

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL –  
PPGEC**



Ramon Mendes Knabben

**ESTUDO DO RUÍDO PNEU-PAVIMENTO E DA ABSORÇÃO  
SONORA EM DIFERENTES REVESTIMENTOS DE PAVIMENTO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, como requisito exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Glicério Trichês

Florianópolis

2012



Ramon Mendes Knabben

## **ESTUDO DO RUÍDO PNEU-PAVIMENTO E DA ABSORÇÃO SONORA EM DIFERENTES REVESTIMENTOS DE PAVIMENTO**

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.

Florianópolis, 24 de maio de 2012.

---

Prof. Dr. Roberto Caldas de Andrade Pinto  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFSC

### **Banca Examinadora:**

---

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

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Laura Maria Goretti da Motta  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Prof. Dr. Samir N.Y.Gerges  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Antônio Fortunato Marcon  
Universidade Federal de Santa Catarina



***Dedicatória:***

*Aos meus pais, Rogério de Oliveira Knabben e Carla Maria Mendes Knabben. Obrigado por todo o incentivo, esta conquista é nossa.*



## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Glicério Trichês pela sua orientação e amizade. Agradeço sua dedicação e paciência na orientação de todas as etapas deste trabalho.

Ao Professor Samir Gerges, do L.V.A. da Engenharia Mecânica da UFSC, pela amizade e por toda a sua ajuda durante a execução da dissertação.

Aos Professores Antônio Fortunato Marcon e Orlando Martini de Oliveira por toda a ajuda durante o meu mestrado.

À Professora Laura Maria Goretti da Motta pelo carinho e conselhos.

À Professora Liseane Fontes por todo seu apoio.

À minha namorada por todo o incentivo e apoio nas horas de dificuldade.

À empresa KTOP Engenharia e Projetos pelos equipamentos fornecidos para a realização deste trabalho.

Aos colegas do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, em especial Carlos Quintero por toda sua ajuda no laboratório de pavimentação.

Ao meu amigo Joe Arnaldo Villena Del Carpio por toda a sua ajuda nos ensaios para realização desta dissertação.

Ao meu amigo João Victor Staub de Melo.

À minha irmã Mariana Mendes Knabben pelo apoio e carinho.

Muito Obrigado!



## RESUMO

O ruído gerado pelo tráfego veicular se constitui atualmente um dos problemas ambientais mais relevantes em zonas urbanas. A geração e a propagação do ruído dos veículos são regidas por vários e diferentes mecanismos. Entretanto, o ruído gerado pelo acoplamento pneu-pavimento passa ser a fonte dominante quando o veículo trafega em velocidades acima de 50 km/h. O ideal seria que não houvesse a geração de ruído durante a rolagem dos pneus, mas, como isso até o momento é impossível, há que se buscar meios para a mitigação deste ruído, e uma delas é através da otimização dos revestimentos asfálticos. Nesse trabalho foram confeccionadas em laboratório corpos de prova Marshall e placas de concreto asfáltico para quatro diferentes tipos de mistura (mistura densa asfáltica comum, mistura densa com asfalto-borracha, revestimento drenante com diferentes volumes de vazios entre 22 e 28% e uma camada porosa de atrito) com o objetivo de determinar o coeficiente de absorção sonora e as características de drenabilidade. Foram extraídos três corpos de prova de cada placa através da sonda rotativa e verificou-se o comportamento acústico, utilizando um sistema de medição em laboratório com o tubo de impedância. Ainda este trabalho apresenta um estudo em campo sobre a geração de ruído resultante do acoplamento entre o pneu e o pavimento, realizado na Avenida Beira-Mar, na Rua Vereador Osni Ortega em Florianópolis e na BR 282 que liga a cidade de Lages à Campos Novos (Santa Catarina, Brasil). Para tal fim, medidas do nível de pressão sonora foram feitas utilizando um sonômetro sobre quatro misturas asfálticas diferentes: mistura densa envelhecida (25 anos), executada com asfalto convencional, mistura nova, faixa C do DNIT, executada com asfalto-borracha, microrrevestimento e uma camada porosa de atrito (CPA). Foram realizadas medições de nível de ruído máximo ( $LA_{máx}$ ) utilizando algumas diretrizes do método CPB (Controlled Pass-Bay) executado com um veículo de teste, para três diferentes velocidades (60, 80 e 100 km/h) e também medições de nível de ruído equivalente ( $LA_{eq}$ ) do fluxo veicular em três locais diferentes da Avenida Beira-Mar. Como a Avenida estava sendo restaurada o objetivo foi quantificar o ruído provocado pelo tráfego em diferentes momentos do dia e verificar se existiu uma diferença significativa nestes níveis dependendo do tipo de revestimento avaliado. Os resultados do ensaio de absorção sonora mostraram que todas as misturas porosas obtiveram boa capacidade de absorção acústica e que a absorção sonora é dependente do volume de vazios, vazios comunicantes e espessura

da amostra. Os resultados em campo mostraram redução do nível de pressão sonora ( $LA_{máx}$ ) após a restauração do pavimento da Beira Mar e que a CPA mostrou o menor nível de pressão sonora gerado dentre os revestimentos estudados. O estudo conclui que para os tipos de revestimento avaliados, a velocidade do veículo e a macrotextura da mistura asfáltica influenciam diretamente o ruído produzido.

Palavras-chave: Absorção sonora. Mistura asfáltica. Ruído pneu-pavimento.

## ABSTRACT

The noise generated by the coupling between tire/pavement constitutes itself nowadays as one of the most relevant environmental problems in urban areas. The generation and the propagation of noise from vehicles is ruled by several and different mechanisms. However, the noise generated by the tire/pavement coupling comes to be the dominant source when the vehicle travels at speeds over 50 km/h. The ideal would be that there were no generations of noise during the rolling of the tires. As this, up to this moment, is impossible, one has to seek means for the mitigation of this noise through more acoustically absorbent surfaces. In this work were made in the laboratory Marshall samples and concrete asphalt slabs for four different types of mixes (dense mix asphalt common, dense mix with asphalt-rubber, drainage asphalt concrete with different volumes of voids between 22 and 28% and a porous asphalt) with the goal to determine the sound absorption coefficient and permeability characteristics. Were extracted three samples of each slab by rotating perforation and found the sound absorption coefficient, using a measuring system in the laboratory with the impedance tube. This work still presents a study about the generation of noise in field resulting from the coupling between tire/pavement, conducted on Beira-Mar Avenue, Vereador Osni Ortega Street in Florianópolis, Santa Catarina, Brazil and BR 282 which connects the cities of Lages and Campos Novos (Santa Catarina, Brazil). The measurements of sound pressure level were made with a sonometer under four surfaces: aged thick mixture (25 years), executed with conventional asphalt, new mixture, DNIT's C band, executed with rubber-asphalt, micro asphalt surface and porous asphalt. Were conducted measurements of maximum noise levels ( $L_{Amax}$ ) using only one vehicle, for 3 different speeds (60, 80 and 100 km/h) and also measurements of equivalent noise level ( $L_{eq}$ ) for 3 points on the Beira-Mar Avenue. As the avenue was being restored the objective was to quantify the noise caused by the traffic in different moments of the day and check if there was a significant difference in these levels depending on the type of coating evaluated. The results of the sound absorption test showed that all porous mixtures had good sound absorption capacity and that the sound absorption is dependent on the volume of voids, interconnecting voids and thickness of the sample. The results in the field showed a reduction of sound pressure level ( $L_{Amax}$ ) after the restoration of the pavement of the Beira-Mar Avenue and the porous asphalt was the quieter between all the surfaces in the study. The study

concludes that for all surfaces evaluated, the vehicle speed, and macrotexture of the asphalt mixture influence directly the noise generated by the tire/pavement coupling.

**Keywords:** Sound absorption. Asphalt mixture. Pavement-tire noise

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Parâmetros físicos da onda sonora (KIELY, 1999).....	36
Figura 2.2 - Escala comparativa da pressão sonora e do nível de pressão sonora (WAYSON, 1998). .....	37
Figura 2.3 - Decréscimo do nível de pressão sonora em função do decréscimo de volume de tráfego (RAITANEN, 2005). .....	38
Figura 2.4 - Circuitos de compensação sonora A,B e C (SANDBERG e EJSMONT, 2002).....	39
Figura 2.5 - Formas de espectros de frequência do mesmo som (RASMUSSEN <i>et al.</i> , 2007).....	40
Figura 2.6 - Frequência característica do som para uma velocidade de 60 km/h para um automóvel (45th GRB, 2007). .....	41
Figura 2.7 - Frequência característica do som para uma velocidade de 60 km/h para um veículo pesado (45th GRB, 2007). .....	41
Figura 2.8 - Nível de ruído rodoviário e nível de ruído equivalente, $L_{Aeq}$ , (FEHRL, 2006).....	43
Figura 2.9 - Definição dos níveis de som (RASMUSSEN <i>et al.</i> , 2007).....	44
Figura 2.10 - Estrutura típica de um pneu .....	46
Figura 2.11 – Esquema ilustrativo do mecanismos mecânicos do ruído pneu-pavimento – vibrações radiais (RASMUSSEN <i>et al.</i> , 2007). .....	48
Figura 2.12 - Esquema ilustrativo do mecanismos mecânicos do ruído pneu-pavimento – vibrações na parede lateral (RASMUSSEN <i>et al.</i> , 2007). .....	48
Figura 2.13 - Esquema ilustrativo das vibrações causadas pela aceleração ou a frenagem do veículo (BERNHARD e WAYSON, 2005). .....	49
Figura 2.14 - Esquema ilustrativo da adesão na área de contato entre a banda de rodagem e a superfície do pavimento (RASMUSSEN <i>et al.</i> , 2007).....	49
Figura 2.15 - Esquema ilustrativo do bombeamento do ar (RASMUSSEN <i>et al.</i> , 2007).....	50
Figura 2.16 - Esquema ilustrativo da ressonância de Helmholtz (SANDBERG e EJSMONT, 2002). .....	51
Figura 2.17 - Esquema ilustrativo da ressonância tubular ou efeito “buzina” (SANDBERG e EJSMONT, 2002). .....	51
Figura 2.18 - Efeito da distância na percepção do ruído a partir de uma fonte pontual (HANSON <i>et al.</i> , 2004).....	53
Figura 2.19 - Efeito da distância sobre uma linha de fontes de ruído situada ao longo de uma superfície pavimentada (HANSON <i>et al.</i> , 2004).....	54
Figura 2.20 - Efeito da adição de fontes de ruído (HANSON <i>et al.</i> , 2004).....	55

Figura 2.21 - Adição dos níveis de pressão sonora (GERGES e ARENAS, 2010).....	57
Figura 2.22 - Subtração do ruído de fundo (GERGES e ARENAS, 2010).....	58
Figura 2.23 - Espectros de absorção em função da espessura do revestimento (FEHRL, 2006). ....	59
Figura 2.24 - Típica absorção sonora para revestimentos porosos com diferentes espessuras (HAMET <i>et al.</i> , 1990 <i>apud</i> SANDBERG e EJSMONT, 2002).....	60
Figura 2.25 - Tubo de impedância (HANSON <i>et al.</i> , 2004).....	66
Figura 2.26 - Comparação dos coeficientes de absorção acústica obtidos em corpos de prova de espessuras diferentes, da mistura tipo CPA (LÁO, 2004) .....	69
Figura 2.27 - Coeficiente de absorção sonora (FEHRL, 2006) .....	69
Figura 2.28 - Curva de absorção sonora de uma mistura asfáltica drenante (ASTRANA JUNIOR 2006).....	70
Figura 2.29 - Medida do ruído pelo método estatístico de passagem (SPB) (CERATTI <i>et al.</i> , 2009).....	76
Figura 2.30 - Posicionamento do microfone: (a) vista superior e (b) vista frontal .....	76
Figura 2.31 - Definição da zona onde não é permitida a existência de quaisquer barreiras de segurança (NORMA ISO 11819-1:1997).....	77
Figura 2.32 - Equipamento de ensaio do método CPX (HANSON <i>et al.</i> , 2005).....	80
Figura 2.33 - Pneus de referência CPX: (a) ASTM SRTT e (b) Avon AV4 (MORGAN <i>et al.</i> , 2009).....	80
Figura 2.34 - Posicionamento dos microfones no trailer CPX (NORMA ISO 11819-2: 2010). ....	82
Figura 2.35 - Método da Passagem Controlada (CPB) vs. Método da Estrita Proximidade (CPX) (LÉDÉE, 2006). ....	83
Figura 2.36 - Método da superfície estendida (BERENGIER <i>et al.</i> , 2001).....	84
Figura 2.37 - Método Coast-By (LÁO, 2004). ....	85
Figura 2.38 - Método do tambor (SPECHT <i>et al.</i> , 2009). ....	87
Figura 2.39 - Influência do tamanho máximo dos agregados no ruído gerado pela interação pneu-pavimento (BENDTSEN, 2006).....	89
Figura 2.40 - Desempenho acústico ao longo do tempo para automóveis com velocidade de referência de 50 km/h (FEHRL, 2006). ....	92
Figura 2.41 - Desempenho acústico do revestimento ao longo do tempo para automóveis com velocidade de referência de 110 km/h (FEHRL, 2006).....	92

