



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Vanesa María Kolodziej

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS, DRENANTES E  
MECÂNICAS DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS POROSOS**

Florianópolis  
2016



VANESA MARÍA KOLODZIEJ

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS, DRENANTES E  
MECÂNICAS DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS POROSOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Glicério Trichês.

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do  
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kolodziej, Vanesa María

Estudo das propriedades acústicas, drenantes e mecânicas de revestimentos asfálticos porosos / Vanesa María Kolodziej; orientador, Glicério Trichês - Florianópolis, SC, 2016.

184 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Permeabilidade. 3. Absorção sonora. 4. Resistência Mecânica. I., Glicério Trichês. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Vanesa María Kolodziej

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS, DRENANTES E  
MECÂNICAS DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS POROSOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 17 de outubro de 2016.

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Luciano Pivoto Specht, Dr.  
Universidade Federal de Santa Maria

---

Prof. Samir N. Y. Gerges, PhD.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.<sup>a</sup> Liseane Padilha Thives, Dr.<sup>a</sup>  
Universidade Federal de Santa Catarina



***Dedicatória:***  
*Esta pesquisa está dedicada ao meu querido pai Carlos (in memoriam) que sempre foi e continuará sendo meu exemplo a seguir.*



## AGRADECIMENTOS

A minha mãe María Laura, a meus irmãos Javier e Sebastián e aos demais familiares pelo carinho, ajuda e incentivo para concluir o mestrado.

A Lucas pelo amor, pela compreensão e por estar ao meu lado sempre que precisei durante tantos anos e, sobretudo, nestes anos de realização do mestrado.

Ao meu orientador Professor Glicério Trichês pela disponibilidade, dedicação, conselhos e apoio na parte acadêmica e humana.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Pavimentação pela cooperação nos ensaios e por tantos momentos gratos e difíceis compartilhados que fizeram do mestrado uma experiência inesquecível.

Aos amigos Manu, Gabi, Sarvia, Sergio, Adosindro, Moisés, Carlos, José Marcos, Cheche, Priscila e Camilo pela amizade e por tornar mais felizes meus dias em Florianópolis.

À professora Liseane Padilha Thives por toda a ajuda e conhecimentos transmitidos durante o mestrado.

Aos professores membros da banca examinadora pelos conselhos e orientações para melhorar minha pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina e ao pessoal da Secretaria de Pós-Graduação.

Ao Conselho Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudo concedida no período do mestrado.

À Rede Temática de Tecnologia do Asfalto, da Petrobrás, pelos investimentos feitos no Laboratório de Pavimentação da UFSC.

Muito obrigada!



“La utopía está en el horizonte. Camino dos pasos, ella se aleja dos pasos. Camino diez pasos y el horizonte se corre diez pasos más allá. Por mucho que camine nunca la alcanzaré. ¿Entonces para qué sirve la utopía? Para eso, sirve para caminar”.

(Fernando Birri)



## RESUMO

Atualmente é necessário o desenvolvimento de pavimentos rodoviários que ofereçam qualidade, conforto e segurança aos usuários. O objetivo desta pesquisa foi obter um revestimento que reduza os níveis de ruído provocados pelo tráfego, elimine a presença de água no pavimento e que ao mesmo tempo apresente durabilidade e resistência mecânica. No presente trabalho foram avaliadas em laboratório as propriedades acústicas, drenantes e de resistência mecânica de três misturas asfálticas com gradação aberta e diâmetro máximo de agregado de 9,5 mm selecionadas com base em estudos e experiências nacionais e internacionais. A mistura G1 foi escolhida do estudo desenvolvido por Guimarães no Brasil, a mistura G2 segundo as misturas descontínuas utilizadas na Espanha e Argentina e a mistura G3 foi selecionada com base num estudo realizado nos Estados Unidos. Os agregados utilizados foram de origem granítica e o ligante modificado com polímero. Os ensaios foram conduzidos sobre corpos de prova moldados no Compactador Giratório Superpave e sobre placas moldadas na mesa compactadora LCPC. Para avaliar o desempenho quanto à redução de ruído das misturas foi utilizado um tubo de impedância para medir a absorção sonora nos corpos de prova com três espessuras diferentes. A permeabilidade foi medida com o permeâmetro LCS sobre as placas compactadas. A determinação da durabilidade e a resistência mecânica das misturas realizou-se através dos ensaios de desgaste Cântabro, o ensaio Lottman de dano por umidade induzida, o ensaio de módulo de resiliência e o ensaio de deformação permanente. A pesquisa conclui que a mistura G3 apresentou um desempenho satisfatório com relação às propriedades acústicas, drenantes e mecânicas avaliadas.

**Palavras-chave:** permeabilidade, absorção sonora, resistência mecânica.



## ABSTRACT

Currently it is necessary to develop road pavements that offer quality, comfort and safety to users. The objective of this research was to obtain a surface that reduces noise levels caused by traffic, eliminate the presence of water on the surface and at the same time presents durability and mechanical strength. In this study were evaluated in laboratory acoustic, drainage and mechanical strength properties of three asphalt mixtures with open gradation and maximum diameter of aggregate 9.5 mm selected on the basis of studies and national and international experiences. The mixture G1 was chosen the study by Guimarães in Brazil, G2 mixture according to the discontinuous mixtures used in Spain and Argentina and the mixture G3 was selected based on a study conducted in the United States. The aggregates used were granite and a modified binder polymer. The tests were conducted on specimens molded in Superpave Gyrotory Compactor with a fixed number of 50 turns and over molded slabs in compacting table LCPC. To evaluate the performance in terms of noise reduction of mixtures an impedance tube was used to measure the sound absorption in the specimens with three different thicknesses. The permeability was measured using a permeameter LCS on the compacted slabs. Determination of durability and mechanical strength of the mixtures was performed using the Cantabro test, the Lottman moisture susceptibility test, resilient modulus test and the permanent deformation test. The research concludes that the G3 mixture showed satisfactory performance with respect to acoustic, drainage and mechanical properties evaluated.

**Keywords:** permeability, acoustic absorption, mechanical strength.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 - Propagação da onda sonora .....   | 39 |
| Figura 2.2 - Formas de espectro de frequências do mesmo som .....                                      | 42 |
| Figura 2.3 - Circuitos de compensação sonora .....   | 43 |
| Figura 2.4 - Nível de ruído rodoviário e nível de ruído equivalente $L_{aeq}$ .....                    | 44 |
| Figura 2.5 - Definição de $L_{max}$ , $L_{10}$ e $L_{eq}$ .....  | 45 |
| Figura 2.6 - Relação entre as fontes de ruído de tráfego .....   | 46 |
| Figura 2.7 - Vibrações mecânicas entre o pneu e o pavimento (efeito martelo).....                      | 50 |
| Figura 2.8 - Vibrações de ar entre pneu/pavimento (efeito bater palmas ou assobiar).....               | 50 |
| Figura 2.9 - Mecanismo aderência/deslize entre pneu/pavimento (efeito deslizamento do tênis).....      | 51 |
| Figura 2.10 - Adesão na área de contato entre a banda de rodagem e o pavimento (Efeito de sucção)..... | 52 |
| Figura 2.11 - Mecanismo de amplificação "Buzina Acústica" .....  | 53 |
| Figura 2.12 - Efeito Ressonador de Helmholtz.....  | 53 |
| Figura 2.13 - Efeito Ressonância de tubo .....   | 54 |
| Figura 2.14 - Ilustração do efeito de vibração da parede lateral do pneu .....                         | 54 |
| Figura 2.15 - Reflexão do ruído na superfície de um revestimento denso .....                           | 56 |
| Figura 2.16 - Reflexão do ruído na superfície de um pavimento poroso .....                             | 56 |
| Figura 2.17 - Estrutura de ressonância de Helmholtz .....  | 62 |
| Figura 2.18 - Espectros de absorção em função da espessura do revestimento .....                       | 63 |
| Figura 2.19 - Curva de absorção sonora para diferentes tipos de revestimento .....                     | 64 |
| Figura 2.20 - Componentes do tubo de impedância .....  | 66 |
| Figura 2.21 - Ruído em função da velocidade para duas categorias de veículos.....                      | 71 |
| Figura 2.22 - Influência da textura superficial nas características da superfície .....                | 74 |
| Figura 2.23 - Influência do tamanho máximo de agregado no pico de absorção sonora .....                | 77 |
| Figura 2.24 - Redução de ruído dos diferentes revestimentos .....                                      | 83 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 2.25 - Zonas de contato pneu/pavimento.....  | 87  |
| Figura 2.26 - Representação dos vazios numa mistura porosa.....   | 89  |
| Figura 2.27 - Permeâmetro LCS.....  | 94  |
| Figura 2.28 - Granulometrias de Meurer Filho e Guimarães.....   | 97  |
| Figura 2.29 - Granulometrias das misturas CPA.....  | 98  |
| Figura 2.30 - Curvas granulométricas para M 8, M 10, e PA 12.....   | 101 |
| Figura 2.31 - Coeficiente de absorção sonora misturas M 10, F 10 e PA 12.....                                 | 102 |
| Figura 2.32 - Granulometrias de misturas drenantes e descontínuas aplicadas na Argentina e Espanha.....       | 104 |
| Figura 2.33 - Granulometrias AR475, P475 e AR475P.....  | 106 |
| Figura 2.34 - Valores Lmax para diferentes tipos de revestimentos na França.....                              | 109 |
| Figura 2.35 - Granulometrias das misturas aplicadas na França e no Brasil.....                                | 110 |
| Figura 2.36 - Granulometrias de misturas drenantes.....   | 111 |
| Figura 2.37 - Granulometrias para reduzir o ruído.....  | 112 |
| <br>  |     |
| Figura 3.1 - Método da pesquisa.....  | 115 |
| Figura 3.2 - Etapas da dosagem das misturas.....  | 120 |
| Figura 3.3 - Compactador Giratório Superpave.....   | 122 |
| Figura 3.4 - Compactador de placas LCPC.....  | 127 |
| Figura 3.5 - Permeâmetro LCS utilizado no ensaio.....   | 128 |
| Figura 3.6 - Equipamento <i>Orniéreur</i> para avaliação da deformação permanente (simulador de tráfego)..... | 130 |
| Figura 3.7 - Ensaio deformação permanente.....  | 131 |
| Figura 3.8 - Representação dos 15 pontos de leitura da trilha de roda na placa.....                           | 132 |
| Figura 3.9 - Tubo de impedância para medição do coeficiente de absorção das misturas.....                     | 134 |
| <br>  |     |
| Figura 4.1 - Curva viscosidade vs. temperatura do ligante.....  | 136 |
| Figura 4.2- Granulometrias utilizadas na pesquisa.....  | 138 |
| Figura 4.3 - Procedimento de compactação dos corpos de prova no CGS.....                                      | 140 |
| Figura 4.4 - Corpos de prova compactados nesta etapa.....   | 140 |
| Figura 4.5 - Corpos de prova com fita adesiva e parafina.....   | 141 |
| Figura 4.6 - Massa específica máxima aparente ( $G_{mb}$ ) da mistura G1.....                                 | 141 |
| Figura 4.7 - Massa específica aparente $G_{mb}$ da mistura G2.....  | 142 |
| Figura 4.8 - Massa específica aparente $G_{mb}$ da mistura G3.....  | 142 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.9 - Massa específica aparente média das três misturas .....  | 143 |
| Figura 4.10 - Porcentagem de volume de vazios da mistura G1 .....   | 144 |
| Figura 4.11 - Porcentagem de volume de vazios da mistura G2 .....   | 144 |
| Figura 4.12 - Porcentagem de volume de vazios da mistura G3 .....   | 145 |
| Figura 4.13 - Porcentagem média de volume de vazios das três misturas .....                                     | 145 |
| Figura 4.14 - Procedimento determinação dos vazios comunicantes ..  | 146 |
| Figura 4.15 - Porcentagem de vazios comunicantes da mistura G1 ....   | 147 |
| Figura 4.16 - Porcentagem de vazios comunicantes da mistura G2 ....   | 147 |
| Figura 4.17 - Porcentagem de vazios comunicantes da mistura G3 ....   | 148 |
| Figura 4.18 - Porcentagem média de vazios comunicantes das três misturas.....                                   | 148 |
| Figura 4.19 - Corpos de prova depois da realização do ensaio Cântabro .....                                     | 149 |
| Figura 4.20 - Resultados do desgaste para os corpos de prova da mistura G1 .....                                | 150 |
| Figura 4.21 - Desagregação dos corpos de prova da mistura G2 .....  | 150 |
| Figura 4.22 - Desagregação dos corpos de prova da mistura G3 .....  | 151 |
| Figura 4.23 - Porcentagem média de desgaste dos corpos de prova das três misturas.....                          | 151 |
| Figura 4.24 - Corpos de prova moldados para o ensaio Lottman .....  | 153 |
| Figura 4.25 - Resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados para cada mistura..... | 154 |
| Figura 4.26 - Resultados da resistência retida por umidade induzida .   | 155 |
| Figura 4.27 - Determinação da porcentagem de vazios comunicantes nas placas .....                               | 156 |
| Figura 4.28 - Permeabilidade média das misturas .....   | 158 |
| Figura 4.29 - Placas após do ensaio de deformação .....   | 160 |
| Figura 4.30 - Deformação permanente das placas da mistura G1 .....  | 161 |
| Figura 4.31 - Deformação permanente para as placas da mistura G2 .  | 161 |
| Figura 4.32 - Deformação para as placas da mistura G3 .....   | 162 |
| Figura 4.33 - Colocação do corpo de prova no tubo de impedância ...   | 164 |
| Figura 4.34 - Curva de absorção para os corpos de prova da mistura G1 .....                                     | 165 |
| Figura 4.35 - Coeficiente de absorção em função da frequência para a mistura G2 .....                           | 166 |
| Figura 4.36 - Curva absorção sonora para as diferentes espessuras da mistura G3 .....                           | 167 |
| Figura 4.37 - Ressonadores de Helmholtz simples.....  | 169 |

Figura 4.38 - Curva de absorção sonora para as misturas G1, G2 e G3  
..... 170

## LISTA DE QUADROS

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 2.1 - Revestimentos utilizados para a redução do ruído e suas principais características.....              | 84  |
| Quadro 2.2 - Granulometria de Meurer Filho com $D_{max}=9,5$ mm.....  | 96  |
| Quadro 2.3 - Granulometria com $D_{max}=9,5$ mm.....  | 96  |
| Quadro 2.4 - Faixas granulométricas e requisitos de dosagem da camada porosa de atrito (CPA).....                 | 98  |
| Quadro 2.5 - Faixas granulométricas para misturas de revestimentos  | 100 |
| Quadro 2.6 - Conteúdo de vazios mínimo das misturas .....   | 100 |
| Quadro 2.7 - Faixas granulométricas para M8, M10, F8 e F10.....   | 103 |
| Quadro 2.8 - Especificações para granulometrias das misturas OGFC nos EEUU.....                                   | 105 |
| Quadro 2.9 - Granulometrias das misturas AR475, P475 e AR475P..   | 106 |
| Quadro 2.10 - Resultados para as misturas AR475 e AR475P.....   | 107 |
| Quadro 2.11 - Formulação típica do BBDr.....  | 108 |
| Quadro 2.12 - Condição de descontinuidade das misturas drenantes..  | 108 |
| <br>  |     |
| Quadro 3.1 - Total de amostras ensaiadas na etapa de dosagem das misturas.....                                    | 121 |
| <br>  |     |
| Quadro 4.1 - Resultados da caracterização dos agregados .....   | 135 |
| Quadro 4.2 - Caracterização do ligante Flexpave 60/85-E.....  | 136 |
| Quadro 4.3 - Granulometria G1 .....   | 137 |
| Quadro 4.4 - Granulometria G2 .....   | 137 |
| Quadro 4.5 - Granulometria G3 .....   | 138 |
| Quadro 4.6 - Valores médios de $G_{mm}$ para cada teor de ligante e mistura .....                                 | 139 |
| Quadro 4.7 - Resultados do ensaio Lottman para as três misturas .....   | 154 |
| Quadro 4.8 - Massa específica aparente, porcentagem de volume de vazios e de vazios comunicantes das placas ..... | 157 |
| Quadro 4.9 - Permeabilidade das placas ensaiadas.....   | 157 |
| Quadro 4.10 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência .....   | 159 |
| Quadro 4.11 - Resumo dos resultados dos ensaios para as misturas G1, G2 e G3.....                                 | 171 |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |  |
|---------|--|
| AASHTO  | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>                    |
| ABNT    | <i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>  |
| AFNOR   | <i>Association française de Normalisation</i>  |
| ASTM    | <i>American Society for Testing and Materials International</i>                              |
| CONAMA  | <i>Conselho Nacional do Meio Ambiente</i>  |
| CONTRAN | <i>Conselho Nacional de Trânsito</i>   |
| CAP     | <i>Cimento Asfáltico de Petróleo</i>   |
| CGS     | <i>Compactador Giratório Superpave</i>   |
| CP      | <i>Corpo de Prova</i>  |
| CPA     | <i>Camada Porosa de Atrito</i>   |
| CPB     | <i>Controlled Pass By</i>  |
| CPX     | <i>Close Proximity</i>   |
| dB      | <i>Decibel</i>   |
| DNER    | <i>Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (Extinto)</i>                                 |
| DNIT    | <i>Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes</i>                                |
| FHWA    | <i>Federal Highway Administration</i>  |
| Hz      | <i>Hertz</i>   |
| IMAGINE | <i>Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment</i> |
| IPG     | <i>Innovatie Programma Geluid</i>  |
| ISO     | <i>International Organization for Standardization</i>  |
| LCPC    | <i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>  |
| LCS     | <i>Laboratorio Escuela de Caminos de Santander</i>   |
| LVA     | <i>Laboratório de Vibrações e Acústica</i>   |
| MR      | <i>Módulo de resiliência</i>   |
| N°      | <i>Número, quantidade</i>  |
| NBR     | <i>Norma Brasileira</i>  |
| NCAT    | <i>National Center for Asphalt Technology</i>  |
| NCHRP   | <i>National Cooperative Highway Research Program</i>   |
| NLT     | <i>Normas Españolas del Laboratorio de Transporte</i>  |
| NPS     | <i>Nível de Pressão Sonora</i>   |
| OBSI    | <i>On-board Sound Intensity</i>  |
| OGFC    | <i>Open Graded Friction Course</i>   |

|           |  |
|-----------|--|
| PERS      | <i>Porous Elastic Road Surface</i>                                       |
| PIARC     | <i>The World Road Association</i>  |
| QCITY     | <i>Quiet City Transport</i>  |
| RAUD      | Revestimento Asfáltico Ultra Delgado                                     |
| SBS       | Estireno-Butadieno-Estireno  |
| SHAS      | <i>State Highway Agencies</i>  |
| SILVIA    | <i>Silenda Via - Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control</i> |
| SIRUUS    | <i>Silent Road for Urban and extra-urban Use</i>                         |
| SMA       | <i>Stone Matrix Asphalt</i>  |
| SPB       | <i>Statistical Pass By</i>   |
| SUPERPAVE | <i>Superior Performing Asphalt Pavement</i>                              |
| UFSC      | Universidade Federal de Santa Catarina                                   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                   |  |
|-------------------|--|
| %                 | Porcentagem                                      |
| $\Sigma$          | Somatório  |
| $A_f$             | Área da face                                     |
| $c$               | Velocidade de propagação da onda sonora          |
| $d$               | Diâmetro   |
| $D$               | Desgaste   |
| $D_{m\acute{a}x}$ | Diâmetro máximo do agregado                      |
| $E$               | Espessura das placas                             |
| $f$               | Frequência                                       |
| $f_c$             | Frequência de corte                              |
| $G_1$             | Granulometria 1                                  |
| $G_2$             | Granulometria 2                                  |
| $G_3$             | Granulometria 3                                  |
| $G_{mm}$          | Massa específica máxima medida                   |
| $G_{mb}$          | Massa específica aparente                        |
| $h_m$             | Altura média                                     |
| $h_{redu}$        | Altura reduzida                                  |
| $K$               | Coefficiente de permeabilidade                   |
| $L'$              | Comprimento efetivo do gargalo                   |
| $L$               | Comprimento do gargalo                           |
| $P$               | Pressão sonora instantânea                       |
| $P_{ab}$          | Peso de água absorvida                           |
| $P_0$             | Pressão de referência                            |
| $P_i$             | Porcentagem média de afundamento                 |
| $P_{in}$          | Peso inicial do corpo de prova                   |
| $P_f$             | Peso final do corpo de prova                     |
| $r$               | Coefficiente de reflexão sonora                  |
| $R$               | Resistividade ao fluxo de ar                     |
| $RRT$             | Resistência à tração retida por umidade induzida |
| $RT$              | Resistência à tração                             |
| $RT_u$            | Resistência à tração condicionada                |
| $s$               | Separação entre microfones                       |
| $T$               | Tempo de escoamento                              |
| $V$               | Volume   |
| $V_c$             | Vazios comunicantes                              |
| $V_v$             | Volume de vazios                                 |
| $Z$               | Impedância acústica                              |

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| $\alpha$   | Coefficiente de absorção sonora    |
| $\lambda$  | Comprimento de onda                |
| $\sigma$   | Desvio Padrão                      |
| $\tau$     | Coefficiente de transmissão sonora |
| $\omega_0$ | Frequência de ressonância          |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>31</b> |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....  | 31        |
| 1.2 OBJETIVOS .....   | 32        |
| <b>1.2.1 Objetivo Geral.....</b>  | <b>32</b> |
| <b>1.2.2 Objetivos Específicos.....</b>   | <b>32</b> |
| 1.3 JUSTIFICATIVA .....   | 32        |
| 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....   | 34        |
| <b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                       | <b>35</b> |
| 2.1 IMPORTÂNCIA DO RUÍDO DO TRÁFEGO .....   | 35        |
| 2.2 CONCEITOS BÁSICOS DE SOM E RUÍDO .....  | 38        |
| <b>2.2.1 Nível de pressão sonora.....</b>   | <b>40</b> |
| <b>2.2.2 Frequência .....</b>   | <b>40</b> |
| <b>2.2.3 Circuitos de compensação sonora .....</b>                                    | <b>42</b> |
| <b>2.2.4 Índices de medição do NPS.....</b>   | <b>43</b> |
| 2.3 GERAÇÃO DO RUÍDO DO TRÁFEGO .....   | 45        |
| 2.4 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO RUÍDO .....   | 47        |
| 2.5 RUÍDO PELA INTERAÇÃO PNEU/PAVIMENTO .....   | 49        |
| 2.6 PROPAGAÇÃO DO RUÍDO PNEU/PAVIMENTO .....  | 55        |
| 2.7 ABSORÇÃO SONORA .....   | 56        |
| <b>2.7.1 Materiais de absorção sonora e características internas dos mesmos .....</b> | <b>58</b> |
| <b>2.7.2 Absorção sonora de revestimentos asfálticos.....</b>                         | <b>60</b> |
| <b>2.7.3 Medidas de absorção sonora.....</b>  | <b>64</b> |
| <b>2.7.4 Método do tubo de impedância .....</b>                                       | <b>65</b> |
| 2.8 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO RUÍDO PNEU/PAVIMENTO .....                                  | 69        |
| <b>2.8.1 Medições no campo.....</b>   | <b>69</b> |
| <b>2.8.2 Medições no laboratório.....</b>   | <b>69</b> |
| 2.9 FATORES QUE INFLUENCIAM O RUÍDO PNEU/PAVIMENTO .....                              | 70        |
| <b>2.9.1 Tipo de veículo .....</b>  | <b>70</b> |
| <b>2.9.2 Condições climáticas.....</b>  | <b>71</b> |
| <b>2.9.3 Comportamento dos condutores .....</b>                                       | <b>73</b> |
| <b>2.9.4 Características da superfície do pavimento que interferem no ruído .....</b> | <b>73</b> |
| 2.9.4.1 Textura da superfície .....   | 73        |

|               |   |            |
|---------------|---|------------|
| 2.9.4.2       | Porosidade .....  | 76         |
| 2.9.4.3       | Tamanho máximo de agregado .....  | 76         |
| 2.9.4.4       | Impedância mecânica ou rigidez .....                                      | 78         |
| 2.9.4.5       | Espessura da camada porosa .....  | 78         |
| 2.9.4.6       | Idade do revestimento .....   | 78         |
| 2.9.4.7       | Tipo de Ligante Asfáltico.....  | 79         |
| 2.10          | TIPOS DE REVESTIMENTOS PARA REDUÇÃO DO<br>RUÍDO.....                      | 79         |
| 2.11          | DRENABILIDADE DOS REVESTIMENTOS .....                                     | 86         |
| 2.12          | CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO QUE<br>AFETAM A DRENAGEM DA ÁGUA .....    | 88         |
| <b>2.12.1</b> | <b>Tipos de textura .....</b>   | <b>88</b>  |
| <b>2.12.2</b> | <b>Vazios.....</b>  | <b>88</b>  |
| <b>2.12.3</b> | <b>Tamanho máximo de agregado.....</b>                                    | <b>90</b>  |
| <b>2.12.4</b> | <b>Tipo de ligante asfáltico .....</b>                                    | <b>90</b>  |
| <b>2.12.5</b> | <b>Espessura da camada .....</b>  | <b>90</b>  |
| 2.13          | TIPOS DE REVESTIMENTO COM<br>CARACTERÍSTICAS DRENANTES.....               | 90         |
| <b>2.13.1</b> | <b>Revestimentos porosos .....</b>  | <b>90</b>  |
| <b>2.13.2</b> | <b>Revestimentos drenantes ou permeáveis.....</b>                         | <b>91</b>  |
| 2.13.2.1      | Vantagens dos revestimentos drenantes.....                                | 91         |
| 2.13.2.2      | Desvantagens dos revestimentos drenantes .....                            | 92         |
| 2.14          | MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE .....   | 93         |
| 2.15          | TIPOS DE REVESTIMENTOS COM PROPRIEDADES<br>ACÚSTICAS E/OU DRENANTES ..... | 95         |
| <b>2.15.1</b> | <b>Brasil .....</b>   | <b>95</b>  |
| 2.15.1.1      | Revestimento Asfáltico Drenante.....                                      | 95         |
| 2.15.1.2      | CPA: Camada Porosa de Atrito.....   | 97         |
| <b>2.15.2</b> | <b>Espanha .....</b>  | <b>99</b>  |
| 2.15.2.1      | Misturas betuminosas drenantes.....                                       | 99         |
| 2.15.2.2      | Misturas betuminosas descontínuas .....                                   | 99         |
| <b>2.15.3</b> | <b>Argentina.....</b>   | <b>102</b> |
| 2.15.3.1      | Revestimento drenante CAD 12.....   | 102        |
| 2.15.3.2      | Misturas descontínuas .....   | 102        |
| <b>2.15.4</b> | <b>Estados Unidos.....</b>  | <b>104</b> |
| <b>2.15.5</b> | <b>França.....</b>  | <b>107</b> |
| 2.16          | COMENTÁRIOS SOBRE AS GRANULOMETRIAS.                                      | 110        |
| 2.17          | CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ....                                  | 112        |

**CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS..... 115**

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.1   | 1° ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E SELEÇÃO DAS GRANULOMETRIAS..... | 116 |
| 3.1.1 | Agregados .....  | 116 |
| 3.1.2 | Ligantes.....  | 118 |
| 3.1.3 | Seleção das granulometrias .....   | 119 |
| 3.2   | 2° ETAPA: DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA.<br>.....                         | 120 |
| 3.2.1 | Massa específica máxima medida $G_{mm}$ .....                            | 121 |
| 3.2.2 | Moldagem dos corpos de prova no CGS .....                                | 122 |
| 3.2.3 | Determinação da porcentagem de volume de vazios                          | 123 |
| 3.2.4 | Determinação do volume de vazios comunicantes ....                       | 123 |
| 3.2.5 | Ensaio Cântabro .....  | 124 |
| 3.2.6 | Definição do teor ótimo de ligante .....                                 | 125 |
| 3.2.7 | Ensaio de dano por umidade induzida .....                                | 126 |
| 3.3   | 3° ETAPA: DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE<br>.....                        | 127 |
| 3.4   | 4° ETAPA: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....                      | 130 |
| 3.4.1 | Módulo de resiliência.....   | 130 |
| 3.4.2 | Deformação permanente.....   | 130 |
| 3.5   | 5° ETAPA: ABSORÇÃO SONORA .....  | 133 |

#### **CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....**

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.1   | 1° ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E SELEÇÃO DAS GRANULOMETRIAS..... | 135 |
| 4.1.1 | Agregados .....  | 135 |
| 4.1.2 | Ligante .....  | 136 |
| 4.1.3 | Seleção das granulometrias .....   | 137 |
| 4.2   | 2° ETAPA: DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA.<br>.....                         | 138 |
| 4.2.1 | Massa específica máxima medida $G_{mm}$ .....                            | 139 |
| 4.2.2 | Moldagem dos corpos de prova no CGS .....                                | 139 |
| 4.2.3 | Determinação da porcentagem de volume de vazios                          | 140 |
| 4.2.4 | Volume de vazios comunicantes .....                                      | 146 |
| 4.2.5 | Ensaio Cântabro .....  | 149 |
| 4.2.6 | Seleção do conteúdo de ligante de projeto .....                          | 152 |
| 4.2.7 | Ensaio de dano por umidade induzida .....                                | 153 |
| 4.3   | 3° ETAPA: DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE<br>.....                        | 156 |

|                                     |  |            |
|-------------------------------------|--|------------|
| 4.4                                 | 4° ETAPA: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....          | 159        |
| 4.4.1                               | Módulo de resiliência .....                                  | 159        |
| 4.4.2                               | Deformação permanente.....                                   | 160        |
| 4.5                                 | 5° ETAPA: ABSORÇÃO SONORA .....                              | 163        |
| 4.5.1                               | Condução do ensaio.....                                      | 163        |
| 4.5.2                               | Influência da espessura na capacidade de absorção. ....      | 164        |
| 4.5.2.1                             | Mistura G1 .....   | 164        |
| 4.5.2.2                             | Mistura G2.....  | 166        |
| 4.5.2.3                             | Mistura G3.....  | 167        |
| 4.5.3                               | Influência do tipo de mistura na capacidade de absorção..... | 170        |
| 4.6                                 | RESUMO DOS RESULTADOS .....                                  | 171        |
| <b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....</b> |  | <b>173</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>            |  | <b>177</b> |

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente existe uma preocupação crescente em todo o mundo com o desenvolvimento de rodovias que ofereçam qualidade, conforto e segurança aos usuários e às pessoas que moram perto da mesma.

Normalmente, ao projetar um pavimento, se presta grande atenção à sua função estrutural e pouco se considera seu aspecto funcional, embora esta característica do pavimento seja cada vez mais importante para os usuários e vizinhos que moram perto das rodovias e para as quais exigem maior qualidade e conforto.

O revestimento superficial é uma parte fundamental de qualquer tipo de solução de pavimento devido ao fato que ele oferece diferentes características funcionais tais como atrito, textura, baixo ruído, redução da projeção da água (*splash*), refletividade, drenagem, resistência química, etc. Tal desempenho deve estar vinculado a um nível satisfatório de resistência mecânica (PIARC, 2013).

Não é tarefa fácil otimizar ao mesmo tempo todas estas qualidades funcionais dos revestimentos, mas existe um esforço cada vez maior de melhorar em todos os sentidos as camadas de rolamento.

A existência de lâmina de água sobre o pavimento provoca risco de hidroplanagem e viscoplanagem, prejudica a visibilidade pela névoa formada atrás dos veículos em movimento e aumenta a reflexão luminosa, o que impede visualizar a sinalização horizontal da via à noite. Tudo isto conduz a um aumento do número de acidentes nos dias chuvosos (MEURER FILHO, 2001).

Nos últimos anos, devido a uma combinação crescente de urbanização, aumento da demanda de transporte e uma planificação ineficiente de uso do solo urbano, houve um aumento da contaminação acústica devido ao tráfego de veículos. A alta velocidade de circulação dos veículos é o principal contribuinte ao ruído provocado pelo contato pneu/pavimento. Para reduzir este ruído, uma das alternativas é aperfeiçoar os revestimentos asfálticos no sentido de melhorar a sua capacidade de absorção sonora (PIARC, 2013).

Os concretos asfálticos drenantes, ou misturas asfálticas drenantes, apresentam uma ótima permeabilidade pela elevada porcentagem de vazios comunicantes na sua estrutura interna e ao mesmo tempo também reduzem o ruído gerado pelo contato

pneu/pavimento pelo mecanismo aerodinâmico. Porém, estas misturas são projetadas para aperfeiçoar uma das propriedades que é a permeabilidade e não propriamente a capacidade de absorção sonora. As misturas drenantes têm problemas de colmatação dos vazios, desagregação e de resistência à deformação permanente se a porcentagem dos vazios é muito elevada.

Existe uma tendência internacional para o uso de revestimentos com menores tamanhos de agregados e porcentagens de vazios e com granulometrias descontínuas que tenham uma macrotextura suficiente para conseguir boas reduções de níveis de ruído, boa aderência e eliminação da película de água na superfície.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é obter um revestimento asfáltico que ao mesmo tempo reduza os níveis de ruído provocados pelo tráfego, elimine a presença de água na superfície e apresente elevada resistência mecânica a partir da avaliação das propriedades acústicas, drenantes e mecânicas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Reunir e sintetizar informações das práticas atuais e pesquisas recentes e em curso em outros estados e países sobre misturas que sejam duráveis, com redução de ruído e presença de água para avaliação neste trabalho.
- Reconhecer e avaliar os fatores que influenciam as propriedades de absorção acústica, permeabilidade e resistência mecânica de revestimentos asfálticos.
- Estudar as propriedades de desempenho das misturas selecionadas por meio de ensaios de laboratório e determinar a melhor mistura em termos de desempenho geral (absorção sonora, durabilidade e permeabilidade).

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Um problema atual, mas não recente, é o ruído gerado pelo tráfego de veículos, que é uma das principais fontes da poluição sonora

que afeta a saúde humana e qualidade de vida dos residentes lindeiros. O ruído deteriora a qualidade de vida, causa problemas de saúde e impacta econômica e financeiramente a vida das pessoas e de organizações. Assim, o ruído do tráfego tornou-se um elemento de tensão entre o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida.

A principal fonte de geração do ruído do tráfego é aquele provocado pela interação pneu/pavimento a velocidades elevadas. Seria preferível não produzir o ruído durante a rolagem dos pneus. Como isso é impossível, há que se buscar a sua mitigação através da adoção de superfícies de revestimento com elevada capacidade de absorção sonora que possa reduzi-lo.

A exposição a altos níveis de ruído provoca efeitos nocivos na saúde humana. Segundo informes da Organização Mundial da Saúde, as principais alterações fisiológicas reversíveis são: dilatação das pupilas, hipertensão sanguínea, mudanças gastrintestinais, reações musculares e vasoconstrição das veias. Além dessas alterações fisiológicas, também existem as bioquímicas, que estão relacionadas a mudanças na produção de cortisona, do hormônio da tireoide e de adrenalina; além de alterações na glicose sanguínea e na proteína do sangue. O ruído também provoca efeitos cardiovasculares, dentre os quais o aumento da pressão sanguínea, que causa hipertensão arterial. Provoca perda da capacidade de audição, alteração do sonho, deterioração cognitiva e estresse. Todos esses problemas convergem para o aumento nos gastos em saúde e em perdas expressivas no potencial produtivo (WHO, 1999; SPECHT et al., 2009).

Por outro lado, a presença de água na superfície das rodovias acarreta problemas de segurança aos usuários pela perda de aderência do pneu/pavimento, o risco de hidroplanagem e viscoplanagem e diminuição da visibilidade, o que produz um aumento no número de acidentes de tráfego nos dias chuvosos.

É necessário oferecer ao usuário das rodovias e às comunidades vizinhas às vias, um sistema viário de qualidade técnica e que ao mesmo tempo melhore as condições de conforto e segurança de todos os cidadãos. Por isso, é necessário o estudo e o entendimento das soluções existentes para mitigar o ruído do tráfego e diminuir ou eliminar a presença de água na superfície da rodovia.

Tanto o ruído provocado pelo contato pneu/pavimento como a presença de água podem ser reduzidos ou minimizados otimizando-se as características dos revestimentos asfálticos.

As propriedades acústicas e drenantes de uma mistura asfáltica dependem da granulometria, porcentagem de vazios e vazios comunicantes, tamanho máximo do agregado e da textura superficial do revestimento. O desafio é se buscar um revestimento que apresente ao mesmo tempo boas propriedades acústicas, drenantes e resistência mecânica.

Neste trabalho, foram pesquisadas duas propriedades funcionais que são importantes nas camadas de rolamento: a capacidade de eliminação da lâmina de água superficial nos dias de chuva e a redução do ruído pneu/pavimento. Ao mesmo tempo, a mistura deverá apresentar bom desempenho à deformação permanente, resistência à desagregação e resistência ao dano por umidade induzida.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 1 expõe a introdução do trabalho, o objetivo geral e os objetivos específicos, e a justificativa do mesmo.

O Capítulo 2 consiste de uma revisão bibliográfica da literatura sobre os conceitos de ruído, sua geração, os fatores que influenciam o ruído gerado pela rolagem dos pneus, a permeabilidade dos revestimentos e, finalmente, sobre a prática corrente e pesquisas recentes de misturas abertas.

O Capítulo 3 refere-se aos materiais utilizados na pesquisa assim como o método empregado, detalhando cada ensaio realizado.

Os resultados dos ensaios e análise dos mesmos estão apresentados no Capítulo 4.

No Capítulo 5 são mostradas as principais conclusões obtidas nesta pesquisa, assim como sugestões para pesquisas futuras.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 IMPORTÂNCIA DO RUÍDO DO TRÁFEGO

A qualidade sonora de uma cidade está relacionada diretamente com a forma de urbanização, com as características do uso do solo, com o zoneamento, a densidade demográfica, a morfologia das edificações, o desenho urbano, as características do sistema viário e os hábitos e educação da comunidade.

O ruído parece perturbar as pessoas desde os tempos em que elas passaram a viver nas cidades. A sociedade ecologicamente consciente em que vivemos vem exigindo o enfrentamento de problemas que prejudicam a qualidade de vida. O ruído permeia as atividades humanas 24 horas por dia, e vem sendo apontado como uma das principais causas de deterioração da qualidade de vida, principalmente nas grandes cidades onde pessoas são afetadas mais pela exposição ao ruído do que qualquer outro poluente (BISTAFA, 2006).

Nos países da União Europeia, aproximadamente 40% da população está exposta a ruídos de tráfego rodoviário com um nível de pressão sonora superior a 55 dB(A) durante o dia e 20% são expostos a níveis superiores a 65 dB(A). O problema da poluição sonora também é grave em cidades de países em desenvolvimento e causada principalmente pelo tráfego. Medições realizadas em rodovias densamente transitadas mostraram níveis de pressão sonora equivalente, para 24 horas, de 75 a 80 dB(A), muito acima do nível permitido para preservar a saúde humana (WHO, 1999).

Nos últimos anos tem sido acumulada evidência sobre os efeitos na saúde humana do ruído ambiental e, sobretudo, do ruído produzido pelo tráfego rodoviário. Segundo WHO (1999) e WHO (2011) os efeitos adversos do ruído na saúde são os seguintes:

- **Deficiência Auditiva:** a deficiência auditiva induzida por ruído é a afeção de maior prevalência e estima-se que 120 milhões de pessoas no mundo têm dificuldades auditivas incapacitantes;
- **Inteligibilidade na fala:** o ruído provoca interferência no discurso ou conversa entre as pessoas, o que tem como resultado em um grande número de desvantagens pessoais e mudanças comportamentais;

- **Perturbação do sono:** o ruído pode causar efeitos primários durante o sono como a dificuldade em adormecer, alterações do sono profundo, aumento da pressão arterial, frequência cardíaca e aumento do movimento do corpo e efeitos secundários percebidos ao dia seguinte como aumento da fadiga, depressão e diminuição do desempenho;
- **Efeito sobre as funções fisiológicas:** o ruído gera hipertensão e doenças cardiovasculares;
- **Doença Mental:** o ruído não causa doença direta, mas presume-se que ele pode acelerar e intensificar o desenvolvimento de transtornos mentais latentes (neurose);
- **Diminuição do Desempenho:** Tem sido demonstrado, principalmente nos trabalhadores e crianças, que o ruído pode afetar negativamente o desempenho de tarefas cognitivas;
- **Irritação:** o ruído acima de 80 dB(A) pode aumentar o comportamento agressivo;

Os grupos de pessoas mais vulneráveis aos efeitos do ruído na saúde são pessoas com determinadas doenças ou problemas médicos (por exemplo, pressão arterial elevada); pessoas nos hospitais ou em reabilitação em suas casas, pessoas que tem tarefas cognitivas complexas, os cegos, pessoas com deficiência auditiva, fetos, bebês e crianças pequenas e os idosos em geral.

Além de custos relacionados com a saúde, a contaminação sonora acarreta grandes perdas econômicas, estas principalmente geradas pela desvalorização imobiliária (SANDBERG, 2001). Num estudo feito em 2003 na Dinamarca sobre a influência do ruído de rodovias sobre os preços de moradias, determinou que os preços das casas localizadas perto de rodovias movimentadas foram inferiores em perto de 1% para cada aumento em dB do ruído (FEHRL, 2006).

Também a fauna é afetada pelos altos níveis de ruído das rodovias. Isto acontece, principalmente, em reservas naturais que estão localizadas perto de rodovias.

Existem muitos projetos e programas de investigação internacionais que buscam alternativas para reduzir o ruído causado pelo tráfego ou minimizar seus efeitos. Na Europa, destacam-se os projetos SILVIA (*SILenda Via - Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise*), HARMONOISE, SILENCE, CALM, SIRUUS, QCITY, IMAGINE, investigações do IPG. Nos Estados Unidos existem também diversos projetos e investigações financiados pelo FHWA (*Federal Highway Administration*), NCHRP (*National Cooperative Highway Research*

*Program*), e SHAS (*State Highway Agencies*) e a indústria do pavimento (PIARC, 2013).

