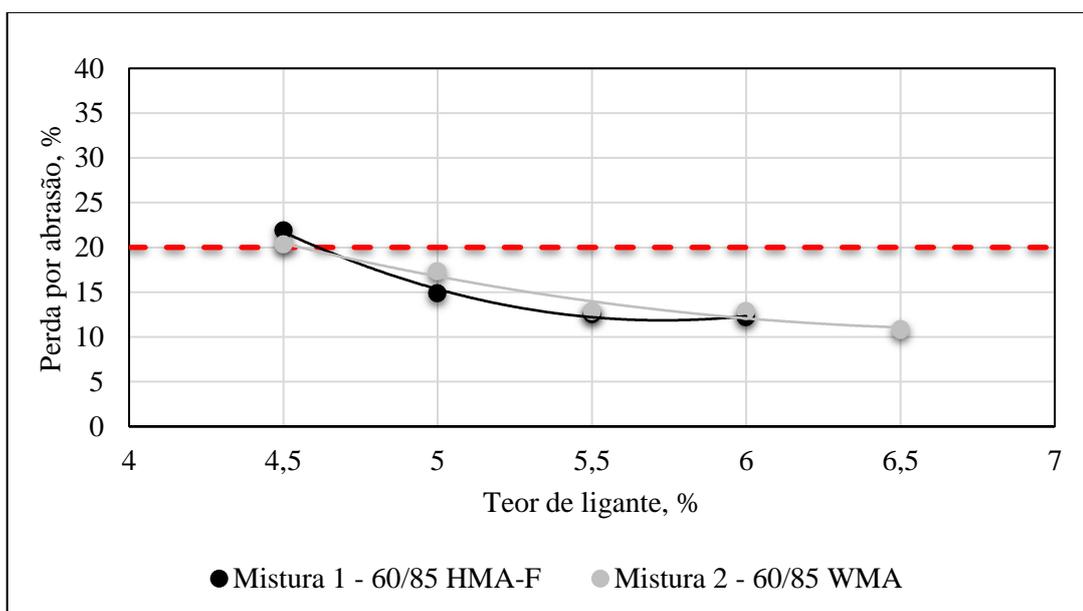


Figura 58 - Perda por abrasão em função do teor de ligante para misturas com ligante AMP 60/85

A Figura 59 traz os resultados obtidos nos ensaios de abrasão para as misturas elaboradas com ligante AMP 65/90, quente e morna, para os teores citados anteriormente. Pode-se perceber um comportamento semelhante ao observado nas misturas com AMP 60/85. Entretanto, a variação da perda por abrasão da mistura morna foi superior ao da mistura quente, no caso do ligante AMP 65/90.

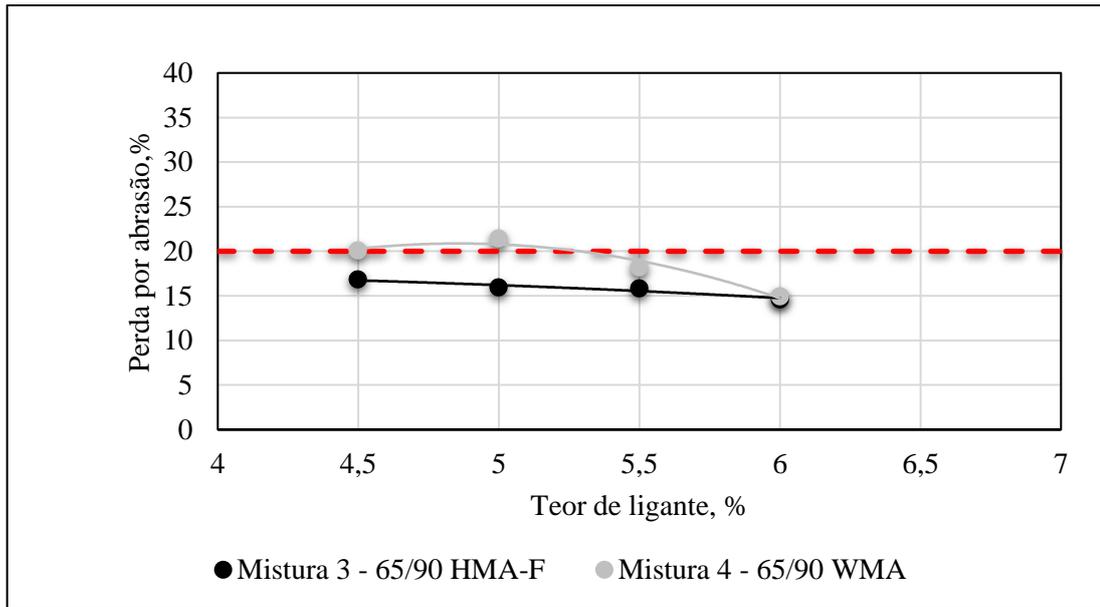


Figura 59 - Perda por abrasão em função do teor de ligante em misturas com AMP 65/90

O gráfico da Figura 60 mostra a relação entre a porcentagem de vazios da mistura e a perda por abrasão. Analisando a mesma, pode-se notar que, na maioria dos casos, a perda por abrasão aumenta conforme a porcentagem de vazios aumenta.