Figura 2.42 - Desempenho acústico ao longo do tempo para os veículos médios com velocidade de referência de 85 km/h (FEHRL, 2006).	93
Figura 2.43 - Desempenho acústico ao longo do tempo para os veículos pesados com velocidade de referência de 85 km/h (FEHRL, 2006).	93
Figura 2.44 - Intervalos de comprimento de onda da textura da superfície e a influência nas características da superfície (PIARC, 1991).	96
Figura 2.45 - Comprimentos de onda e profundidades de textura (DMRB-HD 36/06, 2006).	97
Figura 2.46 - Detalhe da superfície (DMRB-HD 36/06, 2006).	98
Figura 2.47 - Sequência do ensaio da mancha de areia (FONTES, 2009).	100
Figura 2.48 - Ensaio do pêndulo britânico (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2007).	102
Figura 2.49 - Relação entre a resistência à derrapagem e o ruído gerado pela interação pneu-pavimento (OSHINO <i>et al.</i> , 2001 <i>apud</i> SANDBERG e EJSMONT, 2002).	103
Figura 2.50 - Níveis de pressão sonora versus temperatura do ar para 6 tipos de pneus para 80 km/h (LANDSBERGER, 2001 <i>apud</i> SANDBERG e EJSMONT, 2002).	106
Figura 2.51 - Relação entre temperatura do ar e o nível de pressão sonora para uma Mercedes com pneu Pirelli P600 trafegando em pavimento flexível com velocidades de 50, 80 e 110 km/h (KUIJPERS, 2002).	106
Figura 2.52 - Relação entre temperatura do ar e o nível de pressão sonora para uma Mercedes com pneu da Goodyear Eagle NCT2 trafegando em pavimento rígido para velocidades de 50, 80 e 110 km/h (KUIJPERS, 2002).	107
Figura 2.53 - Ruído pneu-pavimento para diferentes categorias de veículo (SANDBERG e EJSMONT, 2002).	111
Figura 2.54 - Referência de NPS da FHWA em função da velocidade (HANSON <i>et al.</i> , 2004).	111
Figura 2.55 - Penetração do ar nos vazios do concreto asfáltico drenante (Japan Highway Research Institute, 1999).	114
Figura 2.56 - Ensaio de drenabilidade em placas (carga variável) (DUMKE, 2005).	115
Figura 2.57 - Ensaio de drenabilidade horizontal (OLIVEIRA, 2003).	116
Figura 2.58 - Drenabilidade das placas (DUMKE, 2005).	117
Figura 2.59 - Influência do tipo de revestimento na geração de ruído para V=80 km/h (NELSON e PHILIPS, 1997 <i>apud</i> TEIXEIRA <i>et al.</i> , 2001).	117
Figura 2.60 - Comparação do ruído entre o revestimento denso e drenante para V=60 Km/h, medido com o carro modelo Toyota Corolla (GOLEBIEWSKI <i>et al.</i> , 2002).	118

Figura 2.61 - Coeficiente de absorção dos revestimentos drenantes e denso (VAN HEYSTRÆTEN <i>et al.</i> , 1990 <i>apud</i> MEURER, 2001).....	119
Figura 2.62 - Valores de emissão sonora para diferentes tipos de pavimentos para veículos leves (HAIDER, 2010).....	119
Figura 2.63 - Configuração de um revestimento drenante constituída por duas camadas porosas (BENDTSEN e ANDERSEN, 2005).....	120
Figura 2.64 - Ruído para 3 tipos de revestimento (MEIARASHI, 2003). 122	122
Figura 2.65 - Ruído gerado por caminhões pesados para diferentes volume de vazios do revestimento (MEIARASHI, 2003).....	122
Figura 2.66 - Ruído gerado por automóveis para diferentes volume de vazios do revestimento (MEIARASHI, 2003).....	123
Figura 2.67 - Nível de pressão sonora para veículos leves (FUJIWARA <i>et al.</i> , 2004).....	124
Figura 2.68 - Nível de pressão sonora para veículos pesados (FUJIWARA <i>et al.</i> , 2004).....	124
Figura 3.1 - Diagrama das etapas do trabalho.....	128
Figura 3.2 - Curva granulométrica da mistura drenante (MEURER FILHO, 2001).....	131
Figura 3.3 - Compactador de placas LCPC. ....	134
Figura 3.4 - Drenômetro. ....	135
Figura 3.5 - Equipamentos do ensaio da mancha de areia.....	138
Figura 4.1 - Preparação do ensaio de adesividade (a esquerda: ligante comum, a direita: ligante modificado com borracha).....	145
Figura 4.2 - Resultado do ensaio de adesividade (a esquerda: ligante comum, a direita: ligante modificado com borracha).....	145
Figura 4.3 - Características do CAP modificado por borracha.....	146
Figura 4.4 - Características do CAP 50-70 convencional.....	146
Figura 4.5 - Curva granulométrica da mistura densa comum Faixa B do DNIT.....	148
Figura 4.6 - Curvas granulométricas das misturas drenantes.....	149
Figura 4.7 - Ensaio da massa específica máxima – procedimento à vácuo.....	150
Figura 4.8 - Curva granulométrica da CPA.....	151
Figura 4.9 - Curva granulométrica da mistura asfáltica com borracha.....	152
Figura 4.10 - Curvas granulométricas das misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa.....	153
Figura 4.11 - Execução da compactação Marshall.....	154
Figura 4.12 - Corpos de prova Marshall (mistura asfáltica densa comum).....	154

Figura 4.13 - Mistura asfáltica drenante .....	155
Figura 4.14 - Ensaio da determinação da massa específica aparente com parafina .....	156
Figura 4.15 - Corpos de prova Marshall (mistura asfalto-borracha).....	157
Figura 4.16 - Preparação da massa para confecção das placas .....	159
Figura 4.17 - Procedimento de compactação das placas.....	159
Figura 4.18 - Drenabilidade das placas de concreto asfáltico.....	160
Figura 4.19 - Ensaio de mancha de areia nas placas de concreto asfáltico	161
Figura 4.20 - Extração dos Cps das placas de concreto asfáltico .....	162
Figura 4.21 - Corpo de prova Marshall antes e depois do ensaio de Cântabro (CPA).....	165
Figura 4.22 - Ensaio de resistência à tração e de módulo de resiliência...	166
Figura 4.23 - Colocação da amostra no tubo de impedância .....	168
Figura 4.24 - Equipamentos para medição da absorção sonora (Laboratório de vibrações acústicas LVA-UFSC).....	168
Figura 4.25 - Ensaio de absorção sem amostra.....	169
Figura 4.26 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P1 com 12,5 mm de diâmetro máximo do agregado) .....	170
Figura 4.27 - Esquema do ressonador Helmholtz.....	171
Figura 4.28 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P1 com 9,5 mm de diâmetro máximo do agregado) .....	172
Figura 4.29 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P2 com 12,5 mm de diâmetro máximo do agregado) .....	173
Figura 4.30 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P2 com 9,5 mm de diâmetro máximo do agregado) .....	174
Figura 4.31 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P3 com 12,5 mm de diâmetro máximo do agregado) .....	175
Figura 4.32 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P3 com 9,5 mm de diâmetro máximo do agregado) .....	176
Figura 4.33 - Curva de absorção sonora (mistura drenante de dupla camada P1).....	177
Figura 4.34 - Curva de absorção sonora (mistura drenante de dupla camada P2).....	178
Figura 4.35 - Curva de absorção sonora (mistura drenante de dupla camada P3).....	179
Figura 4.36 - Curva de absorção sonora (camada porosa de atrito - CPA) .....	179
Figura 4.37 - Curva de absorção sonora (mistura asfáltica densa com borracha).....	180

Figura 4.38 - Curva de absorção sonora (mistura asfáltica densa comum) .....	181
Figura 4.39 - Influência do volume de vazios no pico de absorção sonora (mistura drenante).....	182
Figura 4.40 - Influência do volume de vazios comunicantes no pico de absorção sonora para $D_{m\acute{a}x} = 9,5$ mm (mistura drenante) .....	183
Figura 4.41 - Influência do volume de vazios comunicantes no pico de absorção sonora para $D_{m\acute{a}x} = 12,5$ mm (mistura drenante) .....	183
Figura 4.42 - Comparação entre as curvas de absorção com $D_{m\acute{a}x} = 9,5$ mm e 12,5 mm, para P1 .....	184
Figura 4.43 - Comparação entre as curvas de absorção com $D_{m\acute{a}x} = 9,5$ mm e 12,5 mm, para P2 .....	185
Figura 4.44 - Comparação entre as curvas de absorção com $D_{m\acute{a}x} = 9,5$ mm e 12,5 mm, para P3 .....	185
Figura 4.45 - Influência do tamanho máximo do agregado no pico de absorção sonora .....	186
Figura 4.46 - Curva de absorção sonora para diferentes tipos de revestimentos asfálticos (misturas drenantes com $D_{m\acute{a}x} = 12,5$ mm).....	187
Figura 4.47 - Curva de absorção sonora para diferentes tipos de revestimentos asfálticos (misturas drenantes com $D_{m\acute{a}x} = 9,5$ mm).....	188
Figura 4.48 - Absorção sonora, resistência à tração e desgaste de Cântabro para mistura drenante e CPA .....	189
Figura 4.49 - Comparativo entre a misturara drenante de dupla camada e camada simples (P3).....	190
Figura 4.50 - Comparativo entre a misturara drenante de dupla camada e camada simples (P2).....	190
Figura 4.51 - Comparativo entre a misturara drenante de dupla camada e camada simples (P1).....	191
Figura 4.52 - Curvas de absorção sonora dos revestimentos drenantes de dupla camada .....	192
Figura 4.53 - Influência da espessura na absorção sonora.....	193
Figura 4.54 - Correlação entre o coeficiente de absorção sonora e a porcentagem de volume de vazios.....	194
Figura 4.55 - Correlação entre o coeficiente de absorção sonora e a porcentagem de volume de vazios comunicantes .....	194
Figura 5.1 – Local de medição Km 9+400 UFSC. ....	196
Figura 5.2 - Local de medição TITRI. ....	196
Figura 5.3 - Local de medição Pizzaria Paparella.....	196
Figura 5.4 - Textura da superfície Km 9+400 UFSC (envelhecida).....	197

Figura 5.5 - Textura da superfície TITRI (envelhecida).....	197
Figura 5.6 - Textura da superfície Pizzaria Papparella (envelhecida). .....	197
Figura 5.7 - Textura da superfície com mistura Asfalto-Borracha (segmento já restaurado). .....	198
Figura 5.8 - Equipamento SOLO N° 1163q Classe 1 da marca 01 dB-Metravib. ....	198
Figura 5.9 - Sonômetro instalado no campo. ....	199
Figura 5.10 - Dimensões do veículo de teste usado nesta pesquisa. ....	199
Figura 5.11 - Detalhes das ranhuras de um dos pneus Goodyear 205/55 R15 91V usado neste experimento. ....	200
Figura 5.12 - Ensaio da mancha de areia ((a) Papparella, (b) TITRI, (c) UFSC). ....	200
Figura 5.13 - Ensaio da mancha de areia realizado no revestimento asfalto-borracha. ....	201
Figura 5.14 - Ensaio de drenabilidade (Av. Beira-Mar) .....	205
Figura 5.15 - Posicionamento do Sonômetro (km 9+400). ....	206
Figura 5.16 - Medida do nível de pressão sonora máximo individual gerado pela ação do tráfego na Beira Mar. ....	209
Figura 5.17 - Análise estatística dos resultados. ....	210
Figura 5.18 - Local de medição próximo a Superintendência Regional da Polícia Federal. ....	212
Figura 5.19 - Local de medição próximo ao restaurante Habib's.....	212
Figura 5.20 - Local de medição próximo a Pizzaria Papparella. ....	212
Figura 5.21 - Textura da Superfície local de medição próximo Superintendência Regional da Polícia Federal (antes da restauração). ....	213
Figura 5.22 - Textura da Superfície local de medição próximo Restaurante Habib's (antes da restauração). ....	213
Figura 5.23 - Textura da Superfície local de medição próximo Pizzaria Papparella (antes da restauração). ....	213
Figura 5.24 - Textura do revestimento com Asfalto-Borracha (após a restauração). ....	214
Figura 5.25 - Nível de Pressão Sonora Médio dos Pontos Avaliados. ....	223
Figura 5.26 - Aspecto da textura da camada porosa de atrito .....	225
Figura 5.27 - Ensaio da mancha de areia realizado na CPA .....	225
Figura 5.28 - Medida do nível de pressão sonora máximo individual gerado pela ação do tráfego na Camada Porosa de Atrito. ....	227
Figura 5.29 - Análise estatística do nível de pressão sonora máximo na CPA .....	229