No Brasil, a resolução CONAMA N° 001/1990 dispõe sobre critérios de padrões de emissão de ruído decorrentes de diversas atividades industriais, comerciais, sociais e recreativas, considerando que os níveis excessivos de ruído devem ser controlados porque provocam deterioração da qualidade de vida, sobretudo nos grandes centros urbanos. Segundo esta resolução, são prejudiciais os ruídos com níveis superiores aos considerados aceitáveis pelas normas NBR 10.151 *Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade* e NBR 10.152 *Níveis de ruído para conforto acústico*, da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT. Estas normas descrevem procedimentos de medição do ruído e valores aceitáveis de nível de pressão sonora. São utilizadas medições e limites de níveis de pressão sonora ponderadas pela curva A dB(A). A emissão de ruídos produzidos por veículos automotores obedecem às normas expedidas pelo Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN (CONAMA, 1990).

Não existe na atualidade, no Brasil, uma referência legal que limite exclusivamente os níveis máximos de ruído devido ao tráfego. Entretanto, existem, na legislação, limites máximos de ruído admissíveis por zoneamento, por distintos tipos de ambiente e por veículos, visando assegurar o conforto da comunidade.

Ao contrário de muitos outros problemas ambientais, a poluição sonora continua crescendo. A maioria das pessoas são expostas a várias fontes de ruído, sendo o ruído do tráfego rodoviário uma fonte dominante. O crescimento populacional, a urbanização e, em grande medida o desenvolvimento tecnológico, são as principais forças motrizes e os futuros alargamentos de sistemas rodoviários, aeroportos internacionais e sistemas de transporte ferroviário só irão aumentar o problema do ruído.

Globalmente, o crescimento da poluição sonora ambiental urbana é insustentável, porque não envolve apenas os efeitos adversos diretos e cumulativos sobre a saúde. Ela também afeta negativamente as gerações futuras através da degradação dos ambientes sociais e de aprendizagem e residenciais, com as correspondentes perdas econômicas. Assim, o ruído não é simplesmente um problema local, mas um problema global que afeta a todos e solicita medidas de precaução em qualquer situação de planejamento ambiental. É provável que o ruído continue como uma questão importante também para o próximo século, tanto nos países

desenvolvidos e nos países em desenvolvimento. Portanto, é urgentemente necessária uma ação estratégica, incluindo o controle de ruído contínuo na fonte e em áreas locais.

Para compreensão do ruído e os problemas que ele acarreta, devem-se entender os diferentes tipos de ruído e como medi-los, de onde o ruído vem e os efeitos do ruído sobre os seres humanos.

## 2.2 CONCEITOS BÁSICOS DE SOM E RUÍDO

O som é parte da vida diária e é tudo o que nos rodeia. Está presente na música, ondas do mar, batida na porta, etc. Segundo Gerges (2000), o som é o resultado das vibrações dos corpos elásticos quando essas vibrações se verificam em determinados limites de frequências. Essas vibrações sonoras são mais ou menos rápidas e se transmitem ao meio que circunda o corpo sonoro (fonte sonora) produzindo compressões e distensões sucessivas das moléculas do meio, provocando variações de pressão ambiente.

Nem todas as flutuações de pressão do meio produzem sensação de audição quando atingem o ouvido humano. A sensação de som só ocorrerá quando a amplitude destas flutuações e a frequência de repetição das mesmas estiverem dentro de determinada faixa de valores.

O som é gerado quando a amplitude da variação da pressão ambiente é superior ao limiar da audibilidade ( $2 \times 10^{-5}$  Pa) e quando o período de variação da pressão ambiente corresponde a frequências dentro da faixa de áudio (20 Hz a 20000 Hz). Abaixo ou acima desta faixa estão respectivamente o infrassom e o ultrassom (BISTAFA, 2006).

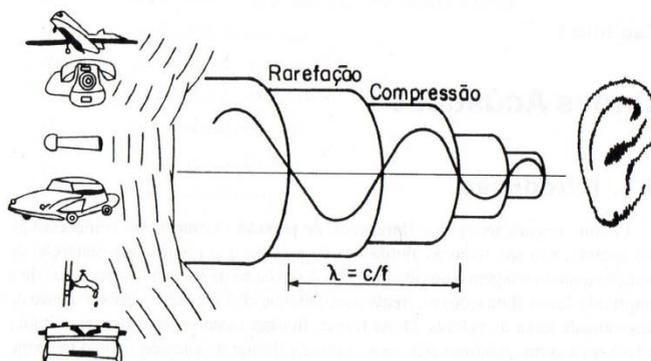
A definição do ruído é um tanto ambígua porque tem duas definições, uma subjetiva e outra física. A definição subjetiva define o ruído como um som sem harmonia, desagradável e indesejado. O efeito do ruído no indivíduo não depende somente de suas características (amplitude, frequência, duração, etc.), mas também da atitude do indivíduo frente a ele. Como o ruído é interpretado subjetivamente, uma mesma sensação auditiva pode ter conotação diferente para cada ser humano (GERGES, 2000; BISTAFA, 2006).

Sob o ponto de vista físico, o ruído é um som de grande complexidade, resultante da superposição desarmônica de sons provenientes de várias fontes. Pode ser definido como uma mistura de tons puros cujas frequências diferem entre si, não seguem nenhuma periodicidade e o movimento resultante não é harmônico e sim,

aleatório. O estudo destas frequências é importante, pois o ouvido humano tem reações adversas para cada faixa, diferenciando as consequências fisiológicas (CAMAROTTO, 1993 *apud* WHO, 1999).

A propagação do som produzido pelos corpos em vibração é por meio de ondas sonoras. Denomina-se de ondas sonoras as ondas longitudinais de pressão que se propagam em um meio elástico e apresentam propriedades de reflexão, reverberação, refração, difração, difusão e interferência. Então, uma onda sonora ao incidir numa superfície pode ser refletida, absorvida, difratada, difundida ou transmitida (GERGES, 2000). A Figura 2.1 mostra a propagação da onda sonora.

Figura 2.1 - Propagação da onda sonora



Fonte: Gerges (2000)

As ondas sonoras podem ser caracterizadas a partir dos seguintes parâmetros: a amplitude ( $A$ ), o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e o período ( $T$ ), frequência ( $f$ ) e velocidade de propagação da onda sonora ( $c$ ). A amplitude se refere à pressão máxima ou mínima produzida pela vibração; o comprimento de onda é a distância entre cristas ou senos sucessivos; o período corresponde ao tempo entre esses picos. A frequência refere-se ao número de vezes que um fenômeno periódico se repete na unidade de tempo e é medida em Hertz (Hz), ou ciclos por segundo. A velocidade de propagação é a velocidade com que a energia sonora é transmitida através do meio, é expressa em m/s e depende da temperatura, da densidade e da homogeneidade do meio. A amplitude de ondas de som costuma ser expressa em decibel.

### 2.2.1 Nível de pressão sonora

Para quantificar o som é necessária a medição da pressão sonora. A pressão sonora é a variação média de pressão em um determinado meio, relacionada à pressão atmosférica medida em Pascal ( $\text{N/m}^2$ ). Para cada frequência, existe um conjunto de valores de pressão sonora mínima, denominado limiar inferior de audibilidade, e de pressão sonora máxima, onde inicia o processo de dor acarretando até mesmo surdez. Para a frequência de 1000 Hz, a pressão audível encontra-se entre  $2 \times 10^{-5}$  Pa, que é o limite de audibilidade, e 100 Pa que é o limiar do surgimento da dor. Esta é uma gama muito ampla de alterações de pressão, sendo visível a dificuldade de se expressar em números de ordens de grandeza tão diferentes numa mesma escala linear. Portanto, usa-se a escala logarítmica. Então, a pressão sonora é quantificada em uma escala logarítmica denominada decibel, resultando no que se chama de nível de pressão sonora (GERGES, 2000):

$$\text{NPS} = 10 \log \left( \frac{P}{P_0} \right)^2 = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (2.1)$$

onde:

NPS ou  $L_p$  = Nível de Pressão Sonora, em dB;

$P$  = pressão sonora instantânea, em  $\text{N/m}^2$ ;

$P_0$  = pressão de referência que corresponde ao limiar de audibilidade ( $2 \times 10^{-5}$   $\text{N/m}^2$  ou 20  $\mu\text{Pa}$ ).

O NPS para o limite inferior de audibilidade é de 0 dB e para o limite de dor é de 130 dB. A escala dB apresenta uma correlação com a audibilidade humana muito melhor que a escala absoluta ( $\text{N/m}^2$ ).

Muitas vezes é necessário representar simultaneamente a variação da pressão sonora e a frequência da onda por meio de gráficos de espectros sonoros.

### 2.2.2 Frequência

A unidade de frequência é o Hertz (Hz), e refere-se à taxa de ocorrência da flutuação completa do som dado pelo número de ciclos por segundo. Um som com apenas uma frequência é chamado de um tom puro, mas é raramente encontrado na prática. A maior parte dos sons do ambiente são constituídos por uma mistura complexa de várias

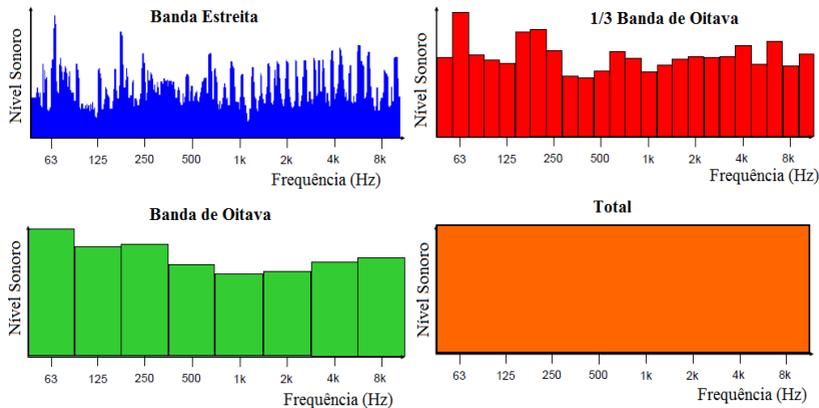
frequências diferentes. A faixa de frequência audível é normalmente de 20 a 20000 Hz (BISTAFA, 2006). A sensibilidade do ouvido para diferentes frequências em toda a gama audível não é uniforme. O ouvido humano é mais sensível na faixa de frequência em que o ruído pneu/pavimento ocorre (FEHRL, 2006).

Na faixa audível, o ouvido humano percebe a frequência de forma não linear e, segundo estudos a respeito, mostram que o ouvido humano obedece a Lei de Weber de estímulo e sensação, que, aplicado à acústica, mostra que a sensação auditiva varia de acordo com o logaritmo dos estímulos que a produzem. Assim, os intervalos de som entre 100 e 200 Hz, 200 e 400 Hz e 400 e 800 Hz parecerão iguais a nossos ouvidos. Com isso o intervalo entre frequências não se mede pela diferença de frequência, mas sim, pela relação entre as mesmas. Define-se, então, uma oitava como sendo o intervalo entre frequências cuja relação é igual a dois.

Para expressar o conteúdo de frequências de um sinal de som, a gama de frequências são divididas em uma série de bandas de frequência contíguas. Assim, as frequências podem ser segmentadas em larguras proporcionais (bandas de oitava) (MUN, 2010).

A divisão da faixa de audiofrequência em bandas de oitava tem sido de considerável aplicação prática e permite uma descrição rápida e correta de sons. Para análise espectral mais precisa, empregam-se faixas menores como de  $1/3$  ou  $1/12$  de banda de oitava (SANDBERG E EJSMONT, 2002). A Figura 2.2 mostra as formas de espectros de frequência do mesmo som.

Figura 2.2 - Formas de espectro de frequências do mesmo som



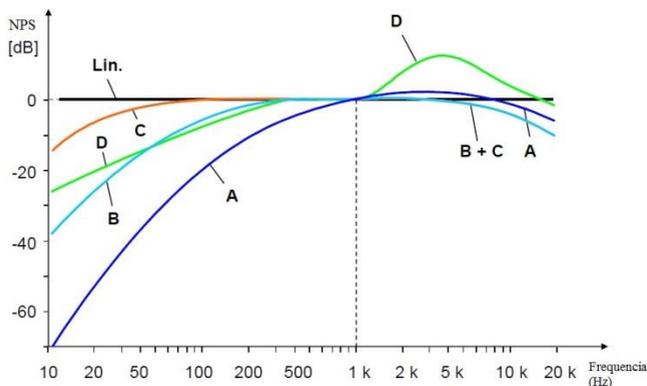
Fonte: Adaptado de Rasmussen et al. (2007)

### 2.2.3 Circuitos de compensação sonora

Os níveis de pressão sonora são alterados através de compensações realizadas pelos filtros dos equipamentos de medida, para cada faixa de frequência, obtendo-se níveis de pressão sonora compensada, ou simplesmente níveis sonoros, para que expresse de maneira mais fiel possível a sensação humana (GERGES E ARENAS, 2010). Os níveis de pressão sonora são atualmente relacionados à frequência através de curvas de ponderação (A, B, C e D).

Os equipamentos de medição do nível de pressão sonora são constituídos, basicamente, pela associação de um voltímetro eletrônico com malhas filtrantes especiais, denominadas de filtros de níveis de pressão sonora compensados, ou circuito de compensação (*Weighting Networks*) que, independentemente da faixa de frequência do som emitido, registram o nível de pressão sonora efetiva que atinge o ouvido humano. Estes filtros foram desenvolvidos através de simulações do comportamento do ouvido humano em experimentos audiômetros realizados em uma amostra de pessoas. Existem diferentes tipos de malhas filtrantes denominadas de ponderação, ou circuito A, B, C e D; que foram padronizadas internacionalmente e cujas curvas de resposta são as da Figura 2.3.

Figura 2.3 - Circuitos de compensação sonora



Fonte: Adaptado de Bruel e Kjaer (1998)

A curva mais utilizada é a curva de ponderação A por adequar-se melhor às intensidades perceptíveis pelo ouvido humano, sendo seu valor expresso em dB(A).

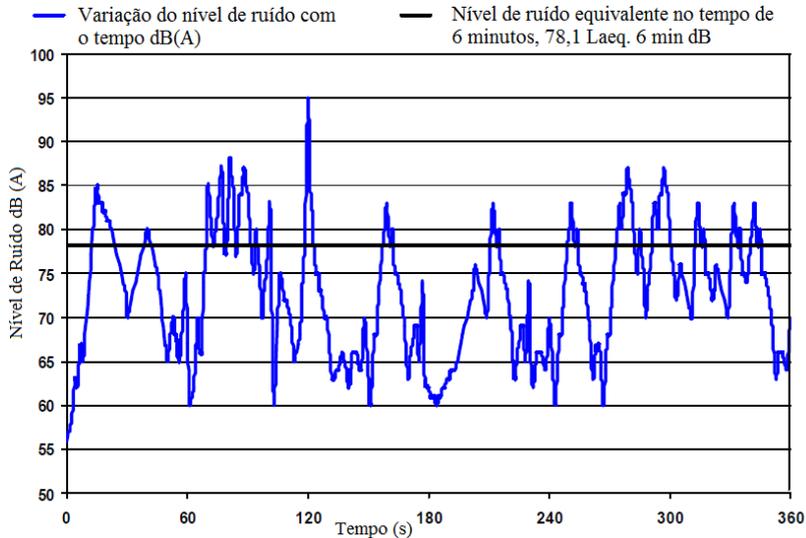
## 2.2.4 Índices de medição do NPS

Na maioria das situações, os níveis sonoros não serão iguais no tempo. Existem maneiras de converter esses tipos de sons não uniformes em uma única medida (número). Um medidor de níveis sonoros mostra a ascensão e queda do som ao longo do tempo, sendo importante considerar o período de tempo em que as medições são realizadas. No caso das medições de ruído do tráfego, o tempo típico de medição é da ordem de 5 a 90 minutos, e por vezes até 24 horas (RASMUSSEN et al., 2007). Em seguida, é a seleção do nível único que representa os dados, que podem ser os seguintes:

$L_{Aeq,T}$ : o nível sonoro contínuo equivalente é o indicador mais utilizado para avaliar o impacto do ruído do tráfego rodoviário. A soma do total de energia durante certo período de tempo dá um nível equivalente à energia média do som durante esse período.  $L_{Aeq}$  é a energia média de nível equivalente ao som na escala ponderada A durante um período. A Figura 2.4 ilustra o conceito de  $L_{Aeq}$ , mostrando uma variação do nível de ruído numa estrada movimentada. O período de medições do ruído da passagem dos veículos foi de 6 minutos e o nível constante de 78,1 dB representa o nível de ruído equivalente  $L_{Aeq}$

que durante o período de 6 minutos tem a mesma energia acústica que a recebida do ruído flutuante do tráfego durante o mesmo período (FEHRL, 2006).

Figura 2.4 - Nível de ruído rodoviário e nível de ruído equivalente Laeq

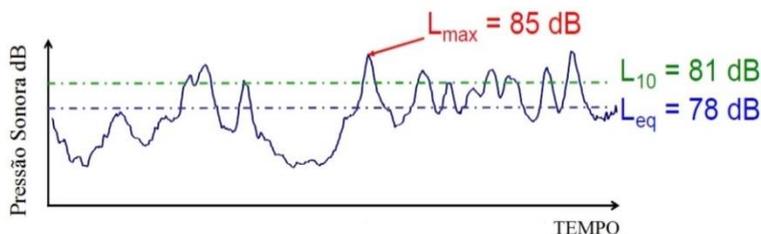


Fonte: Adaptado de Fehrl (2006)

**$L_{\max}$** : este é o nível máximo de som durante o período de medição. Geralmente é utilizado para eventos únicos importantes.

**$L_{xx}$** : representa o nível sonoro que é excedido só xx% do tempo de observação. Por exemplo,  $L_{10}$  significa que este nível foi ultrapassado durante 10% do tempo de observação ficando as demais medidas abaixo deste. Da mesma forma pode ser definido  $L_{50}$  e  $L_{90}$ .

Estes níveis sonoros podem ser expressos em dB(A) ou dB, segundo a análise do ruído seja feita com ou sem ponderação. O mais comum é utilizar o dB(A). A Figura 2.5 representa o  $L_{eq}$ ,  $L_{\max}$  e  $L_{xx}$ .

Figura 2.5 - Definição de  $L_{max}$ ,  $L_{10}$  e  $L_{eq}$ 

Fonte: Adaptado de Rasmussen et al. (2007)

### 2.3 GERAÇÃO DO RUÍDO DO TRÁFEGO

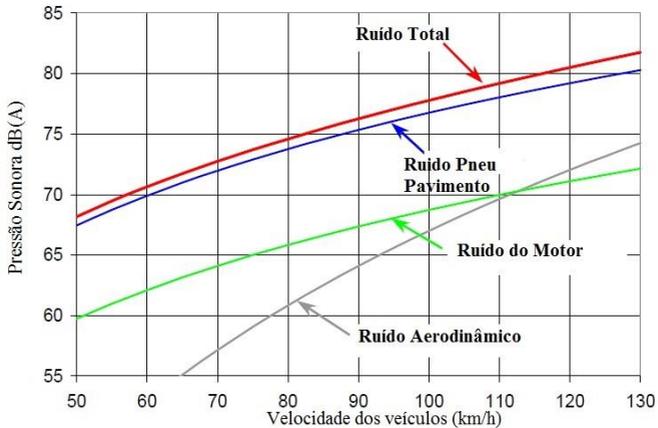
O ruído do tráfego é tudo o som que se ouve como resultado de veículos que se deslocam por uma rodovia e inclui a combinação de todas as possíveis fontes de ruído em um veículo. Estas fontes de ruído são divididas em propulsão, contato pneu/pavimento e efeito aerodinâmico. O ruído da propulsão inclui sons gerados pelo sistema de motor, escapamento e transmissão, e outros componentes do trem de força. O ruído pneu/pavimento é gerado pela rolagem dos pneus ao longo da superfície do pavimento. O ruído aerodinâmico é causado pela turbulência em torno ou ao redor de um veículo que passa através do ar (RASMUSSEN et al., 2007). O ruído aerodinâmico pode ser considerado desprezível em relação aos demais ruídos, mas sua maior contribuição ocorre quando o veículo circula a alta velocidade.

A intensidade do ruído resultante do motor é função de sua estrutura e de sua potência mecânica. Na prática, os motores diesel são mais ruidosos que os à gasolina, e em velocidades reduzidas e com baixo carregamento, a diferença em média é de 6 dB(A) (COPPE/UFRJ/DENATRAN/MJ,1980 *apud* LÁO, 2004).

A entrada de ar e a exaustão de gases são fontes predominantes de ruído quando não é usado o silenciador, pois este reduz as flutuações de pressão e permite a comunicação do ar com a atmosfera através de defletores equipados com absorvente de ruído. Este tipo de ruído aumenta com o aumento da velocidade do motor.

Bernhard e Wayson (2004) mostram os três mecanismos de geração de ruído pelo tráfego de veículos leves e velocidades acima de 50 km/h (Figura 2.6). Nesta figura, a parcela do ruído na interface pneu/pavimento supera o ruído do motor e aerodinâmico.

Figura 2.6 - Relação entre as fontes de ruído de tráfego



Fonte: Adaptado de Bernhard e Wayson (2004)

A importância relativa do ruído de propulsão e do pneu/pavimento depende do tipo de veículo, da velocidade do veículo, da forma como o veículo é conduzido e do desempenho acústico da superfície do revestimento. Fontes de ruído de propulsão são controladas, principalmente, pela velocidade do motor do veículo, enquanto o ruído do pneu/pavimento é controlado pela velocidade do veículo na rodovia (FEHRL, 2006).

Em velocidades de autoestrada para veículos bem conservados, a principal fonte de ruído do tráfego é o ruído do pneu/pavimento. Assim, a interface pneu/pavimento é o principal objetivo de estudos para reduzir o ruído do tráfego (BERNHARD E WAYSON, 2004).

Os fatores que influenciam o ruído gerado pelo tráfego de veículos são as características do revestimento do pavimento (características físicas, idade, rigidez), textura da superfície de rolamento, presença de lâmina de água, condições climáticas (temperatura e vento) e veículos (tipos, pneus e velocidade) (SANDBERG E EJSMONT, 2002).

## 2.4 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO RUÍDO

Sendo o ruído do tráfego uma fonte de poluição sonora que traz consequências para a saúde e qualidade de vida das pessoas que moram em áreas urbanas e perto de rodovias, muitas formas de mitigação do mesmo são estudadas e aplicadas internacionalmente.

Uma política de ruído integrado deve incluir vários procedimentos de controle: medidas para limitar o ruído na fonte, controle de ruído dentro do caminho de transmissão de som, proteção no local do receptor, planejamento do uso da terra, educação e sensibilização da opinião pública. Idealmente, os países devem dar prioridade a medidas cautelares que impedem o ruído, mas eles também devem programar medidas para mitigar os problemas de ruído existentes (WHO, 1999).

Nos processos de expansão de vias existentes ou na planificação de novas vias, nos estudos de impacto ambiental deve-se considerar a contaminação sonora que as vias provocarão de forma de minimizar as consequências negativas do ruído do tráfego sobre as pessoas ou, pelo menos, que o projeto contemple medidas de redução do ruído.

Os níveis de ruído do tráfego percebidos pela população podem ser reduzidos mediante ações sobre a fonte do ruído (motor, pneu/pavimento), a propagação do ruído (barreiras acústicas) ou a recepção do ruído (medidas de isolamento acústico nos edifícios) (FEHRL, 2006).

O isolamento acústico das edificações e a instalação de janelas antirruído são soluções bastante eficazes na redução do nível de pressão sonora, porém se limitam a um pequeno grupo de pessoas que se encontram no interior do local protegido, não tendo nenhuma melhora no entorno da via. Além disso, as condições climáticas e financeiras de muitos países tornam estas soluções inviáveis.

As barreiras acústicas já foram bastante empregadas. Contudo, estas representam impacto visual negativo e alteram as correntes de ar nos locais de aplicação das mesmas. O uso de barreiras para bloquear o caminho direto da fonte para o receptor pode reduzir a propagação do som. Os efeitos atenuantes da barreira são limitados pela energia do som que salta ou dobra ao redor da barreira. Por isso, elas não têm que ter lacunas. As barreiras acústicas reduzem a propagação do ruído em função de sua altura e da distância que estejam da fonte emissora.

Embora barreiras mais altas sejam melhores, na prática, é difícil conseguir reduções de mais de 10 dB (SILENCE, 2008).

Outras soluções existentes para mitigar o ruído do tráfego é limitar as emissões de ruído dos veículos novos (tipo de teste) e controlar regularmente as emissões de ruído dos veículos já em uso. Estes limites sobre os níveis de pressão sonora para veículos reduzem a emissão de ruído dos motores. Limitar a velocidade de circulação dos veículos e caminhões também é uma solução possível para reduzir o ruído do tráfego rodoviário.

Atualmente, a medida mais eficaz de mitigação do ruído do tráfego é reduzir as emissões de ruído na fonte. Existe um forte foco em medidas de mitigação relacionadas com as fontes do ruído e uma crescente ênfase na relação custo-benefício das mesmas (PIARC, 2013).

O principal ruído do tráfego em rodovias é o ruído gerado pela interação pneu/pavimento (BERNHARD E WAYSON, 2004). Este ruído pode ser reduzido mediante a utilização dos chamados pavimentos silenciosos que são revestimentos que têm características específicas relacionadas às magnitudes de textura do revestimento, ao índice de vazios e à rigidez do mesmo, que proporcionam um melhor desempenho do pavimento em relação aos níveis sonoros (PIARC, 2013).

A construção de superfícies silenciosas tem um benefício potencial amplo porque não necessariamente incorre-se em custos adicionais de construção. Outra vantagem importante é que o controle do ruído pneu/pavimento é uma redução de ruído na fonte que é a abordagem mais eficaz. Outras formas de controle de ruído, como as barreiras podem ser caras, menos eficaz e aplicável em cidades, e muitas vezes são visualmente intrusivas. Em algumas situações são utilizados pavimentos de baixo ruído em combinação com barreiras acústicas, terraplenagens ou outras medidas sem compreensão ou controle do desempenho combinado que não é sempre eficaz (FEHRL, 2006).

Partindo de diversas pesquisas e experiências internacionais desenvolvidas em EEUU, Europa, Austrália e Japão, conclui-se que é possível construir e manter pavimentos mais silenciosos que os pavimentos típicos, sendo também seguros, duráveis e de baixo custo.

Ainda continua sendo crucial que o conhecimento e as experiências sejam compartilhados de forma a permitir que as inovações e produtos desenvolvidos para uso nos estados membros específicos, possam ser igualmente benéficos para uso em uma área mais ampla.

## 2.5 RUÍDO PELA INTERAÇÃO PNEU/PAVIMENTO

Na década de 1980, a partir do esforço do ramo automobilístico e da evolução tecnológica para reduzir o ruído mecânico dos automóveis, o ruído da interação pneumático/pavimento passou a ser preponderante. Para reduzir este ruído é necessário atuar sobre o pneumático e sobre o revestimento.

A interação pneu/pavimento passa a ser a principal fonte geradora de ruído quando os veículos ultrapassam um determinado limite de velocidade de circulação, chegando de 2 a 4 dB(A) acima do ruído produzido pelas demais fontes (RASMUSSEN et al., 2007). Existem divergências quanto ao valor dessa velocidade limite, variando de 50 a 80 km/h.

Para automóveis circulando entre 50 ou 60 km/h a influência na geração de ruído é predominantemente do motor. Para velocidades mais elevadas, predomina o ruído pneu/pavimento. Para os veículos pesados, este limite é de 70 ou 80 km/h (SANZ, 2006 *apud* KNABBEN, 2012). Assim, a interface pneu/pavimento é o principal objetivo de estudos para reduzir o ruído do tráfego.

A percepção do ruído oriundo desta interação está fortemente influenciada pelas características do veículo, pelo tipo de pneu e pelas características do revestimento.

### **Mecanismos de geração do ruído de rolamento do pneu**

O ruído pneu/pavimento depende de vários mecanismos e de dois sistemas principais (pneumático e revestimento) (PRATICÓ, 2012). Estes mecanismos ocorrem simultaneamente e em diferentes graus, dependendo da combinação da interação do pneu/pavimento.

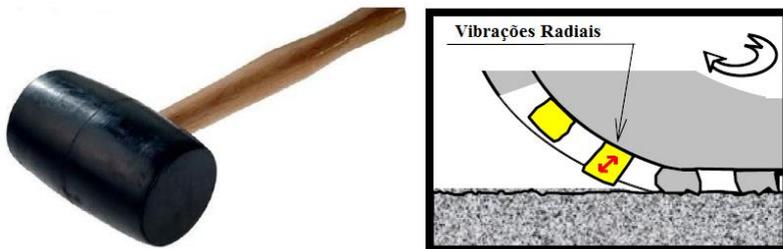
Segundo Sandberg e Ejsmont (2002), Rasmussen et al. (2007) e PIARC (2013), os mecanismos de geração do ruído pneumático revestimento podem ser divididos da seguinte maneira:

#### **a) Mecanismos de geração**

**Vibrações mecânicas:** são geradas pelos sucessivos impactos entre os blocos da banda de rolagem do pneu e a superfície do pavimento. Este mecanismo está fortemente relacionado às características da banda de rolagem e a textura da superfície do

pavimento. Pode-se comparar o impacto do bloco da banda de rolagem, com um pequeno martelo de borracha que bate no pavimento, causando vibração à carcaça do pneu. A Figura 2.7 mostra a vibração causada pelo impacto entre a banda de rolagem e o pavimento.

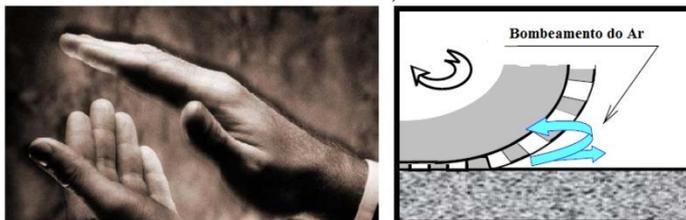
Figura 2.7 - Vibrações mecânicas entre o pneu e o pavimento (efeito martelo)



Fonte: Adaptado de Rasmussen et al. (2007)

**Vibrações de ar ou de bombeamento do ar:** são geradas entre a superfície do pavimento e os sulcos do pneu. Entre os blocos da banda de rolagem do pneu e a textura de um revestimento existem poros preenchidos com ar. Com a rolagem dos pneus, em alguns poros esse ar é expulso e em outros o ar é aprisionado e comprimido. O ar também é sugado na parte de trás do pneu. Todos esses mecanismos ocorrem milhares de vezes por segundo. Um exemplo prático é bater palmas ou assobiar, onde o ar é forçado a sair de uma pequena abertura. A Figura 2.8 mostra o bombeamento do ar que ocorre no contato pneu/pavimento.

Figura 2.8 - Vibrações de ar entre pneu/pavimento (efeito bater palmas ou assobiar)



Fonte: Adaptado de Rasmussen et al. (2007)

**Vibrações do tipo aderência/deslize (“*stick-slip*”):** este mecanismo é constituído por uma sequência de ciclos de contato (*stick*) e de separação (*slip*) entre a superfície do revestimento e a borracha do pneumático gerando as vibrações tangenciais. Isto acontece milhares de vezes por segundo, produzindo um som de alta frequência. Um exemplo prático deste efeito pode ser observado num jogo de basquete onde o som característico do deslizamento do tênis pode ser ouvido. Esse mesmo tipo de som é produzido quando um pneu rola ao longo da superfície do pavimento. A Figura 2.9 mostra este mecanismo.

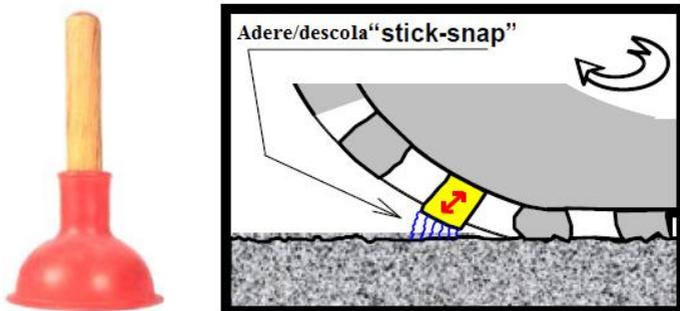
Figura 2.9 - Mecanismo aderência/deslize entre pneu/pavimento (efeito deslizamento do tênis)



Fonte: Adaptado de Rasmussen et al. (2007)

**Vibrações do tipo adere/descola (“*stick-snap*”):** o contato entre os blocos da banda de rolagem com a superfície do pavimento durante a rolagem, causam uma adesão entre estes blocos e o revestimento. No momento seguinte à adesão ocorre a liberação do bloco, criando a energia sonora e a vibração radial na carcaça do pneu. Este efeito é semelhante a um copo de sucção que se adere a uma superfície lisa, pela adesão e o vácuo que é criado quando o ar no copo é empurrado para fora. Quando os blocos do pneu interagem com o pavimento, um efeito igual pode ocorrer. Na Figura 2.10 está representado o mecanismo.

Figura 2.10 - Adesão na área de contato entre a banda de rodagem e o pavimento (Efeito de sucção)



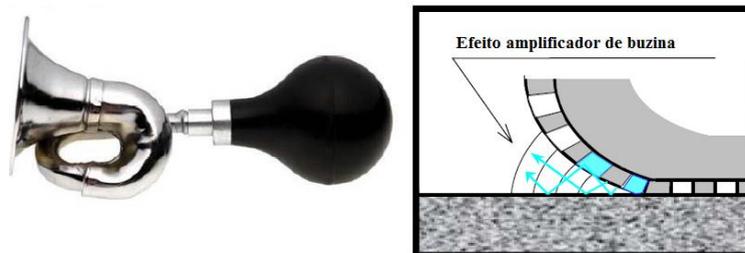
Fonte: Adaptado de Rasmussen et al. (2007)

### b) Mecanismos de amplificação

Os mecanismos de amplificação podem aumentar os níveis de ruído dos mecanismos descritos anteriormente e são os seguintes: efeito corneta, ressonância de Helmholtz, ressonância tubular, vibrações laterais e ressonância da cavidade.

**Efeito buzina acústica:** é gerada pela geometria do pneu e o pavimento, o qual forma um segmento em forma de cunha de ar aberta. Isso resulta na amplificação significativa do ruído gerado imediatamente à frente, ou atrás da área de contato, e na distorção de algumas frequências. Ocorrem múltiplas reflexões das ondas sonoras entre o pneu e a superfície do pavimento amplificando dessa forma o ruído. Estas múltiplas reflexões de som são semelhantes às reflexões que ocorrem dentro de uma buzina. No entanto, no caso do pneu, a buzina é fraca uma vez que é aberta nos dois lados. A Figura 2.11 mostra o mecanismo.

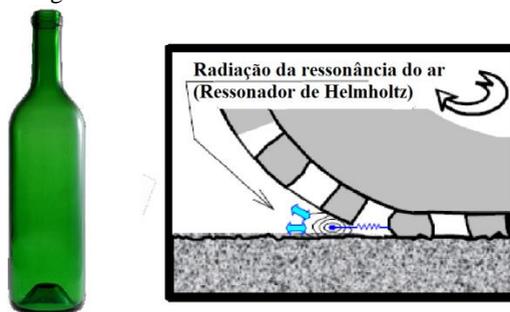
Figura 2.11 - Mecanismo de amplificação "Buzina Acústica"



Fonte: Adaptado de Rasmussen et al. (2007)

**Ressonador de Helmholtz:** este efeito é devido a uma movimentação de ar entre cavidades interconectadas da banda de rolagem e a superfície do pavimento, amplificado por ressonâncias. O fenômeno pode ocorrer na extremidade traseira do pneu. Este fenômeno é análogo ao som criado ao assoprar pelo gargalo de uma garrafa vazia. O ar no gargalo da garrafa, que funciona como uma massa, vibra para acima e para baixo sobre a almofada de ar para dentro da garrafa, que funciona como uma mola. No caso do pneu/pavimento, o volume da cavidade (do sulco liberado no contato com a superfície) atua como mola e o ar presente entre a banda de rolagem e a superfície do pavimento atuam como massa. Este fenômeno está associado a uma faixa de frequência entre 1000 a 2000 Hz. A Figura 2.12 mostra o efeito.

Figura 2.12 - Efeito Ressonador de Helmholtz



Fonte: Adaptado de Rasmussen et al. (2007).

**Ressonância de tubo:** Este efeito é semelhante ao produzido quando o ar é soprado através de um tubo de órgão. Um som será

amplificado que é único para o comprimento do tubo e aberturas do mesmo. Geometrias de tubos podem ser encontradas num pneu como as várias ranhuras do pneu que são comprimidas e abertas em vários pontos debaixo da área de contato. O som gerado em outros locais pode ser amplificado dentro destes tubos. A Figura 2.13 esquematiza este efeito.

Figura 2.13 - Efeito Ressonância de tubo



Fonte: Adaptado de Rasmussen et al. (2007).

**Vibrações da parede lateral:** A energia criada pela vibração do pneu na interface da área de contato com a superfície do pavimento é transportada para a parede lateral do pneu que vibra e irradia o ruído. Este efeito é conhecido como efeito do prato de torta, porque se este prato é disposto de forma invertida e um telefone celular ou barbeador é colocado em cima, as vibrações produzidas por estes objetos serão ampliadas significativamente. A maior parte das pequenas vibrações, descritas como mecanismos de geração, serão ampliadas como vibrações da parede lateral do pneu. A Figura 2.14 representa as vibrações.

Figura 2.14 - Ilustração do efeito de vibração da parede lateral do pneu



Fonte: Adaptado de Bernhard e Wayson (2004).

**Ressonância acústica interna do pneu:** é criado quando um pneu é “chutado” e, na verdade, pode ser mais bem ouvido no interior do veículo. O ar dentro do pneu é excitado durante a rolagem do pneu. Este mecanismo de amplificação é menos importante que o mecanismo descrito anteriormente para o ruído ouvido no exterior do veículo. O ar no interior do próprio veículo tende a amplificar ainda mais esta frequência.

A combinação de alguns ou todos estes mecanismos produzem o ruído de contato pneu/pavimento. Ele sofre a influência das características dos pneumáticos e de seu estado de conservação bem como da irregularidade longitudinal, do tipo e nível de serventia dos revestimentos e da impedância mecânica do contato pneu/pavimento.

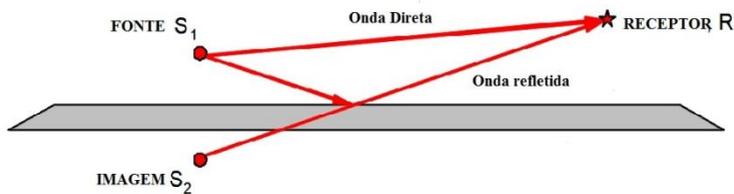
## 2.6 PROPAGAÇÃO DO RUÍDO PNEU/PAVIMENTO

O ruído propagado de uma fonte sonora em campo livre é atenuado pela distância da fonte. A taxa de atenuação depende da forma da frente de onda. Para uma fonte pontual idealizada, as ondas sonoras se propagam ao longo de uma frente de onda esférica e a pressão sonora diminui de acordo com a lei do inverso do quadrado da distância.

Um veículo em posição estática pode ser considerado como uma fonte pontual unidirecional, mas à medida que se desloca, vai ocupando sucessivamente novas posições do percurso, deixando de ser uma única fonte e sim, uma sequência de fontes. O espectro do ruído de tráfego é uma mistura de todos os espectros característicos de cada fonte, que depende do meio de propagação. A análise por frequência permite identificar as contribuições ao ruído total de determinadas fontes sonoras, o que é fundamental no estudo da propagação e em medidas corretivas (LÁO, 2004).

Quando uma fonte e um receptor estão localizados acima de uma superfície plana, como a superfície do pavimento, ocorrem as reflexões a partir do plano do solo. Para uma superfície de concreto asfáltico denso, como a diferença de trajeto entre a onda incidente e a refletida é pequena e nenhuma interferência destrutiva ocorre entre estas, as ondas sonoras que chegam dos dois trajetos adicionam a intensidade sonora em 6 dB sobre a amplitude de campo livre (FEHRL, 2006). A Figura 2.15 representa a reflexão da onda sonora numa superfície densa.

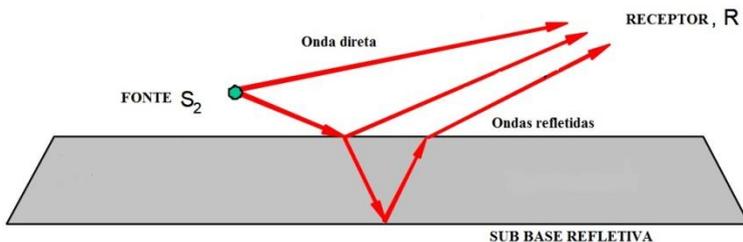
Figura 2.15 - Reflexão do ruído na superfície de um revestimento denso



Fonte: Adaptado de Fehrl (2006).

Quando a superfície é porosa, a diferença de comprimentos de trajeteto entre as ondas diretas e refletidas é grande e ocorre interferência destrutiva no caminho da onda como está representado na Figura 2.16. Esta interferência ocorre em uma faixa de frequência entre 250 - 1000 Hertz.

Figura 2.16 - Reflexão do ruído na superfície de um pavimento poroso



Fonte: Adaptado de Fehrl (2006).

As frequências e as amplitudes destes efeitos da interferência dependem fortemente das propriedades acústicas da camada de superfície e do ângulo de incidência das ondas sonoras nesta superfície.

## 2.7 ABSORÇÃO SONORA

Para resolver os problemas ambientais associados ao ruído do tráfego é necessária a utilização de materiais que absorvam as ondas sonoras em uma ampla faixa de frequências (MUN, 2010).