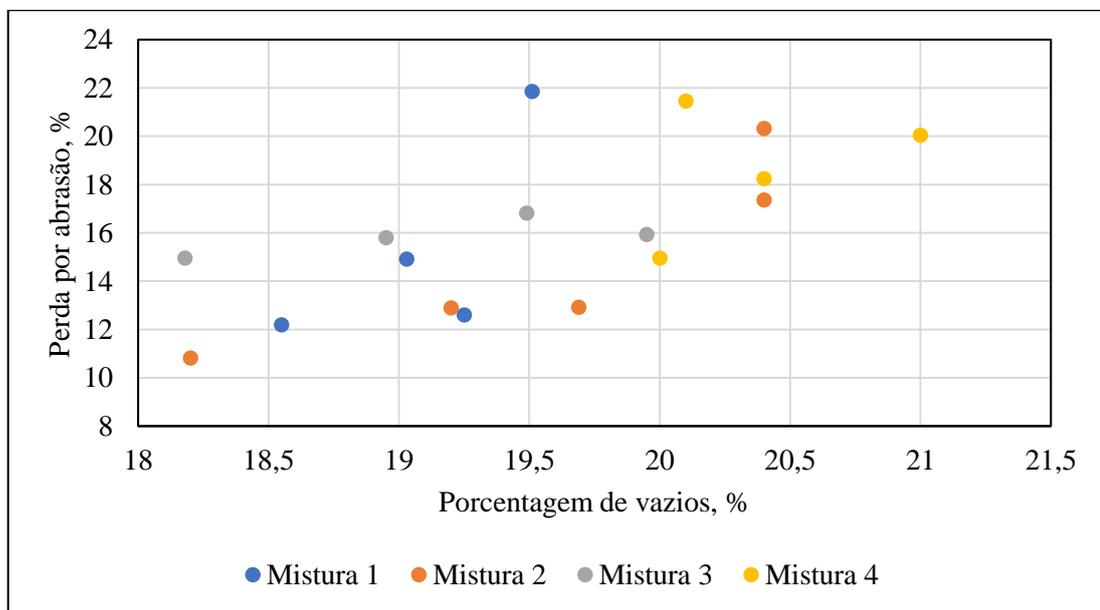


Figura 60 - Gráfico da relação porcentagem de vazios x perda por abrasão

Um fato inesperado, após a realização dos ensaios de abrasão, foi a constatação de um comportamento levemente superior das misturas com AMP 60/85 em relação às misturas com

AMP 65/90, nos teores mais elevados, já que o último possui propriedades superiores ao primeiro, no que diz respeito à viscosidade e maior adição de polímeros. Tal fato pode ser atribuído à elevada variabilidade no que diz respeito à compactação dos corpos de prova.

#### 4.6 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PROJETO DE LIGANTE ASFÁLTICO

Como exposto previamente, dois principais fatores definidores do teor de ligante em misturas asfálticas tipo CPA são o escorrimento e a desagregação são os quesitos que guiaram a definição do teor ótimo de cada mistura.

De acordo com a ASTM D7064, na definição do teor de ligante de projeto devem ser levados em consideração o escorrimento do mesmo (0,3% no máximo) e a porcentagem de vazios de ar (18% no mínimo); considerando-se opcionalmente resultados de ensaio Cantabro e de dano por umidade induzida (ensaio realizado após a predefinição do teor de projeto).

##### 4.6.1 Misturas com AMP 60/85

Analisando inicialmente o ensaio de escorrimento envolvendo o ligante asfáltico AMP 60/85 percebe-se que a mistura a quente com fibras de celulose (mistura 1) apresentou valores abaixo do máximo permitido pela ASTM D7064 nos teores de 4,5% a 6%. Já o teor de 6,5% da mistura 1 foi excluído por apresentar escorrimento de aproximadamente 0,5%. Por sua vez, a mistura morna obteve resultado satisfatório em todos os teores analisados.

O próximo critério analisado foi a porcentagem de vazios das misturas que deveria atingir um mínimo de 18%. Analisando a Figura 55 percebe-se que a porcentagem de vazios da mistura 1, analisando-se os teores remanescentes (excluindo 6,5%), é sempre superior ao mínimo definido por norma, 18%. A mistura 2 também apresenta porcentagem de vazios superior a definida pela norma

No ensaio Cântabro da mistura 1 (Figura 58) o teor de 4,5% é eliminado por não atender ao requisito da norma ASTM D7064, que impõe um limite de perda por abrasão de 20%. O mesmo se aplica à mistura 2, na qual o teor de 4,5% também apresentou resultado insatisfatório.