Figura 5.30 – Esquema do local das medições (Rua Vereador Osni Ortega)	230
Figura 5.31 - Ensaio da mancha de areia realizado no microrrevestimento	231
Figura 5.32 - Medida do nível de pressão sonora máximo individual gerado pela ação do tráfego no microrrevestimento	234
Figura 5.33 - Análise estatística do nível de pressão sonora máximo no microrrevestimento	235
Figura 5.34 - Medida do nível de pressão sonora máximo individual gerado pela ação do tráfego para três revestimentos asfálticos deste estudo	236
Figura 5.35 - Análise estatística do nível de pressão sonora para três revestimentos asfálticos deste estudo	236
Figura 5.36 - Influência da macrotextura no nível de pressão sonora	238
Figura 5.37 - Influência da drenabilidade no nível de pressão sonora	238

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Velocidade de cruzamento quando o ruído pneu-pavimento é mais importante que o ruído do motor (SANDBERG e EJSMONT, 2002). .....	45
Quadro 2.2 - Absorção Acústica de materiais utilizados na construção civil norma NBR 12.179/1992.....	71
Quadro 2.3 - Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB(A) (NBR 10151/2000). ....	74
Quadro 2.4 - Velocidades de referência ( $V_{ref}$ ) e fatores preponderantes ( $W_x$ ) (NORMA ISO 11819-1:1997). ....	78
Quadro 2.5 - Classificação da textura da superfície de rolamento (FERNANDES e DOMINGUES, 1993). ....	97
Quadro 2.6 - Classificação da macrotextura pelo método da Mancha de Areia (DNIT, 2006a).....	100
Quadro 2.7 - Classificação da macrotextura segundo o método da Mancha de Areia (PASQUET, 1968). ....	101
Quadro 2.8 - Avaliação das condições de aderência pneu pavimento ou resistência à derrapagem (DNIT, 2006b).....	102
Quadro 2.9 - Estimativa do efeito da água nos níveis sonoros (SANDBERG e EJSMONT, 2002). ....	104
Quadro 2.10 - Influência da água na geração de ruído utilizando o método do SPB (FREITAS <i>et al.</i> , 2006). ....	105
Quadro 2.11 - Resultados do ruído gerado para diferentes tipos de pneus (HANSON <i>et al.</i> , 2004). ....	110
Quadro 2.12 - Faixas granulométricas e requisitos de dosagem da Camada Porosa de Atrito (DNER-ES 386/99).....	113
Quadro 3.1 - Granulometria da mistura asfáltica densa comum.....	130
Quadro 3.2 - Granulometria da mistura drenante (MEURER FILHO, 2001). .....	132
Quadro 3.3 - Granulometria da camada porosa de atrito .....	132
Quadro 3.4 - Granulometria da mistura asfáltica com borracha .....	133
Quadro 3.5 - Configurações dos corpos de prova.....	133
Quadro 3.6 - Configuração das placas das misturas asfálticas .....	135
Quadro 4.1 - Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles .....	143
Quadro 4.2 - Resultados do ensaio de durabilidade para fração “c” e “d”	144
Quadro 4.3 - Resultados do ensaio de absorção do agregado graúdo.....	144
Quadro 4.4 - Resultados do ensaio de penetração .....	146

Quadro 4.5 - Granulometria dos agregados e composição da mistura asfáltica densa comum faixa B do DNIT .....	147
Quadro 4.6 - Características físicas dos agregados.....	148
Quadro 4.7 - Granulometria da mistura drenante .....	149
Quadro 4.8 - Densidade dos agregados das misturas drenantes .....	150
Quadro 4.9 - Composição granulométrica da CPA .....	150
Quadro 4.10 - Granulometria dos agregados e composição da mistura asfáltica densa com borracha faixa C .....	152
Quadro 4.11 - Volume de vazios dos corpos de prova Marshall (mistura asfáltica densa comum).....	154
Quadro 4.12 - Volume de vazios dos corpos de prova Marshall (mistura drenante).....	156
Quadro 4.13 - Volume de vazios dos corpos de prova Marshall (camada porosa de atrito).....	157
Quadro 4.14 - Volume de vazios dos corpos de prova Marshall (mistura asfáltica com borracha).....	158
Quadro 4.15 - Drenabilidade das placas de concreto asfáltico .....	161
Quadro 4.16 - Macrotextura das placas de concreto asfáltico .....	162
Quadro 4.17 - Volume de vazios dos corpos de prova extraídos das placas de misturas asfálticas .....	163
Quadro 4.18 - Vazios comunicantes (misturas drenante e CPA).....	164
Quadro 4.19 - Resultados do ensaio de Cântabro.....	165
Quadro 4.20 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	166
Quadro 4.21 - Ensaio de módulo de resiliência .....	167
Quadro 5.1 - Macrotextura Km 9+400 UFSC (mistura asfáltica densa comum envelhecida com desgaste da argamassa). .....	201
Quadro 5.2 - Macrotextura TITRI (mistura asfáltica densa comum envelhecida com desgaste da argamassa). .....	202
Quadro 5.3 - Macrotextura Papparella (mistura asfáltica densa comum envelhecida com desgaste da argamassa). .....	202
Quadro 5.4 - Macrotextura Papparella Após a Restauração (Asfalto-Borracha).....	202
Quadro 5.5 - Resumo da macrotextura. ....	203
Quadro 5.6 - Macrotextura antes da restauração, na praça perto do Shopping Beira-Mar. ....	204
Quadro 5.7 - Macrotextura antes da restauração, perto do El Divino.....	204
Quadro 5.8 - Macrotextura depois da restauração, perto do Shopping Beira-Mar. ....	205

Quadro 5.9 - Macrotextura depois da restauração, perto do El Divino. ...	205
Quadro 5.10 - Drenabilidade das estações de teste (Av. Beira-mar para o ensaio de $LA_{máx}$ ).....	206
Quadro 5.11 - Nível de pressão sonora (Mistura asfáltica densa comum km 9+400 USFC e mistura asfáltica densa comum TITRI), ambas envelhecidas.....	207
Quadro 5.12 - Nível de pressão sonora da estação de teste Papparella (Mistura asfáltica densa comum envelhecida e mistura asfáltica com borracha).....	208
Quadro 5.13 – Macrotextura do local próximo a Superintendência Regional da Policia Federal (Mistura densa envelhecida, antes da restauração).....	214
Quadro 5.14 – Macrotextura do local próximo ao Restaurante Habib's (Mistura densa envelhecida, antes da restauração).....	215
Quadro 5.15 – Macrotextura do local próximo a Papparella (Mistura densa envelhecida, antes da restauração).....	215
Quadro 5.16 - Macrotextura em frente ao Papparella (Mistura asfáltica com borracha, após a restauração).....	215
Quadro 5.17 - Resumo da macrotextura .....	216
Quadro 5.18 - Nível de pressão sonora na Superintendência Regional da Policia Federal (antes da restauração). .....	217
Quadro 5.19 - Nível de pressão sonora restaurante Habibs (antes da restauração).....	218
Quadro 5.20 - Nível de pressão sonora pizzaria Papparella (antes da restauração).....	219
Quadro 5.21 - Nível de pressão sonora na Superintendência Regional da Policia Federal (depois da restauração). .....	220
Quadro 5.22 - Nível de pressão sonora restaurante Habibs (depois da restauração).....	221
Quadro 5.23 - Nível de pressão sonora pizzaria Papparella (depois da restauração).....	222
Quadro 5.24 - Nível de pressão sonora ( $LA_{eq}$ ) nas três estações de testes .....	223
Quadro 5.25 - Macrotextura na Camada Porosa de Atrito.....	226
Quadro 5.26 - Drenabilidade da estação de teste (Camada Porosa de Atrito) .....	226
Quadro 5.27 - Nível de pressão sonora (Camada Porosa de Atrito). .....	228
Quadro 5.28 - Macrotextura Rua Vereador Osni Ortiga (Microrrevestimento).....	231

Quadro 5.29 - Drenabilidade da estação de teste (Rua Vereador Osni Ortiga).....	232
Quadro 5.30 - Nível de pressão sonora (Microrrevestimento).....	233

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	29
1.2 OBJETIVOS.....	31
<b>1.2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>31</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>31</b>
1.3 JUSTIFICATIVA .....	31
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	33
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>35</b>
2.1 PARÂMETROS FÍSICOS DO RUÍDO .....	35
2.2 FREQUÊNCIA.....	38
2.3 NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA (NPS).....	42
2.4 GERAÇÃO DO RUÍDO PROVOCADO PELO CONTATO PNEU-PAVIMENTO.....	44
<b>2.4.1 Mecanismos de Geração Mecânica .....</b>	<b>47</b>
<b>2.4.2 Mecanismos de Geração Aerodinâmica .....</b>	<b>50</b>
2.5 PROPAGAÇÃO DO RUÍDO GERADO PELO TRÁFEGO .....	52
2.6 ABSORÇÃO SONORA .....	58
<b>2.6.1 Considerações Iniciais.....</b>	<b>58</b>
<b>2.6.2 Materiais de Absorção Sonora .....</b>	<b>61</b>
<b>2.6.3 Medida do Coeficiente de Absorção Sonora .....</b>	<b>63</b>
<b>2.6.4 Impedância Acústica .....</b>	<b>67</b>
2.7 SONÔMETROS .....	71
2.8 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO RUÍDO PNEU-PAVIMENTO.....	72
<b>2.8.1 Ruído Ambiental .....</b>	<b>73</b>
2.8.1.1 Nível sonoro dia-noite .....	74
2.8.1.2 Índice de ruído do tráfego.....	75
<b>2.8.2 Avaliação do Ruído Pneu-Pavimento .....</b>	<b>75</b>
2.8.2.1 Método estatístico de passagem (SPB) .....	75
2.8.2.2 Método da estrita proximidade (CPX) .....	79
2.8.2.3 Método da passagem controlada (CPB).....	82
2.8.2.4 Método da superfície estendida .....	84
2.8.2.5 Método Coast-By.....	85