O som se propaga uniformemente em todas as direções, diminuindo sua amplitude a medida que se afasta da fonte sonora em condições de campo livre. Ao encontrar um obstáculo como a superfície do pavimento, parte da onda sonora incidente no mesmo será refletida,

outra parte é absorvida e outra parte transmitida pelo obstáculo. As quantidades relativas da onda sonora refletidas, absorvidas e transmitidas dependem do comprimento da onda, de sua amplitude e das propriedades do material que compõe a superfície. A absorção do som é uma propriedade do material que contribui para reduzir os níveis de ruído quando o som se propaga a partir da fonte para o receptor.

Os coeficientes de reflexão sonora ( $\delta$ ), o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) e o coeficiente de transmissão sonora ( $\tau$ ) são definidos nas equações 2.2 a 2.4 (BISTAFA, 2006):

$$\delta = \frac{\text{energia acústica refletida}}{\text{energia acústica incidente}} = \frac{W_{\text{refletida}}}{W_{\text{incidente}}} \quad (2.2)$$

$$\alpha = \frac{\text{energia acústica absorvida}}{\text{energia acústica incidente}} = \frac{W_{\text{absorvida}}}{W_{\text{incidente}}} \quad (2.3)$$

$$\tau = \frac{\text{energia acústica transmitida}}{\text{energia acústica incidente}} = \frac{W_{\text{transmitida}}}{W_{\text{incidente}}} \quad (2.4)$$

O coeficiente de absorção acústica é a relação entre a energia acústica incidente e a energia acústica absorvida pela superfície. Este valor é sempre positivo e pode variar de 0 a 1, sendo que um material puramente absorvente possui o valor de 1. O coeficiente  $\alpha$  depende principalmente da frequência, do ângulo de incidência do som, do tipo de campo sonoro (difuso, ondas planas, etc.), da densidade, da espessura e da estrutura interna do material (GERGES E ARENAS, 2010).

A caracterização quanto às propriedades de absorção e de reflexão de uma superfície é dada pelo coeficiente de absorção sonora, pelo coeficiente de reflexão sonora e pela impedância acústica ( $Z$ ). A impedância acústica é a oposição que o meio oferece a passagem da onda sonora em função da frequência e da velocidade. Para um meio material, pode ser definida como a razão entre a pressão sonora  $P$  e a velocidade das partículas no meio material (Equação 2.5).

$$Z = \frac{P}{v} = \rho \times c \quad (2.5)$$

onde:

$Z$  = impedância acústica específica de valor real (para ondas planas) em  $\text{kg/m}^2\text{s}$ ;

$P$  = pressão acústica no meio (para ondas planas se propagando no sentido positivo de  $x$ );

$v$  = velocidade de vibração da partícula (para ondas planas se propagando no sentido positivo de  $x$ );

$\rho$  = densidade do material, medida em  $\text{kg/m}^3$ ;

$c$  = velocidade do som no meio, em  $\text{m/s}$ .

Para ondas estacionárias ou divergentes, o valor de  $Z$  em geral é um número complexo (equação 2.6).

$$Z = \frac{P}{v} = r + ix \quad (2.6)$$

onde:

$r$  = resistência acústica específica;

$x$  = reatância acústica específica;

$i$  = número imaginário  $\sqrt{-1}$ .

### **2.7.1 Materiais de absorção sonora e características internas dos mesmos**

Os materiais de absorção sonora são geralmente porosos e/ou fibrosos (BISTAFA, 2006; GERGES E ARENAS, 2010). Nos materiais porosos, a energia acústica incidente entra pelos poros e dissipa-se por reflexões múltiplas e atrito viscoso, transformando-se em energia térmica. Nos materiais fibrosos, a energia acústica incidente entra pelos interstícios das fibras fazendo que elas vibrem junto com o ar, dissipando assim como energia térmica devido ao atrito das fibras excitadas.

Tanto para os materiais porosos com os fibrosos é fundamental que o material permita a passagem de um fluxo de ar, que vai propagar as ondas sonoras através do ar dos poros ou interstícios do material poroso ou fibroso, respectivamente (GERGES E ARENAS, 2010).

Para quantificar as características internas dos materiais são utilizados três parâmetros mais importantes:

### a) Resistividade ao fluxo de ar

A resistividade ao fluxo de ar pode ser usada para estabelecer correlações entre a estrutura do material e algumas das suas propriedades acústicas. A resistividade específica ao fluxo de ar é definida como:

$$R_s = \frac{1}{u} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\Delta P}{u} \quad (2.7)$$

onde:

$R_s$  = é a resistividade específica ao fluxo de ar, em  $\text{Ns/m}^3$ ;

$\Delta P$  = diferença de pressão de ar, medida entre os dois lados de uma amostra de material na qual se força a passagem de ar, em  $\text{N/m}^2$ ;

$u$  = velocidade do ar normal a superfície da amostra, em  $\text{m/s}$ .

A resistividade ao fluxo  $R$  é a resistividade específica ao fluxo por unidade de espessura do material:

$$R = \frac{R_s}{d} \quad (2.8)$$

onde:

$R$  = resistividade ao fluxo de ar, em  $\text{Ns/m}^4$ ;

$d$  = espessura da amostra, em  $\text{m}$ ;

$R_s$  = resistividade específica ao fluxo de ar, em  $\text{Ns/m}^3$ .

Se a resistividade é demasiado elevada, a onda sonora não pode entrar facilmente no meio. Se for demasiado baixa, não há atrito suficiente para dissipar a energia do som significativamente. Para materiais acústicos, a gama de valores para a resistividade do fluxo de ar está entre  $2 \times 10^3$  e  $2 \times 10^5 \text{ Ns/m}^4$  (GERGES E ARENAS, 2010).

### b) Porosidade

A porosidade é definida como a relação entre o volume de vazios dos poros da amostra do material e o volume total da amostra (Equação 2.9). A porosidade é um parâmetro com um papel importante na propagação acústica no meio poroso numa extensa faixa de frequências.

$$h_p = \frac{V_v}{V_t} \quad (2.9)$$

onde:

$h_p$  = porosidade;

$V_v$  = volume de vazios da amostra;

$V_t$  = volume total da amostra de material.

### c) Fator estrutural e tortuosidade

A influência da forma geométrica do esqueleto na densidade efetiva e compressibilidade é representada pelo fator estrutural  $S$ . Este parâmetro representa a relação entre a densidade efetiva do fluido e a densidade do mesmo fluido no campo livre. Não é possível estimar este valor teoricamente.

As teorias mais modernas não fazem referência a este fator de estrutura e sim, a um conceito mais apropriado desde o ponto de vista físico que é a tortuosidade de um material, a qual representa o grau de irregularidade e variação na direção de um canal (GERGES E ARENAS, 2010).

A tortuosidade é definida pela relação entre o comprimento real do canal do poro e o comprimento total de amostra. Esta é a sinuosidade da passagem de fluxo real em um meio poroso. Ela está diretamente relacionada tanto com a forma dos poros e a variação de seção transversal ao longo do comprimento do poro, como quanto à existência de ramificação colateral. A tortuosidade pode ser quantificada experimentalmente mediante a medida da transmissão ultrassônica e mediante medidas de condutividade elétrica (LUONG et al., 2014).

O espectro do coeficiente de absorção de um pavimento depende da tortuosidade, cuja relação com as propriedades da mistura asfáltica é ainda um problema (PRATICÓ, 2014).

## 2.7.2 Absorção sonora de revestimentos asfálticos

A absorção sonora de uma superfície de estrada é considerada um dos parâmetros que influenciam os níveis de ruído rodoviário gerado pelo contato pneu/pavimento (LI et al., 2015). Estudos mostram que o coeficiente de absorção sonora nos revestimentos abertos ou porosos varia com a frequência do som e é mais favorável na faixa de 800 a 1000 Hz, que é normalmente a faixa de frequências na qual o ruído

pneu/pavimento acontece com maior intensidade (SANDBERG E EJSMONT, 2002).

Os revestimentos porosos e semi porosos apresentam importantes propriedades acústicas que podem afetar a geração e propagação de ruído dos veículos (FEHRL, 2006). Os revestimentos porosos são capazes de absorver o som do motor, bem como o som gerado pela interação pneu/pavimento. Essas boas propriedades de absorção se devem não só ao alto conteúdo de vazios, mas também a sua resistência ao fluxo e tortuosidade.

Superfícies porosas são muito populares para a redução do ruído do tráfego devido à sua aptidão em absorver o mesmo. Elas podem reduzir o ruído em até 6 dB(A), em comparação a uma camada convencional (PIARC, 2013).

As ondas sonoras entram pela camada superior da superfície porosa do revestimento e são parcialmente refletidas e parcialmente absorvidas. A energia sonora da parte absorvida é transformada em outro tipo de energia. Em rodovias isto é, principalmente, devido a dois efeitos: i) por perdas viscosas devido a como a onda de pressão bombeia ar para dentro e para fora das cavidades do revestimento; ii) por amortecimento elástico térmico.

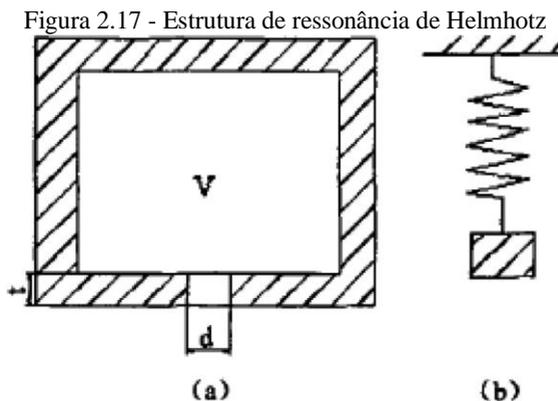
A absorção sonora é dependente da frequência acústica da onda sonora incidente, do ângulo de incidência das ondas sonoras sobre a superfície da rodovia, tipo de campo sonoro (difuso, ondas planas, etc), densidade, espessura e estrutura interna do material.

O valor do coeficiente de absorção acústica dependerá da facilidade da onda para entrar nos poros do material, por um lado. Por outro lado, este valor depende do atrito com a superfície da estrutura interna que participa na dissipação da energia sonora (TIWARIA et al., 2004).

O revestimento pode ser considerado como um material de absorção sonora de estrutura porosa com esqueletos sólidos. O revestimento é considerado composto por estruturas de absorção de som de ressonância da cavidade.

A estrutura de ressonância de Helmholtz contém uma cavidade rodeada por um recipiente fechado e ligado com o ar exterior através de um orifício com um pequeno diâmetro e profundidade em comparação com o volume da cavidade (Figura 2.17 (a)). Quando a profundidade  $t$  e o diâmetro  $d$  forem muito menores que o comprimento de onda do som, a elasticidade da coluna de ar no interior do orifício é desprezada e a

coluna de ar é assumida como sendo um ponto de massa sem deformação. O ar no interior da cavidade é assumido como sendo uma mola de ar sob a vibração elástica da onda sonora. A estrutura pode ser descrita como um oscilador de mola, como mostrado na Figura 2.17 (b). Quando a frequência do som incidente está no mesmo ritmo com a frequência inerente do sistema de mola, a coluna de ar está em vibração violenta devido à ressonância. A energia sonora é dissipada durante a fricção entre a coluna de ar e as paredes laterais do orifício (LIU et al., 2016).

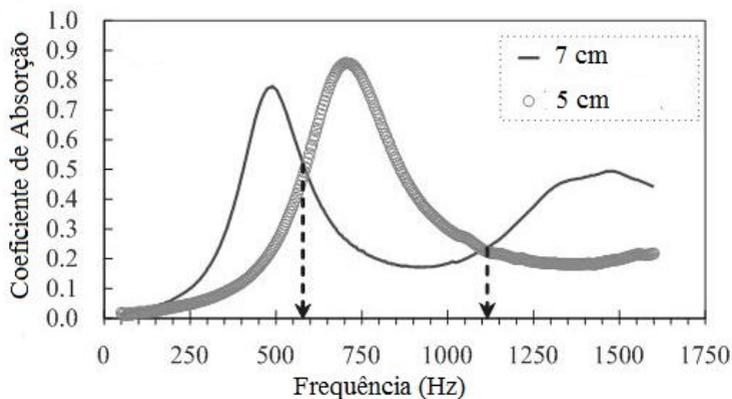


Fonte: Liu et al. (2016).

Fatores como a porcentagem de vazios, padrões de textura, espessura da camada e a estrutura dos vazios influenciam a capacidade de absorção sonora do revestimento. Geralmente, quanto maior é a porcentagem de volume de vazios, maior é o coeficiente de absorção sonora. Quanto maior é a espessura do revestimento, maior é a quantidade de som de baixa frequência absorvido (LIU et al., 2016).

A Figura 2.18 mostra os espectros de absorção de som em função da espessura do revestimento e nela pode ser visto que o pico do espectro de absorção é dependente da espessura da camada.

Figura 2.18 - Espectros de absorção em função da espessura do revestimento



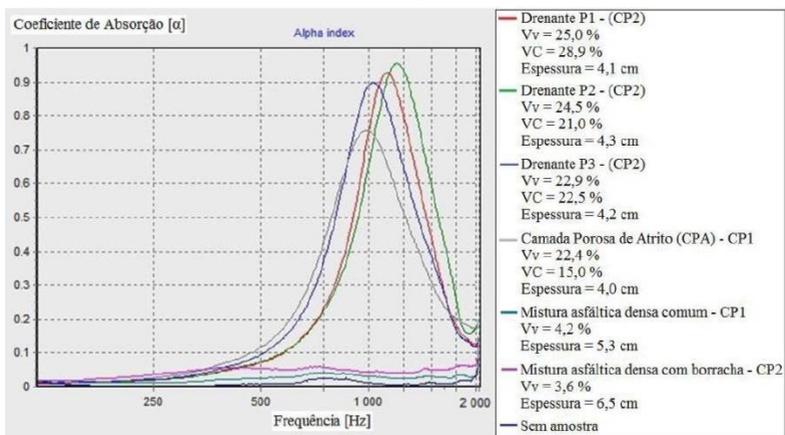
Fonte: Adaptado de Mun (2010).

Para espessuras maiores que 50 mm ocorrem dois picos de absorção em diferentes frequências (SANDBERG e EJSMONT, 2002; FEHRL, 2006). Coeficientes de absorção acústica menores que 0,2 têm pouca influência nos níveis sonoros finais que afetam aos receptores. As misturas densas têm espectros de absorção com valores máximos entre 0,05 e 0,2.

Astrana Júnior (2006) realizou ensaios de absorção sonora em concretos asfálticos drenantes e densos com o tubo aberto colocado sobre a placa asfáltica drenante. Nesse estudo, ele avaliou a absorção sonora de misturas drenantes com granulometrias desenvolvidas por Meurer Filho (2001) e determinou que o coeficiente de absorção destas misturas foi maior que as convencionais.

Láo (2004) e Knabben (2012) realizaram ensaios de absorção sonora em diferentes tipos de revestimento utilizando o tubo de impedância. Os maiores coeficientes de absorção foram para as misturas drenantes e camadas porosas de atrito (CPA). A Figura 2.19 mostra o estudo de Knabben (2012).

Figura 2.19 - Curva de absorção sonora para diferentes tipos de revestimento



Fonte: Knabben (2012)

As curvas de absorção sonora das misturas abertas ou porosas se comportam como um ressonador de Helmholtz, ou seja, existe um pico de absorção sonora na frequência de ressonância de Helmholtz (KNABBEN, 2012).

### 2.7.3 Medidas de absorção sonora

Para aperfeiçoar as propriedades de absorção de som de superfícies de rodovias é necessária a medição de absorção de som. As correlações entre as medições do coeficiente de absorção sonora de um revestimento e o desempenho deste revestimento como redutor de ruído, de uma forma geral, tem mostrado que superfícies de pavimentos mais absorventes tendem a diminuir o ruído total emitido, tanto o ruído gerado pelo chamado trem de força do veículo quanto pelo ruído gerado pelo contato pneu/pavimento.

Existem vários métodos normalizados para a medida do coeficiente de absorção e cada método pode ser aplicado para fins específicos. No que diz respeito à sua aplicabilidade, eles podem ser utilizados no laboratório, como o método do tubo de impedância, ou *in situ*, tais como o método de superfície alargada e o método natural.

Os métodos de medição de absorção sonora de revestimentos são os seguintes:

- Medições da impedância acústica e coeficiente de absorção sonora de corpos de prova em laboratório com incidência normal de ondas sonoras planas segundo normas ASTM E-1050 ou ISO 10534 partes 1 e 2;
- Medições das propriedades acústicas de pavimentos *in situ* com o “Método de superfície estendida” segundo norma ISO 13472-1;
- Medições do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante de acordo com a norma ISO 354;
- Medições do coeficiente de absorção sonora de pavimentos com o *Guard Tube Method* (Método do tubo guarda) desenvolvido pela ISO (norma 13472-2:2005 e 13472-3:2005).

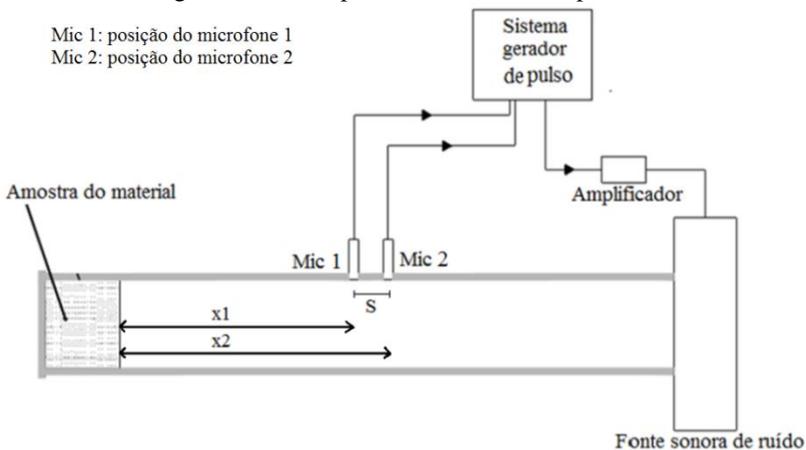
Para realizar a medição da absorção sonora dos corpos de prova moldados no laboratório neste trabalho foi utilizado o método do tubo de impedância, ou tubo de ondas estacionárias.

#### **2.7.4 Método do tubo de impedância**

O método do tubo de Impedância está normalizado pela ASTM E 1050 e ISO 10534-2: 1998(E). Consiste, basicamente, em excitar um tubo, que contém uma amostra de material no seu extremo, com um ruído branco de banda larga e medir a pressão sonora no seu interior. Os sinais obtidos são processados por analisador digital de frequências para determinar a curva de absorção sonora em função da frequência.

O tubo possui uma fonte de ruído em um dos extremos e o outro extremo está fechado por uma tampa onde se coloca a amostra de material a ser testado. A fonte de ruído é conectada a um gerador de sinais sinusoidais e um amplificador que produz dentro do tubo uma onda sonora estacionária. A pressão sonora da onda estacionária é captada por microfone (GERGES E ARENAS, 2010). Na Figura 2.20 está representado o tubo de impedância com seus respectivos componentes.

Figura 2.20 - Componentes do tubo de impedância



Fonte: Hanson et al. (2004) *apud* Knabben (2012).

O procedimento para a obtenção da absorção sonora da amostra consiste na determinação das pressões sonoras em duas posições pré-estabelecidas utilizando-se dois microfones. Para calcular a absorção é utilizado o método de função de transferência. Medindo-se a função transferência entre as duas posições dos microfones, pode-se calcular o coeficiente de reflexão com o qual se determina o coeficiente de absorção sonora e a impedância acústica específica normal à superfície.

O método da medição com dois microfones envolve a decomposição de um sinal aleatório de banda larga estacionário nos seus componentes incidente e refletido. O sinal aleatório é gerado por uma fonte de som, e as componentes incidente e refletida são determinadas a partir da relação entre as pressões acústicas medidas por microfones em dois locais na parede do tubo (MUN, 2010).

O processo de medição é baseado na interação de duas ondas planas; uma incidente e a outra refletida. Segundo a norma ISO 10534-2 as pressões sonoras da onda incidente  $p_I$  e refletida  $p_R$  dentro do tubo são, respectivamente:

$$p_I = P_I e^{jk_0 x} \quad (2.10)$$

$$p_R = P_R e^{-jk_0 x} \quad (2.11)$$

onde:

$P_I$  = valor de  $p_I$  na superfície da amostra ( $x = 0$ );

$P_R$  = valor de  $p_R$  na superfície da amostra ( $x = 0$ );

$k_0$  = número de onda complexo.

As pressões sonoras  $p_1$  e  $p_2$  são as transformadas de Fourier da pressão sonora temporal nos dois microfones nas posições 1 e 2:

$$p_1 = P_I e^{jk_0 x_1} + P_R e^{-jk_0 x_1} \quad (2.12)$$

$$p_2 = P_I e^{jk_0 x_2} + P_R e^{-jk_0 x_2} \quad (2.13)$$

onde:

$x_1$  = distância da amostra ao microfone 1;

$x_2$  = distância da amostra ao microfone 2.

As funções de transferência para a onda incidente  $H_I$  e a onda refletida  $H_R$  são as seguintes, respetivamente:

$$H_I = \frac{P_{2I}}{P_{1I}} = e^{-jk_0(x_1 - x_2)} = e^{-jk_0 s} \quad (2.14)$$

$$H_R = \frac{P_{2R}}{P_{1R}} = e^{jk_0(x_1 - x_2)} = e^{jk_0 s} \quad (2.15)$$

onde:

$s = x_1 - x_2$  é a distância entre os dois microfones.

A função de transferência  $H_{12}$  para o campo acústico total pode ser calculada utilizando as equações anteriores e tendo em consideração que  $P_R = r P_I$ :

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0 x_2} + r e^{-jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + r e^{-jk_0 x_1}} \quad (2.16)$$

O coeficiente de reflexão  $r$  na posição  $x = 0$  é obtido pela seguinte equação:

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1} \quad (2.17)$$

Finalmente, o coeficiente de absorção  $\alpha$  é calculado em função de  $r$ :

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2.18)$$

O alto-falante gera ondas estacionárias aleatórias que se propagam no tubo de impedância como ondas planas excitadas por tons puros abaixo da frequência de corte. A frequência de corte é dada pela seguinte equação:

$$f_c = \frac{1,84 \times c}{\pi \times d} \quad (2.19)$$

onde:

$f_c$  = frequência de corte;

$c$  = velocidade do som no ar a temperatura de 20°C, em m/s, que é de 343 m/s;

$d$  = diâmetro do tubo a ser utilizado, em m.

Segundo Gerges e Arenas (2010), Boden e Abom verificaram que o espaço entre as posições do microfone (s) define a faixa de frequências onde os resultados das medições são mais precisos. A equação (2.20) determina as frequências mínima e máxima da faixa recomendada de trabalho como função da separação entre os microfones.

$$\frac{0,1c}{2s} < f < \frac{0,8c}{2s} \quad (2.20)$$

O método do tubo de impedância pode ser empregado no laboratório para projetos de misturas asfálticas utilizando corpos de prova compactados sendo mais representativo e menos complicado que realizar medidas *in situ* sobre a rodovia (PACHECO, 2010). As vantagens deste método são o baixo custo, a simplicidade e a rapidez nos preparativos e procedimentos, assim como o pouco equipamento requerido.

## 2.8 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO RUÍDO PNEU/PAVIMENTO

### 2.8.1 Medições no campo

Os Métodos de medição do ruído pneu/pavimento no campo são: Método estatístico de passagem (SPB), Método da estrada proximidade (CPX), Método da passagem controlada (CPB), Método da superfície estendida e o Método coast-by. Informações sobre estes métodos podem ser encontrados em Knabben (2012).

O método OBSI (*On-board sound intensity*) de medição do ruído pneu/pavimento é semelhante ao método CPX porque os dois incluem microfones posicionados perto da área de contato pneu/pavimento e ambos realizam as medições com o veículo em movimento. O método OBSI utiliza microfones duplos para medir a intensidade do som. Existem mais experiências com o método OBSI nos EEUU, enquanto que a técnica CPX tem sido preferida em outras partes do mundo (RASMUSSEN et al., 2007).

Existe uma correlação entre a intensidade do som (ruído) medido no campo com o método OBSI e os valores de capacidade de absorção sonora medidos no laboratório, dependendo da frequência. A redução do ruído pelos efeitos da absorção pode ser claramente visto em frequências próximas de 1000 Hz para misturas abertas ou porosas (LU et al., 2009).

### 2.8.2 Medições no laboratório

Para medições do ruído em laboratório é utilizado o método do tambor (Drum-DR). O equipamento consiste em um cilindro de 3,60 m de diâmetro que contém as amostras da superfície do revestimento de 1/6 do diâmetro do cilindro. Nele são colocados dois braços com rodas para simular o tráfego. A principal característica deste ensaio é que ele consegue representar o ruído apenas do atrito pneu/pavimento (SANDBERG E EJSMONT, 2002).

## 2.9 FATORES QUE INFLUENCIAM O RUÍDO PNEU/PAVIMENTO

### 2.9.1 Tipo de veículo

A diferença dos níveis sonoros máximos entre veículos leves e os veículos pesados é de cerca de 10 dB(A), para velocidades próximas dos 75 km/h, e de cerca de 6 dB(A) para velocidades próximas dos 85 km/h (FREITAS et al., 2008).

Segundo SILENCE (2008), existem claras diferenças nos níveis de ruído segundo o tamanho dos veículos. Na velocidade de 60 km/h, o nível Lamax de um caminhão com mais de três eixos é de 83 dB; de um caminhão com três ou menos eixos, 80 dB; de um ônibus é de 79 dB; de uma van, de 75 dB; de motocicletas, 74 dB; e de automóveis, 73 dB. Isto significa que um ônibus a 60 km/h faz o mesmo ruído que 4 veículos leves.

Nas vias urbanas, os veículos pesados representam uma pequena porcentagem do tráfego total e as velocidades dos veículos leves são maiores. Então, a paisagem das emissões de ruído está dominada pelos veículos leves. Nas vias de alta velocidade, como as autopistas, a velocidade dos veículos leves é mais alta e por isso também dominam a emissão do ruído, embora a porcentagem de veículos pesados seja igualmente elevada. Somente quando a porcentagem de veículos pesados é muito alta, e/ou as diferenças quanto à velocidade sejam pequenas, eles dominaram os níveis de ruído em uma rodovia (SILENCE, 2008).

### Tipo de pneu

As características do pneu como sua estrutura, dimensão, rigidez da borracha, relevo, desgaste e idade influenciam o ruído gerado pela interação pneu/pavimento (SILVIA, 2004).

Estudos de Sandberg (2001) realizados sobre a diferença no ruído entre vários pneus confirmou uma diferença de 10 dB(A) entre o melhor e o pior pneu em uma amostra de 100 pneus de automóveis de, aproximadamente, o mesmo tamanho. Para pneus de caminhão, o estudo também tem comprovado uma diferença de 10 dB(A) entre o melhor e o pior pneu de uma amostra de 20 pneus de tamanho, aproximadamente, semelhante. Também verificou que existe um incremento de, aproximadamente, 5 dB(A) quando a largura do pneu aumenta de 140

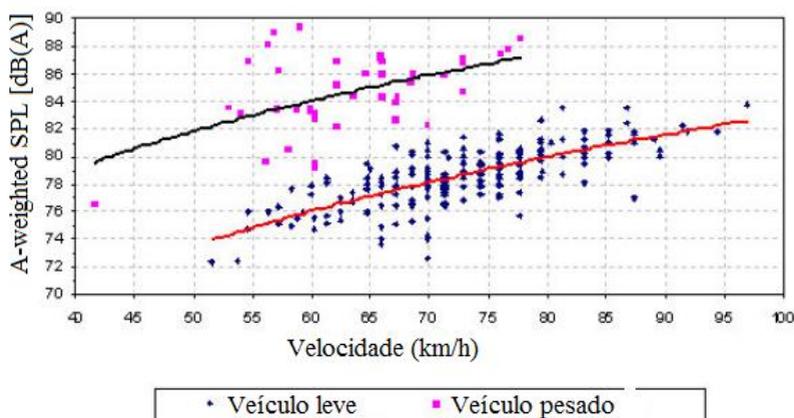
mm para 200 mm. Os pneus com predominância de ranhuras transversais geram mais ruído que pneus com predominância de ranhuras longitudinais.

## Velocidade do veículo

Vários estudos mostram que quanto maior a velocidade de circulação dos veículos maior é o ruído gerado. A velocidade do veículo é o parâmetro operacional mais importante que influencia o ruído gerado pelo contato pneu/pavimento (SILVIA, 2004).

A Figura 2.21 mostra o efeito da velocidade do veículo na geração do ruído para duas categorias diferentes de veículos: leves e pesados.

Figura 2.21 - Ruído em função da velocidade para duas categorias de veículos



Fonte: Adaptado de Silvia (2004).

## 2.9.2 Condições climáticas

### Vento e temperatura

Segundo Sandberg e Ejsmont (2002), existe influência da temperatura e do vento nos níveis de ruído produzidos pelo contato pneu/pavimento.

Landsberger (2001), *apud* Sandberg e Ejsmont (2002), apresentou os níveis de pressão sonora em função da temperatura do ar

pelo método Coast-By para 6 tipos de pneus circulando a 80 km/h. Houve uma pequena mas significativa redução dos níveis de ruído com o aumento da temperatura, mas não para todos os pneus.

O ruído pneu/pavimento é afetado pela temperatura durante a geração e propagação. Uma estimativa comum para o efeito da temperatura é que uma diferença de temperatura de 10°C significa uma diferença de cerca de 1 dB no ruído. Não existe um padrão comum para as correções por temperatura das medições de ruído (RAITANEN, 2005).

A velocidade do vento influencia fortemente o ruído aerodinâmico para velocidades superiores a 120 km/h para os automóveis e a 90 km/h para veículos pesados (FREITAS et al., 2006 *apud* KNABBEN, 2012).

### **Presença de água**

Segundo Freitas et al. (2008), os níveis de ruído aumentam consideravelmente com a presença de água na superfície do revestimento, aumentando o ruído global em 4 dB(A). Esse aumento é determinado pelos níveis de pressão sonora correspondente a frequências superiores a 500 Hz, quando se trata de veículos pesados, e superiores a 1000 Hz, no caso de veículos leves.

Ainda não se conhece, adequadamente, de que forma a presença de água influencia os mecanismos de geração de ruído que são, basicamente, os mesmos em condições secas e molhadas. No entanto, pode referir-se os seguintes mecanismos de ruído em condições de pista molhada (SANDBERG e EJSMONT, 2002):

- deslocamento de água na frente da área de contato (projeção de água);
- compressão de água nas ranhuras dos pneus e conseqüente projeção;
- contato entre a água projetada (em forma de jacto ou de gotas) e o corpo do veículo;
- impacto do relevo dos pneus na superfície da água;
- quebra de ligação entre a borracha dos pneus e a água.

A eficácia das camadas “silenciosas”, especialmente as camadas drenantes, pode ficar comprometida na presença de água, uma vez que esta pode aumentar significativamente os níveis de ruído (DESCORNET et al., 2000).

### 2.9.3 Comportamento dos condutores

Os estilos de condução dos veículos têm um alto impacto sobre o ruído gerado. Usando baixas rotações do motor, evitando acelerações desnecessárias e atingindo velocidades dentro dos limites legais, pode-se obter uma redução significativa do ruído de propulsão do veículo. Existe uma relação entre a rotação do motor e o ruído gerado: um veículo viajando com 4000 rpm produz a mesma quantidade de ruído que 32 veículos viajando na mesma velocidade porém com apenas 2000 rpm (SILENCE, 2008).

Estilos de condução menos agressivos ou passivos podem reduzir o ruído em média 5 dB para automóveis e veículos comerciais, e 7 dB para motocicletas. Além disso, resulta em uma economia considerável de combustível, melhora a segurança no tráfego e reduz as emissões de gases.

### 2.9.4 Características da superfície do pavimento que interferem no ruído

#### 2.9.4.1 Textura da superfície

A textura da superfície é considerada o parâmetro intrínseco mais importante de uma rodovia que influencia o ruído gerado pelo tráfego pela interação pneu/pavimento.

Em 1980, Descornet demonstrou que o ruído da interação pneu/pavimento está relacionado a dois comprimentos de onda críticos da textura do revestimento (BIANCHETTO, 1996 *apud* LÁO, 2004) que são os seguintes:

- Comprimento de onda de aproximadamente 80 mm (mega-textura).
- Comprimento de onda de aproximadamente 3 mm, (macrotextura).

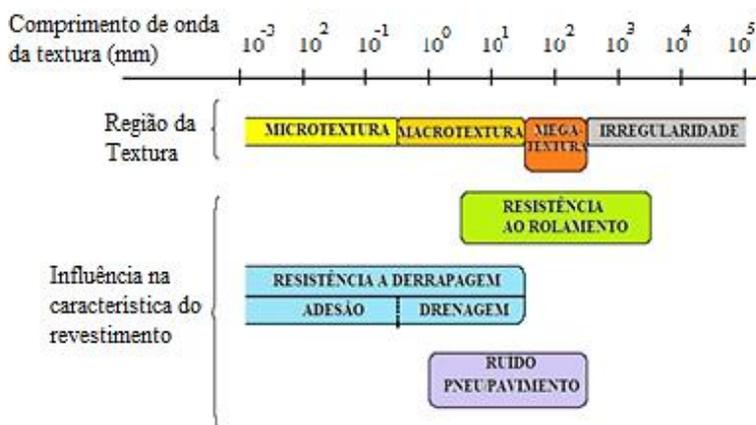
A ISO 13473-2 (2002), *apud* PIARC (2013), classifica a textura do pavimento de acordo com a variação no comprimento de onda ( $\lambda$ ), que é a quantidade que descreve a dimensão horizontal das irregularidades de um perfil de textura:

- **Irregularidade:**  $\lambda > 500$  mm;

- **Megatextura:**  $50 \text{ mm} < \lambda < 500 \text{ mm}$  e picos de amplitude de onda entre 0,1 e 50 mm;
- **Macrotextura:**  $0,50 \text{ mm} < \lambda < 50 \text{ mm}$  e picos de amplitude de onda entre 0,1 e 20 mm;
- **Microtextura:**  $\lambda < 0,50 \text{ mm}$  e picos de amplitude de onda entre 0,001 e 0,50 mm.

Na Figura 2.22 pode-se verificar que a principal responsável pelo ruído é a macrotextura juntamente com a megatextura. A macrotextura também tem influência na drenagem da superfície do pavimento.

Figura 2.22 - Influência da textura superficial nas características da superfície



Fonte: Adaptado de Fehrl (2006)

A megatextura do revestimento, além de ter influência no aumento do ruído gerado pelo contato pneu/pavimento, também é responsável por um aumento no consumo de combustível devido à resistência ao rolamento (FEHRL, 2006). A megatextura também é responsável pelas vibrações radiais e fenômenos de ressonância associados ao veículo. Ela pode ainda ser aumentada pelo desgaste da superfície da pista com o tempo e pelo processo de fadiga do revestimento.

A FEHRL (2006) afirma que os comprimentos de onda importantes para o controle do ruído são a megatextura e macrotextura ( $0,5 \text{ mm} < \lambda < 500 \text{ mm}$ ). Importante ressaltar a necessidade de estudar a microtextura, pois mesmo sem uma contribuição expressiva ao ruído,

colabora parcialmente com a resistência à derrapagem, especialmente em pistas molhadas.

Foi investigada pelo grupo de estudos da ISO a importância de cada uma dessas faixas de valores da irregularidade para a segurança à derrapagem e emissões de ruído. Verificou-se que a microtextura é importante para o desenvolvimento do atrito, ou seja, para a segurança, mas não é tão significativa para a geração do ruído pneu/pavimento. Já a macrotextura e megatextura possuem papel importante na geração do ruído e também na segurança à derrapagem (ASTRANA JUNIOR, 2006).

A macrotextura depende da granulometria e do tamanho máximo do agregado. Ela é necessária para uma adequada resistência ao deslizamento a velocidades superiores a 60 km/h, ou com o pavimento molhado. Em condições de chuva, além do atrito produzido pela histerese do pneu, a rugosidade permite melhorar a aderência ao facilitar a eliminação da água interposta entre o pneu e o pavimento.

A maior macrotextura está associada a uma melhor resistência à derrapagem, porém também gera um maior ruído do pneu/pavimento por causa do fenômeno de vibração dos pneus (LU et al., 2009; PACHECO, 2010).

A macrotextura apresenta a capacidade de reduzir ou ampliar o ruído, de acordo com a distribuição espacial dos agregados na superfície, decorrente da distribuição granulométrica da mistura. A forma que a textura (disposição dos agregados, forma dos agregados) encontra-se distribuída na superfície influencia a geração e a propagação do ruído (CALLAI, 2011).

A distribuição da textura, em seu plano vertical, determina se ela é positiva ou negativa. Se for positiva, apresenta partículas acima de um plano que pode ser definido como o contato da superfície. A textura negativa ocorre quando o revestimento é composto por agregados que tenham uma relação de vazios superficiais interconectados e a superfície superior de acabamento é plana. A textura positiva apresenta pontos singulares onde os pneumáticos se apoiam. Na textura negativa, estes pontos se encontram voltados para o interior do revestimento, tornando a superfície menos irregular, pois os vazios se manifestam em profundidade, reduzindo consideravelmente o ruído de circulação dos veículos (RASMUSSEN et al., 2007).

Dependendo do tamanho dos agregados, a textura positiva eleva os níveis de vibrações no rolamento do pneu, enquanto que texturas negativas contribuem para níveis menores (FERHL, 2006).

A vibração é afetada pela macrotextura enquanto que a expulsão de ar é afetada pela presença de vazios superficiais (SPECHT et al., 2009). É necessário otimizar a redução da emissão de ruído e aumentar a segurança, sendo o mais adequado ter uma microtextura áspera e uma macrotextura rugosa, sempre que o som de rolamento não seja muito alto, reduzindo-se o tamanho máximo de agregado e aumentando a porosidade da mistura (PACHECO, 2010).

Um objetivo comum para atingir um revestimento silencioso é reduzir as dimensões da textura. Embora deva existir uma textura para permitir caminhos de fuga do ar, esta textura deve ser pequena, menor que 5 mm e deve ser negativa (RASMUSSEN et al., 2007).

#### 2.9.4.2 Porosidade

O conteúdo de vazios internos em um revestimento possibilita que a propagação da onda sonora seja atenuada, pois o som perde-se no seu interior. O aumento da porosidade minimiza o ruído gerado pelos mecanismos aerodinâmicos, sendo uma característica importante na absorção sonora.

Segundo Sandberg e Ejsmont (2002), para os revestimentos porosos são recomendáveis porcentagens de vazios maiores que 20%, sendo preferíveis valores entre 20 a 30%. A espessura mínima recomendada para camadas porosas é de 40 mm. Revestimentos com maiores espessuras propiciam uma boa absorção acústica em baixas frequências.

O volume de vazios comunicantes é mais importante para a redução do ruído, pois o som consegue penetrar e fluir pelo material aumentando assim o coeficiente de absorção sonora.

Entretanto, quanto maior a porosidade do revestimento, menor é a sua vida de serviço. Na Holanda, recomendam vazios iniciais entre 10 ou 14 % como sendo ideal para a redução do ruído gerado pelo tráfego e para uma maior vida de serviço (RASMUSSEN et al., 2007).

#### 2.9.4.3 Tamanho máximo de agregado

Quando os agregados são maiores, a macrotextura superficial é maior, gerando um contato superficial grande entre o pneu e a superfície

do revestimento. Isto afeta os mecanismos de geração do ruído mecânico de impactos e choques (ASTRANA JUNIOR, 2006).

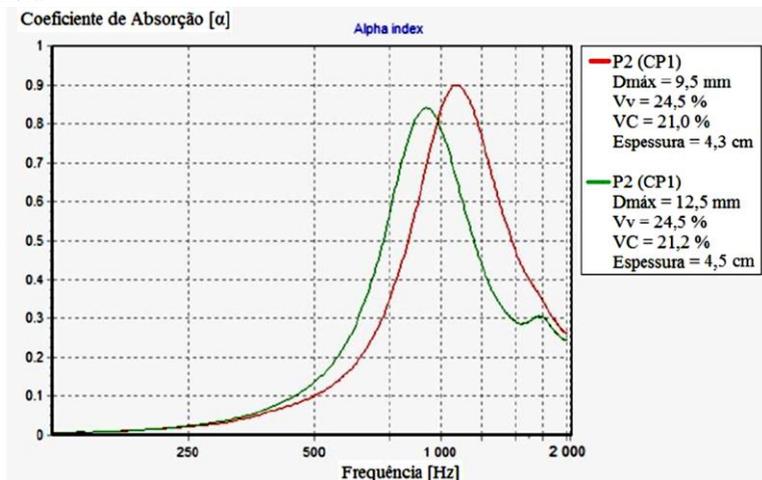
Uma alternativa para a redução do ruído é usar um tamanho máximo de agregado menor do que 9,5 mm, pois agregados de tamanho pequeno ajudam a reduzir o ruído provocado pelo mecanismo de impacto e choque (FEHRL, 2006).

Misturas porosas com tamanhos de agregados menores e revestimentos de maior espessura tendem a proporcionar uma redução de ruído mais significativa (LU et al., 2009).

A utilização de tamanhos máximos de agregado pequenos (9,5 mm), juntamente com o uso de asfalto-borracha, ou ligantes modificados por polímero, podem reduzir significativamente a desagregação da mistura e, portanto, reduzir o ruído pneu/pavimento gerado pelo fenômeno de vibração (LU et al., 2009).

Segundo as medições de absorção sonora realizadas por Mun (2010) e Knabben (2012) sobre misturas abertas, a utilização de tamanhos máximos de agregados mais pequenos resulta em maiores valores de coeficientes de absorção sonora. A Figura 2.23 apresenta o resultado do ensaio de absorção sonora realizado por Knabben (2012) para misturas com diâmetro máximo de 9,5 mm e 12,5 mm. Na figura pode-se observar que o coeficiente de absorção para a mistura com diâmetro máximo de 9,5 mm é maior.