Após a análise dos dados obtidos nos ensaios, optou-se pela escolha do teor de 6% para ambas as misturas. O teor escolhido obteve resultados satisfatórios nos principais ensaios, de

escorrimento e abrasão, que simulam os fenômenos tidos como principais desvantagens no uso de CPA, o escorrimento do ligante e a desagregação.

#### 4.6.2 Misturas com AMP 65/90

A determinação do teor ótimo de ligante para as misturas dosadas com AMP 65/90 seguiu o mesmo procedimento utilizado para o ligante AMP 60/85.

No ensaio de escorrimento do ligante asfáltico a mistura 3 não obteve resultado satisfatório para o teor de 6,5%, de forma semelhante ao acontecido com a mistura 2. A mistura 4 sem a utilização de cal também não obteve resultado satisfatório para o teor de 6,5%, extrapolando o limite de 0,3%. Sendo assim, para ambas as misturas o teor de 6,5% foi excluído.

Analisando os dados do ensaio Cântabro (Figura 59) percebe-se que todos os teores possíveis da mistura 3 atendem o requisito imposto pela norma ASTM D7064 (máximo de 20% de perda). Já os resultados para a mistura 4, dos teores possíveis, somente os de 5,5% e 6% atendem ao máximo de perda imposto pela norma.

Assim como na mistura com AMP 60/85, o teor de asfalto escolhido para ambas as misturas com AMP 65/90 foi de 6% já que o mesmo conduz a resultados satisfatórios no ensaio de escorrimento e, principalmente, menor perda por abrasão.

#### 4.7 ENSAIO DE DANO POR UMIDADE INDUZIDA

O ensaio de dano por umidade induzida foi conduzido de acordo com a norma AASHTO T283 em amostras, com dimensões Marshall, no teor de ligante de projeto. Devido à granulometria aberta da camada porosa de atrito, o dano causado pela presença de umidade pode ser mais severo nessas misturas do que em misturas asfálticas convencionais.

Como pode ser observado na Figura 61 todas as misturas apresentaram resistência à tração retida superior aos 80% estabelecido pela ASTM D7064 e não variaram muito entre si. Isso demonstra que as misturas estudadas não foram sensíveis ao condicionamento a que foram submetidas.

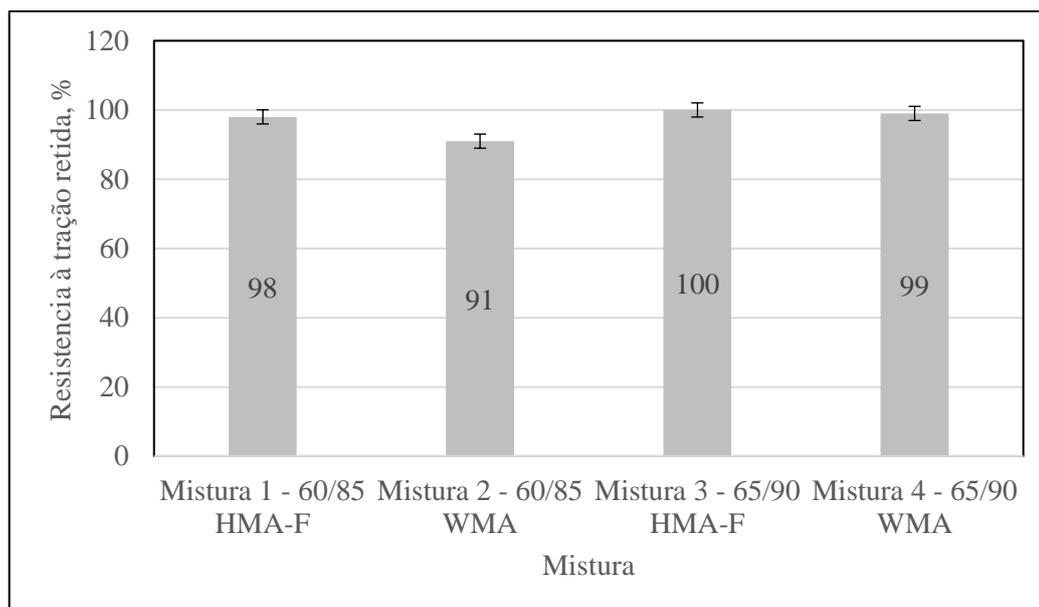


Figura 61 - Resultados do ensaio de Dano por Umidade Induzida para as misturas estudadas

As misturas quentes, de controle, apresentaram resultados superiores aos das equivalentes mornas. Destaca-se o desempenho da mistura 3 (65/90-HMA-F) que não apresentou qualquer perda de resistência à tração, devido ao condicionamento.