2.8.2.6 Método do tambor (Drum - DR).....	86
2.9 FATORES QUE INFLUENCIAM O RUÍDO GERADO PELO TRÁFEGO DE VEÍCULOS .....	87
<b>2.9.1 Características do Revestimento do Pavimento.....</b>	<b>87</b>
2.9.1.1 Características físicas.....	87
2.9.1.2 Idade das camadas .....	91
2.9.1.3 Rigidez da superfície do revestimento .....	94
<b>2.9.2 Textura Superficial do Pavimento .....</b>	<b>95</b>
2.9.2.1 Definição da textura e sua relação com o ruído .....	95
2.9.2.2 Métodos de caracterização da textura .....	98
<b>2.9.3 Geração do Ruído na Presença de Água .....</b>	<b>103</b>
<b>2.9.4 Condições Climáticas (temperatura e vento) .....</b>	<b>105</b>
<b>2.9.5 Veículos .....</b>	<b>107</b>
2.9.5.1 Tipo de veículo .....	107
2.9.5.2 Pneu .....	108
2.9.5.3 Velocidade do veículo .....	110
2.10 TIPOS DE REVESTIMENTO E A REDUÇÃO DO RUÍDO .....	111
<b>2.10.1 Revestimento Asfáltico Poroso e Revestimento Asfáltico Drenante. ....</b>	<b>112</b>
<b>2.10.2 Revestimento Asfáltico com Borracha (revestimento elástico).....</b>	<b>121</b>
2.11 COMENTÁRIOS RELEVANTES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..	124
<b>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA DA PESQUISA.....</b>	<b>127</b>
3.1 METODOLOGIA UTILIZADA NO ESTUDO EM LABORATÓRIO... ..	128
<b>3.1.1 ETAPA 1 – Caracterização dos Materiais .....</b>	<b>129</b>
3.1.1.1 Agregados.....	129
3.1.1.2 Ligantes asfálticos .....	130
3.1.1.3 Composições granulométricas e teores de CAP das misturas .....	130
<b>3.1.2 ETAPA 2 – Confecção dos Corpos de Prova Marshall .....</b>	<b>133</b>
<b>3.1.3 ETAPA 3 – Confecção das Placas de Concreto Asfáltico.....</b>	<b>134</b>
<b>3.1.4 ETAPA 4 – Determinação da Drenabilidade, Porosidade e Macrotextura .....</b>	<b>135</b>
<b>3.1.5 ETAPA 5 – Ensaios Mecânicos .....</b>	<b>136</b>
<b>3.1.6 ETAPA 6 – Ensaio de Absorção Acústica .....</b>	<b>136</b>
3.2 METODOLOGIA UTILIZADA NO ESTUDO DE CAMPO.....	137
<b>3.2.1 ETAPA 7 - Avaliação do Ruído Gerado na Avenida Beira-Mar.....</b>	<b>137</b>

3.2.1.1	Escolha dos locais de avaliação .....	137
3.2.1.2	Macrot textura e drenabilidade .....	138
3.2.1.3	Método de medição do ruído .....	138
<b>3.2.2</b>	<b>ETAPA 8 – Avaliação do Ruído Gerado na Camada de CPA.....</b>	<b>139</b>
3.2.2.1	Escolha do local de avaliação .....	139
3.2.2.2	Macrot textura e drenabilidade .....	139
3.2.2.3	Método de medição do ruído .....	140
<b>3.2.3</b>	<b>ETAPA 9 – Avaliação do Ruído Gerado no Microrrevestimento .....</b>	<b>140</b>
3.2.3.1	Escolha do local de avaliação .....	140
3.2.3.2	Macrot textura e drenabilidade .....	140
3.2.3.3	Método de medição do ruído .....	141
<b>3.2.4</b>	<b>ETAPA 10 – Análise dos Resultados .....</b>	<b>141</b>
 <b>CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EM LABORATÓRIO .....</b>		<b>143</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	143
4.1.1	Agregados .....	143
4.1.2	Ligantes Asfálticos .....	145
4.1.3	Composições granulométricas.....	147
4.2	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA MARSHALL .....	153
4.2.1	Mistura asfáltica densa comum.....	153
4.2.2	Mistura asfáltica drenante.....	155
4.2.3	Camada porosa de atrito (CPA).....	156
4.2.4	Mistura asfáltica densa com borracha .....	157
4.3	CONFECÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO .....	158
4.4	DETERMINAÇÃO DA DRENABILIDADE E MACROTEXTURA DAS PLACAS.....	160
4.5	EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DAS PLACAS MOLDADAS 162	
4.6	ENSAIOS MECÂNICOS .....	165
4.7	ENSAIO DE ABSORÇÃO SONORA .....	167
4.7.1	Análise e comparação dos resultados do ensaio de absorção sonora .	181
 <b>CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EM CAMPO.....</b>		<b>195</b>
5.1	ANÁLISE DO RUÍDO GERADO NA BEIRA MAR.....	195

<b>5.1.1 Resultados das Medições em Campo do <math>L(A)_{máx}</math></b> .....	<b>195</b>
5.1.1.1 Locais das medições .....	195
5.1.1.2 Equipamento utilizado .....	198
5.1.1.3 Veículo de teste .....	199
5.1.1.4 Determinação da macrotextura dos revestimentos e da drenabilidade .....	200
5.1.1.5 Determinação dos níveis de pressão sonora ( $LA_{máx}$ ) .....	206
<b>5.1.2 Resultados das Medições em Campo do <math>L(A)_{eq}</math></b> .....	<b>211</b>
5.1.2.1 Localização dos pontos das medições.....	211
5.1.2.2 Determinação da macrotextura dos revestimentos.....	214
5.1.2.3 Determinação dos níveis de pressão sonora ( $LA_{eq}$ ) .....	216
<b>5.2 AVALIAÇÃO DO RUÍDO GERADO NA CAMADA DE CPA</b> .....	<b>224</b>
<b>5.2.1 Local das medições</b> .....	<b>224</b>
<b>5.2.2 Determinação da macrotextura do revestimento e da drenabilidade</b>	<b>225</b>
<b>5.2.3 Determinação dos níveis de pressão sonora (<math>LA_{máx}</math>)</b> .....	<b>226</b>
<b>5.3 AVALIAÇÃO DO RUÍDO GERADO NO MICRORREVESTIMENTO</b>	<b>229</b>
<b>5.3.1 Local das medições</b> .....	<b>230</b>
<b>5.3.2 Determinação da macrotextura do revestimento e da drenabilidade</b>	<b>230</b>
<b>5.3.3 Determinação dos níveis de pressão sonora (<math>LA_{máx}</math>)</b> .....	<b>232</b>
<b>5.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO NPS PARA OS DIFERENTES REVESTIMENTOS</b> .....	<b>235</b>
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</b> .....	<b>239</b>
<b>6.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b> .....	<b>241</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>243</b>

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento desordenado das cidades acarreta desequilíbrio no processo de urbanização e o aumento da necessidade da mobilidade das populações. Assim, um dos grandes impactos decorrentes desse processo é o aumento do nível do ruído, principalmente em locais de alto volume de tráfego.

O ruído de tráfego constitui atualmente um dos problemas ambientais mais relevantes em zonas urbanas. A complexa rede de comunicações viárias se constitui na fonte predominante de perturbação do ruído ambiente. O tráfego de veículos faz parte de um grupo de fatores geradores do ruído urbano.

Os níveis de ruído médio em regiões às margens de vias expressas e de rodovias de tráfego intenso atingem 85 decibels. Na fachada das habitações mais próximas podem chegar aos 78, muito acima dos 55 decibels recomendados pela OMS (Organização Mundial da Saúde).

Uma extensa lista de sintomas e doenças vem sendo objeto de estudos médicos nas últimas décadas: estresse, alteração no padrão do sono, insônia, perdas de habilidade mental e motora, perda de memória, dores de cabeça, náuseas, perdas auditivas temporárias e definitivas, zumbido no ouvido e distúrbios nos sistemas circulatório, respiratório e imunológico figuram entre os males provocados pelo barulho.

Mudanças no comportamento social e ocupacional são percebidas em indivíduos que ficam expostos por tempo demasiado a ruídos intensos. Aspectos psicológicos destacam-se nesses comportamentos e refletem-se na forma de irritabilidade excessiva, impaciência, depressão e falta de interesse social, entre outros (ALVES FILHO, 2002).

Relatórios da Comissão Europeia elaborados pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE e OMS indicam que a exposição contínua a níveis de ruído entre 55 e 65 decibels provoca irritação e prejuízos à comunicação e ao aprendizado. Acima desta faixa os danos à saúde são ainda mais graves.

A fauna também é afetada pelos altos níveis de ruído das rodovias. A reprodução de algumas espécies de aves é reduzida pela interferência na comunicação e pelo estresse hormonal; a população já

começa a declinar com níveis de ruído médios a partir de 42 decibels. Várias espécies de grandes mamíferos também apresentam população muito baixa em áreas distando de 100 a 200 metros de rodovias.

Assim, a poluição sonora tornou-se uma questão de extrema relevância para diversos centros de pesquisa ao redor do mundo, por ser um dos fatores de degradação da qualidade de vida das populações. Pesquisas visando minimizar os níveis de ruídos prejudiciais à saúde humana vêm sendo realizadas por diversos países, no intuito de melhorar a qualidade de vida das pessoas.

Em decorrência destas pesquisas algumas soluções vêm sendo adotadas no intuito de reduzir os ruídos provenientes do tráfego, tais como construção de pavimentos silenciosos, a instalação de barreiras acústicas, o controle de velocidade e a mudança na geometria das vias.

As primeiras misturas betuminosas porosas com características drenantes foram desenvolvidas a partir de experiências realizadas nos Estados Unidos, tendo-se posteriormente transferido este conceito para a Europa (SANTOS, 2007). A princípio, ela foi projetada para reduzir os riscos de aquaplanagem, eliminar o fenômeno de espelhamento e aumentar a aderência entre o pneu e o pavimento. No entanto, verificou-se também a redução do ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

Além do tipo de camada superficial, existem outros fatores associados à emissão do ruído, tais como as características dos veículos e o comportamento de condução. Dentro das características dos veículos, pode-se ainda referir o tipo de veículo (peso, dimensões, número de eixos, potência do motor), a velocidade de circulação e o tipo de pneu (SANTOS, 2007).

O ruído do tráfego pode ser separado em duas parcelas, uma derivada do ruído proveniente do motor dos veículos e a segunda, do acoplamento pneu-pavimento. A segunda parcela pode ser reduzida utilizando superfícies silenciosas. É nessa segunda parcela que se insere o tema desta dissertação.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é a avaliação da capacidade de absorção sonora de misturas betuminosas em laboratório e sua relação com a geração do ruído pela interação pneu-pavimento em campo.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar o ensaio de absorção sonora com o tubo de impedância em todos os corpos de prova moldados em laboratório;
- Realizar medições de nível de ruído em campo utilizando apenas um veículo, para três diferentes velocidades (60, 80 e 100 km/h) na comparação de diferentes revestimentos asfálticos;
- Realizar medições de nível de ruído global com duração de 15 minutos em cada medida, com objetivo de verificar a redução do ruído quando se modifica o tipo de revestimento do pavimento;
- Determinar uma correlação entre as medidas de absorção sonora realizadas em laboratório e as características da textura dos revestimentos, com as medições dos níveis de pressão sonora obtidos nos ensaios de campo.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O transporte rodoviário traz grande impacto ambiental, tanto pelo consumo de energia quanto pela infraestrutura física necessária à sua operação. Além disso, a emissão de gases e o ruído decorrente do tráfego causam danos irreversíveis ao meio ambiente e a saúde humana e têm sido alvo de inúmeros estudos e pesquisas em vários países.

A exposição humana a altos níveis de ruído ocasiona respostas involuntárias e inconscientes do organismo a esse estímulo. As principais alterações fisiológicas são: dilatação das pupilas; hipertensão

sanguínea; mudanças gastrointestinais; 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. Todos esses problemas convergem para o aumento nos gastos com saúde e em perdas expressivas no potencial produtivo (WHO, 1999 e FERNANDES, 2002).

Atualmente, a poluição sonora, depois da poluição do ar e da água, é o problema ambiental que mais afeta a saúde das pessoas. Em um estudo realizado na cidade de Copenhague, verificou-se que nas áreas com elevado ruído havia maior porcentagem de consultas médicas, internações e uso de medicamentos (GERGES, 2000).

De acordo com diversos autores, os efeitos do ruído ambiental afeta o organismo humano de forma direta ou indireta, considerando-se a frequência, intensidade, duração e susceptibilidade individual nas quais o ser humano encontra-se exposto.

O ruído, além de ser prejudicial à saúde e à qualidade de vida da população, também afeta o valor dos imóveis em áreas sujeitas a sons indesejáveis. Na Suécia, um estudo de perdas causadas pelo ruído do tráfego apresentava cifras da ordem de 330 milhões de dólares por ano, ligadas principalmente à desvalorização imobiliária (SANDBERG, 2001).

O Brasil atualmente é considerado um país com níveis de ruído extremamente elevados. As cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, por exemplo, estão entre as cinco com maiores níveis de ruído no mundo. Estas cidades possuem locais considerados críticos onde alcançam picos de emissão de ruído da ordem de 95 decibels (FERNANDES, 2002).

A criação de leis que fixam as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído demonstra o aumento do interesse do poder Público com o controle do ruído.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito de um projeto financiado pelo CNPq (processo N° 402378/2009-1) denominado Quantificação dos Ruídos Provocados pelo Acoplamento Pneu/Revestimento das Rodovias Aplicada ao Planejamento de Transporte.