Figura 2.23 - Influência do tamanho máximo de agregado no pico de absorção sonora



Fonte: Knabben (2012)

#### 2.9.4.4 Impedância mecânica ou rigidez

A impedância mecânica é a relação entre o módulo de elasticidade do revestimento e o módulo de elasticidade do pneu. Segundo FEHRL (2006), a impedância mecânica do revestimento é muito maior que o da borracha do pneu. Reduzir a impedância mecânica do revestimento ocasionará uma redução nas forças transmitidas pelo impacto do pneu, as quais irão reduzir os níveis de vibrações e, portanto, reduzir a geração de ruído. Este é o caso das superfícies poro elásticas com conteúdo de borracha de 20% em peso onde a redução de ruído pode chegar até 10 dB.

O módulo varia de acordo com o tipo de mistura e para um mesmo tipo de mistura, varia de acordo com o ligante utilizado, com sua granulometria, com a adição de modificadores, como polímeros ou borracha, e com o volume de vazios.

#### 2.9.4.5 Espessura da camada porosa

A espessura de revestimentos porosos influencia onde ocorre à máxima absorção no espectro de frequências como mostra a Figura 2.18. O aumento da espessura diminui a frequência de absorção máxima (FEHRL, 2006; PRATICÓ, 2012).

Misturas porosas com tamanhos de agregados menores e com mais espessura tendem a proporcionar redução de ruído mais significativo (LU et al., 2009).

#### 2.9.4.6 Idade do revestimento

O desempenho acústico das superfícies tenderá a degradar-se ao longo do tempo como consequência do desgaste devido à ação do tráfego. Em camadas porosas, a colmatação dos poros na superfície por sujeira também pode reduzir a eficiência acústica (FEHRL, 2006).

As camadas de superfície de asfalto densas possuem níveis mais altos de ruído no início da sua vida útil, mas são mais estáveis ao longo do tempo, em oposição às camadas mais finas como as misturas abertas de asfalto-borracha que se caracterizam por ter baixos níveis de ruído no início da sua vida útil e um aumento significativo de ruído em seus primeiros anos de serviço.

Estudos desenvolvidos em Portugal em três trechos com diferentes misturas asfálticas (duas misturas abertas com asfalto-

borracha e uma mistura gap com asfalto convencional), demonstraram aumentos dos níveis de ruído produzidos num prazo de três anos. Estes aumentos foram da ordem de 3,3 dB a 4,1 dB, correspondendo o valor de 4,1 dB para a mistura aberta de diâmetro máximo de 10 mm. Entretanto, esta mistura apresentou menores níveis de ruído em comparação com as outras duas, a mistura aberta de diâmetro máximo 12 mm e a mistura gap, também de 12 mm (FREITAS, 2012).

#### 2.9.4.7 Tipo de Ligante Asfáltico

Os ligantes modificados com polímero e asfalto-borracha aumentam ligeiramente a absorção acústica, indicando que, em geral, estes ligantes podem reduzir os ruídos de alta frequência. Devido ao fato que estes ligantes aumentam a resistência à desagregação da mistura, o ruído de frequências mais baixas pode ser reduzido em longo prazo, em comparação com os ligantes convencionais (LU et al., 2009).

## 2.10 TIPOS DE REVESTIMENTOS PARA REDUÇÃO DO RUÍDO

As primeiras experiências com revestimentos silenciosos datam de um pouco mais de 40 anos atrás. Várias soluções foram desenvolvidas que utilizaram materiais como asfalto e concreto.

Os pavimentos silenciosos surgem da necessidade de redução do ruído que resulta do contato entre o pneu e o pavimento, uma vez que o estado atual da técnica não permite uma redução significativa do ruído produzido pelo motor e pelo sistema de exaustão dos veículos.

A construção de pavimentos que busquem segurança, desempenho, custo e baixos níveis de ruído devem considerar as seguintes possibilidades: a) superfícies com baixa textura e agregados pequenos; b) camadas porosas com altos volumes de vazios; c) superfícies com baixa rigidez no contato pneu/pavimento (SANDBERG, 2001).

As regras básicas para o projeto de uma superfície de pavimento silenciosa são (HAIDER *et. al apud* PIARC, 2013; PRATICÓ, 2012):

- a superfície deve ter uma macrotextura com uma disposição aleatória, compacta e homogênea de pequenos e medianos agregados de tamanho máximo 10 mm;

- revestimentos com uma porosidade composta de poros conectados à superfície e entre si que proporcionam absorção de som;
- megatexturas e macrotexturas de grande comprimento de onda devem minimizar-se garantindo em todos os casos macrotexturas finas e homogêneas. Isto é válido também para superfícies porosas;
- superfícies porosas com tamanhos de agregados pequenos.

Superfícies silenciosas são aquelas que conseguem absorver o som, sendo ideal maximizar a absorção sonora a 1000 Hz, para as rodovias de alta velocidade, e 600 Hz para as rodovias de baixa velocidade. Do ponto de vista relacionado com a redução do ruído podem ser consideradas as soluções de revestimentos apresentadas a seguir (PRATICÓ, 2012; PIARC, 2013).

#### **a) Revestimento poroso de uma camada**

Os revestimentos porosos de uma camada têm uma alta porcentagem de vazios. São chamados nos EEUU de OGFC (*open graded friction course*), e rara vez a porcentagem de vazios supera os 20%. Países da Europa utilizam revestimentos porosos com porcentagens de vazios entre 15 e 30%. As espessuras destes revestimentos são geralmente de 30 a 50 mm (PIARC, 2013).

Os revestimentos porosos reduzem o ruído de 3 a 5 dB, em comparação com um revestimento convencional, e têm uma durabilidade de 8 ou mais anos. O ligante asfáltico utilizado na mistura pode ser modificado ou não.

A desvantagem da utilização destes revestimentos é a colmatação dos poros com o tempo, o que reduz a capacidade de drenagem e da absorção acústica. No entanto, estes revestimentos apresentam boas propriedades de atrito, textura, diminuição da projeção da água nos dias chuvosos e são capazes de reduzir os níveis de ruído pneu/pavimento mediante a absorção do som (PIARC, 2013).

#### **b) Revestimento poroso de duas camadas**

Um revestimento poroso de duas camadas apresenta uma espessura total de 50 a 90 mm e consiste numa camada mais grosseira abaixo e uma camada mais fina no topo.

A camada superior é constituída por agregados de tamanho máximo inferior a 9,5 mm e com espessuras de 15 a 30 mm. Os vazios

destas misturas, nos EEUU, são tipicamente de 15 a 19% e na Europa e Japão, estes vazios são da ordem de 20 a 30%. Tem uma redução do ruído de 4 a 6 dB em comparação com um revestimento convencional. No entanto, estudos desenvolvidos na Holanda indicaram que as camadas duplas de asfalto poroso desagregam mais rápido do que o asfalto poroso de uma camada (LU et al., 2009).

### **c) Stone Matrix Asphalt (SMA) ou Matriz Pétreas Asfáltica**

A matriz pétreas asfáltica é um revestimento de graduação descontínua com uma elevada percentagem de agregados graúdos e volume de vazios preenchidos por uma quantidade importante de mastiche asfáltico. Estes revestimentos são originários de Alemanha e são utilizados em muitos outros países (Reino Unido, França, Países Baixos, Dinamarca). A redução de ruído nestes revestimentos é de 3 dB em comparação com uma mistura convencional (PIARC, 2013).

### **d) Camadas delgadas, muito delgadas e ultra delgadas**

São camadas finas de mistura asfáltica colocadas sobre um pavimento já existente, ou novo, e possuem descontinuidades em sua granulometria, favorecendo a incorporação de vazios. As primeiras aplicações destas camadas foram feitas na França (final da década de 1990). Foram divididas em três categorias: BBM (*Béton Bitumineux Mince*), ou concreto betuminoso delgado, com espessuras entre 3 a 4 cm; BBTM (*Béton Bitumineux Très Mince*), ou concreto betuminoso muito delgado, com espessuras entre 2 a 3 cm; e BBUM (*Béton Bitumineux Ultra-Mince*), ou concreto betuminoso ultra delgado, com espessura de 1 cm (ASTRANA JÚNIOR, 2006).

Estes revestimentos são construídos para a redução do ruído em zonas urbanas. As propriedades da superfície são homogêneas e apresentam boa redução de ruído e excelente resistência à derrapagem. As espessuras destes revestimentos são de 10 a 40 mm e empregam agregados de tamanho pequeno.

Reis (2012) apresentou os procedimentos executivos de laboratório e de campo, bem como os resultados do estudo de dosagem e monitoramento das características funcionais de um revestimento asfáltico ultra delgado (RAUD) num trecho experimental em rodovia de alto tráfego no sul do Brasil. O estudo demonstrou que o RAUD é classificado como um revestimento silencioso, com redução de pelo

menos 67% da energia acústica, em relação ao concreto asfáltico tradicionalmente utilizado.

#### **e) Superfícies poro elásticas**

A mistura típica de um PERS (*Porous Elastic Road Surface*) consiste de partículas de borracha em forma cúbica ou partículas de fibra de borracha e agregados minerais e areia que realçam o atrito. O poliuretano, ou outra resina artificial, é utilizado como ligante. A espessura típica é de 3 a 4 cm e pode ser executada em campo ou pré-fabricada como um tapete que é colado sobre a camada inferior rígida usando resina epoxy (ASTRANA JÚNIOR, 2006).

Estas misturas são compostas por grânulos de borracha numa porcentagem de 20 % do volume da mistura e contém entre 20 a 40% de volume de vazios. Segundo estudos, esta superfície proporciona uma redução efetiva do ruído pneu/pavimento de 5 a 15 dB em comparação com superfícies densas convencionais (PIARC, 2013).

#### **f) Concreto poroso**

O concreto poroso de cimento Portland é um material que tem grandes conteúdos de vazios utilizando misturas abertas ou gap. A permeabilidade resultante permite a água (e o ar) fluir facilmente através deste material. Este tipo de concreto é utilizado atualmente como uma camada superior (camada de desgaste) de pavimentos e oferece baixa emissão de ruído e boa capacidade de drenagem.

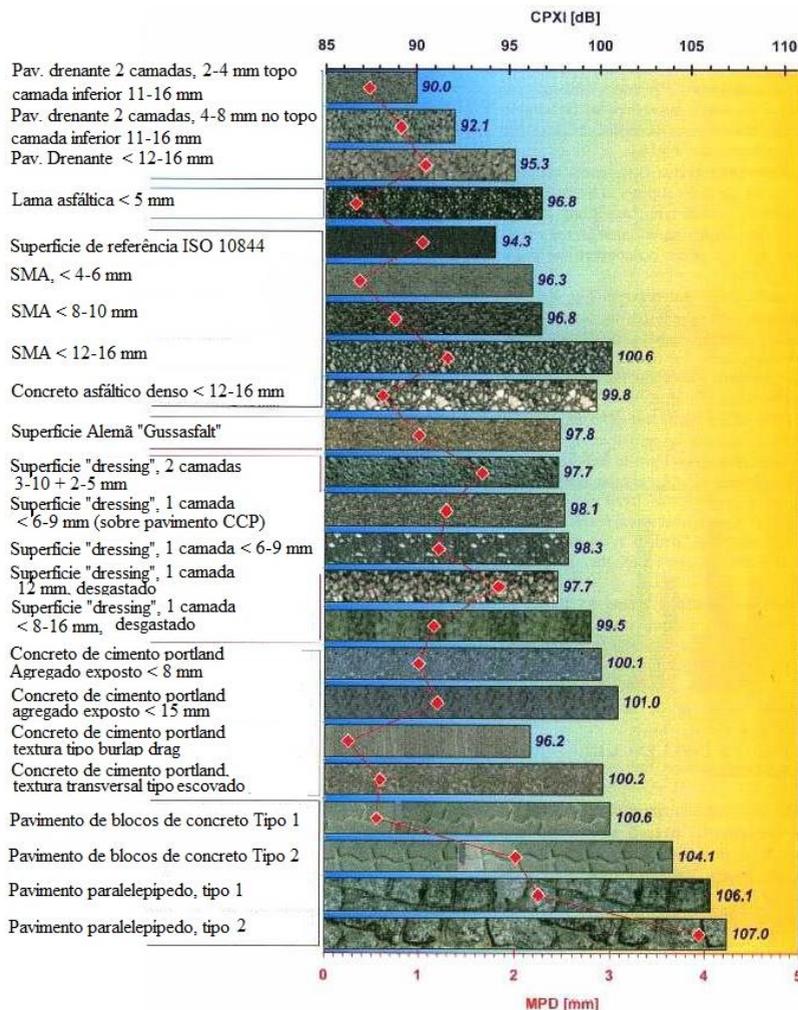
#### **g) Concreto com agregado exposto**

A superfície do concreto é aspergida com um agente de retardamento e, em seguida, a argamassa é removida por lavagem. A mistura de concreto é preparada com um agregado de alta qualidade que é exposto na superfície do pavimento. Os agregados utilizados são de tamanho pequeno. Pode ser construído em sistemas de uma ou de duas camadas. Para tamanho de agregado de 8 mm foram comprovadas reduções de 3 a 3,5 dB(A) e para um tamanho de 16 mm, as reduções nos níveis de ruído foram de 1 a 1,5 dB(A).

No projeto SILVIA (2004) foram medidos níveis de ruído no campo para diferentes superfícies utilizando o trailer chamado CPXI (*Close Proximity Index*) executado de acordo com a norma ISO/DIS 11819-2. A Figura 2.24 mostra a comparação entre os níveis de ruído

das diferentes superfícies. Os menores níveis são para as camadas porosas e de tamanho máximo de agregado pequeno.

Figura 2.24 - Redução de ruído dos diferentes revestimentos



Fonte: Adaptado de SILVIA (2004)

O Quadro 2.1 apresenta os diferentes revestimentos utilizados na redução do ruído de rolamento, a espessura, a porcentagem de vazios e a

redução do ruído alcançada para cada um deles (PIARC, 2013). As misturas porosas apresentam reduções de ruído da ordem de 3-5 dB dependendo do tamanho máximo de agregado na sua composição.

Quadro 2.1 - Revestimentos utilizados para a redução do ruído e suas principais características

| Tipo                             | Espessura(mm)            | Tamanho max de agregado (mm)            | Textura e/ou percentagem de vazios | Redução do ruído (dB) |
|----------------------------------|--------------------------|---|------------------------------------|-----------------------|
| Superfícies Poro elásticas PERS  | 30                       | 2 mm (borracha)<br>8 mm (agregados)     | 30-35%                             | 5~15 (vs. DAC)        |
| RAC (O)                          | 30                       | 12 (as OGFC)                            | 14-20%                             | 6                     |
| RAC(G)                           | 30                       | 12 (as DGFC)                            | 4%                                 |                       |
| SMA 0/16                         | 30-50                    | 16 mm                                   | 4%                                 | -1~ -2                |
| SMA 0/11                         | 30-50                    | 11                                      | 4%                                 | 0                     |
| SMA 0/8                          | 30-50                    | 8                                       | 4%                                 | 1                     |
| SMA                              | 30-50                    | 5-16 mm                                 | 0.5-1.5 mm<br>4%                   | -2~ 1                 |
| DAC0/11 ou DAC 0/8               | 30                       | 8/11                                    | 0.8 mm<br>4%                       | 0                     |
| Asfalto poroso 0/16 PAC          | 45                       | 16                                      | 25%                                | 3                     |
| Asfalto poroso 0/11 PAC          | 45                       | 11                                      | 25%                                | 4                     |
| Asfalto poroso 0/8 PAC           | 45                       | 8 mm                                    | 25                                 | 5                     |
| Asfalto poroso de dupla camada   | 25 sup.<br>45 inf.       | 8 sup.<br>16 inf.                       | 20% sup.<br>25% inf.               | 4~6 (vs. DAC)         |
| Camadas finas                    | 5~8 mm                   | 5~8 mm                                  | 5~15%                              | 3~7                   |
| bardon                           | 25 - 35 - 50 mm<br>c.a   | 14                                      | SH=2 mm                            | 3 (vs. HRA)           |
| masterflex (não está registrada) | (15~50 mm)               | 6-10-14                                 | 2 mm                               | 5~ 6 (vs. DAC)        |
| Novachip                         | (12~25 mm)               | 6 mm; 9 mm; 12 mm;<br>(1/4 - 3/8 - 1/2) | textura similar a PAC              | 1 (vs.PCC/ DAC)       |
| MASTERpave                       | (20 mm ~50 mm~<br>75 mm) | 6 - 14 - 20 mm                          | 1.5-2                              | 4                     |
| UL-M                             | 20-50 mm                 | 6 mm - 10 mm - 14<br>mm                 | 1.5 mm                             | 5~7 (vs.DAC)          |
| MicroFlex                        | 20 mm                    | 6 mm                                    | AV=13%                             | 3.9~4.9 (vs. DAC)     |

Continuação Quadro 2.1

| TIPO                      | Espessura (mm) | Tamanho máximo de agregado (mm) | Textura ou conteúdo de vazios (%) | Redução do ruído (dB) |
|---------------------------|----------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Colsoft                   | 20-30 mm       | 6 mm-10 mm                      | 2 mm                              | 3 ~5 (vs. DAC)        |
| Rugosoft                  | 20-50 mm       | Desconhecido                    | Desconhecido                      | 5~7 (vs. DAC)         |
| Nanosoft.                 | 25-40 mm       | 4 mm                            | Desconhecido                      | 9                     |
| MICROVIA                  | 10-30 mm       | 6 mm                            | 0.8 mm                            | Desconhecido          |
| Rollpave                  | 30 mm          | 6 mm                            | Desconhecido                      | 4.3                   |
| Nobelpave                 | NA             |                                 |                                   |                       |
| Tratamento superficial    | 3 ~ 20 mm      | 3 ~ 20 mm                       |                                   | + 2~-3 dB (A)         |
| Concreto Poroso           | 80             | 9.5 mm                          | 20-25%                            | 4~8                   |
| Concreto de cimento geral |                |                                 | 4%-25%                            | -2~8                  |

Fonte: Adaptado de PIARC (2013)

Em 2005, o NCAT (*National Center for Asphalt Technology*) testou 244 seções de pavimento com vários materiais asfálticos. Segundo este estudo, as misturas abertas ou porosas com tamanhos de agregados pequenos forneceram um desempenho superior na redução do ruído em comparação com outros tipos de revestimentos (LU et al., 2009).

O uso mais amplo de superfícies silenciosas poderia, sem dúvida, melhorar a qualidade de vida de um número significativo de cidadãos e, ao mesmo tempo, melhorar a percepção da qualidade da infraestrutura rodoviária, particularmente quando o usuário experimentar o maior conforto propiciado por estas superfícies.

Os benefícios das superfícies silenciosas podem ser alcançados sem afetar o desempenho estrutural e de segurança da rodovia. A resistência à derrapagem será preservada ou pode até ser aumentada. Algumas das superfícies com características de redução de ruído serão ainda mais seguras que as densas convencionais, como as superfícies porosas que têm a capacidade de drenar as águas pluviais, melhorando a visibilidade em tempo chuvoso. O asfalto poroso também é, até hoje, a tecnologia de superfície de rodovia mais eficiente em termos de redução do ruído.

As superfícies que reduzem a emissão do ruído pneu/pavimento também podem reduzir o ruído no interior do veículo melhorando assim o conforto do usuário reduzindo o estresse do condutor do veículo.

## 2.11 DRENABILIDADE DOS REVESTIMENTOS

A presença das águas pluviais sobre os pavimentos vai ter efeitos funcionais e estruturais. Os segundos correspondem usualmente aos defeitos induzidos nos pavimentos por infiltração das águas.

Quanto aos aspectos funcionais, os parâmetros mais relevantes estão relacionados à segurança contra a derrapagem ou aquaplanagem, a qual é função de uma boa interação pneu/pavimento. Esta interação depende da macrotextura e microtextura do revestimento, bem como das boas condições de drenagem superficial.

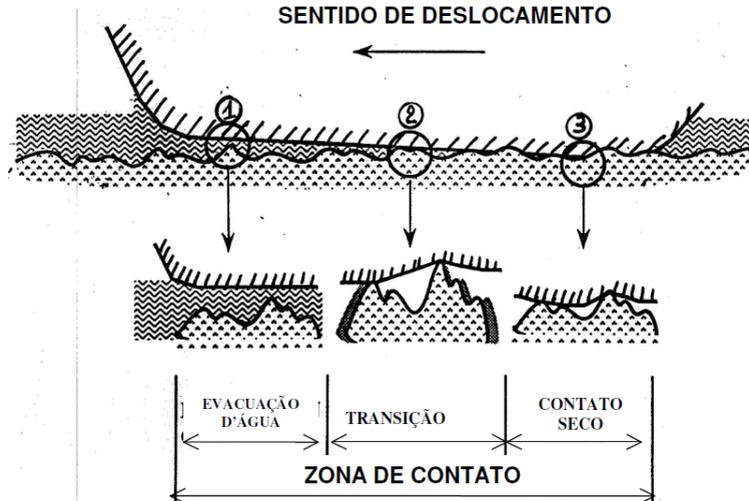
A existência de lâmina de água sobre o pavimento provoca a perda de aderência entre o pneu e o revestimento, o risco de hidroplanagem, a redução da visibilidade pela névoa formada atrás dos veículos e aumenta a reflexão luminosa, o que impede visualizar a sinalização horizontal à noite. Esta situação produz um aumento do número de acidentes nos dias chuvosos (GUIMARÃES, 2012).

### **Aderência em pistas molhadas**

Quando um veículo trafega em um pavimento na condição molhada, existem três zonas na interface pneu/pavimento (MOMM, 1998) (Figura 2.25):

- Zona Molhada (zona 1): localiza-se na frente da zona do contato do pneu e o tamanho dela depende da velocidade do veículo. É a região com maior concentração de água e onde há um maior risco de hidroplanagem;
- Zona intermediária (zona 2): zona de transição, é a região onde a lâmina de água deve ser rompida e onde o contato seco começa a ocorrer. Pode ocorrer hidroplanagem se o filme de água não for perfurado pela área de contato dos pneus;
- Zona seca ou de contato (zona 3): é a região onde teoricamente não existe a presença de água. Ocorre o perfeito contato pneu/pavimento. É nessa zona que se desenvolvem as forças de atrito.

Figura 2.25 - Zonas de contato pneu/pavimento  
SENTIDO DE DESLOCAMENTO



Fonte: Do (1995) apud Momm (1998)

O tamanho de cada uma das três zonas é determinado pela espessura da lâmina d'água, que, por sua vez, depende da capacidade de drenagem do pavimento, da intensidade da chuva, da profundidade das ranhuras do pneu, da pressão do pneu, da existência de macrotextura na superfície e da velocidade do veículo (MOMM, 1998).

A área da zona de contato seco abrange a maior parte da área de contato entre o pneu e o pavimento. À medida que a velocidade do veículo aumenta, ocorre redução da área da zona de contato e aumento das áreas das zonas intermediária e molhada. Quando a área da zona de contato se torna nula, ocorre o fenômeno de hidroplanagem, que é a separação do pneu/pavimento devido à pressão d'água existente sob o pneu (KOKKALIS, 1998 apud DUMKE, 2005).

A hidroplanagem é um dos principais fatores influenciadores de acidentes rodoviários. Este fenômeno ocorre quando os pneus perdem o contato com o pavimento devido à presença de um filme de água não rompido pelos pneus ou pela textura da pista. Nesta situação os pneus deixam de rolar sobre a superfície e passam a flutuar e escorregar sobre ela (LOPES, 2009).

## 2.12 CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO QUE AFETAM A DRENAGEM DA ÁGUA

### 2.12.1 Tipos de textura

A microtextura indica a propriedade dos agregados em apresentar uma superfície áspera capaz de perfurar o filme de água residual no contato do pneu com o pavimento e, assim, oferecer atrito entre o pneu e o pavimento (LUCAS e BEGOU, 1993 *apud* DUMKE, 2005).

Para que a microtextura atue no comportamento da aderência é necessário que a macrotextura seja capaz de eliminar a água da interface pneu/pavimento. Só então a microtextura atuará na ruptura da película de água quando no contato da aresta da aspereza com a borracha do pneu.

A macrotextura tem como função facilitar e contribuir para a drenagem da água na área de contato pneu/pavimento evitando os riscos de hidroplanagem. Ela é maior nas estruturas abertas que nas fechadas. Isso ocorre porque as estruturas abertas permitem a formação de canais entre a zona de rodagem e o revestimento, facilitando a drenagem da água para fora da área de contato (LOPES, 2009).

Para que um pavimento ofereça boas condições de aderência a qualquer velocidade dos veículos deve ter uma superfície com macrotextura suficientemente grossa, ou aberta, e uma microtextura áspera (LOPES, 2009). É possível prevenir a ocorrência da hidroplanagem dinâmica em chuvas de intensidade razoável, se o pavimento for dotado de uma macrotextura suficientemente aberta.

### 2.12.2 Vazios

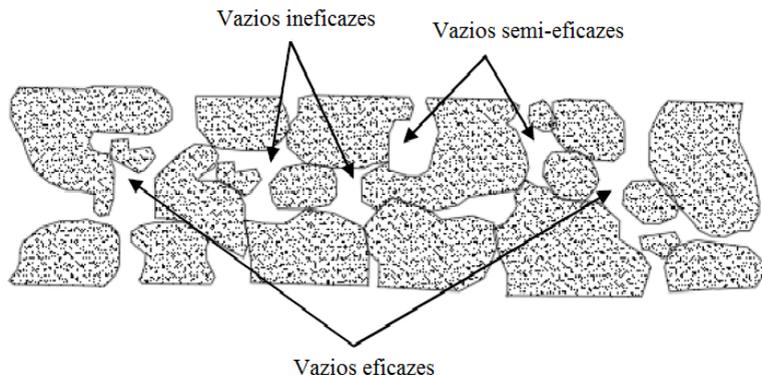
Um revestimento com elevado conteúdo de vazios tem a capacidade de eliminar quase que totalmente a lâmina de água da superfície do pavimento formada durante uma chuva.

A porcentagem de vazios é o parâmetro que melhor traduz a capacidade de drenagem de uma mistura porosa. De acordo com o Projeto Diretriz da Tecnologia de Pavimentação Drenante (Associação das Rodovias do Japão, 1996) (OLIVEIRA, 2003), os vazios das misturas podem ser classificados como (Figura 2.26):

- Vazios eficazes: vazios que contribuem para a passagem e armazenamento de água;

- Vazios semi-eficazes: vazios que não contribuem para a passagem, mas permitem o armazenamento de água;
- Vazios ineficazes: vazios que não contribuem para a passagem nem armazenamento da água (MEURER FILHO, 2001; CARMONA DO NASCIMENTO, 2012).

Figura 2.26 - Representação dos vazios numa mistura porosa



Fonte: Carmona do Nascimento (2012)

Os vazios eficazes, ou comunicantes, são os que permitem a passagem da água através do revestimento. Então, quanto maior for a porcentagem de vazios comunicantes ou eficazes da mistura, maior será a permeabilidade da mesma.

Quando a mistura tem elevada quantidade de vazios eficazes ou vazios comunicantes, a água se infiltra verticalmente e se acumula no fundo da camada, junto à camada impermeável, formando uma zona saturada. Acontece, então, o escoamento lento transversal por percolação, devido ao gradiente hidráulico, até o bordo, se a drenagem na interface de saída for devidamente assegurada (GNCS, 1996 *apud* DUMKE, 2005).

O estudo japonês CERI propôs aumentar os vazios de misturas abertas de 17 a 20 ou 23% para retardar a perda de capacidade de permeabilidade e absorção do ruído devido ao entupimento dos vazios eficazes que depende das condições ambientais e de tráfego (LU et al., 2009).

### **2.12.3 Tamanho máximo de agregado**

O tamanho máximo de agregado tem influência na permeabilidade das misturas. Tem-se como padrão que o tamanho máximo de agregado e a porosidade efetiva (vazios comunicantes) são diretamente proporcionais à permeabilidade e o teor de ligante na mistura é inversamente proporcional à permeabilidade (SOUZA, 2008).

A redução do tamanho máximo do agregado provoca alguma redução na capacidade de permeabilidade de uma mistura (LU et al., 2009).

### **2.12.4 Tipo de ligante asfáltico**

Ligantes asfálticos modificados com polímero ou borracha reduzem a permeabilidade das misturas. No estudo de Lu et al. (2009), o asfalto-borracha tinha um terço da permeabilidade da mistura com ligante convencional. Em misturas com ligantes modificados existe um menor volume de vazios comunicantes que em misturas abertas com ligantes convencionais.

### **2.12.5 Espessura da camada**

A permeabilidade depende da espessura da camada, quanto maior é a espessura, menor é a permeabilidade. Quando a espessura do revestimento é maior, torna-se menos provável que uma série de vazios interligados possam se estender por toda a profundidade da espessura e, portanto, diminui a potencial permeabilidade (NCHRP report 531 *apud* PRATICÓ, 2014).

## **2.13 TIPOS DE REVESTIMENTO COM CARACTERÍSTICAS DRENANTES**

### **2.13.1 Revestimentos porosos**

Os revestimentos que têm elevada porcentagem de vazios na sua estrutura interna têm capacidade de eliminar a lâmina de água sobre a superfície do pavimento. Estes vazios podem ser eficazes, semi-eficazes ou ineficazes. Os revestimentos tipo camada porosa de atrito (CPA) apresentam elevada porcentagem de vazios de 18 a 25%, mas estes vazios são na sua maioria vazios semi-eficazes ou ineficazes. Os

revestimentos que têm elevada porcentagem de vazios comunicantes são chamados de revestimentos drenantes ou de concreto asfáltico drenante.

### **2.13.2 Revestimentos drenantes ou permeáveis**

Os revestimentos asfálticos drenantes são os que apresentam melhores características drenantes porque eles têm uma porcentagem elevada de vazios comunicantes, o que permite que a água se infiltre por entre seus poros produzindo a drenagem da superfície de rolamento (LEFEBVRE, 1993).

Os revestimentos drenantes são constituídos por uma camada de desgaste com uma estrutura aberta e porosa sobrejacente a uma camada impermeável. O objetivo deste revestimento é proporcionar uma rápida drenagem das águas superficiais de modo a diminuir o risco de ocorrência do fenômeno de hidroplanagem e da perda de visibilidade associada à projeção de água precipitada (MEURER FILHO, 2001).

A principal característica de uma mistura asfáltica drenante está na sua permeabilidade elevada, que permite a passagem da água pelos vazios comunicantes da mistura. É importante que se tenha uma noção de como os vazios estão distribuídos no interior da mistura, para uma correta análise da permeabilidade (OLIVEIRA, 2003). Simultaneamente ela propicia a redução do ruído por absorção (CARMONA DO NASCIMENTO, 2012).

Os fatores que influenciam a permeabilidade são: a porcentagem de vazios comunicantes, a natureza do ligante, o tamanho máximo de agregado e a espessura do revestimento.

A condutividade hidráulica, expressa em cm/s, é função da vazão da área transversal de fluxo, do comprimento de percolação e da diferença de pressão.

#### **2.13.2.1 Vantagens dos revestimentos drenantes**

Segundo Lefebvre (1993), Oliveira (2003), Dumke (2005) e Guimarães (2012), as principais vantagens dos revestimentos drenantes são:

- Segurança e conforto na condução no período de precipitação pela elevada aderência dos pneus;
- Melhoria da visibilidade devido à redução da projeção de água formada atrás dos veículos;

- Redução da reflexão luminosa principalmente à noite eliminando o fenômeno de espelhamento e melhorando visualização da sinalização horizontal;

- Melhoria do ambiente sonoro por redução do ruído provocado ao nível da interface pneu/pavimento, devido à elevada porosidade que diminui significativamente a compressão do ar, pois pode escapar através dos vazios da mistura;

- Reduz fenômenos de hidroplanagem e viscoplanagem;

- Rápida evacuação da água nas deformações evitando que ela fique acumulada nas trilhas de roda sobre a superfície do pavimento;

- O seu desempenho é mais notório em vias com tráfego de velocidades elevadas, com boas características em planta e perfil e um adequado sistema de drenagem.

### 2.13.2.2 Desvantagens dos revestimentos drenantes

Segundo Lefebvre (1993), Meurer Filho (2001) e Carmona do Nascimento (2012), as desvantagens dos revestimentos drenantes são as seguintes:

- Contribuição estrutural pouco significativa. A camada não é considerada no dimensionamento do pavimento;

- Colmatção e perda de permeabilidade num tempo de 3 a 6 meses em cidades e zonas rurais, e ao fim de três anos em autoestradas, podendo aí as zonas de circulação dos pneumáticos encontrarem-se pouco colmatadas, em virtude da descompressão provocada pela passagem dos pneumáticos.

- Envelhecimento precoce do ligante asfáltico, pois a elevada quantidade de vazios que esta camada apresenta, proporciona uma superior exposição do filme de ligante que envolve os agregados ao ar e à água, acelerando sua oxidação.

Segundo a Normalização do Reino Unido, a camada drenante apresenta (HA, 1999 *apud* CARMONA DO NASCIMENTO, 2012):

- Durabilidade muito dependente de diversos fatores, nomeadamente da qualidade dos materiais, da base de fundação, das características da área envolvente, do projeto de drenagem, e das condições de circulação.

- Movimentos de frenagem e inversão de marcha por veículos pesados, também reduzem a vida destas camadas, pois impõem tensões tangenciais que podem provocar a perda de coesão da mistura e consequentemente desprendimento de agregados.

- A zona de passagem dos pneus tem uma colmatação mais lenta, devido ao efeito de sucção durante a passagem dos mesmos. Este tipo de camada exige, no entanto, maior manutenção, pois obriga a operações de limpeza e aspiração da camada com alguma regularidade.

- O problema nestas misturas é que o aumento da porosidade supõe uma perda de coesão e uma menor resistência à desagregação da mistura fabricada.

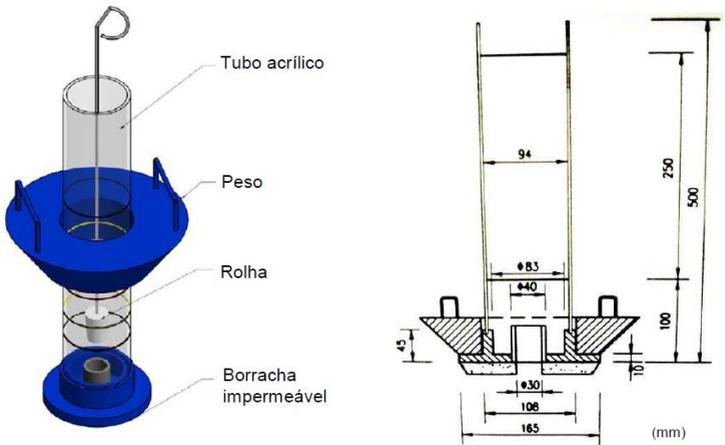
## 2.14 MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE

Existem dois tipos de permeâmetros muito utilizados para a avaliação de misturas abertas: os permeâmetros de carga hidráulica variável e os permeâmetros de carga hidráulica constante (MOMM, 2002 *apud* OLIVEIRA, 2003). O permeâmetro de carga hidráulica variável trabalha em regime transitório e permite o escoamento de um determinado volume de água entre uma determinada área do revestimento. O permeâmetro de carga hidráulica constante funciona em regime estacionário.

Diferentes equipamentos foram desenvolvidos para medir a capacidade de drenagem de misturas abertas. A abordagem comum é a determinação do tempo de descarga de um volume específico de água. Este parâmetro permite a determinação do coeficiente de permeabilidade  $k$  (cm/s) para comparar o desempenho de diferentes misturas ou de uma mesma mistura ao longo do tempo.

Com o objetivo de avaliar a característica de permeabilidade das misturas, o Laboratorio de Caminos y Aeropuertos de la Escuela de Caminos de Santander desenvolveu, em 1988, o permeâmetro LCS (*Laboratorio Escuela de Caminos de Santander*) (Figura 2.27). Este equipamento é um permeâmetro de carga variável que permite avaliar *in situ*, a permeabilidade da camada, a partir do tempo que um determinado volume de água demora a infiltrar-se no pavimento. O procedimento de ensaio está descrito na norma espanhola NLT 327/00.

Figura 2.27 - Permeâmetro LCS



Fonte: NLT 327 (2000) *apud* Carmona do Nascimento (2012)

Trabalhos desenvolvidos por Meurer Filho (2001), Dumke (2005), Guimarães (2012) utilizaram permeâmetros de carga hidráulica variável sobre placas confeccionadas em laboratório para medir a permeabilidade das misturas abertas.

Nos Estados Unidos é utilizado o permeâmetro *NCAT field* que tem o mesmo princípio de funcionamento que o LCS ensaiado *in situ* ou sobre placas moldadas no laboratório.

Um dos problemas que afetam a permeabilidade dos pavimentos é a colmatação dos poros vazios com o tempo, o que é inevitável. Segundo Porto (1999), a colmatação é mais intensa nos dois primeiros anos de uso do pavimento sendo que após esse período a permeabilidade apresenta pequenas reduções (OLIVEIRA, 2003).

## 2.15 TIPOS DE REVESTIMENTOS COM PROPRIEDADES ACÚSTICAS E/OU DRENANTES

### 2.15.1 Brasil

#### 2.15.1.1 Revestimento Asfáltico Drenante

Meurer Filho (2001) desenvolveu um estudo sobre os concretos asfálticos drenantes para maximizar o teor de vazios comunicantes. Escolheu diferentes descontinuidades na granulometria e selecionou três tamanhos máximos de agregado  $D_{\text{máx}} = 9,50$  mm, com descontinuidade 0/4 (supressão de tamanhos de agregados entre 0 e 4 mm);  $D_{\text{máx}} = 12,50$  mm com descontinuidade 0/6 e  $D_{\text{máx}} = 19,10$  mm com descontinuidade 0/9. Para a formulação das misturas utilizou ligante modificado por polímero SBS em 4%.

O objetivo de seu trabalho foi definir uma curva granulométrica para concreto asfáltico drenante que maximizasse o teor de vazios comunicantes mantendo a resistência à deformação permanente e à desagregação da mistura em níveis adequados.

Os resultados mostraram concretos asfálticos drenantes com porcentagens de vazios maiores que 25 %, velocidade de percolação de 13 cm/s no ensaio de permeabilidade, perdas no ensaio Cântabro menores que 25 % e porcentagem de deformação permanente menor que 10% (MEURER FILHO, 2001). O Quadro 2.2 mostra a granulometria que apresentou melhores resultados para misturas drenantes obtida no estudo para um  $D_{\text{máx}} = 9,50$  mm.

Quadro 2.2 - Granulometria de Meurer Filho com Dmax=9,5 mm

| <b>Abertura (mm)</b> | <b>% Passante</b> |
|----------------------|-------------------|
| 9,5                  | 100               |
| 6,3                  | 38,5              |
| 4,75                 | 7,71              |
| 2,8                  | 7,71              |
| 1,18                 | 7,71              |
| 0,6                  | 7,71              |
| 0,3                  | 7,71              |
| 0,15                 | 7,71              |
| 0,075                | 4,36              |

Fonte: Meurer Filho (2001)

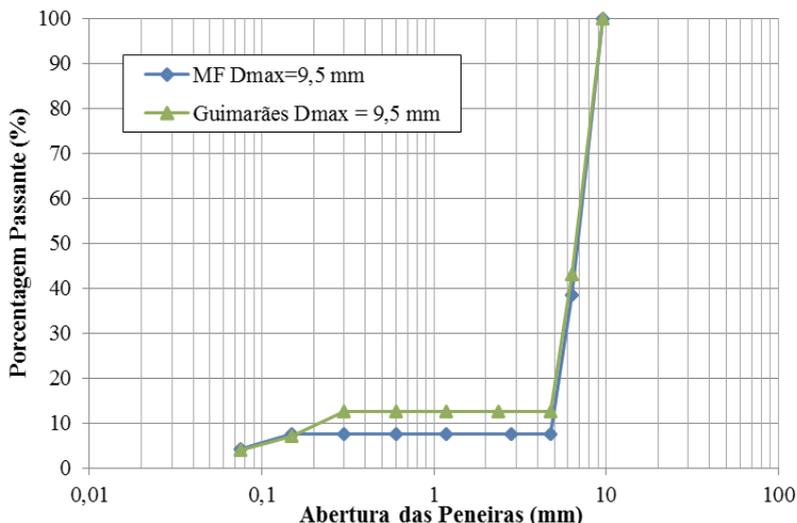
Guimarães (2012) também estudou as misturas de concreto asfáltico drenante com uma granulometria baseada na proposta por Meurer Filho, mas com uma menor porcentagem de vazios na mistura (menor que 25%) e utilizou ligante de alta consistência CAP 30/45 modificado por polímero SBS e asfalto-borracha. A velocidade de percolação para estas misturas no ensaio de permeabilidade foi de 2,0 cm/s e as deformações permanentes foram menores que 10%. O Quadro 2.3 mostra a granulometria utilizada com um diâmetro máximo de agregado de 9,5 mm e a Figura 2.28 as granulometrias desenvolvidas por Meurer Filho e Guimarães.