Entre as misturas mornas, ressalta-se que a mistura 2 (60/85 WMA sem fibras) apresentou o pior desempenho mesmo tendo cal calcítica e agente surfactante, que contém um agente melhorador de adesividade na sua composição. O mesmo não ocorreu na mistura 4 (65/90 WMA sem fibras), que não se mostrou suscetível aos ciclos de condicionamento e que tem somente o aditivo surfactante na composição.

Outros autores realizaram ensaios de dano por umidade induzida com agregados de natureza granítica e obtiveram resultados não tão satisfatórios. Queiroz (2016) realizou o ensaio em misturas do tipo CPA dosadas com ligante AMP 55/75-E e agregado granítico obtendo resultado de 46%. O desempenho insatisfatório da mistura foi atribuído à presença de grandes quantidades de sílica no agregado.

É importante ressaltar que os resultados encontrados nessa pesquisa se opõem aos obtidos por Lu, Luo e Harvey (2011). Estes autores realizaram ensaios de dano por umidade induzida em quatro misturas moldadas com diferentes métodos de compactação, utilizando agregado basáltico-vulcânico e ligante PG 64-16. Os autores afirmam que o ensaio de DUI proposto pela

ASTM D7064 não é adequado para misturas porosas já que o ciclo de descongelamento a 60°C durante 24 horas pode provocar deformações na amostra e enfraquecimento do ligante e conseqüente piora nos resultados de resistência. As misturas estudadas pelos autores não atingiram o mínimo de 80% de resistência à tração retida (RTR).

#### 4.8 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral são mostrados na Figura 62. As misturas 3 e 4, usinadas com ligante AMP65/90, apresentaram resultados de RT superiores aos das Misturas 1 e 2, usinadas com AMP 60/85.

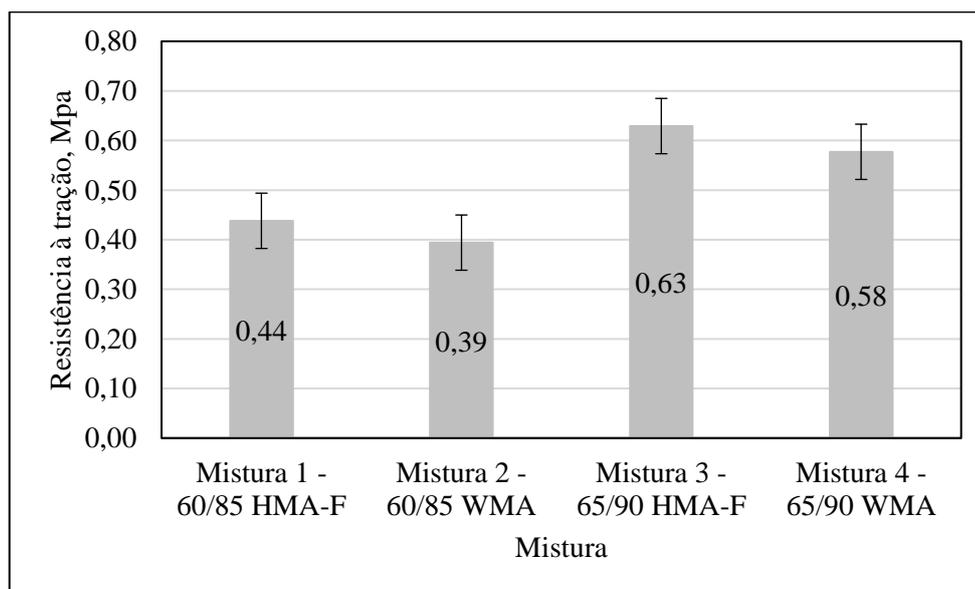


Figura 62 - Resultados dos ensaios de resistência à tração para as misturas estudadas

Ressalta-se que a metodologia de dosagem de misturas asfálticas porosas utilizada, a ASTM D7064, não estabelece um valor mínimo de resistência à tração para as misturas já que esse parâmetro não é levado em consideração no método de dosagem. Entretanto, a norma brasileira de CPA, DNER 386/99, estipula um resultado mínimo de RT para que a mistura seja considerada aceita. Caso o procedimento da norma brasileira fosse empregado, somente os valores iguais ou acima de 0,55 MPa seriam aceitos. Analisando novamente a Figura 62, apenas as misturas dosadas com AMP 65/90 seriam aprovadas para utilização.

Na Figura 63 são expostos os resultados de módulo de resiliência das quatro misturas estudadas na pesquisa. De acordo com Medina e Motta (2015) exercem grande influência nos resultados de módulo de resiliência a granulometria da mistura bem como o tipo de ligante utilizado, sendo o teor do mesmo de pouca interferência. Com exceção da Mistura 4, todas apresentaram valor de módulo de resiliência entre 2100 e 2500 MPa.