No projeto previa-se a compra de equipamento para medida da capacidade de absorção sonora em laboratório, um sonômetro e o desenvolvimento do trailer CPX para avaliação do ruído em campo. Devido aos atrasos na liberação do dinheiro por parte do CNPq, infelizmente não foi possível utilizar o trailer nessa pesquisa.

O trabalho está organizado da seguinte forma:

- O primeiro capítulo expõe o assunto da pesquisa, situa a questão do ruído gerado pelo tráfego, fixa o objetivo geral do estudo e o modo de alcançá-lo através dos objetivos específicos delimitados.

- O segundo capítulo abrange um estudo dos principais aspectos relacionados ao tema. Apresenta-se uma revisão bibliográfica dos conceitos relativos à ocorrência do ruído de forma geral, os princípios da acústica rodoviária, formas de geração, propagação e absorção do ruído, especificamente do ruído gerado pela rolagem dos pneus.

- No terceiro capítulo é definida a metodologia utilizada para atingir os objetivos propostos pelo trabalho. São descritos os materiais utilizados na pesquisa e os procedimentos de ensaios.

- No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados do estudo em laboratório, em que foram realizados os ensaios de absorção sonora.

- No capítulo cinco são apresentados e analisados os ensaios realizados no campo utilizando o sonômetro.

- O capítulo seis define as conclusões do trabalho e as recomendações para futuras pesquisas.



## CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 PARÂMETROS FÍSICOS DO RUÍDO

O som é o resultado das vibrações dos corpos elásticos quando essas vibrações se encontram em determinados limites de frequência. Tais vibrações, que são mais ou menos rápidas, recebem o nome de vibrações sonoras e se propagam com velocidade uniforme em todas as direções se a propriedade elástica do meio for igual em todos os sentidos. Apesar de o som ser composto por uma variedade de frequências, o ouvido humano é capaz de sentir as frequências entre 20 e 20.000Hz (GERGES, 2000).

O ruído é, por sua vez, um som indesejado ou que não apresenta interesse pelo receptor. Após períodos longos de exposição, o ruído causa desconforto nos receptores, produzindo nestes, reações adversas.

O ruído pode ser definido como uma mistura de sons cujas frequências não seguem nenhuma lei precisa, ou, simplesmente, como todo som indesejável. A pressão sonora é utilizada para definir os níveis ou a intensidade do ruído e sua unidade, o decibel (dB), é a unidade logarítmica que expressa a razão entre a pressão sonora que está sendo medida e uma referência (GERGES, 2000).

As ondas sonoras produzidas pelos corpos em vibração podem ser completamente caracterizadas a partir de 3 parâmetros: a amplitude, o comprimento de onda e o período (Figura 2.1).

A amplitude (A) corresponde à pressão máxima ou mínima produzida pela vibração, o comprimento de onda ( $\lambda$ ) corresponde à distância entre cristas, ou senos sucessivos, e o período (t) corresponde ao tempo entre esses picos. A unidade utilizada para a medida da amplitude depende do tipo da onda. Por exemplo, a amplitude de ondas de som e sinais de áudio costuma ser expressas em decibels (dB).

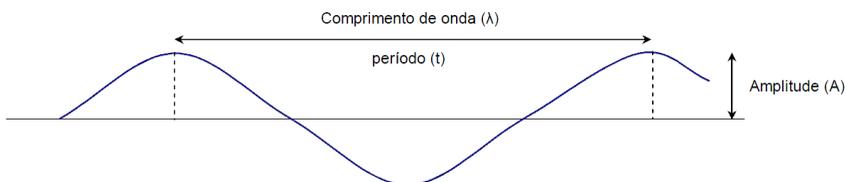


Figura 2.1 - Parâmetros físicos da onda sonora (KIELY, 1999).

Uma unidade usada internacionalmente para descrever as flutuações da pressão sonora é o decibel. O decibel é, por natureza logarítmico, geralmente abreviado pela nomenclatura dB, e indica o nível de pressão sonora ( $L_p$ ). O nível de pressão sonora é calculado pela equação 2.1 (WAYSON, 1998).

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p^2}{p_o^2} \right) \quad (2.1)$$

onde:

- $L_p$ : representa o nível de pressão sonora, em dB;
- $P$ : é a pressão sonora instantânea, em  $N/m^2$ ; e
- $p_o$ : é a pressão sonora de referência ( $2 \times 10^{-5} N/m^2 = 20 \mu N/m^2$ ).

O ouvido saudável pode detectar flutuações de pressão tão baixas quanto  $2 \times 10^{-5} N/m^2$  (ponto inicial/origem do ato de ouvir) e flutuações maiores até que a dor física começa (considera-se que o ponto inicial da dor está aproximadamente a  $63 N/m^2$ ).

O uso do logaritmo reduz a larga escala de valores com a qual deve ser tratado o som, e também, corresponde à forma mais próxima como os ouvidos humanos percebem ou captam o som. A escala derivada transforma-se agora em 0 dB (ponto inicial do ato de ouvir) até aproximadamente 130 dB (ponto inicial da dor). A diferença entre nível de pressão sonora (NPS) e pressão sonora é muito significativa, como se mostra na Figura 2.2, a partir de uma escala comparativa das duas grandezas (WAYSON, 1998).

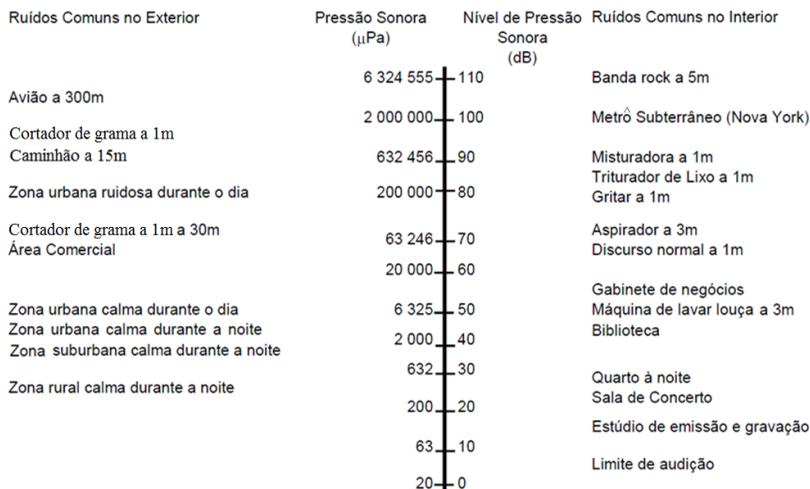


Figura 2.2 - Escala comparativa da pressão sonora e do nível de pressão sonora (WAYSON, 1998).

Em laboratório, um ouvido saudável normal pode distinguir uma mudança de sonoridade quando ocorre uma variação do nível de pressão sonora (NPS) de cerca de 3 dB. Ao ar livre, a percepção de uma alteração de sonoridade é geralmente superior a 3 dB, sendo 5 dB a situação usual. Uma mudança de 10 dB (10 vezes as flutuações da pressão) é geralmente considerada uma duplicação ou uma redução para metade do nível sonoro (WAYSON, 1998).

Tendo em conta o ruído produzido pelo tráfego, isto significa que terá que ocorrer uma mudança significativa nas suas características, para que os indivíduos consigam distinguir objetivamente uma mudança nos níveis de ruído. Na Figura 2.3 apresenta-se a relação da variação do nível de ruído com a redução do volume de tráfego (RAITANEN, 2005).

Por exemplo, caso se consiga reduzir em 3 dB o ruído provocado pela interação pneu-pavimento, seria como reduzir o tráfego em 50%. Quando uma pessoa sente, subjetivamente, que há uma redução de 50% do ruído, significa que o nível de pressão sonora terá diminuído aproximadamente 10 dB, o que seria equivalente a uma redução do tráfego em 90%.

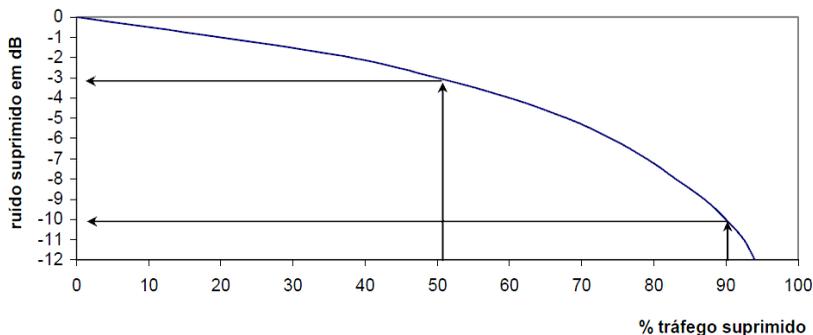


Figura 2.3 - Decréscimo do nível de pressão sonora em função do decréscimo de volume de tráfego (RAITANEN, 2005).

## 2.2 FREQUÊNCIA

Frequência é uma grandeza física ondulatória que indica o número de ocorrências de um evento (ciclos, voltas, oscilações, etc.) em um determinado intervalo de tempo. A unidade mais utilizada para medir a frequência é o Hertz (Hz) que corresponde ao número de oscilações por segundo.

O som é uma mistura complexa de muitas frequências de diferentes ondas. A faixa de frequência audível é normalmente considerada de 20-20.000 Hz para os ouvintes mais jovens, com audição perfeita. No entanto, os sistemas de audição humana não são igualmente sensíveis a todas as frequências de som e, para compensar isso, diversos tipos de filtros ou de ponderações têm sido usados para determinar a relação de forças entre os componentes de frequência que compõem um ruído ambiental específico (BERGLUND *et al.*, 1999).

Para quantificar a intensidade do som, ao invés de especificar o nível de pressão sonora para cada frequência, usam-se geralmente escalas de frequências ou esquemas gerais de ponderação para a escala total de frequências. O ouvido humano percebe a frequência de forma não linear, em que os esquemas gerais de ponderação aproximam-se geralmente mais da forma como o ouvido capta o som, considerando todas as frequências audíveis.

Os sonômetros (vide item 2.7) incorporam malhas de ponderação eletrônicas que se aproximam da forma como o ouvido humano capta o som. Os circuitos eletrônicos de sensibilidade variável com a frequência,

feitos para modelar o comportamento do ouvido humano, são padronizados e classificados em quatro malhas que são internacionalmente reconhecidas como mostra a Figura 2.4 (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

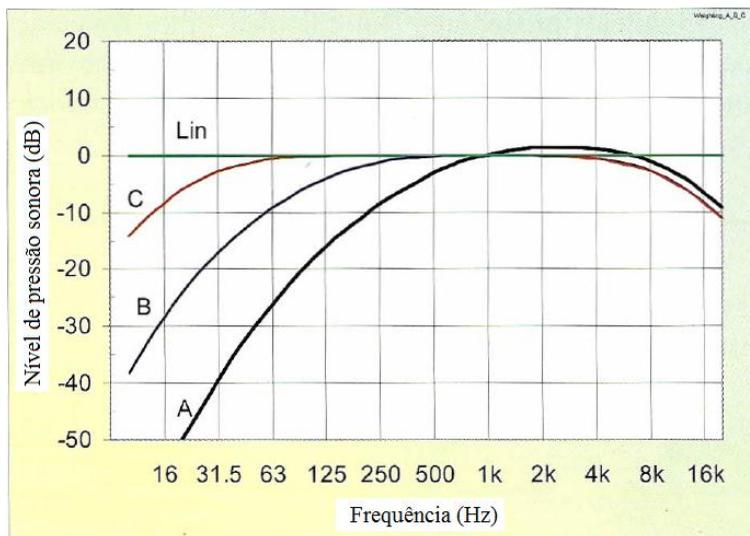


Figura 2.4 - Circuitos de compensação sonora A,B e C (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

Os valores das medições feitas com o emprego das malhas filtrantes A, B e C exprimem-se, respectivamente, em dB (A), dB (B) e dB (C).

A Figura 2.4 mostra que o ouvido humano não é igualmente sensível a todas as frequências, sendo mais sensível entre 2 a 5 kHz e menos sensível a frequências extremas, sejam altas ou baixas. Este fenômeno é mais pronunciado para baixos NPSs (níveis de pressões sonoras) do que para altos. A reta “Lin” significa que o nível de pressão sonora não foi filtrado.

Para quantificar o ruído de tráfego rodoviário, ruído industrial e ruído de tráfego aéreo, usa-se a malha filtrante A (circuito A), pois é o que fornece melhor correlação em testes subjetivos, do que os circuitos B e C. Portanto, quando se determina o ruído em escala dB (A), significa que o nível de ruído é reconhecido por um microfone que o filtra e o ajusta de maneira que mais se assemelha ao ouvido humano.