Quadro 2.3 - Granulometria com Dmax=9,5 mm

| <b>Abertura (mm)</b> | <b>% Passante</b> |
|----------------------|-------------------|
| 9,52                 | 100               |
| 6,3                  | 43,07             |
| 4,75                 | 12,51             |
| 2,36                 | 12,51             |
| 1,18                 | 12,51             |
| 0,6                  | 12,51             |
| 0,3                  | 12,51             |
| 0,15                 | 7,14              |
| 0,075                | 4,08              |

Fonte: Guimarães (2012)

Figura 2.28 - Granulometrias de Meurer Filho e Guimarães



Fonte: Meurer Filho (2001) e Guimarães (2012)

#### 2.15.1.2 CPA: Camada Porosa de Atrito

A camada porosa de atrito CPA mantém uma grande porcentagem de vazios com ar não preenchidos graças às pequenas quantidades de filler, de agregado miúdo e de ligante asfáltico. Possuem entre 18 e 25 % de vazios com ar. A CPA é empregada como camada de rolamento com a finalidade funcional de aumentar a aderência pneu/pavimento, reduzir a espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento e, conseqüentemente, a distância de frenagem, reduzir o spray proveniente do borrifo de água pelos pneus dos veículos, aumentando assim a distância de visibilidade, e reduzir a reflexão da luz dos faróis noturnos. Outro fator importante é a redução do ruído ao rolamento (BERNUCCI et al., 2008). A diferença entre a CPA e o revestimento drenante é o conteúdo de vazios comunicantes que eles possuem (KNABBEN, 2012).

A especificação brasileira do DNER-ES 386/99 recomenda para a CPA cinco faixas granulométricas e teor de ligante asfáltico entre 4 e 6%. O Quadro 2.4 mostra as cinco faixas recomendadas e a Figura 2.29

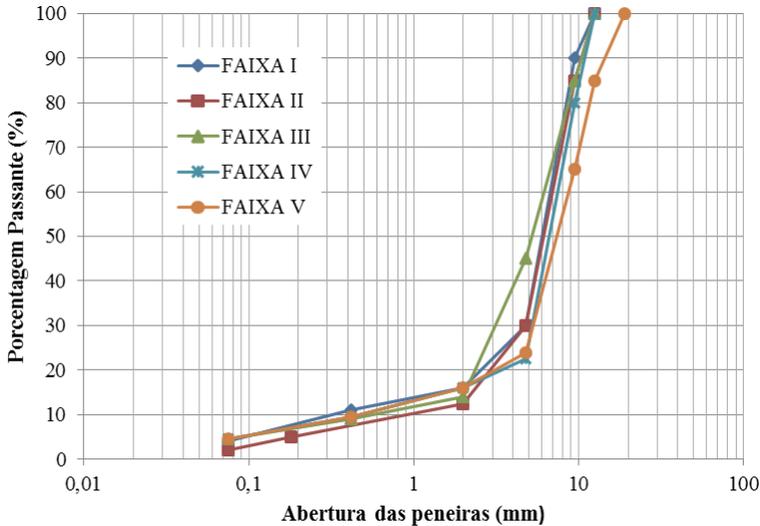
a representação gráfica das granulometrias que passam pelo ponto médio de cada faixa.

Quadro 2.4 - Faixas granulométricas e requisitos de dosagem da camada porosa de atrito (CPA).

| Peneira de malha quadrada                          |              | Porcentagem passando, em peso (faixas) |        |       |       |        | Tolerância na curva de projeto (%) |
|--|--------------|--|--------|-------|-------|--------|------------------------------------|
| ABNT   | Abertura, mm | I                                      | II     | III   | IV    | V      |                                    |
| 3/4"   | 19,0         | -                                      | -      | -     | -     | 100    | -                                  |
| 1/2"   | 12,5         | 100                                    | 100    | 100   | 100   | 70-100 | ± 7                                |
| 3/8"   | 9,5          | 80-100                                 | 70-100 | 80-90 | 70-90 | 50-80  | ± 7                                |
| Nº 4   | 4,8          | 20-40                                  | 20-40  | 40-50 | 15-30 | 18-30  | ± 5                                |
| Nº 10  | 2,0          | 12-20                                  | 5-20   | 10-18 | 10-22 | 10-22  | ± 5                                |
| Nº 40  | 0,42         | 8-14                                   | -      | 6-12  | 6-13  | 6-13   | ± 5                                |
| Nº 80  | 0,18         | -                                      | 2-8    | -     | -     | -      | ± 3                                |
| Nº 200   | 0,075        | 3-5                                    | 0-4    | 3-6   | 3-6   | 3-6    | ± 2                                |
| Ligante polimerizado solúvel no tricloroetileno, % |              | 4,0 - 6,0                              |        |       |       |        | ± 0,3                              |

Fonte: DNER-ES 386/99 *apud* Bernucci et al. (2008)

Figura 2.29 - Granulometrias das misturas CPA



Fonte: DNER-ES 386/99 *apud* Bernucci et al. (2008)

Os valores do coeficiente de absorção sonora para a granulometria de Meurer Filho de  $D_{máx}$  de 9,5 mm e 12,5 mm e para a CPA de  $D_{máx}= 19,5$  mm da faixa V foram estudados por Knabben (2012) e a Figura 2.19 apresenta os resultados obtidos.

## **2.15.2 Espanha**

### **2.15.2.1 Misturas betuminosas drenantes**

Na Espanha, as primeiras misturas drenantes foram aplicadas em 1980. Nas primeiras aplicações estas camadas continham porcentagens de vazios da ordem dos 15 a 18%, verificando-se uma colmatação rápida do revestimento. Atualmente é exigida uma porcentagem mínima de 20%, sendo mais comum o uso de 25 % de vazios (RUIZ RUBIO, 2006). Na maior parte das camadas drenantes realizadas na Espanha, utilizaram-se ligantes modificados (cerca de 80 %), sobretudo desde que se aumentou a porcentagem de vazios (CARMONA DO NASCIMENTO, 2012). As espessuras das camadas drenantes utilizadas na Espanha são de 4 a 5 cm e para sua composição são utilizados ligantes modificados com polímeros SBS ou EVA (PG-3, 2001).

### **2.15.2.2 Misturas betuminosas descontínuas**

As misturas betuminosas descontínuas foram aplicadas pela primeira vez na Espanha no ano de 1985 e seu uso foi normalizado em 1996.

Apresentam um esqueleto mineral de agregados graúdos em contato entre si e uma elevada porcentagem dos mesmos (75-80%). As vantagens destas misturas são a boa resistência às deformações plásticas, a grande macrotextura, durabilidade, resistência à derrapagem, além de reduzir a necessidade de agregados de ótima qualidade. Como desvantagem, apresentam exsudação, perda de textura, desagregação e envelhecimento (RUIZ RUBIO, 2006).

Estas misturas têm características semelhantes às misturas drenantes, mas em menor grau: capacidade de drenagem devido a sua elevada macrotextura e sua porcentagem de vazios e redução dos níveis de ruído em comparação com misturas convencionais (MIRÓ RECANSES, 2006).

No Quadro 2.5 são mostradas as faixas granulométricas das misturas drenantes e descontínuas e no Quadro 2.6 o conteúdo de vazios mínimo exigido para as mesmas.

Quadro 2.5 - Faixas granulométricas para misturas de revestimentos

| Tipo de Mistura | Abertura das Peneiras (mm) |        |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|----------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 16                         | 12,5   | 10    | 8     | 4     | 2     | 0,5   | 0,063 |
| PA 12           | 100                        | 70-100 |       | 38-62 | 13-27 | 9-20  | 5-12  | 3-6   |
| M 8             |                            |        | 100   | 75-97 | 14-27 | 11-22 | 8-16  | 5-7   |
| M 10            |                            | 100    | 75-97 |       | 14-27 | 11-22 | 8-16  | 5-7   |
| F 8             |                            |        | 100   | 75-97 | 23-38 | 18-32 | 11-23 | 7-9   |
| F 10            |                            | 100    | 75-97 |       | 23-38 | 18-32 | 11-23 | 7-9   |

Fonte: Adaptado de PG-3 (2001)

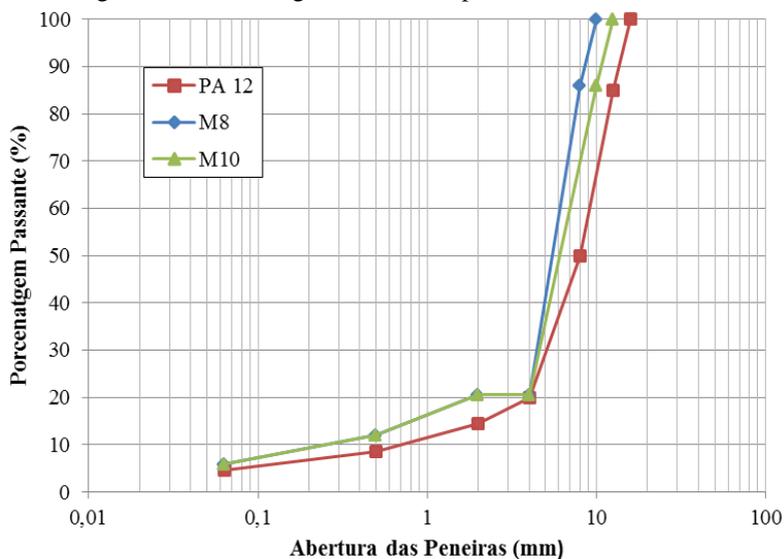
Quadro 2.6 - Conteúdo de vazios mínimo das misturas

| Tipo de Mistura                 | % de Vazios |
|---------------------------------|-------------|
| F (Fino)                        | > 4%        |
| M (Monogranular)                | > 12%       |
| PA 12 ( <i>Porous Asphalt</i> ) | > 20%       |

Fonte: Adaptado de PG-3 (2001)

A Figura 2.30 mostra as curvas granulométricas segundo o ponto médio de cada faixa das misturas drenantes tipo PA 12 e das misturas descontínuas tipo M10 e M8.

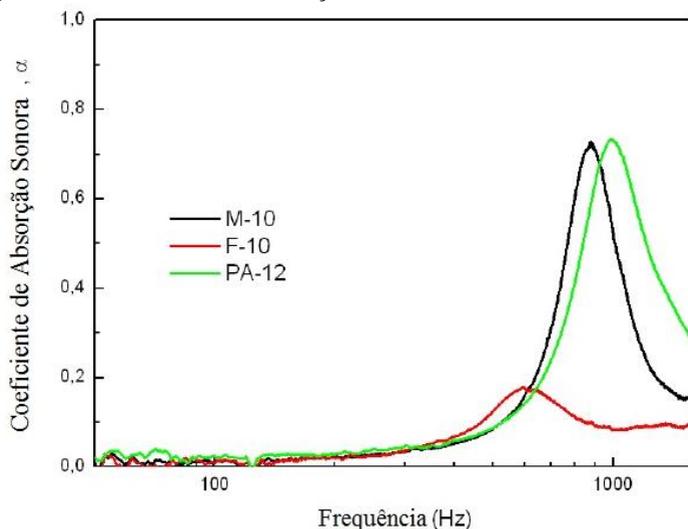
Figura 2.30 - Curvas granulométricas para M 8, M 10, e PA 12



Fonte: Adaptado de PG-3 (2001)

Pacheco (2010) estudou a absorção sonora utilizando um tubo de impedância de misturas tipo PA 12, M 10 e F 10. As misturas PA 12 tinham um conteúdo de vazios de 21%. A mistura M 10 foi formulada com uma porcentagem de vazios de 20% e a mistura F 10 tinha 10% de vazios. Os resultados são mostrados na Figura 2.31.

Figura 2.31 - Coeficiente de absorção sonora misturas M 10, F 10 e PA 12



Fonte: Adaptado de Pacheco (2010)

### 2.15.3 Argentina

Os revestimentos utilizados na Argentina com características acústicas e/ou drenantes são semelhantes aos de Espanha. Porém, as faixas granulométricas correspondem à série de peneiras da ASTM ao invés dos correspondentes as normas europeias EN.

#### 2.15.3.1 Revestimento drenante CAD 12

Na Argentina são utilizadas as misturas drenantes denominadas CAD 12 com porcentagens de vazios maiores a 20%. Experiências de aplicação na Argentina destas misturas segundo (NOUGUÉS, 2006) foram aplicadas na Avenida 9 de Julio Sur, Buenos Aires. A dosagem da mistura foi a seguinte: Agregado 6/12, 84%; Agregado 0/3, 7,7 %; filler calcário, 1,9%; cal hidráulica, 1,9 %; e cimento asfáltico, 4,5 %.

#### 2.15.3.2 Misturas descontínuas

As misturas descontínuas são semelhantes às utilizadas na Espanha só que com a adaptação das peneiras da ASTM. As misturas com denominação MAC M8 e MAC M10 têm as mesmas características

e requisitos de volume de vazios mínimo que as correspondentes M 8 e M 10. As misturas com denominação MAC F8 e MAC F10 são as correspondentes a F 8 e F 10.

Estas misturas apresentam alta resistência mecânica, alta macrotextura, resistência à derrapagem, redução dos níveis de ruído e probabilidade de hidroplanagem (NOUGUÉS, 2006). No Quadro 2.7 são apresentadas as faixas granulométricas destas misturas.

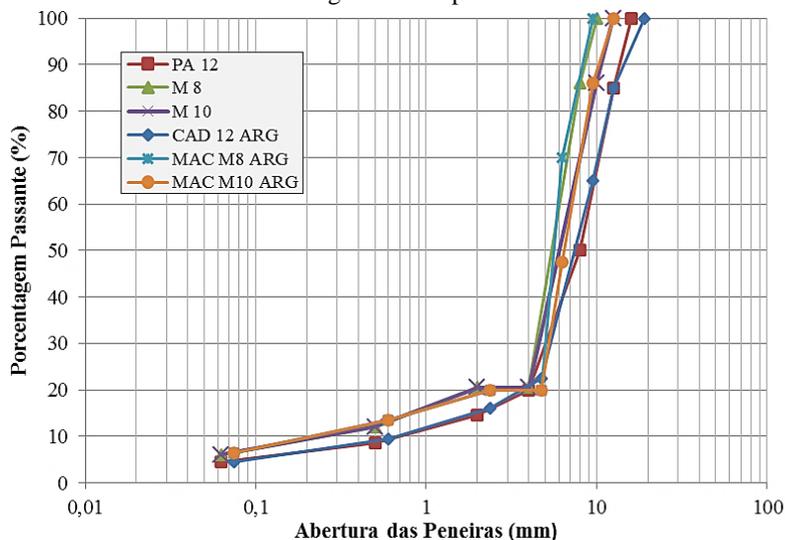
Quadro 2.7 - Faixas granulométricas para M8, M10, F8 e F10.

| FAIXAS GRANULOMÉTRICAS |            |       |       |       |
|------------------------|------------|-------|-------|-------|
| Peneiras               | % Passante |       |       |       |
|                        | M8         | M 10  | F8    | F10   |
| 12,5 mm (½")           | -          | 100   | -     | 100   |
| 9,5 mm (3/8")          | 100        | 75-97 | 100   | 75-97 |
| 6,3 mm (Nº 3)          | 60-80      | 35-60 | 60-80 | 40-65 |
| 4,75 mm (Nº 4)         | 15-28      | 15-28 | 25-40 | 25-40 |
| 2,36 mm (Nº 8)         | 15-25      | 12-25 | 20-35 | 20-35 |
| 600 µm (Nº 30)         | 9-18       | 9-18  | 12-25 | 12-25 |
| 75 µm (Nº200)          | 5-8        | 5-8   | 7-10  | 7-10  |

Fonte: Adaptado de CPA (2010)

A Figura 2.32 mostra as misturas drenantes e descontínuas utilizadas na Argentina (representação curva granulométrica ponto médio de cada faixa) junto com as utilizadas na Espanha.

Figura 2.32 - Granulometrias de misturas drenantes e descontínuas aplicadas na Argentina e Espanha



Fonte: Adaptado de CPA (2010) e PG-3 (2001)

#### 2.15.4 Estados Unidos

As misturas utilizadas como revestimento que apresentam melhores propriedades acústicas e drenantes nos Estados Unidos são as OGFC (*Open Graded Friction Course*). Estas misturas foram desenvolvidas pela primeira vez em 1940, mas apenas na década de 1970 sua utilização aumentou quando a FHWA publicou um procedimento de projeto da mistura. Elas são uma classe especial de misturas caracterizadas pela utilização de uma graduação aberta com agregados de alta qualidade para obter um esqueleto granular que desenvolva o contato entre os grãos e tenha um conteúdo alto de volume de vazios (18-22%) (ALVAREZ et al., 2010). A estrutura de vazios comunicantes destas misturas oferece drenabilidade e redução de ruído, que são as principais vantagens quando utilizadas como revestimentos.

Atualmente, a maioria das misturas OGFC utilizadas nos Estados Unidos contém agregados com Tamanhos Máximos Nominais (TMN) de 9,5 mm e 12,5 mm. O Quadro 2.8 mostra as especificações de granulometrias para OGFC em 20 estados nos Estados Unidos.

Quadro 2.8 - Especificações para granulometrias das misturas OGFC nos EEUU

| ESTADO | PORCENTAGEM PASSANTE |                   |                   |                  |                 |                 |                  |                  |                    |  |
|--------|----------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|--------------------|--|
|        | 1 in.<br>25.0mm      | 3/4 in.<br>19.0mm | 1/2 in.<br>12.5mm | 3/8 in.<br>9.5mm | No. 4<br>4.75mm | No. 8<br>2.36mm | No. 16<br>1.18mm | No. 30<br>0.60mm | No. 200<br>0.075mm |  |
| AL     |                      | 100               | 85-100            | 55-65            | 10-25           | 5-10            |                  |                  | 2-4                |  |
| CT     |                      |                   | 95-100            |                  | 20-35           | 5-19            |                  |                  | 1-5                |  |
| DE     |                      |                   | 100               | 88-98            | 25-42           | 5-15            |                  |                  | 2-5                |  |
| FL     |                      | 100               | 85-100            | 55-75            | 15-25           | 5-10            |                  |                  | 2-4                |  |
| IN     |                      |                   | 100               | 83               | 28              | 13              |                  |                  | 2-4                |  |
| KY     |                      |                   | 100               | 90-100           | 25-50           | 5-15            |                  |                  | 2-5                |  |
| MO     |                      | 100               | 85-100            | 55-75            | 10-25           | 5-10            |                  |                  | 2-4                |  |
| MS     |                      |                   | 100               | 80-100           | 15-30           | 10-20           |                  |                  | 2-5                |  |
| NE     |                      | 100               | 95-100            | 40-80            | 15-35           | 5-12            |                  |                  | 0-3                |  |
| NY     |                      |                   | 95-100            | 40-56            | 20-30           | 6-14            | 4-12             | 3-9              | 2-5                |  |
| TN     |                      | 100               | 85-100            | 35-60            | 10-25           | 5-10            |                  |                  | 2-4                |  |
| OH     |                      |                   | 100               | 85-96            | 28-45           | 9-17            |                  |                  | 2-5                |  |
| SC     |                      | 100               | 85-100            | 55-75            | 15-25           | 5-10            |                  |                  | 2-4                |  |
| LA 1   |                      |                   | 100               | 90-100           | 25-50           | 5-15            |                  |                  | 2-5                |  |
| LA 2   |                      | 100               | 85-100            | 55-75            | 10-25           | 5-10            |                  |                  | 2-4                |  |
| NV 1   |                      |                   | 100               | 90-100           | 35-55           |                 | 5-18             |                  | 0-4                |  |
| NV 2   |                      |                   |                   | 95-100           | 40-60           |                 | 12-22            |                  | 0-5                |  |
| CA 1   |                      |                   |                   | 78-89            | 28-37           | 7-18            |                  |                  |                    |  |
| CA 2   |                      |                   |                   |                  | 29-36           | 7-18            |                  |                  |                    |  |
| OR 1   | 99-100               | 85-96             | 55-71             |                  | 10-24           | 6-16            |                  |                  | 1-6                |  |
| OR 2   |                      | 99-100            | 90-98             |                  | 18-32           | 3-15            |                  |                  | 1-5                |  |
| NC 1   |                      |                   | 100               | 75-100           | 25-45           | 5-15            |                  |                  | 1-3                |  |
| NC 2   |                      |                   | 100               | 75-100           | 25-45           | 5-15            |                  |                  | 1-3                |  |
| NC 3   |                      | 100               | 85-100            | 55-75            | 15-25           | 5-10            |                  |                  | 2-4                |  |
| GA 1   |                      | 100               | 100               | 85-100           | 20-40           | 5-10            |                  |                  | 2-4                |  |
| GA 2   |                      | 100               | 85-100            | 55-75            | 15-25           | 5-10            |                  |                  | 2-4                |  |
| GA 3   |                      | 100               | 80-100            | 35-60            | 10-25           | 5-10            |                  |                  | 1-4                |  |
| TX 1   |                      | 100               | 80-100            | 35-60            | 1-20            | 1-10            |                  |                  | 1-4                |  |
| TX 2   |                      | 100               | 95-100            | 50-80            | 0-8             | 0-4             |                  |                  | 0-4                |  |

Fonte: Adaptado de Putman (2012)

As misturas OGFC com granulometrias especificadas no Quadro 2.8 têm porcentagens de ligante variando de 5 a 7 %, valores de desagregação menores a 20% e TSR maiores a 80% (PUTMAN, 2012).

No estudo desenvolvido por LU et al. (2009), foram avaliadas as propriedades de durabilidade, permeabilidade, absorção acústica e atrito de um total de 22 misturas, incluindo uma mistura densa, duas SMA e 19 misturas abertas ou porosas. Quatro misturas denominadas como AR475, AR475P, P475 e G125 apresentaram desempenhos satisfatórios e foram recomendadas para avaliações de desempenho de longo prazo em seções de teste de campo. O ligante utilizado nas misturas AR475, AR475P foi asfalto-borracha (teor de 9,5 % e 8,4%, respectivamente) e na mistura P475 foi utilizado ligante modificado com polímero (teor de 7,9%). Os teores altos de ligante se devem ao fato que o método para

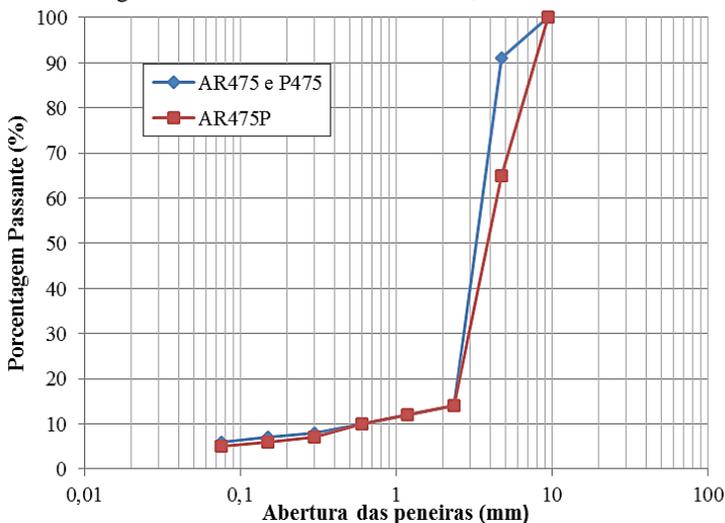
determinar o conteúdo ótimo de ligante é através do ensaio de escorrimento, que tem que ser menor a 0,3%, com o objetivo de fornecer uma mistura com uma espessura de ligante suficiente para obter boa durabilidade. A granulometria das misturas com diâmetro máximo de 9,5 mm, que são as denominadas AR475, AR475P e P475, estão representadas no Quadro 2.9 e na Figura 2.33.

Quadro 2.9 - Granulometrias das misturas AR475, P475 e AR475P

| Abertura (mm) | % Passante    |        |
|---------------|---------------|--------|
|               | AR475<br>P475 | AR475P |
| 9,5           | 100           | 100    |
| 4,75          | 91            | 65     |
| 2,36          | 14            | 14     |
| 1,18          | 12            | 12     |
| 0,6           | 10            | 10     |
| 0,3           | 8             | 7      |
| 0,15          | 7             | 6      |
| 0,075         | 6             | 5      |

Fonte: Adaptado de Lu et al. (2009)

Figura 2.33 - Granulometrias AR475, P475 e AR475P



Fonte: Adaptado de Lu et al. (2009)

Os resultados do desgaste Cântabro, permeabilidade e absorção sonora estão apresentados no Quadro 2.10. Todas as misturas têm conteúdos de vazios de 20%, aproximadamente.

Quadro 2.10 - Resultados para as misturas AR475 e AR475P

| Misturas | Desgaste (%) | Permeabilidade (cm/s) | Coef. Absorção |
|----------|--------------|-----------------------|----------------|
| AR475    | 12           | 0,06                  | 0,44           |
| AR475P   | 6            | 0,08                  | 0,45           |
| 475P     | 3            | 0,05                  | 0,42           |

Fonte: Adaptado de Lu et al. (2009)

Incluindo-se alguns agregados de maiores dimensões na mistura aberta de TMN de 4,75 mm (% material retido peneira N° 4, 4,75 mm) aumenta-se ligeiramente a permeabilidade, a resistência à desagregação, o dano por umidade induzida e o atrito. Não apresenta grandes benefícios na absorção acústica nem na resistência à deformação permanente.

Todas as misturas abertas incluídas no estudo de LU et al. (2009) tiveram permeabilidades superiores a 0,01 cm/s, exceto as misturas densas e SMA.

Na Europa são especificados valores de permeabilidade na faixa de 0,01 a 0,4 cm/s para as misturas abertas (LU et al., 2009).

O NCAT (*National Center of Asphalt Technology*) tem sugerido um valor mínimo de permeabilidade de 100 m/dia (0,12 cm/s) para a nova geração de misturas abertas (*open graded friction course*) que tem como objetivo principal remover a água da superfície do revestimento (ALVAREZ *et al.*, 2006).

## 2.15.5 França

A França começou a utilizar revestimentos drenantes a partir 1984. A denominação dos mesmos é “*bétons bituminex drainants*” (BBDr). A espessura das camadas era de 4 cm e o ligante asfáltico utilizado poderia ser modificado ou não.

O informe de revestimentos drenantes de 1997 apresenta uma formulação típica do mesmo. O tamanho máximo de agregado utilizado nestas misturas é de 10 mm e tem uma descontinuidade entre os

tamanhos de agregados de 2 mm e 6 mm (descontinuidade 2/6). O Quadro 2.11 mostra as especificações para o projeto destas misturas.

Quadro 2.11 - Formulação típica do BBDr

| 0/10 (Descontinuidade 2/6) |             |
|----------------------------|-------------|
| Brita 6/10                 | 85 a 90 %   |
| Areias 0/2                 | 8 a 12 %    |
| Filler                     | 1 a 4 %     |
| passante 2 mm              | 12 a 15 %   |
| passante 0,08 mm           | 3 à 5%      |
| Teores de Ligante          |             |
| BBDr ligante puro          | 4,4 a 4,8 % |
| BBDr ligante modificado    | 4,7 a 5,2 % |
| BBDr asfalto -<br>borracha | 5,7 a 6,1%  |
| BBDr fibras                | 5,1 a 5,5 % |

Fonte: Adaptado de *Observatoire des Techniques de Chaussées* (1997)

Estas misturas são classificadas como tipo 1 ou 2, segundo a porcentagem de vazios da mistura o qual é determinado pela porcentagem de material passante na peneira de 6,3 mm. As misturas Tipo 1 têm porcentagens de vazios entre 20 e 25% , para 13% de material passante na peneira de 6,3 mm, e as misturas tipo 2, têm porcentagens de vazios entre 25-30 % para 8% de material passante na peneira de 6,3 mm. O Quadro 2.12 mostra a condição de descontinuidade destas misturas.

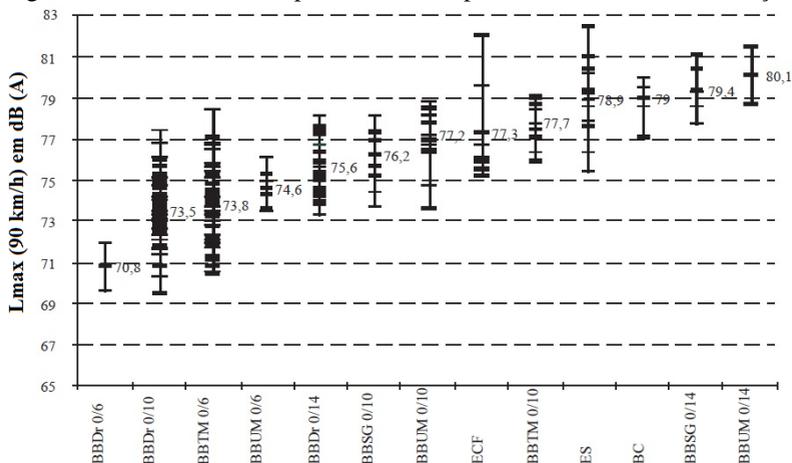
Quadro 2.12 - Condição de descontinuidade das misturas drenantes

| BBDr   | D mm | Descontinuidade | Peneiras |        |         |            |
|--------|------|-----------------|----------|--------|---------|------------|
|        |      |                 | 6,3 mm % | 4 mm % | 2 mm %  | 0,063 mm % |
| Tipo 1 | 0/10 | 2/6             | 13       |        | 13 ± 2  | 3,5        |
|        | 0/6  | 2/4             |          | 10     | 10 à 13 | 3,5        |
| Tipo 2 | 0/10 | 2/6             | 8        |        | 8 ± 1   | 3,5        |
|        | 6/10 | 2/4             |          | 5      | 5 ± 1   | 3,5        |

Fonte: Adaptado de L.C.d.P (2007) *apud* Thomas (2011)

A Figura 2.34 mostra os valores dos níveis de ruído de rolamento  $L_{\max}$  obtidos com um veículo de teste a 90 km/h e com um sonômetro localizado a 7,5 m do eixo da via e a 1,20 m de altura nos diferentes revestimentos utilizados na França. As misturas drenantes BBDr apresentam os menores valores de  $L_{\max}$ .

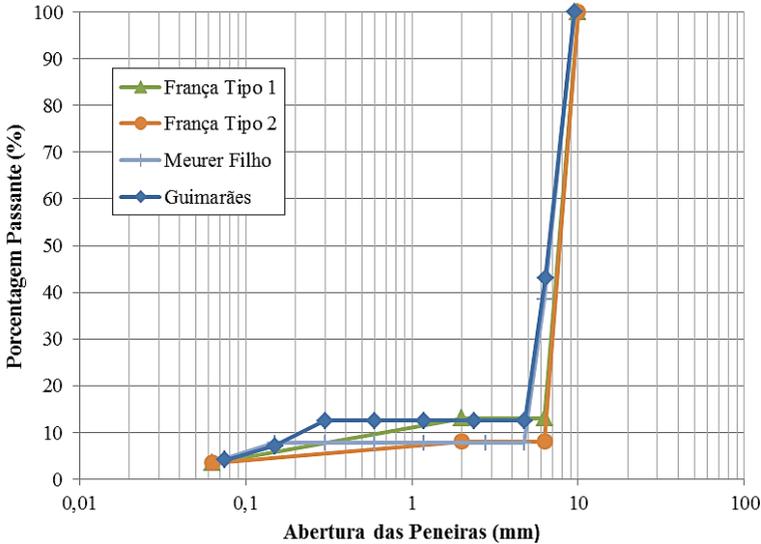
Figura 2.34 - Valores  $L_{\max}$  para diferentes tipos de revestimentos na França



Fonte: Adaptado de *Observatoire des Techniques de Chaussées* (1997)

A Figura 2.35 representa a granulometria das misturas francesas e as estudadas por Meurer Filho e Guimarães. A mistura francesa representada está baseada no Quadro 2.12. As granulometrias são semelhantes quanto à concepção de elevadas porcentagens de agregado graúdo na sua composição e a geração de descontinuidades na sua formulação.

Figura 2.35 - Granulometrias das misturas aplicadas na França e no Brasil

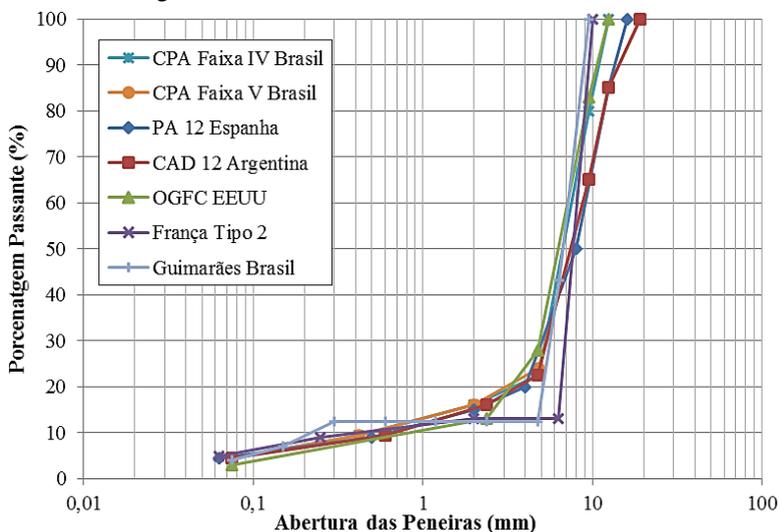


Fonte: Adaptado de Thomas (2011), Meurer Filho (2001) e Guimarães (2012)

## 2.16 COMENTÁRIOS SOBRE AS GRANULOMETRIAS

A Figura 2.36 representa as granulometrias das misturas denominadas de drenantes utilizadas nos países descritos na seção anterior. As misturas denominadas de drenantes utilizadas na Espanha e Argentina representam a tendência da maioria dos países europeus de se ter diâmetros máximos maiores que 12,5 mm na sua composição e porcentagens de vazios maiores que 20%, com exceção da França onde são utilizados tamanhos máximos de agregados de 10 mm e as curvas granulométricas são descontínuas e com porcentagens de vazios entre 20 e 30%. As misturas mais utilizadas nos Estados Unidos têm diâmetros máximos de 19,0 e 12,5 mm e porcentagens de vazios entre 18 e 22%, ou seja, menores que as porcentagens de vazios das misturas utilizadas na Europa.

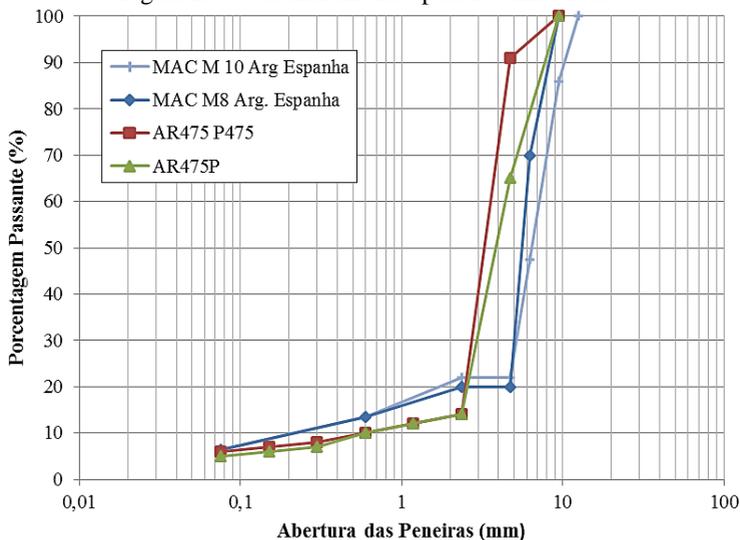
Figura 2.36 - Granulometrias de misturas drenantes



Fonte: Adaptado de Putman (2012), PG-3 (2001), CPA (2010), Guimarães (2012) e Thomas (2011)

Com respeito às misturas que apresentam bom desempenho quanto à redução do ruído e resistência mecânica, na Espanha e Argentina são utilizadas misturas descontínuas com menores porcentagens de vazios (aproximadamente 15%) como revestimentos para gerar macrotextura, reduzir o ruído e aumentar a resistência à desagregação das misturas. As granulometrias estudadas por Lu et al. (2009) nos EEUU têm diâmetros máximos de 9,5 mm e apresentam um bom desempenho quanto à resistência mecânica e absorção sonora, sendo recomendadas para futuras avaliações em campo. As granulometrias descontínuas e as estudadas por Lu et al. (2009) são mostradas na Figura 2.37.

Figura 2.37 - Granulometrias para reduzir o ruído



Fonte: Adaptado de CPA (2010) e Lu et al. (2009)

As misturas drenantes apresentam ótimas propriedades de drenabilidade e também propriedades de absorção acústica devido a seu alto conteúdo de vazios, o que reduz os níveis de ruído gerados pelo mecanismo aerodinâmico, mas aumenta o ruído gerado pelo mecanismo de impactos devido ao tamanho do agregado ser maior. Estas misturas têm a desvantagem da colmatação dos vazios e sua baixa resistência mecânica à desagregação e deformação permanente.

As misturas descontínuas e as estudadas por Lu et al. (2009) reduzem o ruído pneu/pavimento por ter tamanhos máximos de agregados pequenos, o que reduz o ruído gerado pelos mecanismos de impacto. A drenabilidade de estas misturas é mais baixa pelo menor conteúdo de vazios, mas apresentam boas propriedades de resistência mecânica.

## 2.17 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da revisão bibliográfica realizada são expostos alguns conceitos importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

- O ruído do tráfego afeta a saúde e qualidade de vida das pessoas produzindo efeitos adversos de longo e curto prazo. Além de custos

relacionados com a saúde, a contaminação sonora acarreta grandes perdas econômicas geradas pela desvalorização imobiliária.

- As velocidades superiores a 50 km/h, a principal fonte de geração do ruído do tráfego é o ruído provocado pela interação pneu/pavimento. Os mecanismos principais de geração deste ruído são de tipo mecânicos pelo impacto do pneu contra o pavimento e de bombeamento de ar ou aerodinâmicos. Os mecanismos de amplificação podem aumentar os níveis de ruído dos mecanismos descritos anteriormente.

- Existem vários fatores que influenciam o ruído pneu/pavimento como o tipo de veículo, tipo de pneu, velocidade dos veículos, condições climáticas e características do revestimento.

- A medida mais eficaz de mitigação do ruído do tráfego é reduzir as emissões de ruído na fonte mediante a utilização dos chamados revestimentos silenciosos.

- A presença de água na superfície das rodovias acarreta problemas de segurança aos usuários pela perda de aderência do pneu, o risco de hidroplanagem e viscoplanagem, diminuição da visibilidade aumentando o número de acidentes de tráfego nos dias chuvosos. Uma medida eficaz para a redução da lâmina de água na superfície é a utilização de revestimentos drenantes ou porosos.

- As características do revestimento relevantes que influenciam suas propriedades acústicas e drenantes são: a textura, a porosidade, o tamanho máximo de agregado e a espessura.

- Tanto para reduzir o ruído pneu/pavimento como para eliminar a lâmina de água sobre a superfície é recomendado o uso de revestimentos porosos. Os revestimentos porosos têm capacidade de absorver o ruído pneu/pavimento e de permitir a passagem da água pela sua estrutura interna. As medições da capacidade de absorção sonora são realizadas com o tubo de impedância e a capacidade de eliminação da água é avaliada com o uso de um permeâmetro.

- As misturas drenantes apresentam ótimas propriedades drenantes e também boas propriedades acústicas devido a seu alto conteúdo de vazios, o que reduz os níveis de ruído gerados pelo mecanismo aerodinâmico, mas também aumenta o ruído gerado pelo mecanismo de impacto. Porém esta mistura tem a desvantagem da colmatagem dos vazios e da sua baixa resistência mecânica.

- Para revestimentos que atingem propriedades acústicas são utilizados tamanhos de agregados menores ou iguais a 10 mm. A

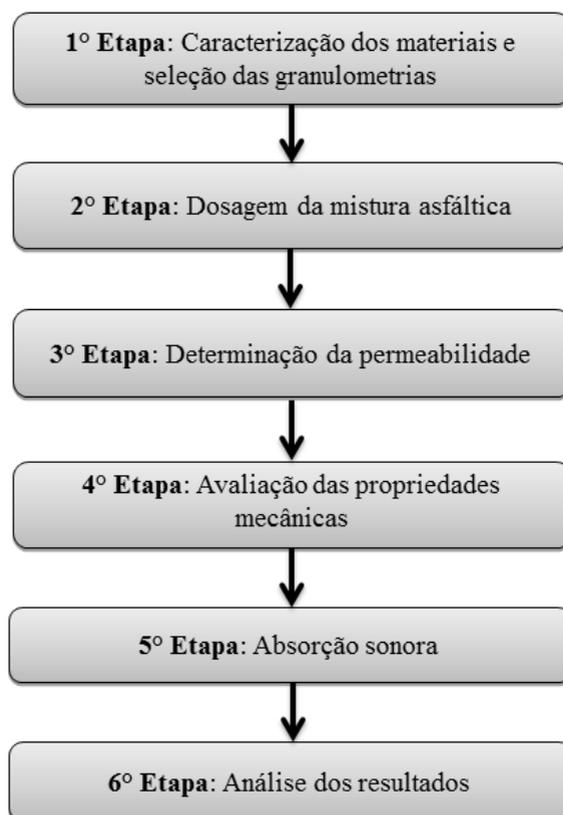
utilização de agregados de menor tamanho reduz os níveis de ruído gerados pelo mecanismo de impactos.

- Um revestimento com boas propriedades acústicas, drenantes e mecânicas teria que ter um tamanho máximo de agregado pequeno, na ordem de 10 mm, para conseguir reduzir os ruídos gerados pelos mecanismos de impacto e uma porcentagem de vazios elevada para assegurar uma drenagem da água do revestimento e redução dos níveis de ruído gerados pelos mecanismos aerodinâmicos, mas que não comprometa a resistência mecânica da mistura.

## CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados para confecção dos corpos de prova e das placas de concreto asfáltico e o método aplicado na pesquisa. O método da pesquisa fundamenta-se na realização de uma série de ensaios laboratoriais para avaliar o desempenho das misturas em relação à permeabilidade, absorção acústica e durabilidade para alcançar os objetivos propostos. A Figura 3.1 apresenta a organização do método da pesquisa.

Figura 3.1 - Método da pesquisa



Fonte: Autora (2016)

- **1º Etapa: Caracterização dos materiais e seleção das granulometrias.**

A primeira etapa consistiu na caracterização dos materiais para a confecção dos corpos de prova e das placas no laboratório e definição das curvas granulométricas a serem utilizadas nas misturas asfálticas, a partir das experiências na utilização de misturas com alta permeabilidade, redução dos níveis de ruído e que apresentem elevada resistência mecânica. No total foram escolhidas três curvas granulométricas representativas.