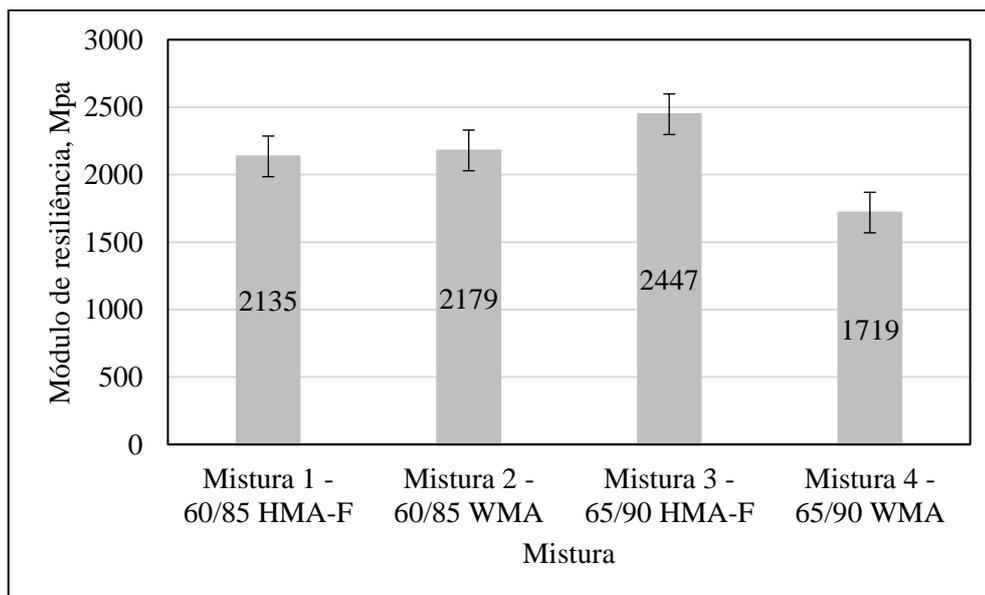


Figura 63 - Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para as misturas estudadas

#### 4.10 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

A permeabilidade das misturas estudadas foi avaliada com um permeâmetro de carga variável, em placas de camada porosa de atrito, conforme descrito no subitem 3.2.8. Os ensaios foram realizados no teor de ligante asfáltico de projeto das misturas.

A Figura 64 evidencia uma clara tendência das misturas mornas apresentarem um valor de permeabilidade mais elevado quando comparadas às respectivas misturas de controle usinadas a quente, o que se deve ao fato da porcentagem de vazios nas misturas mornas ser superior aos das de controle. Todas as permeabilidades encontradas estão acima do valor mínimo de 0,12 cm/s exigidos pela ASTM D7064.

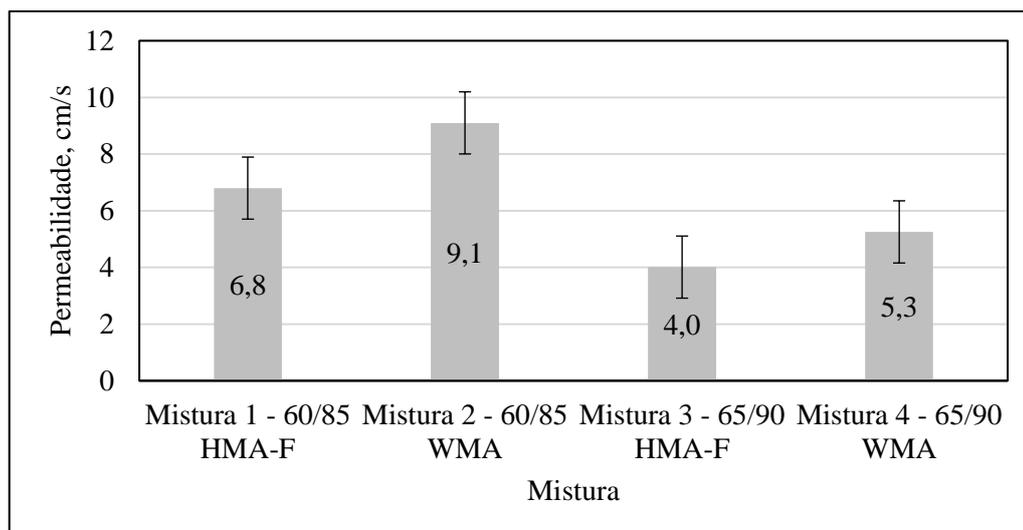


Figura 64 - Resultados do ensaio de permeabilidade para as misturas estudadas

Analisando as misturas 1 e 2 quanto à porcentagem de vazios comunicantes percebe-se que a mistura 2 apresenta permeabilidade superior já que possui um maior volume de vazios comunicantes, ou eficazes, que a mistura 1. O mesmo acontece quando se analisa as misturas 3 e 4 isoladamente.

Entretanto, analisando as misturas de controle (1 e 3), percebe-se que a mistura 3, mesmo possuindo porcentagem de vazios comunicantes superior no teor ótimo de ligante asfáltico ao da mistura 1, apresentou uma taxa de permeabilidade 42% inferior à da mistura 1. O mesmo acontece quando analisamos as misturas mornas (2 e 4) onde ambas possuem porcentagem de vazios comunicantes semelhante porém a permeabilidade da mistura 4 é bem inferior à da mistura 2.