Os estudos sobre o ruído de tráfego rodoviário, com avaliação feita através da malha A é a que se apresenta como a mais correta, independentemente do nível de pressão sonora do estímulo (SILVA, 1978). O uso das curvas de compensação B e C estão em desuso atualmente.

Estudos mostram que a capacidade de audição do ouvido humano obedece a Lei de Weber, que aplicado à acústica, mostra que a sensação auditiva varia de acordo com o logaritmo dos estímulos que a produzem. Por exemplo, a relação entre as frequências de 220 Hz e 440 Hz é percebida como um intervalo de uma oitava. A relação entre 440 Hz e 880 Hz é percebida como um intervalo igual de uma oitava, mesmo que a distância real entre as frequências não seja igual (FERNANDES, 2002). Uma oitava é o intervalo entre uma nota musical e outra com a metade ou o dobro de sua frequência. Refere-se, igualmente, como sendo um intervalo musical de 2/1. A Figura 2.5 mostra as formas de espectros de frequência do mesmo som (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

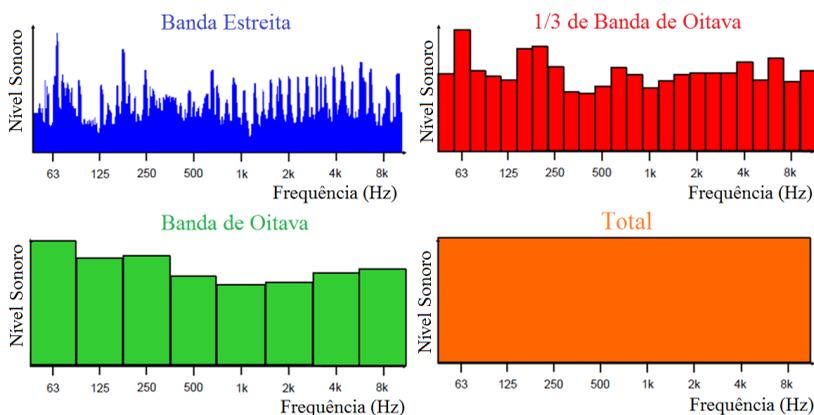


Figura 2.5 - Formas de espectros de frequência do mesmo som (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

Nas escalas de frequência são usadas as bandas de oitava, mas em alguns casos é necessário utilizar escalas de bandas de oitava mais reduzidas, ou seja, 1/3 ou 1/12 de banda de oitava (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

As Figuras 2.6 e 2.7 apresentam os espectros em bandas de 1/3 de oitava, filtradas com a malha A obtidos para um automóvel e para um

veículo pesado em diferentes tipos de revestimentos e a uma velocidade de 60 km/h.

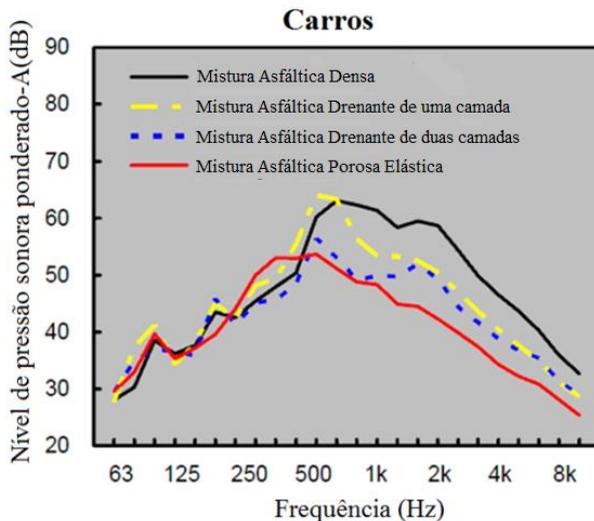


Figura 2.6 - Frequência característica do som para uma velocidade de 60 km/h para um automóvel (45th GRB, 2007).

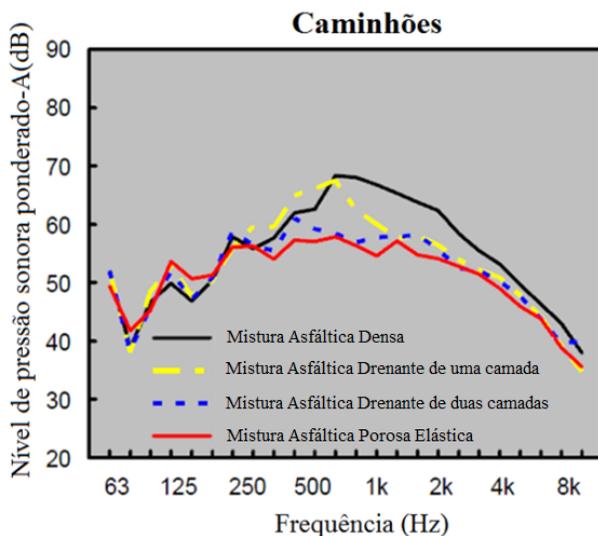


Figura 2.7 - Frequência característica do som para uma velocidade de 60 km/h para um veículo pesado (45th GRB, 2007).

## 2.3 NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA (NPS)

O lançamento de um foguete tem uma alta sonoridade, no entanto dura apenas uma fração de segundo. Já o ruído de tráfego pode não ser tão intenso, mas é contínuo. Para descrever como a duração do som varia ao longo do tempo, são usados vários descritores, entre eles: o nível de ruído máximo ( $L_{m\acute{a}x}$ ), o nível de pressão sonora ( $L_{xx}$ ) e o nível sonoro contínuo equivalente ( $L_{eq}$ ). Em cada um destes descritores, a letra maiúscula L representa um nível de pressão sonora, e não pressão sonora. (SANTOS, 2007).

O nível sonoro contínuo equivalente pode ser expresso em dB(A) ou em dB, sendo a análise do ruído feita com ou sem a ponderação A. Quando a análise do ruído é feita com a ponderação A, representa-se o nível sonoro contínuo equivalente por  $L_{Aeq}$ . Quando não é feita a ponderação, representa-se por  $L_{eq}$  (SILVA, 1978).

O efeito de uma combinação de eventos de ruído está relacionado com a energia do som combinada desses eventos (o princípio da igualdade de energia). A soma do total de energia durante certo período de tempo dá um nível equivalente à energia média do som durante esse período. Assim,  $L_{Aeq}$  é a energia média de nível equivalente ao som na escala ponderada A durante um período. O  $L_{Aeq}$  deve ser usado para medir o som contínuo, como o ruído gerado pelo tráfego rodoviário ou ruídos industriais. No entanto, quando há eventos distintos para o ruído, como acontece com aviões ou trens, é utilizado o descritor  $L_{Am\acute{a}x}$ , que representa o nível de ruído máximo que ocorre por um curto período de tempo (BERGLUND *et al.*, 1999).

Atualmente, a prática recomendada é de supor que o princípio da igualdade de energia é aproximadamente válida para a maioria dos tipos de ruído e que uma simples medida do  $L_{Aeq}$ , irá indicar de forma satisfatória os efeitos esperados do ruído. Quando o ruído é constituído por um pequeno número de eventos discretos, o nível máximo ponderado  $L_{Am\acute{a}x}$ , é um indicador melhor a ser utilizado (BERGLUND *et al.*, 1999).

O  $L_{xx}$  representa um descritor estatístico para o nível de pressão sonora, onde o “xx” representa a percentagem de tempo em que um determinado nível de pressão sonora é excedido. O valor numérico pode ser qualquer percentagem, mas  $L_{10}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{90}$  e  $L_{99}$  são geralmente os mais utilizados.

Pode-se considerar que o  $L_{Aeq}$  é como um descritor médio ponderado de energia acústica. Deverá notar-se que a energia média não é uma média algébrica do nível de pressão sonora durante um período de tempo, mas sim, uma média logarítmica, devido à natureza logarítmica do dB. Assim, o nível sonoro contínuo equivalente ponderado A é expresso pela equação 2.2 (FEHRL, 2006):

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right] \quad (2.2)$$

onde:

- $L_{Aeq}$ : é o nível sonoro contínuo equivalente ponderado A, em dB(A);
- T: é o período de tempo durante o qual se calcula  $L_{Aeq}$ , em s;
- p: é a pressão sonora instantânea ponderada em A, em Pa; e
- $p_0$ : é a pressão sonora de referência ( $2 \times 10^{-5}$  Pa =  $20 \mu\text{Pa}$ ).

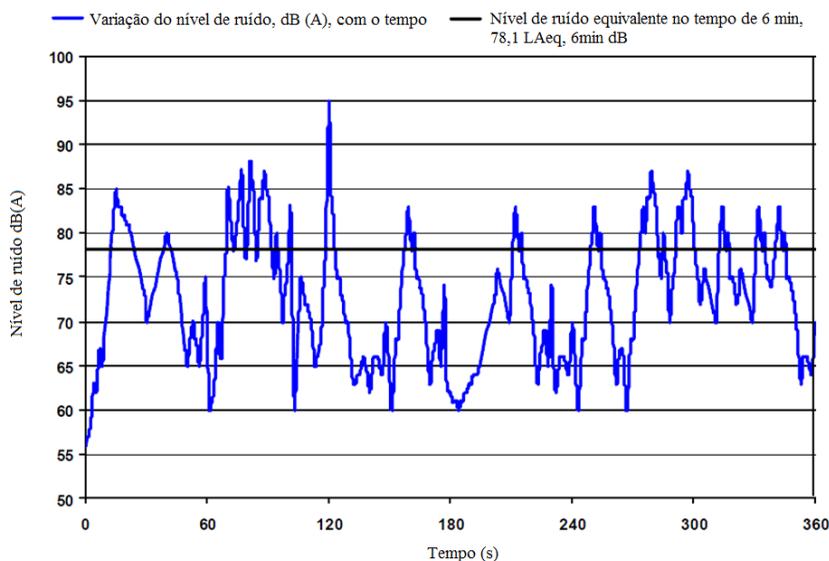


Figura 2.8 - Nível de ruído rodoviário e nível de ruído equivalente,  $L_{Aeq}$ , (FEHRL, 2006).

A Figura 2.8 mostra a variação do nível de ruído em uma rodovia. A variação do nível de ruído foi computada à medida que os veículos

passaram pelo microfone, durante 6 minutos. O ruído constante de 78.1 dB, mostrado na Figura 2.8, representa o  $L_{Aeq}$ , que ao longo dos 6 minutos, tem energia acústica igual a recebida da flutuação de ruído rodoviário durante o mesmo período (FEHRL, 2006).

Na maioria das situações, os níveis sonoros à nossa volta não serão os mesmos a cada momento. Existem várias maneiras de converter esses tipos de sons não uniformes em uma única medição (número). Para ilustrar como isso pode ser feito, a Figura 2.9 mostra um exemplo de  $L_{eq}$ ,  $L_{10}$  e  $L_{máx}$  (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

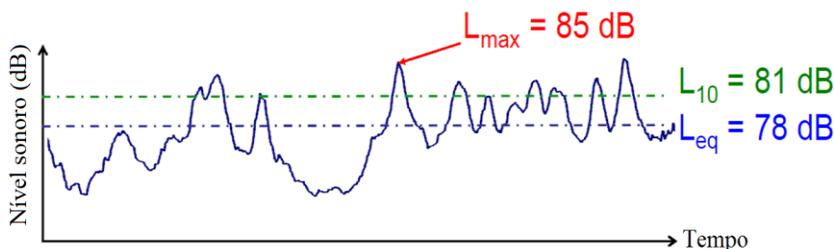


Figura 2.9 - Definição dos níveis de som (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

## 2.4 GERAÇÃO DO RUÍDO PROVOCADO PELO CONTATO PNEU-PAVIMENTO

A geração e propagação de ruído gerado pelo deslocamento dos veículos são regidas por vários mecanismos. Em baixas velocidades, o barulho da unidade de alimentação do veículo (o motor e seus auxiliares, caixa de velocidades, escape, refrigeração do sistema, etc.), muitas vezes dominam o ruído gerado pela interação pneu-pavimento. No entanto, quando a velocidade do veículo aumenta, o ruído gerado pela interação pneu-pavimento também irá aumentar e poderá vir a se tornar a fonte dominante de ruído (NELSON e PHILLIPS, 1994).