- **2º Etapa: Dosagem da mistura asfáltica**

Nesta etapa foi definido o teor ótimo de ligante em função da porcentagem de vazios, volume de vazios comunicantes e do ensaio mecânico de desgaste cântabro dos corpos de prova moldados no CGS. Também foi realizado nesta etapa o ensaio de Lottman para avaliar o dano por umidade induzida no teor de projeto das misturas.

- **3º Etapa: Determinação da permeabilidade**

Na terceira etapa foi determinada a permeabilidade sobre placas moldadas na mesa compactadora LCPC utilizando o permeâmetro LCS.

- **4º Etapa: Avaliação das propriedades mecânicas**

Esta etapa consistiu na realização dos ensaios de módulo de resiliência sobre corpos de prova moldados no CGS e de resistência à deformação permanente nas placas moldadas para todas as misturas estudadas.

- **5º Etapa: Absorção sonora**

O ensaio de absorção sonora foi realizado para todos os corpos de prova moldados no CGS com diferentes espessuras para cada mistura utilizando um tubo de impedância de 100 mm de diâmetro.

- **6º Etapa: Análise dos resultados obtidos**

Nesta última etapa foram analisados todos os resultados dos ensaios realizados nas etapas descritas anteriormente e determinou-se qual das misturas avaliadas apresentou melhor desempenho.

### 3.1 1º ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E SELEÇÃO DAS GRANULOMETRIAS

#### 3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados para o desenvolvimento da etapa experimental do trabalho foram pedrisco e pó de pedra de origem

granítica. Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização dos granulares:

a) Ensaio de abrasão Los Angeles

Este ensaio foi realizado para medir a resistência à abrasão dos agregados seguindo o método da norma DNER-ME 035/98.

b) Ensaio de durabilidade

O ensaio foi conduzido conforme o procedimento descrito na norma DNER-ME 089/94.

c) Ensaio absorção

A absorção do agregado graúdo é definida como a relação entre a massa de água absorvida pelo mesmo após 24 horas de imersão a temperatura ambiente e a massa inicial de material seco. A norma DNER-ME 081/98 descreve os procedimentos utilizados para a obtenção da absorção.

d) Índice de forma

A forma das partículas do agregado foi caracterizada segundo a norma ABNT NBR 5564/2011. Por meio de um paquímetro foram medidas três dimensões das partículas: comprimento, largura e espessura e, segundo as relações entre estas dimensões, foram classificadas as mesmas como cúbicas ou não cúbicas (alongados, lamelares e alongados-lamelares).

e) Ensaio de Adesividade

As características de adesividade do agregado ao ligante asfáltico foram avaliadas de acordo com o método descrito na norma DNER-ME 078/94. Neste ensaio foram testadas quatro amostras: a amostra 1 sem acréscimo de melhorador de adesividade e as outras três amostras com acréscimo de 0,3 %, 0,6 % e 0,9 % de melhorador de adesividade Hycling Alfa-Dop.

### 3.1.2 Ligantes

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado o ligante FLEXPAVE 60/85-E modificado por polímero elastômero SBS fornecido pela GRECA Asfaltos S.A. Este ligante foi selecionado visando proporcionar uma durabilidade adequada, com a formação de uma película betuminosa mais espessa mantendo a mistura mais coesa melhorando a adesividade, com maior resistência à desagregação, garantir suficiente resistência à deformação permanente, minimizar danos provocados pela umidade e evitar escorrimento sem a adição de fibras. A utilização de ligantes modificados por polímeros ou asfalto borracha nas misturas abertas pode reduzir a permeabilidade das mesmas, mas aumenta a absorção acústica (LU et al., 2009). Os ensaios realizados de caracterização do ligante foram:

#### a) Ensaio de Penetração

O ensaio foi conduzido segundo a norma DNIT 155/2010-ME e três medidas individuais de penetração foram obtidas para cada amostra e anotado a média desses três valores.

#### b) Ponto de Amolecimento

O procedimento para a determinação do ponto de amolecimento do ligante é baseado na norma DNIT 131/2010-ME.

#### c) Ensaio de recuperação elástica

O valor da recuperação elástica do ligante foi obtido segundo o procedimento descrito na norma ABNT NBR 15086:2006.

#### d) Viscosidade

Para a obtenção do gráfico de temperatura-viscosidade do ligante foi utilizado o viscosímetro Brookfield e seguido o procedimento descrito na norma ABNT NBR 15184:2004.

### 3.1.3 Seleção das granulometrias

As granulometrias selecionadas para confecção das misturas de estudo foram o resultado da revisão de trabalhos e estudos desenvolvidos visando-se obter misturas que reduzam o ruído, aumentem a permeabilidade e apresentem durabilidade. Para atingir estes objetivos as granulometrias selecionadas apresentaram as seguintes características:

- Granulometrias com gradações abertas para fornecer alta permeabilidade e absorção acústica combinado com tamanhos pequenos de agregado para aumentar a durabilidade da mistura.
- O diâmetro máximo das granulometrias selecionadas foi de 9,5 mm visando reduzir o ruído provocado pelo mecanismo de impactos e choques e a desagregação da mistura.
- Porcentagens de vazios das misturas entre 18 a 25%.
- Granulometrias com conteúdo de finos suficientes para minimizar o escorrimento e melhorar o desempenho Cântabro e compactação das misturas.

No total foram selecionadas três granulometrias que atendiam os critérios descritos para o desenvolvimento do trabalho. As granulometrias selecionadas nesta pesquisa foram as seguintes:

**G1:** Dentre as granulometrias de Meurer Filho (2001) e outras testadas por Guimarães (2012), esta é a que apresentou menor desagregação e boa permeabilidade.

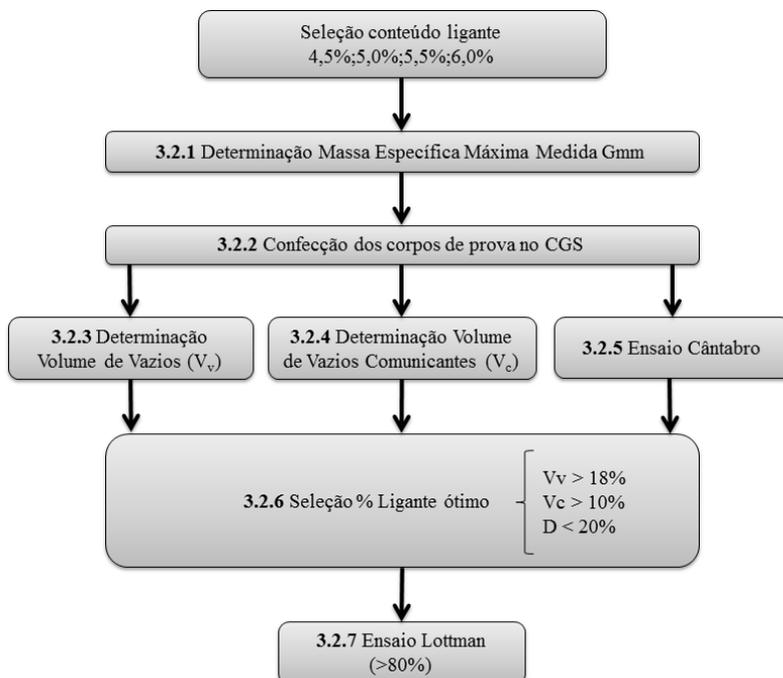
**G2:** Baseada nas misturas descontínuas utilizadas na Espanha e Argentina que ajudam a reduzir o ruído e têm boas resistências à desagregação.

**G3:** Granulometria selecionada em base ao trabalho de LU et al. (2009) da Universidade de California (Estados Unidos) e recomendada para ser testada no campo devido a seu desempenho promissor. A mesma foi modificada para este estudo com a adição de uma maior porcentagem de agregado retido na peneira de 4,75 mm (agregado mais grosso) com o objetivo de aumentar a permeabilidade, a resistência à desagregação e a resistência à umidade induzida.

### 3.2 2ª ETAPA: DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA

Para a dosagem da mistura asfáltica foram propostos quatro percentagens de ligante em função de trabalhos e experiências anteriores com misturas abertas as quais têm os valores de 4,5 %, 5,0 %, 5,5 % e 6,0 %. Os ensaios realizados nesta etapa têm por finalidade definir o teor ótimo de ligante das misturas, verificando-se a percentagem de volume de vazios, o volume de vazios comunicantes e o desgaste por abrasão Cântabro. Uma vez obtido o teor ótimo, realizou-se o ensaio de dano por umidade induzida (Ensaio Lottman). As etapas da dosagem para cada mistura são representadas na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Etapas da dosagem das misturas



Fonte: Autora (2016)

Primeiramente, foi determinada a densidade máxima Rice das misturas. Os corpos de prova foram moldados com o Compactador Giratório Superpave para um número de giros de projeto de 50. Foram

confeccionados três corpos de prova para cada percentagem de ligante. As dimensões dos corpos de prova moldados foram de 100 mm de diâmetro e uma altura de 63 mm, aproximadamente.

Realizaram-se as determinações do volume de vazios e volume de vazios comunicantes e o ensaio de desgaste Cântabro. A partir deles, determinou-se para qual percentagem de ligante são atingidas as exigências estabelecidas. Por último, foi realizado o ensaio Lottman de dano por umidade induzida.

O Quadro 3.1 representa a quantidade de amostras preparadas em cada etapa da dosagem da mistura. Para cada percentagem de ligante e para cada granulometria foram preparadas: duas amostras de mistura solta para a determinação da massa específica máxima medida  $G_{mm}$ , três corpos de prova moldados no CGS para a determinação do volume de vazios, volume de vazios comunicantes e o Ensaio Cântabro e seis corpos de prova para o Ensaio Lottman de umidade induzida com a percentagem ótima escolhida de ligante. Destaca-se que os corpos de prova preparados para o ensaio Cântabro também foram utilizados para determinar a percentagem de volume de vazios e o volume de vazios comunicantes das misturas.

Quadro 3.1 - Total de amostras ensaiadas na etapa de dosagem das misturas

| ENSAIOS                      | Quantidade Amostras |     |     |     |           |     |     |     |          |     |     |     |
|------------------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|
|                              | G1                  |     |     |     | G2        |     |     |     | G3       |     |     |     |
|                              | % Ligante           |     |     |     | % Ligante |     |     |     | %Ligante |     |     |     |
|                              | 4,5                 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 4,5       | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 4,5      | 5,0 | 5,5 | 6,0 |
| Rice (Amostra Mistura Solta) | 2                   | 2   | 2   | 2   | 2         | 2   | 2   | 2   | 2        | 2   | 2   | 2   |
| Volume de Vazios (cp CGS)    |                     |     |     |     |           |     |     |     |          |     |     |     |
| Vazios Comunicantes          | 3                   | 3   | 3   | 3   | 3         | 3   | 3   | 3   | 3        | 3   | 3   | 3   |
| Ensaio Cântabro              |                     |     |     |     |           |     |     |     |          |     |     |     |
| Ensaio Lottman (cp CGS)      | 6                   |     |     |     | 6         |     |     |     | 6        |     |     |     |

Fonte: Autora (2016)

### 3.2.1 Massa específica máxima medida $G_{mm}$

Para a determinação da massa específica máxima medida  $G_{mm}$ , foram preparadas, para cada granulometria e para cada percentagem de ligante, duas amostras de mistura solta. O procedimento foi realizado seguindo-se a norma AASHTO T 209 – *Standard method of test for theoretical maximum specific gravity and density of Hot-Mix Asphalt (HMA)* ou método Rice.

### 3.2.2 Moldagem dos corpos de prova no CGS

Na presente pesquisa os corpos de prova testados foram confeccionados no Compactador Giratório Superpave (Figura 3.3) com os seguintes parâmetros de compactação: 50 giros, pressão vertical de 600 kPa, ângulo de giro de  $1,25^{\circ} \pm 0,02^{\circ}$  e velocidade de giro de 30 rpm. Antes da utilização do CGS, foi calibrada a altura padrão, o ângulo de giro e a pressão vertical.

Figura 3.3 - Compactador Giratório Superpave



Fonte: Autora (2016)

Os corpos de prova moldados tiveram diâmetro de 100 mm e altura de 63 mm, aproximadamente. O número de giros selecionado para a compactação foi de 50 giros, segundo recomendações da norma ASTM D7064/D7064M-08 para misturas abertas ou drenantes.

No total foram confeccionados 36 corpos de prova nesta etapa: quatro teores de ligante (4,5; 5,0; 5,5; 6,0%), três granulometrias (G1, G2 e G3) e três corpos de prova para cada teor de ligante.

### 3.2.3 Determinação da porcentagem de volume de vazios

Uma vez realizada a compactação, foi feita a pesagem dos corpos de prova (a seco, com fita, com parafina e submerso) para determinação da porcentagem de volume de vazios das misturas. A massa específica aparente das misturas foi determinada seguindo o método de ensaio DNER-ME 117/94 com a utilização de parafina e fita adesiva por serem misturas porosas.

A porcentagem de volume de vazios de cada corpo de prova foi calculada a partir da massa específica máxima medida  $G_{mm}$  e a densidade aparente  $G_{mb}$ , utilizando a equação 3.1.

$$V_V = \left( \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

onde:

$V_V$  = porcentagem de volume de vazios do corpo de prova (%);

$G_{mm}$  = massa específica máxima medida da mistura;

$G_{mb}$  = densidade aparente do corpo de prova.

A porcentagem de volume de vazios não é por si só uma propriedade de desempenho. No entanto, uma porcentagem de vazios mais elevada normalmente resulta em maior permeabilidade, particularmente se a interligação desses vazios aumenta na medida em que aumenta a porcentagem de vazios. Entretanto, porcentagens de vazios mais elevadas estão geralmente associadas com menor durabilidade da mistura.

### 3.2.4 Determinação do volume de vazios comunicantes

Os vazios comunicantes são os responsáveis diretos pelo fluxo e armazenamento de água no interior da mistura asfáltica drenante. A obtenção do volume de vazios comunicantes consiste em medir a quantidade de água que penetra no interior do corpo de prova pela face superior enquanto as faces lateral e inferior são impermeabilizadas por fita adesiva e parafina, mantendo-se em sua face superior uma película constante de água durante dez minutos (AFNOR NF P-98-254-2, 1993).

A porcentagem de vazios comunicantes é obtida mediante a Equação 3.2.

$$V_c = \left( \frac{P_{ab}}{A_f \times h_{redu}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

onde:

$V_c$  = volume de vazios comunicantes (%);

$P_{ab}$  = peso de água absorvida (g);

$A_f$  = área da face (cm<sup>2</sup>);

$h_{redu}$  = altura reduzida (cm).

A altura reduzida é calculada pela seguinte equação:

$$h_{redu} = h_m - \left( \frac{d_{m\acute{a}x}}{20} \right) \quad (3.3)$$

onde:

$h_m$  = altura média do corpo de prova, em cm;

$d_{m\acute{a}x}$  = diâmetro máximo do agregado, em cm.

### 3.2.5 Ensaio Cântabro

O principal modo de falha das misturas porosas é a desagregação, que pode ser acelerada pela travagem do veículo, a aceleração, viragem bem como a temperatura quente (LU et al., 2009).

O ensaio Cântabro teve como finalidade avaliar a perda por desgaste dos corpos de prova e foi conduzido de acordo com a especificação brasileira DNER-ME 383/99. O ensaio consistiu em colocar cada corpo de prova compactado no CGS dentro do aparelho de abrasão Los Angeles sem as esferas de aço e determinar a porcentagem de perda de peso após 300 revoluções do tambor a uma temperatura de 25°C e de 30 a 33 rpm. Foram testados três corpos de prova para cada teor de ligante e para cada granulometria.

O desgaste dos corpos de prova foi calculado pela equação 3.4.

$$D = \left( \frac{P_{in} - P_f}{P_{in}} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

onde:

$D$  = desgaste da mistura com aproximação de 1%;

$P_{in}$  = peso do corpo de prova antes do ensaio;

$P_f$  = peso do corpo de prova após o ensaio.

O desgaste para cada teor de ligante deve ser a média aritmética de três ensaios. Para que os valores quanto à desagregação das misturas sejam aceitáveis, as porcentagens terão que ser inferiores a 20% segundo limites máximos impostos nas especificações aplicadas nos Estados Unidos (ASTM D7064/D7064M-08).

No Brasil, a porcentagem máxima para o desgaste dos corpos de prova no ensaio Cântabro é de 25% segundo a especificação de serviço DNER-ES 386/99 para camada porosa de atrito.

A desagregação aumenta a rugosidade da superfície da rodovia e também aumenta o ruído pneu/pavimento, particularmente em frequências mais baixas de ruído por causa da vibração dos pneus.

### **3.2.6 Definição do teor ótimo de ligante**

Após a realização dos ensaios descritos, determinou-se o teor de ligante para que cada mistura atingisse as especificações de projeto propostas. Estas especificações estão referidas à porcentagem de volume de vazios, aos vazios comunicantes e ao desgaste por abrasão da mistura e são as seguintes:

- A porcentagem de volume de vazios da mistura deve ser maior ou igual a 18%;
- O volume de vazios comunicantes deve ser maior que 10%;
- A porcentagem de perda por desagregação da mistura determinada pelo ensaio Cântabro deve ser menor que 20%.

Segundo Tsai et al. (2012), as misturas abertas ou drenantes são concebidas para que tenham grandes porcentagens de vazios na mistura compactada, sem sacrifício significativo em termos de durabilidade da sua vida útil. Sua estrutura aberta ajuda a drenar água e preservar o atrito superficial, reduzindo acidentes por derrapagem e hidroplanagem, aumentando assim a segurança ao tráfego com pista molhada. A partir desta perspectiva, não é necessário especificar um limite superior de porcentagem de vazios se a mistura compactada satisfizer as especificações de desempenho para permeabilidade, desgaste, dano por umidade induzida e deformação permanente.

A porcentagem de vazios recomendada na especificação DNER-ES 386/99 para camada porosa de atrito no Brasil é de 18 a 25%.

É recomendável adotar uma porcentagem de perda máxima no Ensaio Cântabro para o projeto da mistura na ordem de 20 a 30% (TSAI

et al., 2012). O limite máximo adotado neste trabalho para a porcentagem de desgaste das misturas no ensaio Cântabro foi de 20%, seguindo-se o especificado na norma ASTM D7064/D7064M-08.

### **3.2.7 Ensaio de dano por umidade induzida**

O dano por umidade induzida foi determinado segundo a norma AASHTO T 283 com algumas modificações, tal como especificado na norma ASTM D7064/D7064M-08:

- As amostras foram compactadas com 50 giros no CGS;
- Um vácuo de 660 mmHg (87.8 kPa) foi aplicado durante 10 minutos;
- As amostras foram mantidas submersas em água durante o ciclo de congelamento e descongelamento para manter a saturação.

Seis corpos de prova para cada mistura com o teor de projeto determinado e com um diâmetro de 100 mm e altura de 63 mm foram moldados e divididos em dois grupos de três. Um subgrupo foi considerado de controle e o outro, foi condicionado sendo submetido primeiramente a uma saturação a vácuo de 87.8 kPa durante 10 minutos, e em seguida, submerso em água durante o ciclo de congelamento a -18°C durante 16 horas, seguida ainda de um ciclo de degelo de 24 horas a 60°C. Durante os ciclos de congelamento e degelo os corpos de prova foram mantidos submersos em água. Em vez de cinco ciclos de congelamento/degelo tal como especifica a norma ASTM D 7064, apenas foi aplicado um ciclo. Em um estudo realizado por Watson et al., não foi encontrada diferença significativa na resistência à tração quando são utilizados um, três ou cinco ciclos de congelamento/degelo no ensaio de umidade induzida para misturas asfálticas abertas ou porosas, e sugere-se apenas necessário um ciclo de congelamento/degelo (ALVAREZ et al., 2006).

Todos os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral para a determinação da resistência à tração estática indireta (RT) na temperatura de 25°C. A sensibilidade à água foi avaliada pela relação entre a resistência à tração média do grupo condicionado e a resistência à tração média do grupo de controle.

A resistência à tração retida por umidade induzida das misturas é definida pela equação (3.5).

$$RRT = \frac{RT_u}{RT} \times 100 \quad (3.5)$$

onde:

RRT = resistência à tração retida por umidade induzida (%);

$RT_u$  = resistência à tração média dos corpos de prova condicionados;

RT = resistência à tração média dos corpos de prova não condicionados.

A relação mínima admissível para RRT é de 80%, segundo a norma ASTM D7064/D7064M-08 para misturas porosas.

A resistência à tração por compressão diametral a 25°C deve ser maior a 0,55 MPa, segundo a especificação de serviço DNER-ES 386/99 para camada porosa de atrito.

### 3.3 3º ETAPA: DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE

Para a determinação da permeabilidade das misturas, foram moldadas seis placas de dimensões de 18 cm de largura, 50 cm de comprimento e 5 cm de espessura, utilizando-se a mesa compactadora de placas LCPC desenvolvida pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*. A compactação das placas foi conduzida segundo as recomendações da norma francesa AFNOR NF P 98-250-2 *Essais Relatifs Aux Chaussées, Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaque*. Na Figura 3.4 está representada a mesa compactadora LCPC.

Figura 3.4 - Compactador de placas LCPC



Fonte: Autora (2016)

A energia de compactação especificada pela norma francesa AFNOR NF P-98-250-2 para misturas asfálticas de superfície ou revestimento é a forte, sendo esta energia utilizada no processo de compactação das misturas.

Após a moldagem, determinou-se o volume de vazios das placas de acordo com o procedimento descrito na norma DNER-ME 117/94 (com a utilização de parafina e fita adesiva por serem misturas porosas). Também foi determinado o volume de vazios comunicantes de cada placa seguindo o método da norma francesa AFNOR-NF-P-98-254-2, 1993. Estes procedimentos foram os mesmos que os adotados para a determinação da porcentagem do volume de vazios e vazios comunicantes nos corpos de prova cilíndricos moldados no compactador giratório.

A permeabilidade das placas compactadas foi determinada com o permeâmetro LCS segundo a norma espanhola NLT-327/2000 (Figura 3.5). A norma prevê a execução do ensaio *in situ* para verificação da permeabilidade, mas o ensaio pode ser executado também em laboratório em placas moldadas. Os ensaios de permeabilidade realizados em placas representam uma simulação mais realista da permeabilidade do campo, ao invés de se realizar o ensaio em corpos de prova de 100 ou 150 mm de diâmetro (LU et al., 2009).

Figura 3.5 - Permeâmetro LCS utilizado no ensaio



Fonte: Autora (2016)

Neste ensaio foi medido o tempo necessário para a percolação de uma coluna de água na camada de mistura asfáltica. O procedimento do ensaio foi o seguinte: posicionou-se o permeâmetro no ponto de leitura selecionado e colocou-se o anel externo de aço para pressionar a borracha vedadora na saída do tubo de acrílico. Logo após, encheu-se o tubo transparente do permeâmetro com água até 15 cm acima da marca superior e tirou-se a tampa vedante para deixar escoar a água para saturar a região em análise. Colocou-se a tampa vedante e voltou-se a encher o tubo transparente até a marca superior. A tampa vedante foi retirada ao mesmo instante em que foi acionado um cronômetro e mediu-se o tempo que demorou para escoar a água entre a marca superior e a marca inferior do tubo.

A permeabilidade das misturas foi determinada em função do tempo de escoamento do volume de água conhecido segundo a equação (3.6).

$$\text{LnK} = 7,624 - 1,348\text{LnT} \quad (3.6)$$

onde:

K = coeficiente de permeabilidade, em  $\text{cm/s} \cdot 10^{-2}$ ;

T = tempo de escoamento da água no permeâmetro LCS, em s.

Quanto maior a permeabilidade da mistura, maior será a capacidade do revestimento em drenar água para fora da rodovia, reduzindo a espessura da película de água melhorando assim a segurança. Uma permeabilidade superior da mistura também está associada com a redução do mecanismo de bombeamento do ar e com uma maior absorção acústica, o que pode reduzir o ruído resultante da interação pneu/pavimento (LU et al., 2009).

O NCAT (*National Center of Asphalt Technology*) tem sugerido um valor mínimo de permeabilidade de 100 m/dia (0,12 cm/s) para a nova geração de misturas abertas (*open graded friction course*) que tem como objetivo principal remover a água da superfície do revestimento (ALVAREZ et al., 2006).

## 3.4 4ª ETAPA: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

### 3.4.1 Módulo de resiliência

Para o ensaio de módulo de resiliência foram moldados três corpos de prova para cada mistura no CGS com um número de giros de projeto de 50, pressão vertical de 600 kPa e ângulo de rotação de 1,25° e com 30 rpm.

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado segundo a norma DNIT 135/2010-ME. A tensão aplicada no ensaio foi de 15% da resistência à tração por compressão diametral determinada na etapa de dosagem da mistura para o ensaio Lottman.

### 3.4.2 Deformação permanente

A avaliação do desempenho quanto à deformação permanente seguiu a especificação francesa NF P 98-253-1 - *Essais Relatifs Aux Chaussées, Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés*. Este ensaio tem como objetivo determinar o desempenho das misturas quanto à resistência à deformação permanente.

O equipamento *Orniéreur* (Figura 3.6) utilizado para o ensaio permite avaliar duas placas simultaneamente de dimensões de 50 cm de comprimento, 18 cm de largura e 5 cm de espessura.

Figura 3.6 - Equipamento *Orniéreur* para avaliação da deformação permanente (simulador de tráfego)



Fonte: Autora (2016)

Após o período de 15 dias de cura, as placas foram colocadas no simulador do tráfego 12 horas antes do início dos ciclos a uma temperatura de 60°C. Um sensor térmico colocado no interior de uma das placas ensaiadas (Figura 3.7) monitorava esta temperatura. Para a realização do ensaio, as placas foram submetidas ao carregamento cíclico de um eixo simples de roda simples com uma pressão dos pneus de 0,6 MPa, carga vertical de 5KN e frequência de 1 Hz.

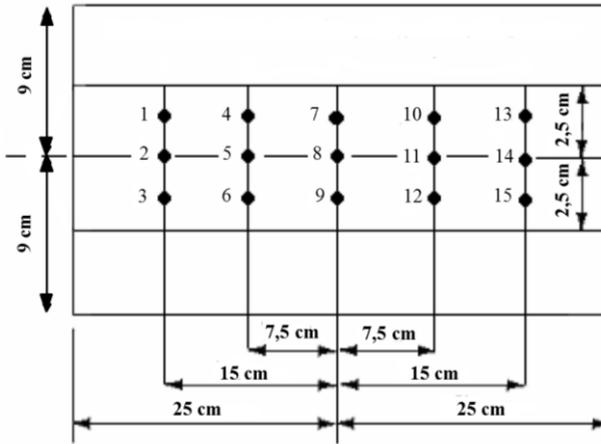
Figura 3.7 - Ensaio deformação permanente



Fonte: Autora (2016)

Durante o ensaio foram realizadas medições do afundamento na trilha de roda em 15 pontos distribuídos na superfície da placa a cada número de ciclos pré-definidos (Figura 3.8). Para este trabalho, mediu-se a deformação a 100, 300, 1000, 3000, 10000 e 30000 ciclos (cada ciclo corresponde a uma ida e volta).

Figura 3.8 - Representação dos 15 pontos de leitura da trilha de roda na placa



Fonte: Adaptado da norma NF P 98-253-1

A porcentagem média de afundamento em cada placa e em cada ciclo definido foi calculada pela relação entre a média das profundidades medidas nos 15 pontos sobre a superfície da placa em relação ao ciclo zero e a espessura da placa, através da equação 3.7.

$$P_i \% = 100 \times \frac{\sum j(m_{ij} - m_{0j})}{15 \times E} \quad (3.7)$$

onde:

$P_i$  = porcentagem média de afundamento da trilha de roda na superfície da placa no ciclo  $i$ ;

$j$  = ponto de leitura do afundamento da trilha de roda na placa, que varia de 1 a 15;

$m_{ij}$  = medida da profundidade no ciclo  $i$  do ponto  $j$ , em mm;

$m_{0j}$  = medida da profundidade inicial no ciclo 0 do ponto  $j$ , em mm;

$E$  = espessura da placa, em mm.

Após a realização do ensaio, plotou-se a curva da evolução da porcentagem do afundamento na trilha de roda versus o número de ciclos, em escala logarítmica.

Segundo as especificações francesas, para que os valores de deformação permanente das misturas sejam aceitáveis, a porcentagem

do afundamento na trilha de roda deveria ser inferior a 10% da espessura da placa após 30000 ciclos.

### 3.5 5° ETAPA: ABSORÇÃO SONORA

Para a realização do ensaio de capacidade de absorção sonora foram moldados no CGS três corpos de prova para cada mistura com três diferentes espessuras, sendo um com 70 mm de altura, outro com 50 mm de altura, e outro com 30 mm. Devido ao fato que a altura mínima de compactação de corpos de prova no CGS é de 5 cm, para a obtenção da espessura de 3 cm foram serrados corpos de prova de 5 cm. O objetivo desta variação da altura dos corpos de prova foi avaliar a influência da sua espessura no coeficiente de absorção sonora destas misturas.

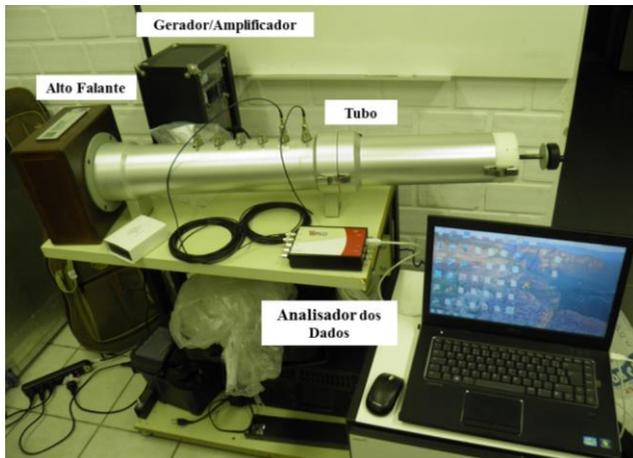
Esta pesquisa utilizou o método do tubo de impedância para determinar as características de absorção sonora das misturas estudadas.

O coeficiente de absorção acústica de um material representa a proporção de energia acústica não refletida pela superfície do material para uma onda de plano de incidência normal (90°). O coeficiente de absorção foi medido em amostras de três espessuras diferentes (3 cm, 5 cm e 7 cm) para cada mistura. O procedimento de ensaio adotado foi o descrito na norma ISO 10534-2:1998, usando um tubo de impedância de 100 mm de diâmetro.

A técnica do ensaio de absorção sonora consistiu em excitar um tubo de impedância com um ruído branco e medir a pressão sonora no seu interior em duas posições pré-determinadas utilizando o método dos dois microfones. Os sinais obtidos são processados por analisador digital de frequências através do qual se determina a curva de absorção sonora em função da frequência. A Figura 3.9 apresenta o equipamento utilizado para a realização dos ensaios de absorção sonora.

Todos os ensaios de absorção sonora foram realizados no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Figura 3.9 - Tubo de impedância para medição do coeficiente de absorção das misturas



Fonte: Autora (2016)

## CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados de todos os ensaios realizados segundo o método descrito no capítulo anterior.

### 4.1 1º ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E SELEÇÃO DAS GRANULOMETRIAS

#### 4.1.1 Agregados

Os resultados dos ensaios de Los Angeles, sanidade, absorção, índice de forma e adesividade realizados para caracterizar os agregados estão apresentados no Quadro 4.1, juntamente com a denominação de suas respectivas normas.

Quadro 4.1 - Resultados da caracterização dos agregados

| Ensaio                     | Norma              | Resultado |
|----------------------------|--------------------|-----------|
| Los Angeles (%)            | DNER-ME 035/98     | 21,47%    |
| Durabilidade (%)           | DNER-ME 089/94     | 2,80%     |
| Absorção (%)               | DNER-ME 081/98     | 0,47%     |
| Partículas não cúbicas (%) | ABNT NBR 5564/2011 | 9,0 %     |
| Adesividade                | DNER-ME 078/94     | 0,30%     |

Os agregados atenderam a especificação DNER-ES 386/99 que limita o valor da abrasão em 30% e o valor de perda de massa no ensaio de sanidade em 12%. Os valores de absorção dos agregados foram pequenos, indicando pouca porosidade do mesmo. Segundo as especificações Superpave, a porcentagem máxima de partículas não cúbicas admissível é de 10%, atendendo este limite o agregado utilizado na pesquisa.

Em relação ao ensaio de adesividade, a amostra sem melhorador apresentou pequeno deslocamento de ligante e as amostras com 0,3%, 0,6% e 0,9% de dope não apresentaram nenhum deslocamento. Foi adotado para as misturas o acréscimo de 0,3% de dope.

## 4.1.2 Ligante

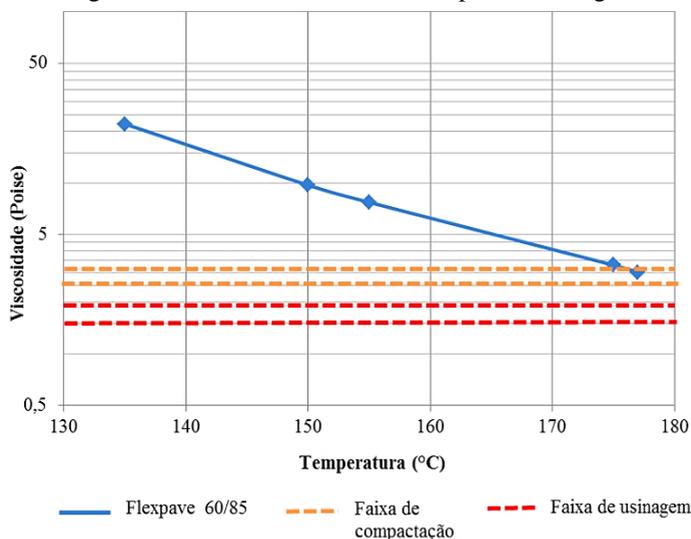
Os resultados dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e recuperação elástica do ligante FLEXPAVE 60/85-E são apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Caracterização do ligante Flexpave 60/85-E

| Ensaio                     | Norma               | Resultados |
|----------------------------|---------------------|------------|
| Penetração (0,1 mm)        | DNIT 155/2010-ME    | 52,4       |
| Ponto de Amolecimento (°C) | DNIT 131/2010-ME    | 69,5       |
| Recuperação elástica (%)   | ABNT NBR 15086:2006 | 86         |

O resultado do ensaio de viscosidade rotacional Brookfield do ligante Flexpave 60/85-E é mostrado na Figura 4.1. Como pode ser visto a temperatura para a mistura do ligante ultrapassa os 180°C. Por tratar-se de uma temperatura muito alta, resolveu-se então adotar para a realização das misturas a temperatura recomendada pelo fornecedor.

Figura 4.1 - Curva viscosidade vs. temperatura do ligante



A Greca Asfaltos S.A. recomenda para o ligante Flexpave 60/85-E temperaturas de misturas de 160°C a 165°C e uma temperatura mínima de compactação de 145°C. Adotou-se então neste trabalho uma

temperatura de 165°C para a realização das misturas e uma temperatura de 155°C para a sua compactação.

### 4.1.3 Seleção das granulometrias

Com base na revisão bibliográfica foram selecionadas três granulometrias (G1, G2 e G3) com desempenhos acústicos, drenantes e mecânicos satisfatórios para o desenvolvimento da pesquisa.

**G1:** Com base nos estudos de Guimarães e apresentada no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Granulometria G1

| Abertura (mm) | % Passante |
|---------------|------------|
| 9,52          | 100        |
| 6,3           | 43,07      |
| 4,75          | 12,51      |
| 2,36          | 12,51      |
| 1,18          | 12,51      |
| 0,6           | 12,51      |
| 0,3           | 12,51      |
| 0,15          | 7,14       |
| 0,075         | 4,08       |

**G2:** Escolhida segundo as misturas descontínuas utilizadas na Espanha e Argentina (Quadro 4.4).

Quadro 4.4 - Granulometria G2

| Abertura (mm) | % Passante |
|---------------|------------|
| 9,52          | 100        |
| 6,3           | 70         |
| 4,75          | 20         |
| 2,36          | 20         |
| 0,6           | 13         |
| 0,075         | 6          |

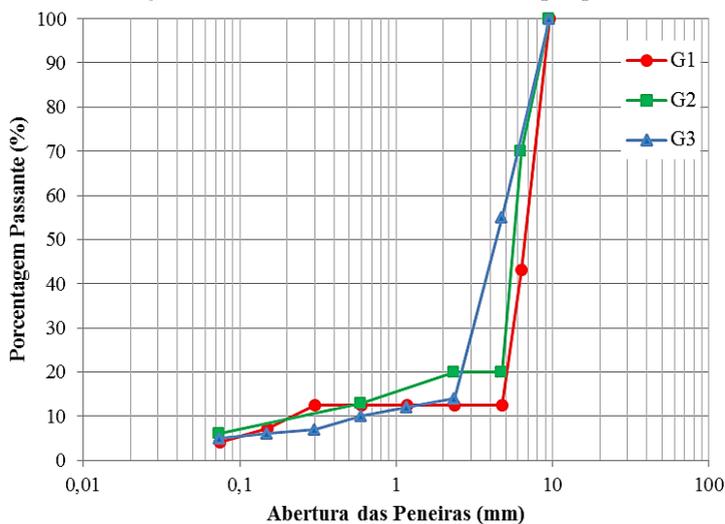
**G3:** Com base em estudos desenvolvidos nos Estados Unidos por LU et al., 2009 (Quadro 4.5) modificando-se a quantidade de material passante na peneira de 4,75 mm para aumentar a permeabilidade.

Quadro 4.5 - Granulometria G3

| Abertura (mm) | % Passante |
|---------------|------------|
| 9,52          | 100        |
| 4,75          | 55         |
| 2,36          | 14         |
| 1,18          | 12         |
| 0,6           | 10         |
| 0,3           | 7          |
| 0,15          | 6          |
| 0,075         | 5          |

Na Figura 4.2 estão representadas as três granulometrias selecionadas para realizar as misturas e ensaios correspondentes. A granulometria G3 tem maior quantidade de material passante pela peneira 4,75 mm.

Figura 4.2- Granulometrias utilizadas na pesquisa



#### 4.2 2ª ETAPA: DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA

Os teores de CAP escolhidos para a execução das misturas foram de 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0% para cada granulometria selecionada (G1, G2 e G3). Para a realização da mistura, os agregados foram aquecidos

previamente a uma temperatura de 175°C e o ligante Flexpave 60/85 à temperatura especificada de 165°C. Foram homogeneizados os agregados graúdos e em seguida adicionado o ligante asfáltico. Na sequência adicionaram-se os agregados miúdos e pulverulentos, permitindo que o ligante envolvesse melhor o agregado mais graúdo.

Primeiramente foram realizadas as misturas para a determinação da densidade máxima teórica de acordo ao método Rice. Em seguida, foram moldados os corpos de prova no CGS para determinar o teor de projeto das misturas.

#### 4.2.1 Massa específica máxima medida $G_{mm}$

Os resultados da  $G_{mm}$  média das duas amostras ensaiadas para cada mistura e porcentagem de ligante são apresentados no Quadro 4.6. A mistura G3 apresentou valores mais baixos de  $G_{mm}$  quando comparada com as misturas G1 e G2.

Quadro 4.6 - Valores médios de  $G_{mm}$  para cada teor de ligante e mistura

| Teor de Ligante (%) | $G_{mm}$ média ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) |       |       |
|---------------------|---|-------|-------|
|                     | G1  | G2    | G3    |
| 4,5                 | 2,457                                     | 2,458 | 2,450 |
| 5,0                 | 2,441                                     | 2,444 | 2,436 |
| 5,5                 | 2,428                                     | 2,423 | 2,411 |
| 6,0                 | 2,417                                     | 2,410 | 2,395 |

#### 4.2.2 Moldagem dos corpos de prova no CGS

Os corpos de prova foram moldados no CGS, fixando-se número de giros de projeto de 50, ângulo de rotação de 1,25°, pressão aplicada de 600 kPa e 30 rpm. Antes da moldagem, a mistura permaneceu em estufa à temperatura de compactação (155°C) por um período de 2 horas de modo a simular o envelhecimento de curto prazo durante a usinagem e aplicação em campo. Após este tempo, a mistura foi colocada no molde de 100 mm de diâmetro e levada ao CGS. Uma vez finalizado os 50 giros, o corpo de prova era extraído do molde e resfriado à temperatura ambiente. A sequência do procedimento de compactação é apresentada na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Procedimento de compactação dos corpos de prova no CGS



A Figura 4.4 apresenta os corpos de prova compactados no CGS para as misturas G1, G2 e G3 e para as porcentagens de ligante de 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%.

Figura 4.4 - Corpos de prova compactados nesta etapa



### 4.2.3 Determinação da porcentagem de volume de vazios

Primeiramente foi determinada a massa específica aparente  $G_{mb}$ , e em seguida, calculado o volume de vazios de cada corpo de prova correspondentes a cada porcentagem de ligante testado (4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%) e cada mistura (G1, G2 e G3). A Figura 4.5 mostra os corpos de prova com fita e parafina para a obtenção da massa específica aparente e a porcentagem do volume de vazios.

Figura 4.5 - Corpos de prova com fita adesiva e parafina



Os resultados da massa específica aparente  $G_{mb}$  em função dos teores de ligante avaliados estão apresentados nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 para as misturas G1, G2 e G3, respectivamente. Na Figura 4.9 estão apresentados os resultados da massa específica aparente média das três misturas para cada teor de ligante.