Oliveira (2003) estudou misturas porosas ajustadas nas faixas IV e V do DNER e obteve valores de 0,453 e 0,386 cm/s, respectivamente. Ainda, Meurer Filho (2001) encontrou valores de permeabilidade de aproximadamente 10,06 cm/s em misturas com ligante modificado com polímero SBS. Dumke (2005) obteve valores de permeabilidade, em placas, que variaram de 10 a 18 cm/s.

Vale ressaltar que o ensaio de permeabilidade realizado nessa pesquisa foi feito com a placa biapoiada e com as bordas e face inferior livres, conforme Dumke (2005). Sendo assim, a água não encontrou dificuldades para percolar apresentando valores mais elevados do que se a placa estivesse apoiada sobre uma camada de concreto asfáltico.

#### 4.10.1 Análise da qualidade das placas utilizadas no ensaio de permeabilidade

Com o intuito de verificar as propriedades das placas utilizadas nos ensaios, foram realizados ensaios de volumetria e extração de ligante pelo método do refluxo. Os resultados dos ensaios de porcentagem de vazios e teor de ligante asfáltico podem ser vistos na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de volumetria e teor de ligante asfáltico dos CPs extraídos das placas

<b>Mistura</b>	<b>Porcentagem de vazios, %</b>	<b>Teor de ligante, %</b>
<b>Mistura 1 - 60/85 HMA-F</b>	19,78	5,3
<b>Mistura 2 - 60/85 WMA</b>	23,4	5,74
<b>Mistura 3 - 65/90 HMA-F</b>	21,48	6,05
<b>Mistura 4 - 65/90 WMA</b>	24,08	5,89

Através da análise da Tabela 16 pode-se notar que todas as placas apresentaram porcentagem de vazios superior aos corpos de prova Marshall. Isso indica que a compactação das mesmas foi aquém do ideal e influenciaram diretamente nos ensaios de permeabilidade realizados. A porcentagem de vazios superior pode ter sido ocasionada por uma má compactação ou quantidade de material insuficiente no molde da placa.

Quanto ao teor de ligante asfáltico das misturas, estabelecido como sendo 6%, o ensaio de extração de betume pelo método do refluxo mostra valores próximos ao teor de projeto. A mistura 1 foi a que apresentou um teor de ligante mais abaixo do esperado. O resultado desse ensaio sofre influência da amostra coletada para realização do ensaio, logo, pode ter acontecido uma distribuição desigual de ligante asfáltico na placa da mistura 1, fazendo com que o resultado não atingisse o resultado esperado.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de analisar a viabilidade técnica de se produzirem misturas do tipo CPA a temperaturas intermediárias sem a adição de fibras comparando seu desempenho ao de misturas convencionais usinadas a quente tomadas como misturas de referência. Dois ligantes modificados por polímero foram utilizados na pesquisa, AMP 60/85 e AMP 65/90. As misturas foram dosadas utilizando os procedimentos da norma americana ASTM D7064-13, que consiste na análise dos resultados do ensaio de escorrimento, volumetria, ensaio Cantabro e dano por umidade induzida.

Através dos ensaios de escorrimento, pode-se constatar que a utilização do agente surfactante na moldagem das misturas mornas foi capaz de manter o escorrimento do ligante asfáltico a níveis inferiores ao máximo de 0,3% permitido pela norma utilizada na dosagem. A mistura 4, morna com AMP65/90, apresentou resultados insatisfatórios para escorrimento quando se utilizou algum tipo de cal.

Durante a realização dos ensaios para definição do teor de ligante de projeto verificou-se que a retirada das fibras fez com que a porcentagem de vazios das misturas mornas aumentasse moderadamente em relação às misturas de referência, tendência também observada na porcentagem de vazios comunicantes, responsáveis por garantir a percolação da água através da camada porosa de atrito.

No ensaio Cantabro as misturas com AMP 60/85 (misturas 1 e 2), apresentaram desempenho semelhante e ultrapassaram o limite máximo imposto pela ASTM D7064 de 20% apenas para o teor de ligante de 4,5%. As misturas 3 e 4, dosadas com AMP 65/90, apresentaram peculiaridades. A mistura 3, de referência, manteve a perda por sempre abaixo do máximo permitido pela ASTM e com muito pouca variação ao passo que a mistura 4, morna, somente ficou abaixo do limite máximo nos teores de 5,5% e 6%.

Sendo considerado um ponto fraco em misturas asfálticas com granulometria aberta, o dano por umidade induzida ficou abaixo do recomendado pela ASTM D7064. As quatro misturas obtiveram uma resistência à tração retida bastante superior ao mínimo (80%) no teor ótimo de ligante escolhido. Isso demonstrou que o emprego dos ligantes escolhidos com agregado

basáltico produziu misturas que não foram gravemente suscetíveis ao ciclo de condicionamento imposto pelo ensaio normatizado pela AASHTO T283.