Bendtsen e Andersen (2005) referem que para velocidades acima dos 40 km/h o ruído pneu-pavimento é a fonte de ruído dominante, enquanto que o ruído do motor exerce pouca ou nenhuma influência sobre o ruído total emitido pelo veículo. No estudo apresentado por Sanz (2006), é referido que no caso de automóveis circulando entre 50 ou 60 km/h, a influência na geração de ruído é predominantemente do motor sendo que para velocidades mais elevadas, predomina o ruído

pneu-pavimento. Este limite é de 70 a 80 km/h para os veículos pesados. Esses intervalos de velocidade dependem do ano de fabricação dos veículos e do seu estado de conservação.

Sandberg e Ejsmont (2002) afirmam que o intervalo de velocidade em que o ruído gerado da interação pneu-pavimento começa a dominar sobre o ruído gerado do motor do veículo depende do tipo, do ano e da carga do veículo. O Quadro 2.1 mostra a média da velocidade de cruzamento para um revestimento denso comum e um SMA.

Quadro 2.1 - Velocidade de cruzamento quando o ruído pneu-pavimento é mais importante que o ruído do motor (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

<b>Tipos de veículos</b>	<b>Velocidade constante</b>	<b>Acelerando</b>
Carros fabricados de 1985-95	30-35 km/h	45-50 km/h
Carros fabricados em 1996	15-25 km/h	30-45 km/h
Caminhões fabricados de 1985-95	40-50 km/h	50-55 km/h
Caminhões fabricados em 1996	30-35 km/h	45-50 km/h

O ruído gerado pela interação pneu-pavimento tem vários tipos de mecanismos de geração, ocorrendo simultaneamente e em diferentes graus, dependendo da combinação da interação do pneu-pavimento (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

Segundo Ejsmont (1997) os mecanismos de geração do ruído provocado pelo contato pneu-pavimento são divididos em dois grupos: o primeiro mecanismo é relacionado com as vibrações mecânicas que ocorrem no pneu e é chamado de “structure borne”; o segundo mecanismo é relacionado com os fenômenos aerodinâmicos, e é chamado de “air borne”.

Para a FEHRL (2006), a geração do ruído pneu-pavimento é composta principalmente de "impactos e choques" e "bombeamento de ar", sendo que a primeira ocorre principalmente abaixo de 1000 Hz e a segunda, principalmente acima de 1000 Hz.

De acordo com Santos (2007), em geral os mecanismos de emissão do ruído pneu-pavimento podem ser divididos em dois tipos de origem: a) Mecânicos e b) Aerodinâmicos. Para uma melhor

compreensão dos mecanismos de geração do ruído, a estrutura típica de um pneu é apresentada na Figura 2.10.

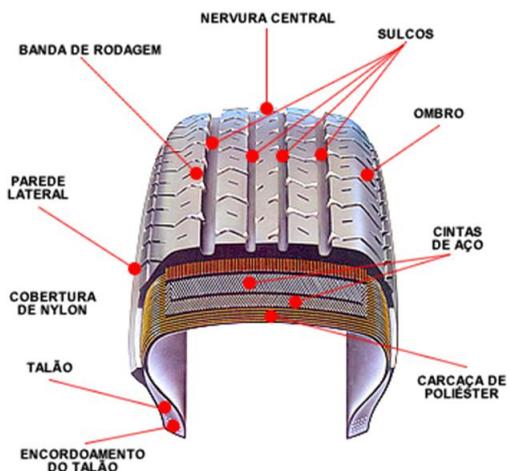


Figura 2.10 - Estrutura típica de um pneu

onde:

- Carcaça: parte resistente do pneu; deve resistir à pressão, peso e choques. Compõem-se de lonas de poliéster, nylon ou aço. A carcaça retém o ar sob pressão que suporta o peso total do veículo. Os pneus radiais possuem ainda as cintas que complementam sua resistência;
- Talões: constituem-se internamente de arames de aço de grande resistência, tendo por finalidade manter o pneu fixado ao aro da roda;
- Parede lateral: são as laterais da carcaça. São revestidos por uma mistura de borracha com alto grau de flexibilidade e alta resistência à fadiga;
- Cintas (lonas): compreende o feixe de cintas (lonas estabilizadoras) que são dimensionadas para suportar cargas em movimento. Sua função é garantir a área de contato necessária entre o pneu e o solo;
- Banda de rodagem: é a parte do pneu que fica em contato direto com o solo. Seus desenhos possuem partes cheias chamadas de biscoitos ou blocos e partes vazias conhecidas como sulcos, e devem oferecer aderência, tração, estabilidade e segurança ao veículo;
- Ombro: é o apoio do pneu nas curvas e manobras; e
- Nervura central: proporciona um contato "circunferencial" do pneu com o solo/revestimento.

### 2.4.1 Mecanismos de Geração Mecânica

Fontes vibrantes são citadas como uma fonte mecânica de som. São ruídos gerados do contato entre a estrutura do pneu e a superfície do revestimento da rodovia. Estas vibrações também são passadas à roda, ao corpo de veículo e outras estruturas que vibram em uma vasta gama de frequências audíveis. Os mecanismos de geração mecânica são classificados em:

- Vibrações radiais e tangenciais do pneu ou impactos e choques;
- Vibrações da parede lateral;
- Vibrações do tipo adere/desliza – conhecida como “stick-slip”; e
- Vibrações do tipo adere/descola – conhecida como “stick-snap”.

As vibrações radiais causadas pelas interações resultantes entre os blocos da banda de rolagem do pneu e a superfície do pavimento podem ser vista como centenas ou mesmo milhares de pequenos golpes de martelo que ocorrem a cada segundo, cada um gerando som (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

Esse mecanismo de impactos e choques consiste essencialmente na excitação dos elementos do pneu quando entram em contato com a superfície do pavimento (FEHRL, 2006).

De acordo com Santos (2007) essas vibrações radiais são ativadas pelos elementos de rugosidade do revestimento que deformam os blocos da banda de rolagem do pneu. As vibrações tangenciais são excitadas por forças tangenciais no ponto de contato. As vibrações do pneu, quando criadas, têm uma forma complexa nas direções radiais, tangenciais e axiais.

As vibrações resultantes desse mecanismo acontecem na banda de rodagem. Os blocos da banda giram na rolagem dos pneus ocorrendo o impacto dos blocos da banda com a superfície do pavimento. A Figura 2.11 mostra a vibração causada pelo impacto entre a banda de rodagem e a superfície do pavimento (FEHRL, 2006).

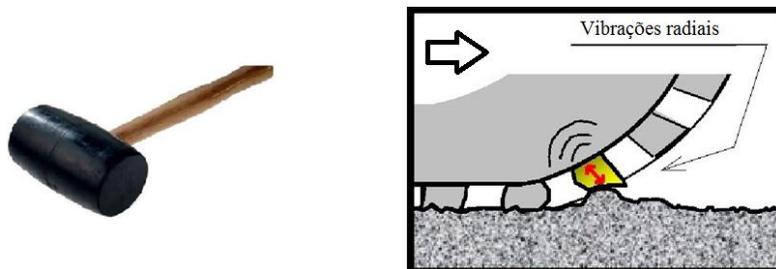


Figura 2.11 – Esquema ilustrativo do mecanismos mecânicos do ruído pneu-pavimento – vibrações radiais (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

Um barbeador elétrico ou um telefone celular vibrando não faz muito som por si só. No entanto, quando colocados em cima de uma placa, as pequenas vibrações são ampliadas significativamente. Muitas das pequenas vibrações descritas como mecanismos de geração serão igualmente ampliadas como vibrações da parede lateral do pneu. As vibrações do piso do pneu são transportadas para a parede lateral que atua como uma “placa de som” que emite o som. A Figura 2.12 ilustra esse tipo de geração mecânica (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

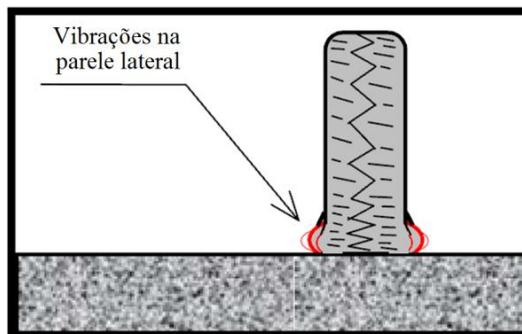


Figura 2.12 - Esquema ilustrativo do mecanismos mecânicos do ruído pneu-pavimento – vibrações na parede lateral (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

Como em um jogo de basquete, quando 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 da rodovia (RASMUSSEN *et al.*, 2007). São as vibrações do tipo “stick slip” que resultam do fenômeno de aderência/deslize. A Figura 2.13 apresenta uma representação esquemática desse fenômeno segundo Bernhard e Wayson, 2005.

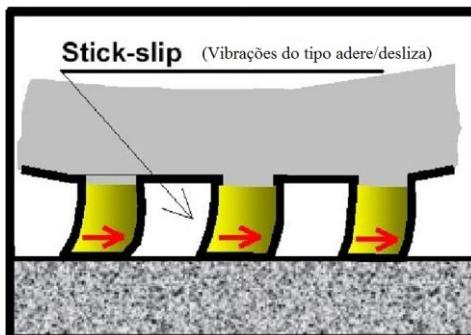


Figura 2.13 - Esquema ilustrativo das vibrações causadas pela aceleração ou a frenagem do veículo (BERNHARD e WAYSON, 2005).

Já o “stick-snap” ocorre quando a superfície do piso do pneu se torna aderente à superfície da rodovia. A força adesiva é aumentada, o que conduz a um aumento da excitação na borda traseira do pneu (KUIJPIERS e BLOKLAND, 2001).

O mecanismo de geração do ruído chamado “stick-snap” é proporcionado pelo contato entre banda de rolagem e a superfície do pavimento, causando uma adesão entre esses. Logo após a adesão, ocorre a liberação do bloco da banda de rolagem, criando a energia sonora e a vibração na carcaça do pneu. A Figura 2.14 mostra a adesão que ocorre na área de contato pneu-pavimento segundo Rasmussen *et al.*, 2007.

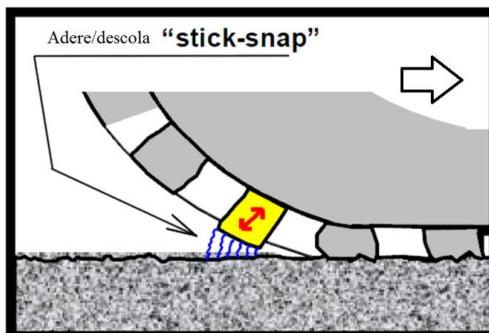


Figura 2.14 - Esquema ilustrativo da adesão na área de contato entre a banda de rolagem e a superfície do pavimento (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

## 2.4.2 Mecanismos de Geração Aerodinâmica

Geração aerodinâmica é a parcela do ruído gerada pelo movimento do ar decorrente do contato entre a estrutura do pneu e a superfície do revestimento da rodovia. Os mecanismos de geração aerodinâmica são classificados em:

- Ressonância da cavidade no tubo do pneu;
- Bombeamento do ar;
- Radiação da ressonância de ar; e
- Ressonância tubular.

As ressonâncias na cavidade interna do conjunto roda-pneu contribuem para o ruído gerado pelos pneus. Este som pode ser mais ouvido no interior do veículo. Na verdade, este mecanismo é menos importante para o ruído no exterior do veículo.

O mecanismo chamado de bombeamento do ar é ocasionado quando os sulcos do pneu são comprimidos e distorcidos. O ar que entra nestes canais é bombeado para dentro e comprimido para fora destas passagens, gerando assim o ruído.