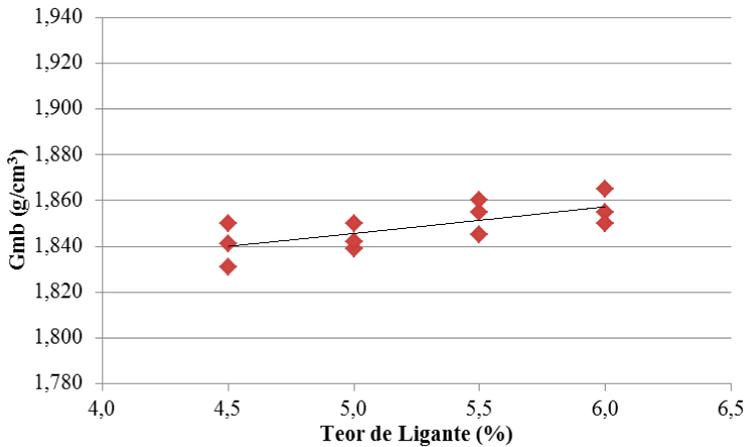
Figura 4.6 - Massa específica máxima aparente ( $G_{mb}$ ) da mistura G1

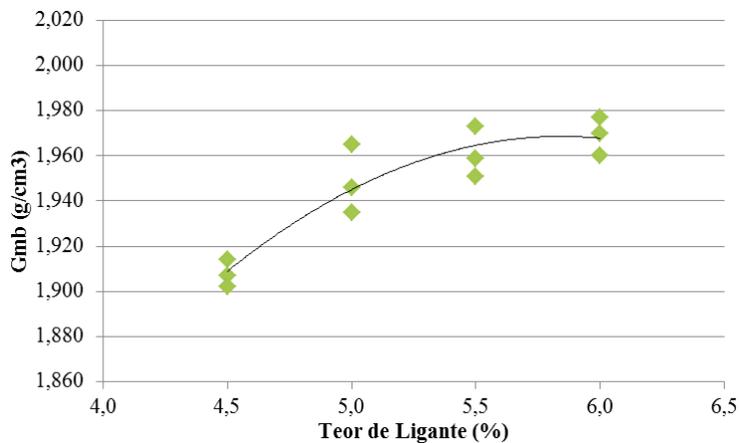
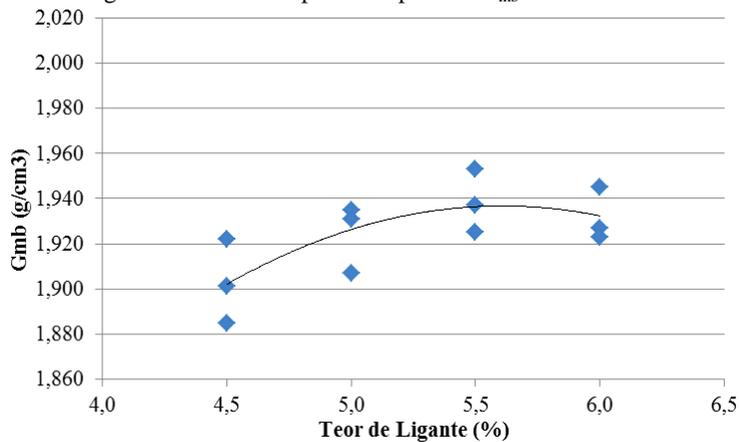
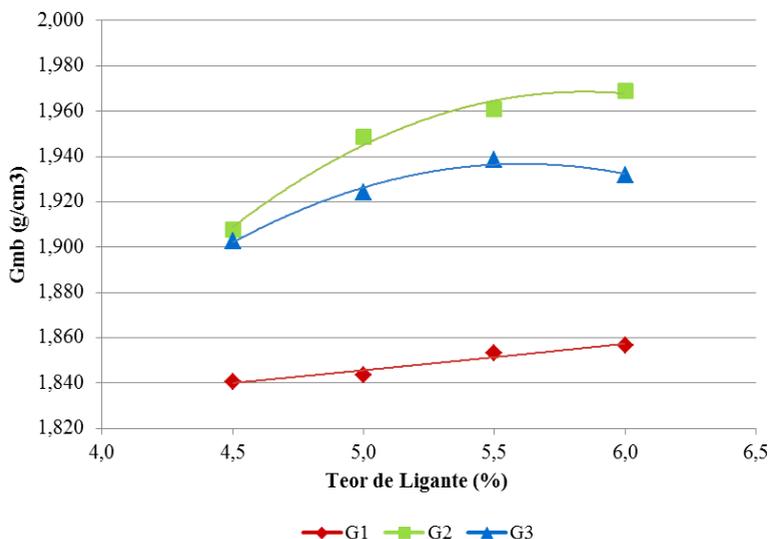
Figura 4.7 - Massa específica aparente  $G_{mb}$  da mistura G2Figura 4.8 - Massa específica aparente  $G_{mb}$  da mistura G3

Figura 4.9 - Massa específica aparente média das três misturas



Nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 estão apresentados os resultados da determinação da porcentagem de volume de vazios para as misturas G1, G2 e G3, respectivamente. Na Figura 4.13 estão apresentados os resultados da porcentagem média do volume de vazios das três misturas para cada teor de ligante. Nas figuras, a linha tracejada representa a porcentagem de volume de vazios mínima estabelecida para as misturas.

Conforme o esperado, as curvas de variação da porcentagem de volume de vazios mostram uma diminuição com o aumento da porcentagem de ligante.

Figura 4.10 - Porcentagem de volume de vazios da mistura G1

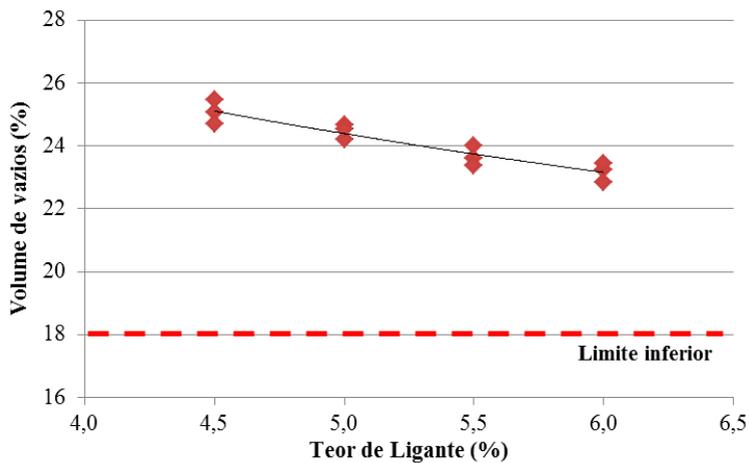


Figura 4.11 - Porcentagem de volume de vazios da mistura G2

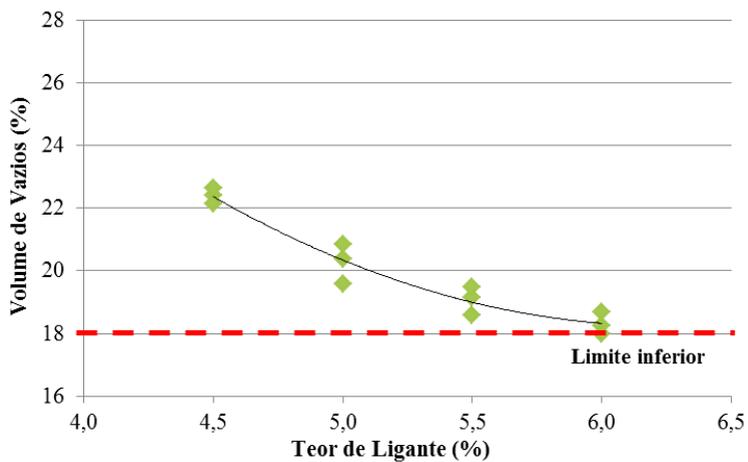


Figura 4.12 - Porcentagem de volume de vazios da mistura G3

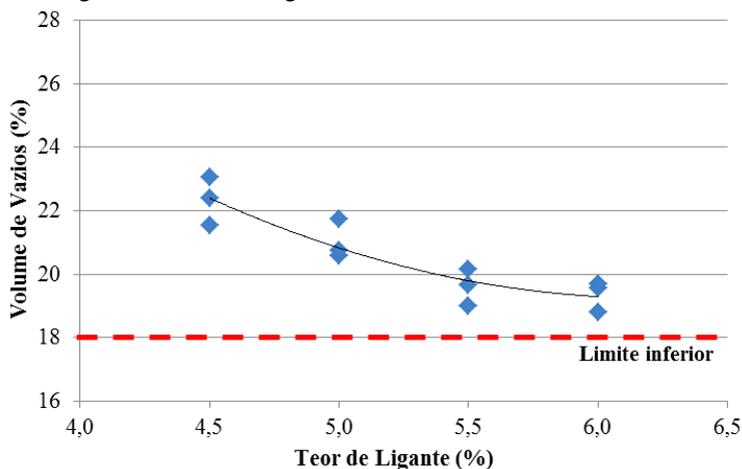
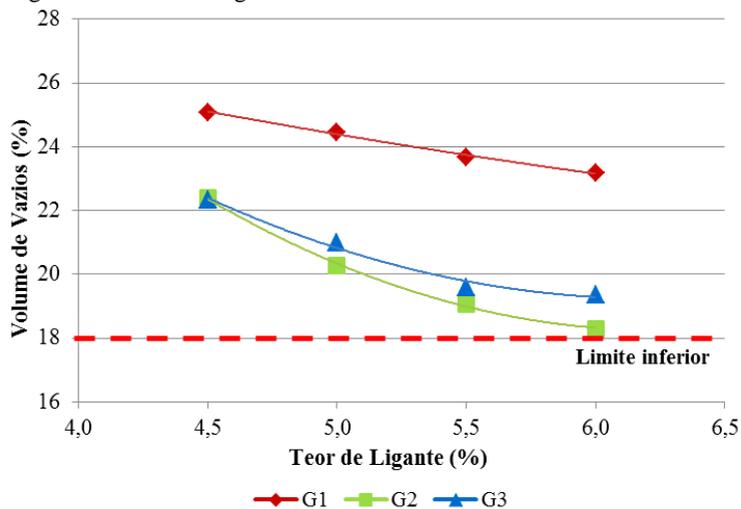


Figura 4.13 - Porcentagem média de volume de vazios das três misturas



Todas as misturas ensaiadas apresentaram uma porcentagem de vazios entre 18 a 26%, variando o valor segundo o teor de ligante e a granulometria utilizada. A mistura G1 mostrou porcentagens de volume de vazios maiores (entre 22 e 26%) que as misturas G2 e G3

(porcentagem de vazios entre 23 e 18 %), enquanto que estas tiveram valores semelhantes entre si.

#### 4.2.4 Volume de vazios comunicantes

A determinação dos vazios comunicantes é de grande importância para a verificação da eficácia da mistura no que diz respeito à permeabilidade, pois mede a porcentagem de vazios dos poros contínuos que contribuem para a percolação da água.

A Figura 4.14 apresenta o procedimento adotado para a determinação da porcentagem de vazios comunicantes dos corpos de prova. Em cada corpo de prova com fita e parafina é deixada limpa a parte superior e colocado um filme de água por um tempo de 10 minutos. O volume de vazios comunicantes é calculado pela variação de peso do corpo de prova de acordo com as Equações 3.2 e 3.3 apresentadas no Capítulo 3.

Figura 4.14 - Procedimento determinação dos vazios comunicantes



As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram as curvas de variação da porcentagem dos vazios comunicantes em função dos teores de ligante para cada mistura (G1, G2 e G3). Na Figura 4.18 estão apresentados os resultados da porcentagem média de vazios comunicantes das três misturas para cada teor de ligante. Assim como aconteceu com o volume de vazios, os vazios comunicantes também decresceram com o aumento do teor de ligante.

Figura 4.15 - Porcentagem de vazios comunicantes da mistura G1

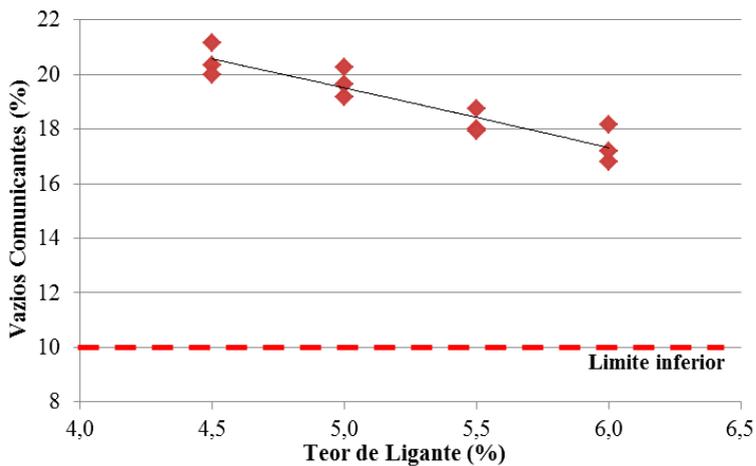


Figura 4.16 - Porcentagem de vazios comunicantes da mistura G2

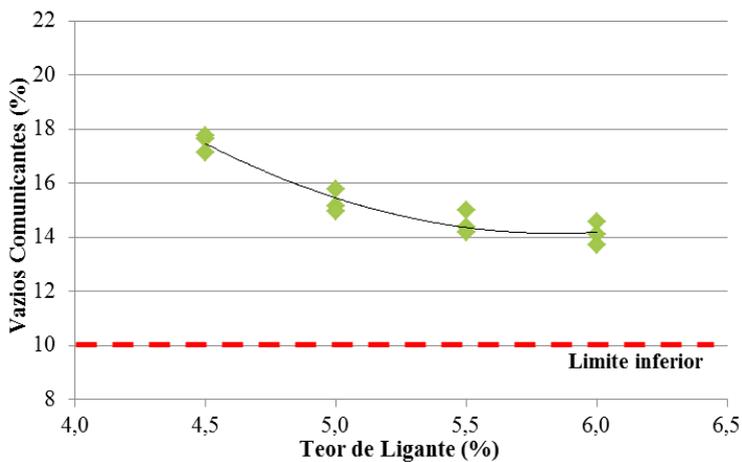


Figura 4.17 - Porcentagem de vazios comunicantes da mistura G3

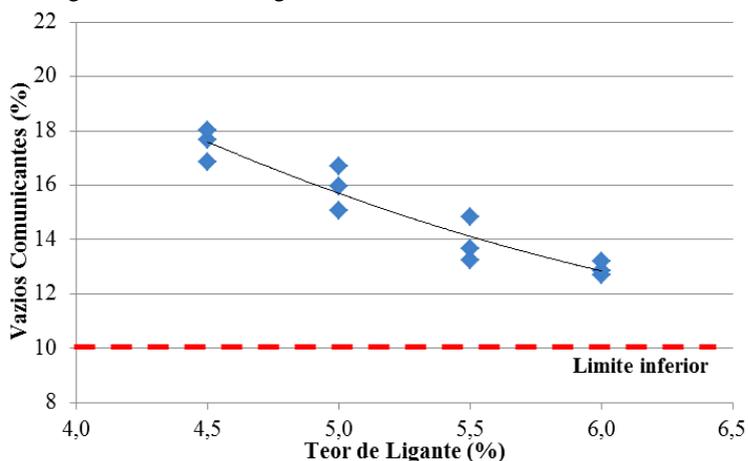
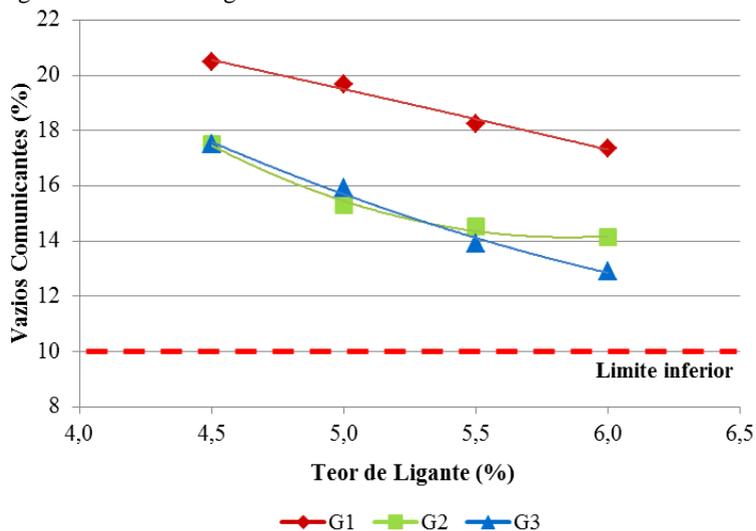


Figura 4.18 - Porcentagem média de vazios comunicantes das três misturas



A mistura G1 mostrou os maiores valores de porcentagem de vazios comunicantes (22 a 16%) para todos os teores de ligante devido à presença de uma descontinuidade bem marcada na sua granulometria, o que gera uma estrutura interna de vazios comunicados. As misturas G2 e

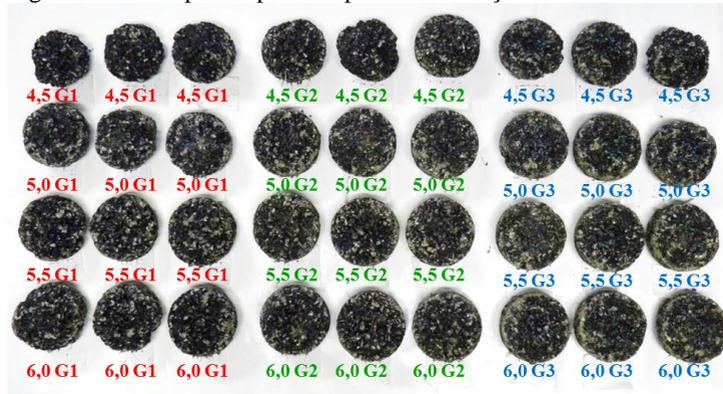
G3 apresentaram porcentagens menores que G1 variando entre 18 e 12% pela menor descontinuidade existente na sua graduação.

#### 4.2.5 Ensaio Cântabro

Um dos principais modos de falha de uma mistura aberta é a desagregação da mesma causada pelo tráfego e altas temperaturas. A avaliação da resistência à desagregação da mistura foi realizada por meio do ensaio Cântabro.

Neste trabalho, a perda porcentual média de três amostras foi definida como a porcentagem de perda de Cântabro para cada mistura. Imagens dos corpos de prova no final dos testes Cântabro são mostradas na Figura 4.19.

Figura 4.19 - Corpos de prova depois da realização do ensaio Cântabro



Os resultados representativos do desgaste para cada porcentagem de ligante e para as misturas G1, G2 e G3 são mostrados nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22, respectivamente. Na Figura 4.23 são apresentados os resultados da porcentagem média de desgaste das três misturas para cada teor de ligante. A linha tracejada representa o limite requerido pela norma ASTM D7064.

Figura 4.20 - Resultados do desgaste para os corpos de prova da mistura G1

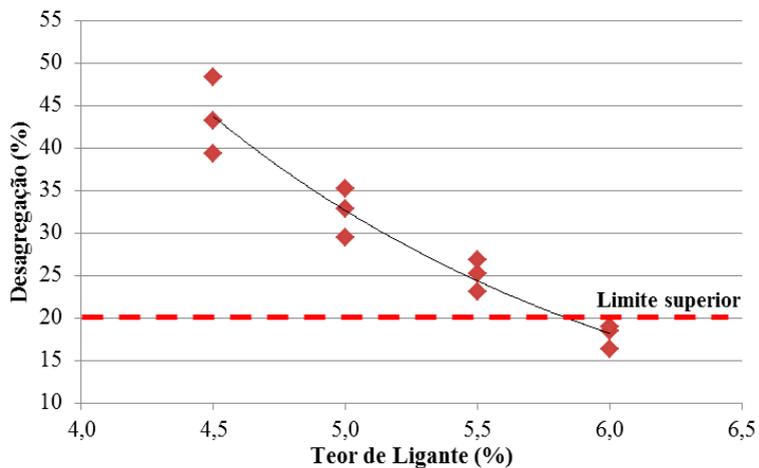


Figura 4.21 - Desagregação dos corpos de prova da mistura G2

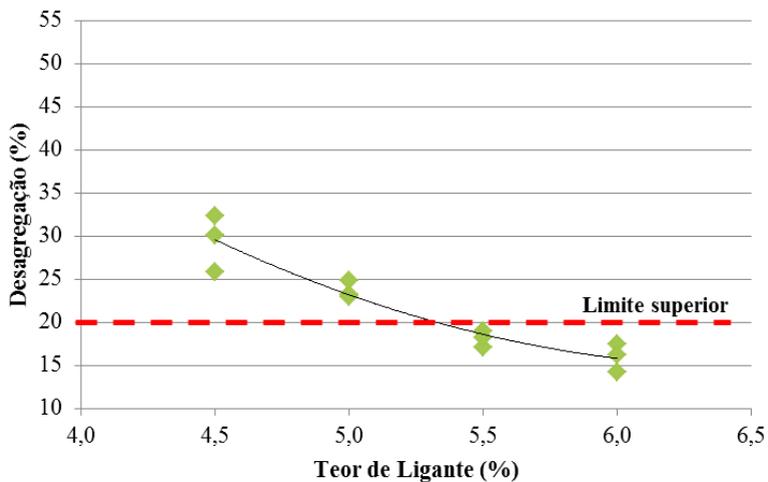


Figura 4.22 - Desagregação dos corpos de prova da mistura G3

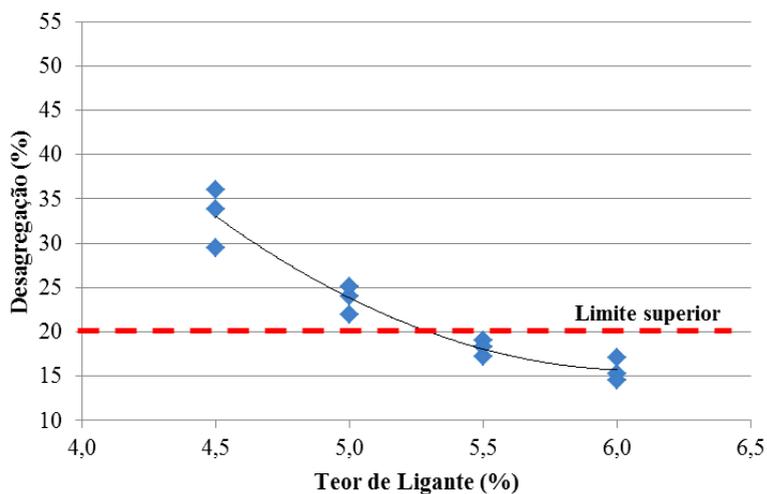
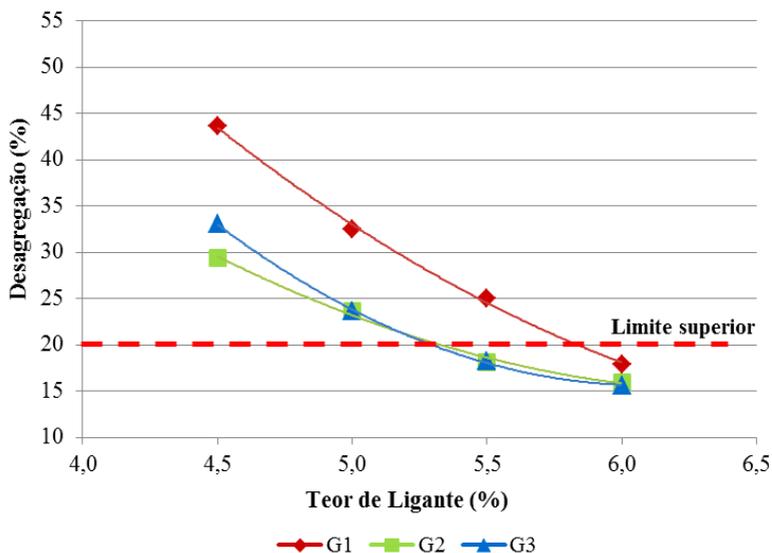


Figura 4.23 - Porcentagem média de desgaste dos corpos de prova das três misturas



A partir dos resultados obtidos, conclui-se que a resistência à abrasão aumenta com o aumento do teor de ligante para todas as

misturas. A mistura G1 apresenta a menor resistência ao desgaste por serem maiores as porcentagens de vazios e de vazios comunicantes, sendo que somente com um teor de ligante de 6,0% ela atingiria um desgaste menor que 20%, que é o limite imposto segundo especificações da norma ASTM D7064. As misturas G2 e G3 atendem à especificação de desgaste menor que 20% para a porcentagem de ligante de 5,5 %.

A partir dos resultados obtidos fica evidente que um aumento da porcentagem de agregados miúdos na mistura ajuda a reduzir a desagregação da mesma, tal como aconteceu com as misturas G2 e G3. Segundo o estudo desenvolvido por Tsai et al. (2012), um aumento na porcentagem de material passante na peneira N°200 (teor de finos) ajuda a reduzir a perda Cântabro. No caso desta pesquisa, embora as misturas não tivessem uma diferença significativa no material passante na peneira N°200 (1 % de diferença, aproximadamente), mas houve sim uma maior quantidade de material miúdo nas misturas G2 e G3.

#### **4.2.6 Seleção do conteúdo de ligante de projeto**

Para definir o teor ótimo de ligante das misturas estudadas G1, G2 e G3, foram analisados os resultados obtidos para a porcentagem de volume de vazios, de vazios comunicantes e do desgaste Cântabro. Seguidamente foram determinadas, para cada mistura, as porcentagens de ligante que atenderiam às especificações de uma porcentagem de volume de vazios maior a 18%, porcentagem de vazios comunicantes maiores a 10% e um desgaste Cântabro menor que 20%.

Com relação à porcentagem de volume de vazios, todos os teores estudados (4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%) satisfizerem a recomendação de um volume de vazios maior a 18%, para todas as misturas.

Com relação à porcentagem de vazios comunicantes, também foi atendida a especificação de um volume maior a 10% para todos os teores e para todas as misturas.

Em relação aos resultados do ensaio de desgaste Cântabro, para a mistura G1, somente os corpos de prova com teor de ligante de 6,0 % foram aprovados, pois obtiveram uma perda inferior a 20%, que é a perda máxima exigida na especificação. As misturas G2 e G3 tiveram um desgaste menor a 20% para os corpos de prova com teor de ligante de 5,5%.

Finalmente, segundo todos os resultados obtidos da porcentagem de volume de vazios, de vazios comunicantes e do desgaste Cântabro, o

teor ótimo de ligante definido para cada granulometria foram os seguintes: 6,0% para a mistura G1 e 5,5% para as misturas G2 e G3.

#### 4.2.7 Ensaio de dano por umidade induzida

Uma vez determinado a porcentagem de ligante de projeto das misturas (6,0% para G1; 5,5% para G2 e G3), procedeu-se à avaliação do dano por umidade induzida das mesmas através do ensaio de Lottman Modificado. Conforme a Figura 4.24, foram moldados 6 corpos de prova para cada mistura no CGS.

Figura 4.24 - Corpos de prova moldados para o ensaio Lottman

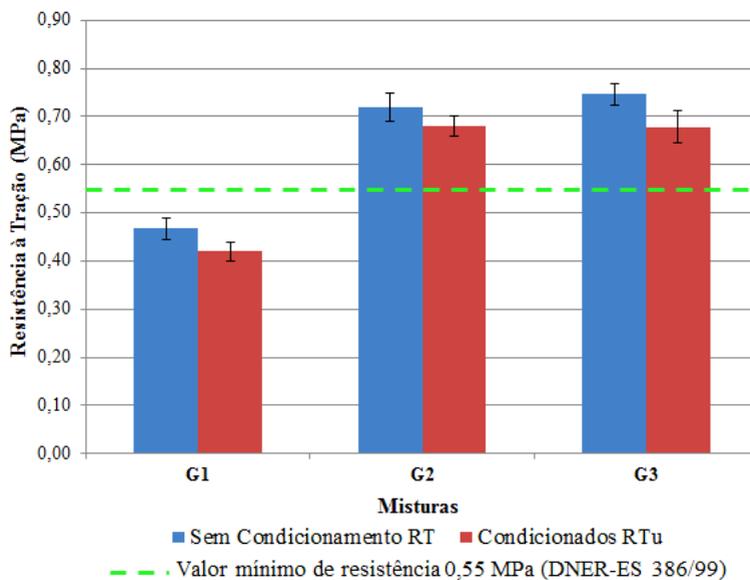


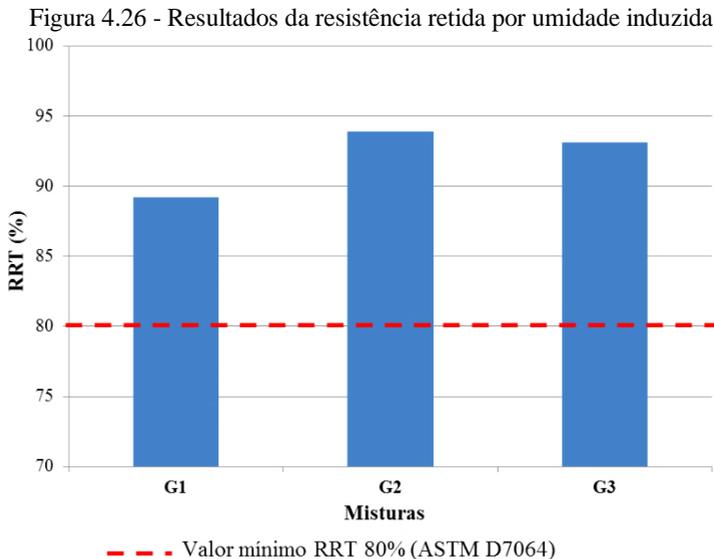
No Quadro 4.7 são mostrados os resultados da resistência à tração dos corpos de prova não condicionados ( $RT$ ), a resistência á tração dos corpos de prova condicionados ( $RT_u$ ) e a resistência á tração retida pela umidade induzida ( $RRT$ ) para as três misturas. Na Figura 4.25 estão mostrados os resultados da resistência à tração por compressão diametral média dos corpos de prova condicionados e não condicionados. A resistência à tração retida pela umidade induzida ( $RRT$ ) é apresentada na Figura 4.26 para cada uma das três misturas.

Quadro 4.7 - Resultados do ensaio Lottman para as três misturas

| Misturas | RT (MPa) | RT média (MPa) | $\sigma$ (MPa) | RTu (MPa) | RTu média (MPa) | $\sigma$ (MPa) | RRT (%) |
|----------|----------|----------------|----------------|-----------|-----------------|----------------|---------|
| G1       | 0,47     | 0,47           | 0,02           | 0,41      | 0,42            | 0,02           | 89,39   |
|          | 0,50     |                |                | 0,44      |                 |                |         |
|          | 0,46     |                |                | 0,42      |                 |                |         |
| G2       | 0,76     | 0,72           | 0,03           | 0,69      | 0,68            | 0,02           | 93,90   |
|          | 0,71     |                |                | 0,69      |                 |                |         |
|          | 0,70     |                |                | 0,66      |                 |                |         |
| G3       | 0,76     | 0,74           | 0,02           | 0,71      | 0,68            | 0,03           | 93,13   |
|          | 0,72     |                |                | 0,67      |                 |                |         |
|          | 0,73     |                |                | 0,67      |                 |                |         |

Figura 4.25 - Resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados para cada mistura





Avaliando-se os resultados da resistência à tração dos grupos de corpos de prova condicionados e não condicionados das três misturas, as misturas G2 e G3 apresentam valores similares entre si e superiores à resistência à tração da mistura G1, em ambas as condições úmida e seca. O fato que a mistura G1 exiba menor resistência se deve a presença de maior porcentagem de volume de vazios e de vazios comunicantes na mistura, o que resulta numa diminuição da resistência à tração.

O valor mínimo para a resistência à tração por compressão diametral é de 0,55 MPa, segundo a especificação DNER-ES 386/99, para misturas tipo camada porosa de atrito no Brasil. Somente as misturas G2 e G3 atingem valores superiores a 0,55 MPa tanto para as condições secas como úmidas, enquanto que a mistura G1 apresentou valores abaixo do mínimo especificado para as duas condições (úmida e seca).

Em relação aos resultados obtidos da resistência à tração retida RRT para avaliar o dano por umidade induzida, conclui-se que todas as misturas exibiram valores superiores a 80%, que o mínimo exigido pela norma ASTM D7064. As misturas G2 e G3 apresentaram melhores desempenhos com valores próximos de RRT (93,9 e 93,1%, respectivamente) e a mistura G1 mostrou maior dano provocado pela umidade com um valor de 89,4%.

### 4.3 3º ETAPA: DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE

Depois da compactação das seis placas segundo o procedimento especificado na norma francesa NF P 98-250-2 (detalhado no item 3.3), foram determinadas as porcentagens de volume de vazios e de vazios comunicantes das placas. O procedimento seguido para essas determinações foi o mesmo que para obter o volume de vazios (norma DNER-ME 117/94) e vazios comunicantes (norma AFNOR-NF-P-98-254-2, 1993) de corpos de prova compactados no CGS. Foi realizada a pesagem das placas (a seco, com fita, com parafina e submerso) para determinação da massa específica aparente e da porcentagem de volume de vazios das misturas. A porcentagem de volume de vazios comunicantes das placas foi obtida mantendo-se uma película de água constante durante dez minutos na face superior da placa e, em seguida, medida a quantidade de água que penetrou no interior da placa (Figura 4.27).

Figura 4.27 - Determinação da porcentagem de vazios comunicantes nas placas



No Quadro 4.8 estão mostrados os resultados da massa específica aparente  $G_{mb}$ , da porcentagem de volume de vazios  $V_v$  e volume de vazios comunicantes de todas as placas compactadas, juntamente com os valores de teor de ligante e espessura para cada placa.

Quadro 4.8 - Massa específica aparente, porcentagem de volume de vazios e de vazios comunicantes das placas

| Mistura                  | G1      |         | G2      |         | G3      |         |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Placas                   | Placa 1 | Placa 2 | Placa 1 | Placa 2 | Placa 1 | Placa 2 |
| Teor de Ligante (%)      | 6,0     | 6,0     | 5,5     | 5,5     | 5,5     | 5,5     |
| Epessura média (mm)      | 51,63   | 51,92   | 51,28   | 51,06   | 50,67   | 50,98   |
| Gmb (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,847   | 1,857   | 1,921   | 1,923   | 1,920   | 1,918   |
| Volume de Vazios (%)     | 23,56   | 23,19   | 20,70   | 20,62   | 20,38   | 20,45   |
| Vazios Comunicantes (%)  | 18,15   | 17,16   | 14,92   | 14,54   | 13,88   | 12,55   |

As porcentagens de volume de vazios e de vazios comunicantes das placas compactadas na mesa compactadora LCPC são semelhantes aos conseguidos em corpos de prova compactados no CGS para todas as misturas analisadas, indicando uma excelente aproximação entre os dois procedimentos de compactação.

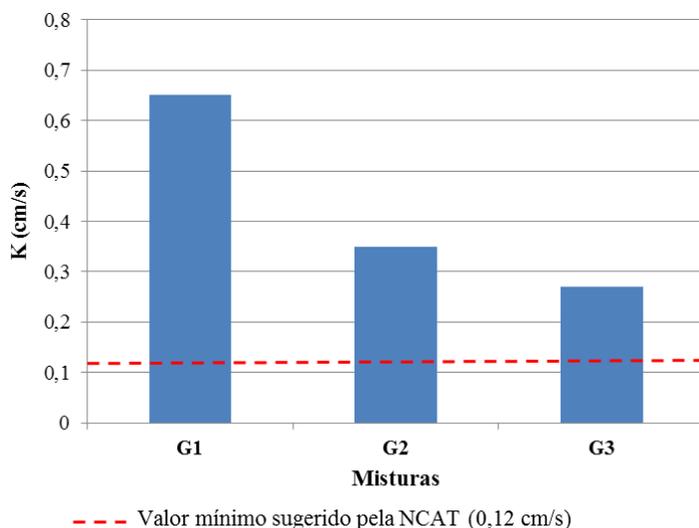
Notou-se que mesmo que a mistura G1 não tenha atingido o valor mínimo de resistência à tração recomendado pela especificação DNER-ES 386/99, continuou-se a fazer os ensaios de avaliação das propriedades da mistura para que pudesse fazer uma análise mais consistente do estudo.

O ensaio de permeabilidade foi conduzindo seguindo a norma NLT 367/2000 em duas placas para cada mistura. As medições da permeabilidade foram realizadas colocando-se o tubo em três posições (borda esquerda, centro e borda direita) de cada placa, com pelo menos duas repetições de medição em cada posição. Os resultados do ensaio estão mostrados no Quadro 4.9 e na Figura 4.28, ressaltando-se que cada valor representa a média de três determinações.

Quadro 4.9 - Permeabilidade das placas ensaiadas

| Misturas        | G1      |         | G2      |         | G3      |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Placas          | Placa 1 | Placa 2 | Placa 1 | Placa 2 | Placa 1 | Placa 2 |
| Tempo (s)       | 13,6    | 12,3    | 19,6    | 20,9    | 25,8    | 24,4    |
| K (cm/s)        | 0,60    | 0,69    | 0,37    | 0,34    | 0,26    | 0,28    |
| Tempo médio (s) | 13,0    |         | 20,3    |         | 25,1    |         |
| K médio (cm/s)  | 0,65    |         | 0,35    |         | 0,27    |         |

Figura 4.28 - Permeabilidade média das misturas



Da análise dos resultados obtidos, pode-se inferir que a mistura G1 apresentou a maior permeabilidade, atingindo um valor de 0,65 cm/s e que as misturas G2 e G3 tiveram valores de permeabilidade semelhantes entre si, com valores de 0,35 cm/s e 0,27 cm/s, respectivamente. A presença de uma maior porcentagem de volume de vazios e de vazios comunicantes na mistura G1 permite a passagem de uma quantidade maior de água pelo interior da mesma. As misturas G2 e G3 apresentam valores semelhantes de permeabilidade devido ao fato de ter também valores semelhantes de porcentagem de vazios comunicantes.

Os resultados dos ensaios mostram que as misturas abertas, com lacuna bem definida na composição granulométrica, como é o caso da mistura G1, apresenta maior eficiência no que diz respeito à permeabilidade.

Os valores de K para todas as misturas superaram o valor mínimo de 0,12 cm/s sugerido pelo NCAT para a nova geração de misturas abertas (*open graded friction course*), demonstrando que todas as misturas avaliadas têm um desempenho satisfatório em relação à permeabilidade.

#### 4.4 4º ETAPA: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

##### 4.4.1 Módulo de resiliência

Para a realização do ensaio de módulo de resiliência foram moldados três corpos de prova para cada mistura. O procedimento de moldagem dos corpos de prova foi o mesmo que o descrito no item 3.2.2. Após moldagem, foram obtidas as porcentagens de volume de vazios e vazios comunicantes de todos os corpos de prova com o mesmo método descrito nos itens 3.2.3 e 3.2.4, respectivamente.

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado a 25°C em três corpos de prova de cada mistura, seguindo a norma DNIT 135/2010-ME. A tensão aplicada no ensaio foi de 15% da resistência à tração diametral determinada no item 4.2.7. Os resultados obtidos são mostrados no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência

| Mistura | CP | Vv (%) | Vc (%) | MR(MPa) | $\sigma$ (MPa) | MR médio (MPa) | $\sigma$ médio (MPa) |
|---------|----|--------|--------|---------|----------------|----------------|----------------------|
| G1      | 1  | 23,85  | 17,98  | 2685    | 54             | 2938           | 85                   |
|         | 2  | 23,31  | 17,49  | 2995    | 79             |                |                      |
|         | 3  | 22,81  | 16,82  | 3134    | 122            |                |                      |
| G2      | 1  | 19,48  | 13,21  | 3457    | 29             | 3308           | 46                   |
|         | 2  | 19,55  | 14,04  | 3356    | 52             |                |                      |
|         | 3  | 20,32  | 14,29  | 3110    | 57             |                |                      |
| G3      | 1  | 19,31  | 12,20  | 3843    | 29             | 3522           | 72                   |
|         | 2  | 19,57  | 12,57  | 3388    | 48             |                |                      |
|         | 3  | 20,21  | 13,57  | 3335    | 139            |                |                      |

Analisando-se os resultados, concluiu-se que a mistura G1 apresentou valores inferiores de módulo de resiliência que as misturas G2 e G3 devido às maiores porcentagens de volume de vazios e vazios comunicantes da mistura G1, o que diminui a rigidez da mesma. As misturas G2 e G3 apresentaram valores semelhantes de módulo de resiliência por ter valores próximos de volume de vazios e vazios comunicantes.

Como as misturas G2 e G3 apresentam uma porcentagem de volume de vazios inferior ao da mistura G1, pode-se dizer que os valores de módulo de resiliência aumentam com o decréscimo da porcentagem de volume de vazios, como era de se esperar.

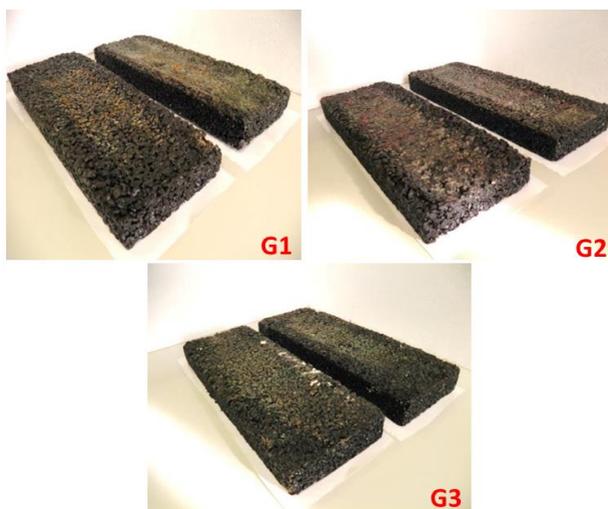
Tarefder e Zaman (2003) têm relacionado valores de módulo de resiliência com o volume de vazios e comprovaram que para maiores porcentagens de vazios têm-se menores valores de módulo de resiliência. Este comportamento é semelhante ao apresentado pelas misturas estudadas.