A partir da realização, no teor de projeto, dos ensaios mecânicos de resistência a tração e módulo de resiliência, ambos por compressão diametral, percebeu-se que o tipo de mistura estudado, camada porosa de atrito, apresenta resultados inferiores aos observados em misturas densas, o que já era esperado. No que diz respeito aos resultados de resistência à tração, a metodologia de dosagem utilizada não sugere um valor mínimo de resistência. Sendo assim, caso as misturas fossem submetidas aos critérios de aceitação da norma de CPA brasileira, apenas as misturas dosadas com AMP 65/90 (Misturas 3 e 4) seriam aceitas dado que é exigido um mínimo de resistência de 0,55 MPa.

Quanto à permeabilidade os resultados mostraram que a retirada das fibras das misturas faz com que a permeabilidade da mistura aumente.

De maneira geral, baseado nos resultados obtidos na pesquisa realizada, com teor ótimo de ligante de 6%, pode-se dizer que a produção de misturas asfálticas porosas a temperaturas intermediárias, com adição de agente surfactante e sem adição de fibras de celulose, é possível e se torna uma alternativa frente às misturas convencionais usinadas a quente. A substituição da mistura quente pela morna traz vantagens relacionadas ao controle da qualidade da mistura e consumo energético, além de benefícios aos trabalhadores e ao meio ambiente já que emitem menos gases do efeito estufa.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando complementar o estudo iniciado nesta Dissertação, sugere-se

- Avaliar o escorrimento das misturas em diferentes temperaturas, além da de usinagem;
- Realizar ensaios de deformação permanente para as misturas estudadas através do ensaio de flow number confinado;
- Realizar o ensaio de dano por umidade induzida seguindo as modificações descritas na ASTM D7064 com 5 ciclos de congelamento e descongelamento;

- Realizar os ensaios de módulo de resiliência em diferentes temperaturas para verificar como se comporta a rigidez da mistura quando submetida a diferentes condições

## REFERÊNCIAS

- AFONSO, Márcia Lopes; DINIS-ALMEIDA, Marisa; FAEL, Cristina Sena. Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibres. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 135, p.104-111, mar. 2017.
- AIREY, Gordon D.. Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 16, n. 8, p.473-487, dez. 2002
- ALI, Ayman et al. Workability Evaluation of Foamed Warm-Mix Asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l.], v. 26, n. 6, p.04014011-1 - 04014011-6, jun. 2014.
- ALMEIDA-COSTA, Ana; BENTA, Agostinho. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 112, p.2308-2317, jan. 2016
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for determination of draindown characteristics: D6390. West Conshohocken, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for open-graded friction course (OGFC): D7064**. West Conshohocken, PA, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate: D4791. West Conshohocken, PA, 2005.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage: T-283**.
- APS, MARCIA. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – *International Friction Index* para revestimentos asfálticos**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006, 179 p.
- ASI, Ibrahim M.. Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes. **Building And Environment**, [s.l.], v. 42, n. 1, p.325-329, jan. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 30: Agregado Miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NBR 15184: Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 15086: Materiais Betuminosos- Determinação da Recuperação Elástica pelo Ductilômetro. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. NBR 6576: Materiais Asfálticos – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. NBR 6560: Materiais Betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. NBR 6296: Produtos betuminosos semissólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, 2012.

BEHL, Ambika et al. Evaluation of Field Performance of Warm-mix Asphalt Pavements in India. **Procedia - Social And Behavioral Sciences**, [s.l.], v. 104, p.158-167, dez. 2013.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A.P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2ª Ed., Rio de Janeiro: PETROBRAS E ABEDA, 2008.

COLPO, G. B.. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014, 154p.

D'ANGELO et al. **Warm-mix asphalt: european practice**. International Technology Scanning Program. Virginia: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER - ES 386/99: Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 078/94: Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Brasília, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 085/94: Material finamente pulverizado- determinação da massa específica real. Brasília, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 086/94: Agregado – determinação do índice de forma. Brasília, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 084/95: Agregado miúdo - determinação da densidade real. Brasília, 1995.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 054/97: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 035/98: Agregados: determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 081/98: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 083/98: Agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 083/99: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME 135: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. DNIT-ME 136: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2010.

DUMKE, Marilan Pedro. **Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha**. 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

FERREIRA, P. N. Avaliação da macrotextura de trechos pavimentados de rodovias estaduais situadas na região insular do município de Florianópolis. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002, 161p.

HAMZAH, M. O.; HARDIMAN. Characterization of the clogging behaviour of double layer porous asphalt. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, V. 6, p.968-980, 2005.

HASSAN, Hossam F.; AL-JABRI, Khalifa S.. Effect of organic fibers on open-graded friction course mixture properties. **International Journal Of Pavement Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 1, p.67-75, mar. 2005.