#### 4.4.2 Deformação permanente

O ensaio de deformação permanente foi realizado de acordo com a norma francesa NF P 98-253-1 utilizando o simulador de tráfego *Orniéreur*.

As medições da deformação das misturas durante o ensaio foram realizadas em 15 pontos distribuídos na superfície das placas a cada 100, 300, 1000, 3000, 10000 e 30000 ciclos. A Figura 4.29 mostra as placas das misturas G1, G2 e G3 depois de ensaiadas a 30000 ciclos.

Figura 4.29 - Placas após do ensaio de deformação



Os resultados da deformação das placas para as misturas G1, G2 e G3 estão mostrados nas Figuras 4.30, 4.31 e 4.32, respectivamente. Em todas essas figuras são apresentados os resultados da porcentagem de afundamento em relação à espessura inicial das placas para todos os ciclos ensaiados.

Figura 4.30 - Deformação permanente das placas da mistura G1

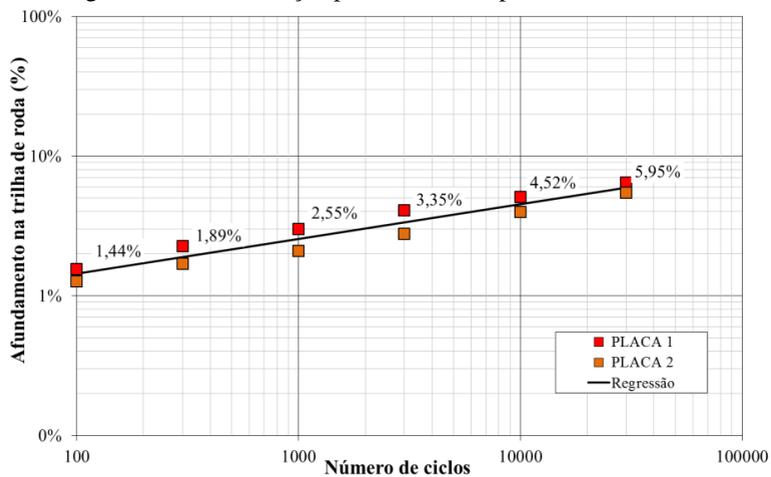


Figura 4.31 - Deformação permanente para as placas da mistura G2

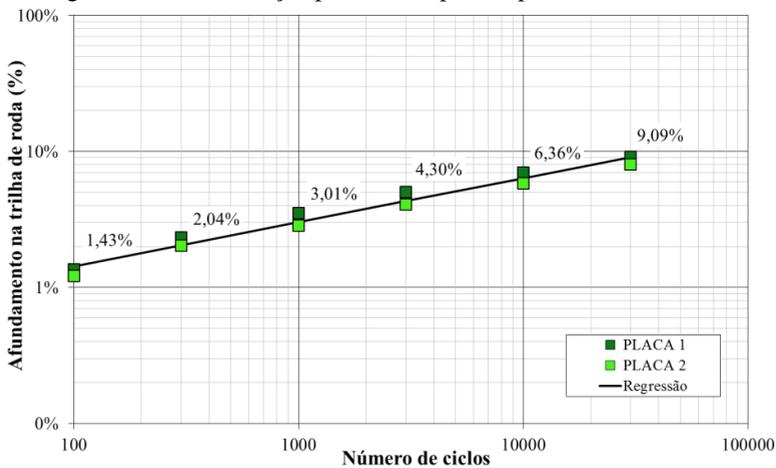
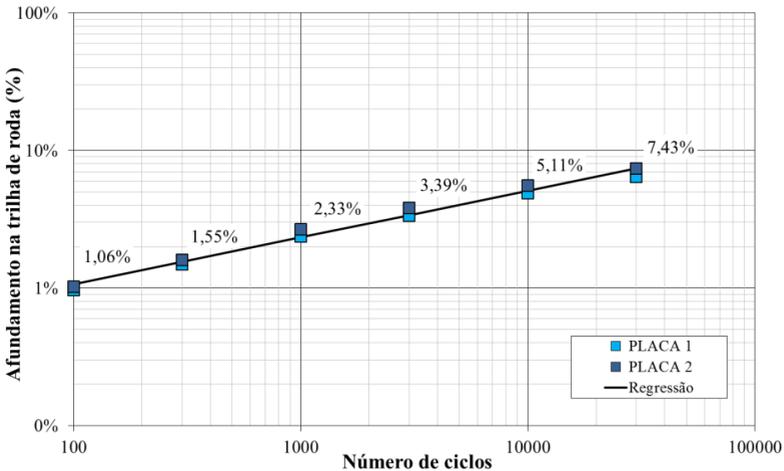


Figura 4.32 - Deformação para as placas da mistura G3



Segundo a especificação francesa, as misturas de concreto asfáltico são consideradas resistentes à deformação permanente quando apresentam uma deformação máxima de 10% da espessura da placa após 30000 ciclos. Todas as placas ensaiadas apresentaram deformação permanente inferior a 10%, mas as placas da mistura G2 deformaram-se mais do que as placas das misturas G1 e G3 com valores próximos ao limite (9,09%). As placas da mistura G1 apresentaram a menor deformação permanente com uma percentagem de 5,95%, mesmo tendo uma maior percentagem de vazios.

O afundamento na trilha de roda está associado a diversos fatores como a composição granulométrica e o teor de ligante. Neste caso, a justificativa da deformação permanente da mistura G2 ser superior às outras poderia ser devido à presença de uma maior percentagem de material passante na peneira de 2,36 mm (20%) em comparação com as misturas G1 e G3 (perto de 12% de material passante na peneira de 2,36 mm). Segundo Ruiz et al. (1990), *apud* Putman (2012), quando muito agregado fino é incluído numa mistura aberta, as partículas mais finas vão separar as partículas grossas e aumentar o potencial da mistura à deformação permanente.

Segundo Moura (2010) o teor de ligante asfáltico presente na mistura está diretamente ligado à deformação permanente. A pesar de não haver uma proporcionalidade precisa entre essas variáveis, existe o

risco da ocorrência de deformação permanente com o aumento do teor de ligante adicionado à mistura.

Neste caso, a qualidade do ligante modificado por polímero utilizado para realizar as misturas (Flexpave 60/85-E) permitiu obter baixos percentagens de afundamento na trilha de roda mesmo tendo altos teores de ligante adicionados às misturas (5,5% para G2 e G3, e 6,0 % para G1).

#### 4.5 5° ETAPA: ABSORÇÃO SONORA

##### 4.5.1 Condução do ensaio

Para a realização do ensaio de absorção sonora foram moldados no CGS três corpos de prova com espessuras de 3 cm, 5 cm e 7 cm para cada mistura. Devido ao fato que a altura mínima de compactação de corpos de prova no CGS é de 5 cm, para a obtenção da espessura de 3 cm foram serrados corpos de prova de 5 cm.

O ensaio de absorção sonora foi conduzido nos corpos de prova moldados no CGS de 100 mm de diâmetro e espessuras de 3, 5 e 7 cm. O objetivo da variação das espessuras nos corpos de prova foi avaliar a influência da mesma na forma da curva de absorção sonora e a frequência em que os valores máximos ocorrem.

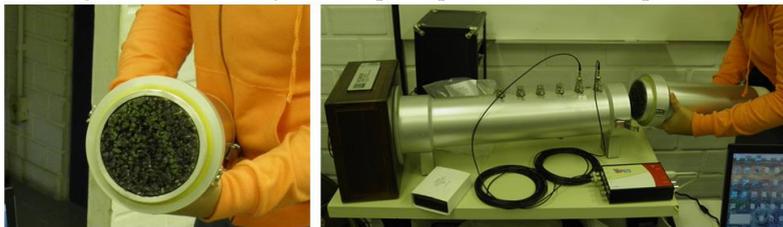
A frequência de corte do tubo de ondas estacionárias foi calculada utilizando a Equação (2.19) dando como resultado um valor de 2009 Hz para o diâmetro do tubo de 10 cm. A distância de separação dos dois microfones para a realização do ensaio foi de 50 mm e de 50 mm também para a separação entre o microfone mais próximo e a amostra.

O espaçamento entre as posições do microfone determina a faixa de frequência na qual as medições são aceitáveis. O espaçamento entre microfones de 50 mm foi utilizado para calcular a faixa de frequência de análise dos resultados com a Equação 2.20. A frequência mínima de trabalho foi de 343 Hz e a frequência máxima de trabalho foi de 2744 Hz. Como a frequência de corte é menor que a frequência máxima de trabalho, o intervalo adotado para análise dos resultados foi de 343 a 2009 Hz.

Antes da realização do ensaio de absorção sonora nas amostras, foi realizado o ensaio de absorção sem amostra para verificar se o

equipamento estava calibrado. A Figura 4.33 mostra a colocação de um corpo de prova no tubo de impedância.

Figura 4.33 - Colocação do corpo de prova no tubo de impedância



O coeficiente de absorção acústica de um material representa a proporção de energia acústica não refletida pela superfície do material para uma onda de plano de incidência normal ( $90^\circ$ ).

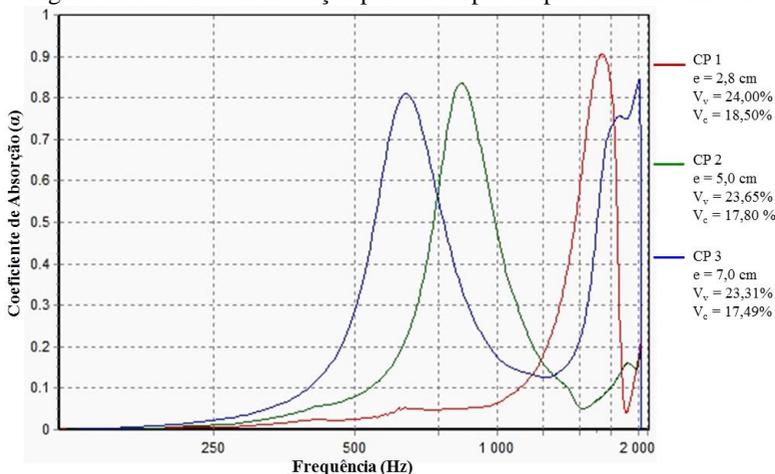
O valor do coeficiente de absorção varia entre 0 e 1, dependendo da fração de energia do som que é refletida de volta. Em qualquer frequência dada,  $\alpha=0$  indica reflexão completa e  $\alpha=1$ , indica absorção completa. A frequência em que ocorre a absorção máxima é denominada de frequência de ressonância.

## 4.5.2 Influência da espessura na capacidade de absorção

### 4.5.2.1 Mistura G1

A Figura 4.34 mostra os resultados da absorção sonora para os corpos de prova da mistura G1 com espessuras de aproximadamente 3, 5 e 7 cm, e porcentagem de volume de vazios entre 23 e 24% e vazios comunicantes entre 17 e 18%.

Figura 4.34 - Curva de absorção para os corpos de prova da mistura G1



Conclui-se, da análise da Figura 4.34, que a espessura do corpo de prova determina em que frequência se encontra o pico de absorção sonora da mistura. Para uma espessura maior a 5,0 cm, a curva apresenta dois picos de absorção em que o maior deles ocorre numa frequência mais baixa. O coeficiente de absorção sonora foi bastante elevado para o corpo de prova de espessura de 2,8 cm, chegando a um pico de 0,9 que pode ser explicado pela presença de uma porcentagem um pouco superior de volume de vazios e vazios comunicantes. O corpo de prova com espessura de 7,0 cm apresenta melhor desempenho quanto à absorção sonora para frequências menores de 750 Hz (pico de absorção de 0,80) e maiores de 1750 Hz (pico de absorção de 0,75). O corpo de prova de espessura de 5,0 cm tem melhor absorção na faixa de frequências de 750 Hz a 1250 Hz com um pico de 0,84 e a espessura de 2,8 cm, na faixa de 1250 Hz a 1750 Hz.

Analisando-se a capacidade de absorção sonora em todo o espectro da frequência de trabalho (343 a 2009 Hz), a espessura de 7,0 cm foi a que apresentou melhor desempenho acústico. Pode-se concluir que quanto maior é a espessura do revestimento maior seria a capacidade de absorção sonora.

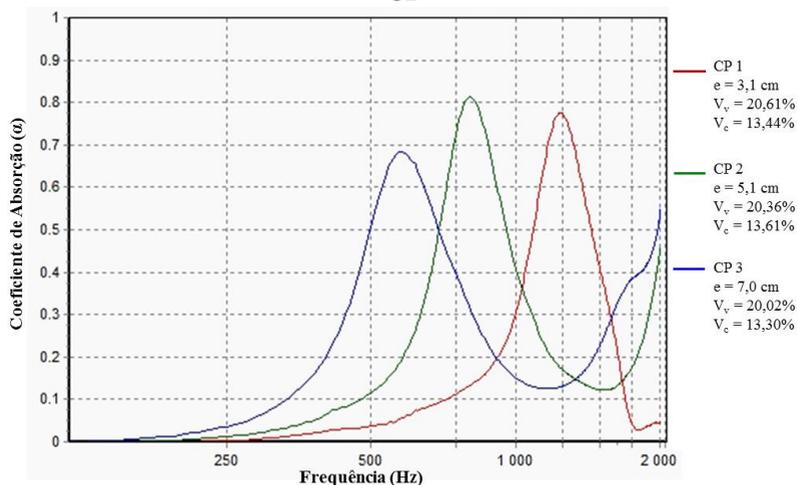
Entretanto, para a redução do ruído do tráfego é mais importante ter maior absorção sonora nas frequências de 800 a 1000 Hz, que é normalmente a faixa de frequência na qual o ruído da rolagem dos pneus acontece com maior intensidade. Desta forma o corpo de prova com

espessura de 5,0 cm mostrou maior absorção sonora na faixa de frequência de 800 a 1000 Hz com um pico de absorção de 0,84. Portanto, esta seria a espessura do revestimento recomendada para essa mistura.

#### 4.5.2.2 Mistura G2

Na Figura 4.35 são apresentados os resultados do coeficiente de absorção em função da frequência para os corpos de prova da mistura G2 com espessuras de aproximadamente 3, 5 e 7 cm e porcentagem de volume de vazios entre 20 e 21% e de vazios comunicantes entre 13 e 14%.

Figura 4.35 - Coeficiente de absorção em função da frequência para a mistura G2



Para esta mistura, o corpo de prova de 7,0 cm apresentou maior capacidade de absorção para as frequências menores que 684 Hz e maiores que 1586 Hz, com um valor máximo de 0,68. A espessura de 5,1 cm mostrou melhor comportamento para a faixa de valores de frequência entre 684 Hz e 1030 Hz com um pico de 0,81. O corpo de prova de 3,1 cm teve melhor desempenho nas faixas de 1030 Hz a 1586 Hz, com um máximo de absorção de 0,77.

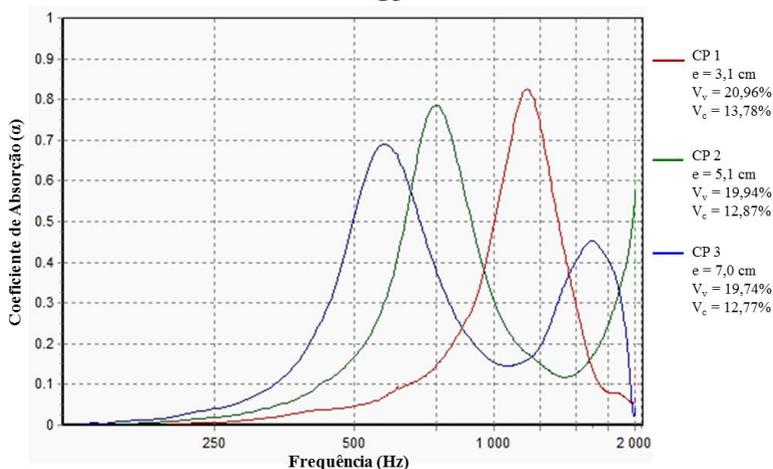
A partir da análise do coeficiente de absorção de todo o espectro de frequências de trabalho, pode-se concluir que a mistura com espessura de 7,0 cm foi a que demonstrou melhor absorção.

Como relatado anteriormente, a faixa de frequências onde o ruído pneu/pavimento tem maior intensidade vai de 800 a 1000 Hz, faixa dentro da qual o corpo de prova de espessura de 5,1 cm demonstrou maior absorção para esta mistura com um pico de 0,81.

#### 4.5.2.3 Mistura G3

Os resultados do espectro de absorção sonora para os corpos de prova da mistura G3 com espessuras de aproximadamente 3, 5 e 7 cm, porcentagem de volume de vazios entre 19 e 21 % e de vazios comunicantes entre 12 e 14% são mostrados na Figura 4.36.

Figura 4.36 - Curva absorção sonora para as diferentes espessuras da mistura G3



Os valores máximos de absorção e as frequências onde os mesmos acontecem (frequências de ressonância) são semelhantes aos da mistura G2 por terem as duas misturas porcentagens de vazios e de vazios comunicantes, aproximadamente, iguais. O corpo de prova com espessura de 7,0 cm apresenta melhor desempenho quanto à absorção sonora para frequências menores que 662 Hz (pico de absorção de 0,69) e maiores que 1460 Hz (pico de absorção de 0,45). Os corpos de prova

com espessura de 5,1 cm tiveram melhor desempenho para frequências na faixa de 662 Hz a 958 Hz e entre 958 Hz a 1460 Hz para a espessura de 3,1 cm, com picos de absorção de 0,78 e 0,82, respectivamente.

Novamente, como tinha acontecido com os corpos de prova das misturas G1 e G2, a espessura de 7,0 cm apresentou maior capacidade de absorção sonora em toda a faixa de frequências analisadas. Porém, a espessura de 5,1 cm seria a recomendada, pois demonstrou melhor absorção na faixa de 800 a 1000 Hz, a qual é crítica para a redução do ruído pneu/pavimento.

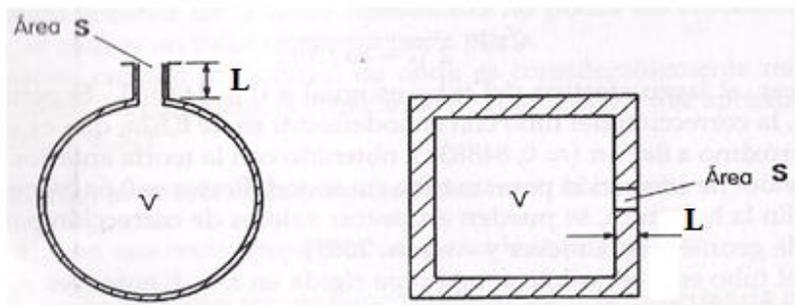
Finalmente, pode-se concluir que para as três misturas G1, G2 e G3 a espessura dos corpos de prova determina em que frequência se encontra o pico de absorção sonora e que para espessuras maiores a 5 cm a curva apresenta dois picos de absorção em que o maior deles esteve numa frequência mais baixa. Esse mesmo comportamento foi observado no trabalho realizado por Fehrl (2006) e Mun (2010).

A espessura de 7 cm apresentou melhor capacidade de absorção sonora para as três misturas estudadas quando foi analisado todo o espectro de frequências de trabalho (343 a 2009 Hz). Pode-se concluir que quanto maior é a espessura do revestimento maior seria a capacidade de absorção sonora.

Também se pode destacar que para as três misturas, a espessura de 5 cm demonstrou melhor desempenho de absorção sonora na faixa de frequências de 800 a 1000 Hz onde o ruído pneu/pavimento é mais intenso.

Finalmente, se pode observar que as curvas de absorção de todas as misturas e espessuras se comportam como um ressonador de Helmholtz, ou seja, existe um pico de absorção na frequência de ressonância de Helmholtz. Este fenômeno ocorre quando o ar passa por uma cavidade e, devido a isso ressoa. Na Figura 4.37 são mostrados ressonadores de Helmholtz simples que consistem em uma cavidade de volume  $V$  com um gargalo de área  $S$  e de comprimento  $L$ .

Figura 4.37 - Ressonadores de Helmholtz simples



Fonte: Gerges e Arenas (2010)

Se o comprimento de onda do som  $\lambda$  é muito maior que as dimensões  $L$ ,  $S$  e  $V$ , o ar do gargalo se move como um bloco de massa  $m$ . Para o cálculo da frequência de ressonância de Helmholtz é utilizado um comprimento efetivo  $L'$ , já que uma quantidade do fluido, além das extremidades do estrangulamento real, move-se em unidade com o fluido na garganta sendo necessário usar um comprimento maior que o verdadeiro  $L$ . O comprimento efetivo e a frequência de ressonância de ressonância de Helmholtz são calculados pela Equação 4.1 e Equação 4.2, respectivamente (GERGES, 2000).

$$L' = L + \frac{16a}{3\pi} \quad (4.1)$$

onde:

$L$  = comprimento do gargalo;

$a$  = raio de abertura do gargalo.

$$\omega_0 = c \times \sqrt{\frac{S}{V \times L'}} \quad (4.2)$$

onde:

$S$  = área da seção do gargalo;

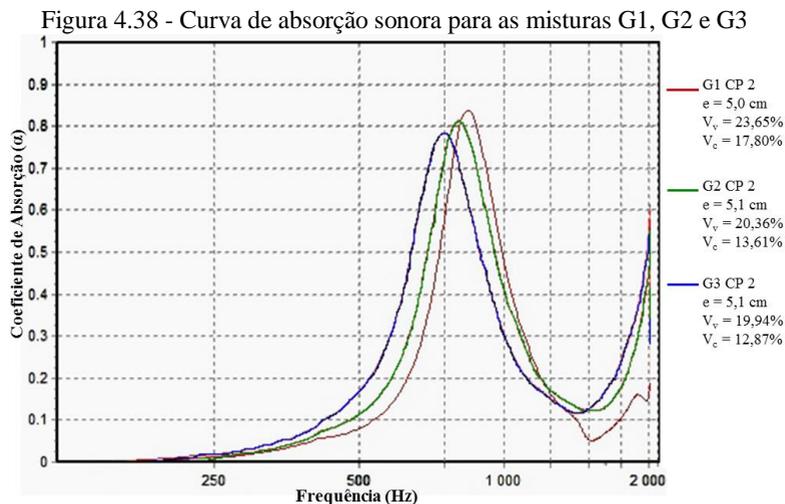
$V$  = volume;

$L'$  = comprimento efetivo do gargalo;

$c$  = velocidade do som no ar.

### 4.5.3 Influência do tipo de mistura na capacidade de absorção

Os resultados da curva de absorção sonora para os corpos de prova das misturas G1, G2 e G3 com espessuras de 5 cm estão representadas na Figura 4.38.



Observa-se que os coeficientes máximos de absorção foram semelhantes para todas as misturas, mas o pico de absorção sonora da mistura G1 (0,84) foi superior aos das misturas G2 e G3. Isso pode ser explicado pela presença de uma maior porcentagem de volume de vazios e de vazios comunicantes na mistura G1, o que permite uma maior passagem da onda sonora para o interior da mesma. As misturas G2 e G3 tiveram valores máximos de 0,81 e 0,78, respectivamente. As frequências onde foram relatados os picos (frequências de ressonância) ficaram na faixa entre 750 Hz e 1000 Hz. Os resultados mostraram que quanto maior o volume de vazios comunicantes maior é o pico do coeficiente de absorção sonora.

A melhoria da absorção sonora devido a um aumento na porcentagem de vazios somente é significativa na faixa de frequências de 810 a 1250 Hz. Para as baixas frequências, entre 300 e 750 Hz, a melhor absorção ocorre para porcentagens de vazios diminuindo.

A mistura G1, a qual contém aproximadamente 23% de vazios e 18% de vazios comunicantes seria o melhor material de atenuação do som entre as misturas estudadas conforme os modelos da Figura 4.37 porque apresentou melhor desempenho de absorção na faixa de frequência de 800 a 1000 Hz.

Todas as misturas apresentaram valores elevados e satisfatórios de coeficiente de absorção sonora entre 0,75 e 0,85, demonstrando ter um bom comportamento quanto à absorção sonora.

Com base nas medidas de coeficientes de absorção acústica realizadas nesta etapa, mostra-se claramente que uma atenuação da energia da onda de som é conseguida através da variação da porcentagem de vazios, da granulometria e da espessura das misturas.

#### 4.6 RESUMO DOS RESULTADOS

No Quadro 4.11 são mostradas as propriedades avaliadas para cada mistura e os resultados correspondentes a cada ensaio realizado.

Quadro 4.11 - Resumo dos resultados dos ensaios para as misturas G1, G2 e G3

| Características das misturas |                                   | G1    | G2    | G3    |
|------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| Teor de ligante (%)          |                                   | 6,0   | 5,5   | 5,5   |
| Gmm (g/cm <sup>3</sup> )     |                                   | 2,417 | 2,423 | 2,411 |
| Gmb (g/cm <sup>3</sup> )     |                                   | 1,857 | 1,961 | 1,938 |
| Volume de vazios (%)         |                                   | 23,18 | 19,07 | 19,61 |
| Vazios comunicantes (%)      |                                   | 17,37 | 14,52 | 13,91 |
| Propriedades Avaliadas       |                                   | G1    | G2    | G3    |
| Permeabilidade (cm/s)        |                                   | 0,65  | 0,35  | 0,27  |
| Absorção sonora              |                                   | 0,84  | 0,81  | 0,78  |
| Desempenho Mecânico          | Desagregação (%)                  | 17,94 | 18,14 | 18,20 |
|                              | Resistência à tração (MPa)        | 0,47  | 0,72  | 0,74  |
|                              | Dano por umidade induzida RRT (%) | 89,2  | 93,9  | 93,1  |
|                              | Módulo de resiliência (MPa)       | 2938  | 3308  | 3522  |
|                              | Deformação Permanente (%)         | 5,95  | 9,09  | 7,43  |

A mistura G3 atendeu todos os limites e especificações para todos os ensaios demonstrando ter um desempenho satisfatório em relação às propriedades acústicas, drenantes e de resistência mecânica. A mistura

G2 apresentou alta deformação permanente e a mistura G1 não atingiu o valor mínimo de resistência à tração (0,55 MPa).

Assim, dentre as três granulometrias estudadas, a mistura G3, que representa a experiência americana, teria uma otimização para os três parâmetros pesquisados.

## CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

A presente pesquisa alcançou o objetivo de avaliar as propriedades acústicas, drenantes e de resistência mecânica de três misturas de diâmetro máximo de 9,5 mm e com gradações abertas escolhidas em base a estudos e experiências nacionais e internacionais. Os ensaios conduzidos nas misturas para avaliar suas propriedades foram a determinação da porcentagem de volume de vazios, de vazios comunicantes, o desgaste Cântabro, o dano por umidade induzida, a permeabilidade, o módulo de resiliência, a deformação permanente e a capacidade de absorção sonora.

Com relação à porcentagem de vazios, todas as misturas estudadas (G1, G2 e G3) satisfizerem a recomendação de um volume de vazios maior a 18%. A porcentagem de vazios comunicantes foi maior que 10% para todas as misturas. A mistura G1 apresentou os maiores porcentagens de vazios e vazios comunicantes e as misturas G2 e G3 exibiram valores semelhantes.

No que diz respeito aos resultados do ensaio de desgaste Cântabro, a mistura G1 teve a maior desagregação atingindo uma perda por desgaste menor a 20% somente com um teor de ligante de 6,0%. As misturas G2 e G3 tiveram um desgaste menor a 20% para os corpos de prova com teores de ligante de 5,5%.

Em relação ao dano provocado pela umidade, todas as misturas demonstraram ter uma resistência satisfatória na presença de umidade, com valores de RRT maiores a 80% que é o valor mínimo exigido em norma.

Com relação à resistência à tração por compressão diametral a mistura G1 não atingiu o valor mínimo de resistência de 0,55 MPa exigido pela especificação DNER-ES 386/99, enquanto que as misturas G2 e G3 exibiram resultados satisfatórios de resistência à tração.

Todas as misturas apresentaram um desempenho satisfatório para o ensaio de permeabilidade com resultados maiores a 0,12 cm/s (valor mínimo recomendado pelo NCAT). A mistura G1 apresentou a maior permeabilidade com um valor de 0,65 cm/s. Uma maior porcentagem de volume de vazios e de vazios comunicantes na mistura G1, permite a passagem de uma quantidade superior de água pelo interior da mesma, o que explicaria o resultado obtido.

Na avaliação do módulo de resiliência das misturas, a G1 foi a que demonstrou os valores mais baixos sendo superada pelas misturas G2 e G3.

Todas as placas ensaiadas à deformação permanente exibiram resultados inferiores a 10%, mas as placas da mistura G2 deformaram-se mais do que as placas das misturas G1 e G3 com valores próximos ao limite (9,09%), demonstrando ter uma deformação elevada.

Com relação ao desempenho na redução de ruído das misturas pode destacar-se que para as três misturas, a espessura de 5 cm demonstrou melhor desempenho de absorção sonora na faixa de frequências de 800 a 1000 Hz onde o ruído pneu/pavimento é mais intenso. Todas as misturas apresentaram valores satisfatórios de capacidade de absorção sonora na faixa de frequências de 800 a 1000 Hz, com coeficientes entre 0,75 e 0,85.

A mistura G1 foi a que demonstrou melhor comportamento desde o ponto de vista funcional das misturas (permeabilidade e absorção sonora) e com respeito à deformação permanente, mas não atingiu o valor mínimo de resistência à tração e apresentou uma alta desagregação.

A mistura G2 teve um desempenho satisfatório na maior parte dos ensaios, mas a deformação permanente da mistura foi muito elevada chegando perto do limite máximo (10%).

Finalmente a mistura G3 (experiência americana) atendeu todos os limites e especificações para todos os ensaios demonstrando ter um desempenho satisfatório em relação às propriedades acústicas, drenantes e de resistência mecânica.

Os ensaios realizados recomendam que esta mistura G3 com este ligante seria a mistura a ser testada em campo para se avaliar a eficiência da capacidade de absorção sonora, a permeabilidade e a resistência mecânica de revestimentos asfálticos.

## RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São recomendadas para pesquisas futuras a avaliação das mesmas granulometrias variando-se o tipo de ligante, por exemplo, asfalto-borracha para verificar se existem melhoras no desempenho acústico, drenante ou mecânico a partir dessa modificação.

Testar corpos de prova com espessura de 4 cm no ensaio de absorção sonora, com o objetivo de tornar mais econômica a execução deste tipo de revestimento.

Execução de segmentos experimentais com diferentes espessuras de revestimento para se avaliar o desempenho em campo.



## REFERÊNCIAS

- AASHTO T 209 – **Standard method of test for theoretical maximum specific gravity ( $G_{mm}$ ) and density of Hot-Mix Asphalt (HMA)**. Test standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing. Washington, D. C., 2012.
- Alvarez, A.E.; Martin, A.E.; Estakhri, C; Button, J.; Glover, C. J.; Jung, S. H. **Synthesis Of Current Practice On The Design, Construction, And Maintenance Of Porous Friction Courses**. FHWA/TX-06/0-5262-1. Texas Transportation Institute. Austin, Texas, 2006.
- Alvarez, A.E.; Martin, A. E.; Estakhri, C. **A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures**. Construction and Building Materials, 2010. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181000471X>.
- Anderson, K.W., Pierce, L.M., Uhlmeyer, J.S., and Weston, J. 2008. *Evaluation of Long-Term Pavement Performance and Noise*
- ASTM D7064/D7064M – 08. Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design. 2008, reapproved 2013.
- ASTRANA JÚNIOR, C. A. L. **Estudo da absorção sonora e permeabilidade em concretos asfálticos drenantes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.
- BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J.A.P., SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. PETROBRÁS Asfaltos e ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos). Rio de Janeiro, RJ; Brasil, 2007.
- BERNHARD, R. J. ; WAYSON R. L. **An introduction to fire/pavement noise of asphalt pavement**. Asphalt Pavement Alliance. USA, 2004. 27 p.
- BISTAFA, Sylvio R.. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. São Paulo: Editora Blucher, 2006. 368 p.

CALLAI, Sérgio Copetti. **Estudo do Ruído Causado pelo Tráfego de Veículos em Rodovias com Diferentes Tipos de Revestimentos de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado)-Escola Politecnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. 2011.

CARMONA DO NASCIMENTO, Cátia Cristiana. **Avaliação da Permeabilidade de Misturas Betuminosas Drenantes em Laboratório e “In Situ”**. Dissertação (Mestrado)-Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2012, 263 p.

CPA. **Pliego de Especificaciones Tecnicas Generales para Mezclas Asfálticas en Caliente de Bajo Espesor para Carpetas de Rodamiento**, Comisión Permanente del Asfalto (CPA), 2010.

CONAMA. Resolução 001, de 08 de março de 1990: **“Dispõe sobre critérios e padrões da emissão de ruídos das atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política”**. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, 1990.

DESCORNET, G. **Vehicle noise emission on wet road surfaces**. Inter.noise 2000. The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Nice, France, 2000.

DNER-ES 386/99: **Pavimentação – Pré-misturado a quente com asfalto polímero – camadaporosa de atrito**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1999.

DO, Minh-Tan. **Contact Pneu/Chaussée - Apport de la Microtexture**. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées , n°196, Março- Abril. 5-17. 1995.

DUMKE, M.P. **Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2005.

FEHRL. **Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces**. SILVIA- Sustainable road surfaces for traffic noise control. Brussels, Belgium, 2006.

FREITAS, E. F.; PEREIRA, P. A. A.; SANTOS, L. G. P.; SANTOS, A. P. S. **A Influência da Água no Ruído Produzido pelo Tráfego Rodoviário**. 2006.

FREITAS, Elisabete et al. **Traffic Noise Changes due to Water on Porous and Dense Asphalt Surfaces**. Road Materials And Pavements Design, [s.i.], v. 10, n. 1, p.1-21, out. 2008.

FREITAS, Elisabete F. **The effect of time on the contribution of asphalt rubber mixtures to noise abatement**. Noise control engineering J. 60, 2012.

GERGES, Samir Nagi Yousri. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 2. ed. Florianópolis. Nr Editora, 2000. 696 p.

GERGES, Samir Nagi Yousri; ARENAS, Jorge P.. **Fundamentos y Control del Ruído y Vibraciones**. 2. ed. Florianopolis: Nr Editora, 2010. 787 p.

GUIMARAES, Jose Marcos Faccin. **Concreto Asfáltico Drenante em Asfaltos modificados por polímero SBS e borracha moída de pneus**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação PPGEC-UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

HA. Highways.gov.uk.- **Desing for Manual and Bridges**. Volume 7, Secção 5, Parte 2 HD 37/99: 1999. Disponível em <http://www.dft.gov.uk/ha/standards/dmrb/index.htm>.

HANSON, D. I; JAMES, R. S.; NESMITH, C. **Tire/pavement noise study**. National Center for Asphalt Technology. Alabama. NCAT Report 04-02. 2004.

ISO 10534-2 E: **Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance tubes – Part 2: Transfer-function method**. 1998.

KNABBEN, Ramon Mendes. **Estudo do Ruído Pneu Pavimento e da Absorção Sonora em Diferentes Revestimentos de Pavimento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2012.

LÁO, VÂNIA L.E.S.T. **Estudo Comparativo do Desempenho Acústico de Diferentes Tipos de Revestimento dos Pavimentos**, Tese de Mestrado, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

LEFEBVRE, G. **Porous Asphalt**. Comité technique AIPCR des routes souples comité technique aipcr des caractéristiques de surface. Bélgica, 1993.

LI M.; VAN KEULEN, W.; CEYLAN H. **Influence of changes in surface layer properties on tire/pavements noise**. Noise Control Engineering Journal, Vol. 61, No.4, pp. 417-424. 2013.

LI M.; VAN KEULEN, W.; TIJS, E.; VAN DE VEN, M.; MOLENAAR, A. **Sound absorption measurement of road surface with in situ technology**. Applied Acoustics 88, p. 12-21, 2015.

LIU, M.; HUANG, X.; XUE, G. **Effects of double layer porous asphalt pavement of urban streets on noise reduction**. International Journal of Sustainable Built Environment 5, p. 183-196, 2016.

LOPES FERNANDES FRANCISCO, Vanessa Dias. **A drenagem superficial e o seu impacto funcional e estrutural na vida dos pavimentos rodoviários**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. 2009.

LU, Q.; FU, P.C.; HARVEY, J. T. **Laboratory Evaluation of the Noise and Durability Properties of Asphalt Surface Mixes**. Research Report: UCPRC-RR-2009-07 University of California Pavement Research Center UC Davis, UC Berkeley. EEUU, 2009.

LUONG J.; BUENO, M.; VÁZQUEZ, V.F.; PAJE, S.E. **Ultrathin porous pavement made with high viscosity asphalt rubber binder: A better acoustic absorption?**. Applied Acoustics 79, 117-123, 2014.

MALLICK, R. B; KANDHAL P.S.; COOLEY, A.J; WATSON, D.E.. **Design, Construction, and Performance of New-Generation Open-Graded Friction Courses.** National Center for Asphalt Technology. Auburn University, 2000.

MEURER FILHO, Edelino. **Estudo de Granulometria Para Concretos Asfálticos Drenantes.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação PPGEC-UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

MIRÓ RECASENS, Rodrigo. **Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la seguridad.** Universidad Politécnica de Cataluña, Zaragoza, 2006.

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

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório.** Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2010.

MUN, Sungho. **Sound Absorption characteristics of porous asphalt concret pavements.** Canadian Journal of Civil Engineering. Vol 37, p. 273-278, 2010.

NLT-327/00. **Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS.** Laboratorio Escuela de Caminos de Santander. 2000.

NOUGUÉS, Felipe. **Construcción carpetas de rodamiento con mezclas asfálticas no convencionales.** Jornadas Tecnicas de Actualizacion y Capacitacion en Pavimentos Flexibles, Comision Permanente del Asfalto (CPA), 2006.

OBSERVATOIRE DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉES. **Enrobes Drainants**. Note d'information. 1997.

OLIVEIRA, C. G. M. **Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante**. Dissertação de mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília. 2003.

PACHECO, M. B. **Caracterización acústica de mezclas asfálticas para ténar la contaminación sonora**. Tesis Doutoral Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla-La Mancha, 2010.

PIARC (World Road Association). **Quiet Pavement Technologies**. Technical Committee D.2 Road Pavements. 2013.

PG3. **Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)**. Artículo 542- Mezclas Bituminosas en Caliente e Artículo 543- Mezclas Bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura. Madrid, 2001.

PRATICÒ, Filippo G.; ANFOSSO-LÉDÉE, Fabienne. **Trends and Issues in Mitigating Traffic Noise Through Quiet Pavements**. SIIV 5th International Congress – Sustainability of Road Infrastructures. Procedia-Social and Behavioral Sciences 53 (2012) 203-212, Sciverse ScienceDirect, 2012.

PRATICÒ, Filippo G. **On the dependence of acoustic performance on pavement characteristics**. Transportation Research Part D 29, p. 79-87, 2014.

PUTMAN, B. J. **Evaluation of open-graded friction courses: construction, maintenance, and performance**. Report No. FHWA-SC-12-04. South Carolina Department of Transportation, USA, 2012.

RAITANEN, N. **Measuring of noise and wearing of quiet surfaces**. 2005. 96 f. Thesis (Doctor of Science in Technology)-Universidade de Tecnologia de Helsinque, Helsinque, 2005.

RASMUSSEN, R. O.; BERNHARD, R. J.; SANDBERG, U.; MUN, E. P. **The Little Book of Quieter Pavements**. FHWA,USA. FHWA -IF-08-004. 2007. 37 p.

REIS, Rafael Marçal Martins de. **Investigação de campo e laboratório sobre revestimento asfáltico ultra delgado**. 2012. 319 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RUIZ RUBIO, Aurelio. Artigo: **Panorámica española de las mezclas bituminosas en caliente**. Revista Carreteras N° 149, p. 27-37. Madrid, 2006.

SANDBERG, U. - **Tyre / Road Noise – Myths and Realities**, INTERNOISE proceedings, 2001.

SANDBERG, mU.; EJSMONT J. **Tyre/road Noise Reference Book**. Informex, Kisa, Sweden, 2002.

SILENCE PROJECT, **Practitioner Handbook for Local Noise Action Plans**, 2008. 128 p.

SILVIA (SILENDA VIA) - **Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control – SilVia Deliverable 07: Recommendations on Specifications for Tyre and Vehicle Requirements**”, TUW, março de 2004.

SOUZA, Sérvulo Andrade de. **Avaliação da Capacidade de Escoamento da Água em Mistura Asfáltica Drenante: Proposta de Ensaio de Laboratório**. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SPECHT, L. P; KOHLER, R; POZZOBON, C.E; CALLAI, S.C. **Causas, formas de medição e métodos para mitigação do ruído decorrente do trafego de veículos**. Fortaleza, v.30 ,n.1,p.12-26,2009.

TAREFDER, R e ZAMAN, R. Correlating asphalt concrete modulus with rut potencial. MAIREPAV03. Third international symposium on

maintenance and rehabilitation of pavements and technological control, Guimarães, Portugal, 2003.

THOMAS, Romaint. **Premiere approche de la capacite isolante des enrobes a forte porosite. Determination de la conductivite thermique au moyen de la methode par comparaison.** LUCREB – Laboratoire Universitaire sur les Chaussées, Routes et Enrobés Bitumineux. 2011.

TIWARIA, V.; SHUKLAA, A.; BOSEB, A. **Acoustic properties of cenosphere reinforced cement and asphalt concrete.** Appl. Acoust 65(3), 263-75, 2004.

TSAI, B.W.; FAN, A.; HARVEY, J.T.; MONISMITH, C.L. **Improved methodology for mix design of Open-Graded-Friction Courses.** UCPRC-RR-2013-06. California Department of Transportation, EEUU, 2012.

WHO. **Guidelines for community noise.** World Health Organization. Genova, 1999.

WHO. **Burden of disease from environmental noise** – Quantification of healthy life years lost in Europe. World Health Organization. – Regional office for Europe and EC-JRC, 2011.