HASSAN, Hossam F.; AL-ORAIMI, Salim; TAHA, Ramzi. Evaluation of Open-Graded Friction Course Mixtures Containing Cellulose Fibers and Styrene Butadiene Rubber Polymer. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l.], v. 17, n. 4, p.416-422, ago. 2005.

HUBER, GERALD. **Performance survey on Open-Graded friction course mixes: Synthesis of Highway Practice 284**. Transportation Research Board. National Research Council, Indianapolis, 2000.

HAMZAH, Meor Othman; HASAN, Mohd Rosli Mohd; VEN, Martin van de. Permeability loss in porous asphalt due to binder creep. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 30, p.10-15, maio 2012

KANDHAL, P. S. **Design, construction and maintenance of open-graded asphalt friction courses**. Information Series 115. National Asphalt Pavement Association. Lanham, MD, 2002.

LIU, Qingquan; CAO, Dongwei. Research on Material Composition and Performance of Porous Asphalt Pavement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l.], v. 21, n. 4, p.135-140, abr. 2009. American Society of Civil Engineers (ASCE).

LU, Qing; LUO, Sang; HARVEY, John. Compaction of Noise-Reducing Asphalt Mixes in the Laboratory. **Road Pavement And Material Characterization, Modeling, And Maintenance**, [s.l.], p.1-9, 16 maio 2011. American Society of Civil Engineers.

LUGÃO, Wilson G. Análise da aderência entre pneu e pavimento com camada porosa de atrito no Aeroporto Tancredo Neves – MG. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

LYONS, Kimberly R.; PUTMAN, Bradley J.. Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 49, p.772-780, dez. 2013.

MANSOUR, Talat N.; PUTMAN, Bradley J.. Influence of Aggregate Gradation on the Performance Properties of Porous Asphalt Mixtures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 25, n. 2, p.281-288, fev. 2013

MAYORA, José M. Pardillo; PIÑA, Rafael Jurado. An assessment of the skid resistance effect on traffic safety under wet-pavement conditions. **Accident Analysis & Prevention**, [s.l.], v. 41, n. 4, p.881-886, jul. 2009.

MEDINA, J. DE; MOTTA, L. M. G. DA. **Mecânica dos pavimentos**. 3ª Ed., Rio de Janeiro. Interciência, 2015.

MENDES, Larissa de Oliveira. **A utilização do método Bailey para a seleção de agregados em misturas asfálticas**. 2011. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MEURER FILHO, E. **Estudos de granulometria para concretos asfálticos drenantes**. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001, 163p.

MOCELIN, D et al. Evaluation of workability of warm mix asphalt through CDI parameter and air voids. **Transport Infrastructure And Systems**, [s.l.], p.335-342, 8 mar. 2017. CRC Press/Balkema.

MOMM, LETO. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 1998, 259p.

MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: < <http://www.more.ufsc.br/> >. Acesso em: 23 de Agosto de 2017.

MOTTA, R. dos S. **Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e Consumo Energético**. 2011. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, C. G. M. **Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante**. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2003, 87p.

PINHEIRO, J. H. M. Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (processos úmido e seco). Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2004, 166p.

POLACCO, Giovanni et al. Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s.l.], v. 280, n. 2, p.366-373, dez. 2004.

PUNITH, V. S.; VEERARAGAVAN, A. Characterization of OGFC Mixtures Containing Reclaimed Polyethylene Fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l.], v. 23, n. 3, p.335-341, mar. 2011. American Society of Civil Engineers (ASCE).

PUTMAN, Bradley J.; LYONS, Kimberly R.. Laboratory Evaluation of Long-Term Draindown of Porous Asphalt Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l.], v. 27, n. 10, p.1-7, out. 2015.

QUEIROZ, Bismak de Oliveira. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas porosas modificadas com politereftalato de etileno (PET)**. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

RUBIO, M. Carmen et al. Warm mix asphalt: an overview. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 24, p.76-84, mar. 2012.

SANTOS, E. L. **Análise histórica de atrito de medição das pistas do Aeroporto Santos Dumond – RJ**. Trabalho de conclusão de curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP. 2004, 123p.

SARGAND, Shad et al. Field Evaluation of Warm-Mix Asphalt Technologies. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l.], v. 24, n. 11, p.1343-1349, nov. 2012.

VAITKUS, A. et al. Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania. **The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering**, [s.l.], v. 4, n. 2, p.80-86, 22 jun. 2009.

VALE, Aline Colares do. **Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

VASUDEVAN, R. et al. A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.311-320, mar. 2012.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2009, 191p.

ZHANG, Jun et al. Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 44, p.391-398, jul. 2013.

WURST, James E.; PUTMAN, Bradley J.. Laboratory Evaluation of Warm-Mix Open Graded Friction Course Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l.], v. 25, n. 3, p.403-410, mar. 2013.