Entre os blocos da banda de rolagem do pneu e a textura de um pavimento 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. Esse processo é semelhante ao de bater palmas ou assobiar, onde o ar é forçado a sair de uma pequena abertura. A Figura 2.15 ilustra este mecanismo (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

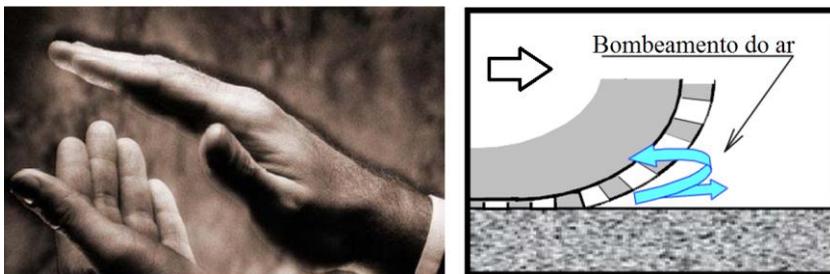


Figura 2.15 - Esquema ilustrativo do bombeamento do ar (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

A radiação da ressonância do ar é um mecanismo que realça o ruído pneu-pavimento e é conhecido como ressonador de Helmholtz. A ressonância de Helmholtz é um fenômeno que ocorre quando o ar passa por uma cavidade e, devido a isso, ele ressoa. Um exemplo do ressonador de Helmholtz é o som criado quando alguém assopra pelo gargalo de uma garrafa vazia. O fenômeno pode ocorrer na extremidade traseira do pneu. Este fenômeno é associado a uma faixa de frequência entre 1000 a 2000 Hz. A Figura 2.16 ilustra esse fenômeno segundo Sandberg e Ejsmont, 2002.

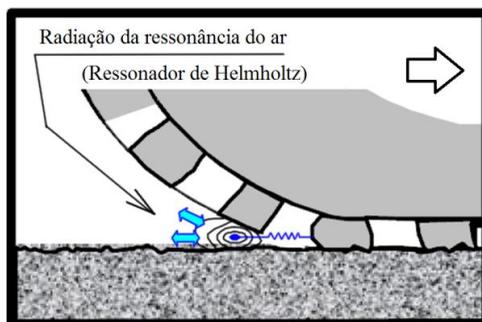


Figura 2.16 - Esquema ilustrativo da ressonância de Helmholtz (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

O ruído gerado na área de contato pneu-pavimento e gerado pelas múltiplas reflexões do som e é amplificado pela geometria da superfície do pneu e da rodovia. Este mecanismo é denominado de ressonância tubular e chamado popularmente de efeito “buzina”. Esse fenômeno é ilustrado na Figura 2.17.

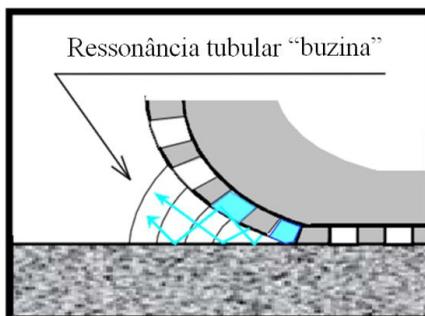


Figura 2.17 - Esquema ilustrativo da ressonância tubular ou efeito “buzina” (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

## 2.5 PROPAGAÇÃO DO RUÍDO GERADO PELO TRÁFEGO

Em condições de campo livre, a propagação do som acontece em todas as direções de maneira uniforme, diminuindo sua amplitude à medida que o observador se afasta da fonte sonora (NELSON e PHILLIPS, 1994).

Teoricamente, o som se propaga em forma de ondas esféricas a partir de uma fonte pontual, ou seja, quando a pressão acústica é só função do raio e do tempo. O som vibra as moléculas do ar e essa vibração é transmitida para as moléculas vizinhas, que por sua vez também passam a propagar para outras moléculas vizinhas, e assim sucessivamente. Essa propagação ocorre em todas as direções. Por esse motivo a onda sonora é classificada como onda esférica. Entretanto, duas situações podem dificultar esse modelo: a presença de obstáculos na trajetória de propagação e, em campo livre, a pouca uniformidade do meio, a qual é perturbada por ventos fortes ou grandes diferenças de temperatura (GERGES e ARENAS, 2010).

Os níveis sonoros de uma fonte localizada diminuem à medida que a distância entre a fonte e o receptor aumenta. Por exemplo, para uma fonte de ruído localizada a certa distância, quando o receptor é afastado do dobro desta distancia inicial, a atenuação do ruído é de 6 dB(A). Triplicando o afastamento, esse valor é de 9,5 dB(A), indicando que a atenuação não é linear com o afastamento. A Figura 2.18 ilustra esse fenômeno (HANSON *et al.*, 2004).

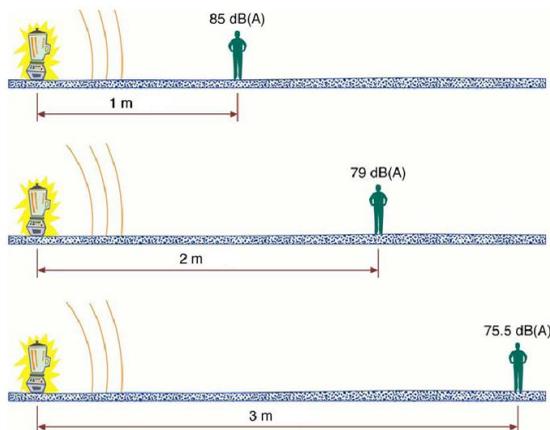


Figura 2.18 - Efeito da distância na percepção do ruído a partir de uma fonte pontual (HANSON *et al.*, 2004).

De acordo com Hanson *et al.*, 2004, a relação dos níveis de pressão sonora com a distância entre a fonte e o receptor pode ser calculada conforme a equação 2.3:

$$L_A = L_{ref} - 20 \log \left( \frac{r}{r_{ref}} \right) \quad (2.3)$$

onde:

- $L_A$ : é o nível sonoro a uma distância  $r$ , em dB(A);
- $L_{ref}$ : é o nível sonoro de referência, em dB(A);
- $r$ : é a distância entre fonte do ruído e o receptor, em m; e
- $r_{ref}$ : é a distância de referência, em m.

Entretanto, o ruído proveniente do fluxo de tráfego se comporta de forma diferente deste modelo. Visto que ocorre quando a energia é de alguma forma contida, de modo que a sua propagação se faça de maneira anômala, segundo dutos ou canais classificados como fonte em linha, uma vez que o ruído é transmitido ao longo de toda a rodovia (HANSON *et al.*, 2004).

Quando a distância entre o receptor e a fonte em linha aumenta, o nível sonoro diminui num grau inferior ao ilustrado na Figura 2.18. Neste caso, conhecido como ondas sonoras cilíndricas, as perdas se tornam inversamente proporcionais à distância, ao se considerar que a

seção reta do duto ou canal de propagação é constante. Então, tem-se: traduzindo, na prática, que para ondas esféricas, cada vez que a distância dobra, ocorre uma perda de potência de 6 dB. No caso de ondas cilíndricas, cada vez que a distância é dobrada, há uma perda de 3 dB. Isto se deve ao fato de o ruído das fontes mais afastadas na linha, começar a contribuir mais em comparação com o ruído das fontes individuais mais próximas. A Figura 2.19 ilustra esquematicamente esse comportamento (HANSON *et al.*, 2004).

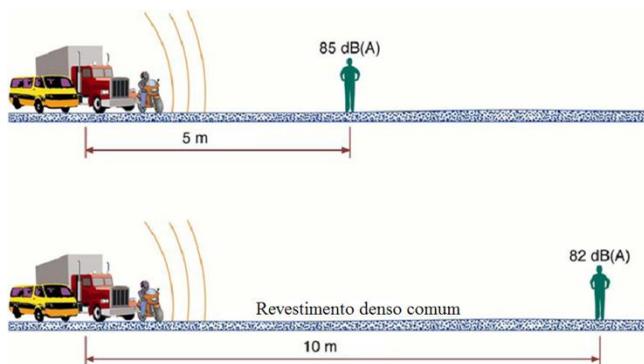


Figura 2.19 - Efeito da distância sobre uma linha de fontes de ruído situada ao longo de uma superfície pavimentada (HANSON *et al.*, 2004).

O nível de ruído próximo à rodovia não depende apenas do ruído a ser gerado pelo tráfego, mas também das características do terreno adjacente à rodovia. A Federal Highway Administration (FHWA) usa a equação 2.4 para prever os níveis de ruído ao lado da pista.

$$L_A = L_{ref} - 10 \log \left\{ \left( \frac{r}{r_{ref}} \right)^{1+\alpha} \right\} \quad (2.4)$$

onde:

- $L_A$ : é o nível sonoro a uma distância  $r$  em, dB(A);
- $L_{ref}$ : é o nível sonoro de referência, em dB(A);
- $r$ : é a distância entre fonte do ruído e o receptor, em m;
- $r_{ref}$ : é a distância de referência, em m; e
- $\alpha$ : é coeficiente de atenuação, que é: 0,0 para terreno com revestimento de mistura asfáltica; e 0,5 para solo mole.

Como já descrito, os níveis de ruído são medidos em uma escala logarítmica. Portanto, isso deve ser considerado quando se combina o efeito de múltiplas fontes.

A Figura 2.20 ilustra os efeitos da adição de níveis de ruído. De acordo com a equação 2.5, se o nível sonoro de uma fonte de som (um liquidificador, por exemplo), medida a três metros é de 85 dB (A), então o nível sonoro de dois liquidificadores nesta mesma distância seria 88 dB (A) e para três liquidificadores, seria de 89,8 dB (A). Para o ruído gerado pelo tráfego, isto significa que se dobrar o número de veículos no fluxo de veículos, o nível de ruído vai aumentar em 3 dB (A).

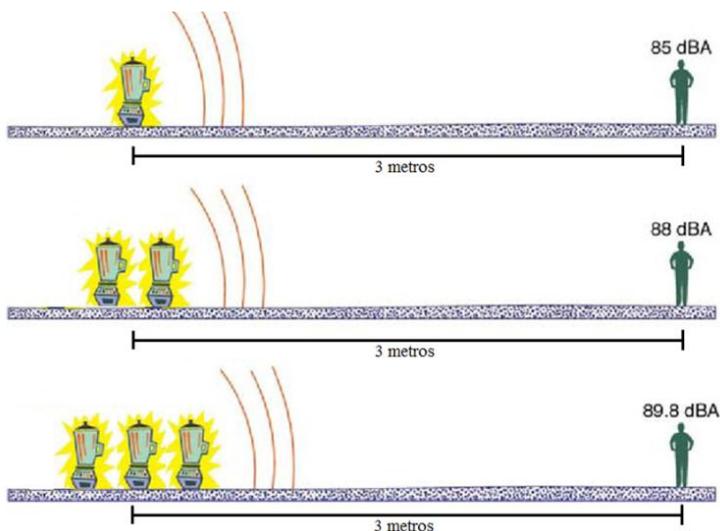


Figura 2.20 - Efeito da adição de fontes de ruído (HANSON *et al.*, 2004).

$$dB(A)_t = 10 \log \left[ 10^{\frac{\{dB(A)_1\}}{10}} + 10^{\frac{\{dB(A)_2\}}{10}} + \dots + 10^{\frac{\{dB(A)_n\}}{10}} \right] \quad (2.5)$$

onde:

- dB(A)<sub>t</sub>: nível de pressão sonora total; e
- dB(A)<sub>i</sub>: nível de pressão sonora de fonte individual.

Quando em um ponto tem-se a incidência de dois níveis de ruídos com pressão sonora  $P_1$  e  $P_2$ , a pressão sonora total é dada pela equação 2.6.

$$P_t = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \quad (2.6)$$

onde:

- $P_t$ : pressão sonora total em ( $N/m^2$ );
- $P_1$ : pressão sonora do primeiro ponto de interesse em ( $N/m^2$ ); e
- $P_2$ : pressão sonora do segundo ponto de interesse em ( $N/m^2$ ).

No entanto, quando se usa a escala dB, os níveis de pressão  $L_1$  e  $L_2$  não podem ser somados diretamente como na equação 2.6. Neste caso, a soma dos níveis de pressão sonora é calculada através das equações 2.7 e 2.8. (GERGES e ARENAS, 2010):

$$\Delta L = 10 \log \left[ 1 + 10^{-\left(\frac{L_1 - L_2}{10}\right)} \right] \quad (2.7)$$

$$NPS = L_1 + \Delta L \quad (2.8)$$

onde:

- $L_1$ : nível de pressão sonora da fonte do primeiro ponto de interesse, em dB(A);
- $L_2$ : nível de pressão sonora da fonte do segundo ponto de interesse, em dB(A);
- $\Delta L$ : diferença entre os níveis de pressão  $L_1$  e  $L_2$  sendo  $L_1 > L_2$ , em dB(A); e
- $NPS$ : nível de pressão total, em dB(A).

O  $\Delta L$  calculado através da equação 2.7 também pode ser determinado utilizando-se a Figura 2.21, que representa a relação entre  $(L_1 - L_2)$  e  $\Delta L$  (GERGES e ARENAS, 2010).

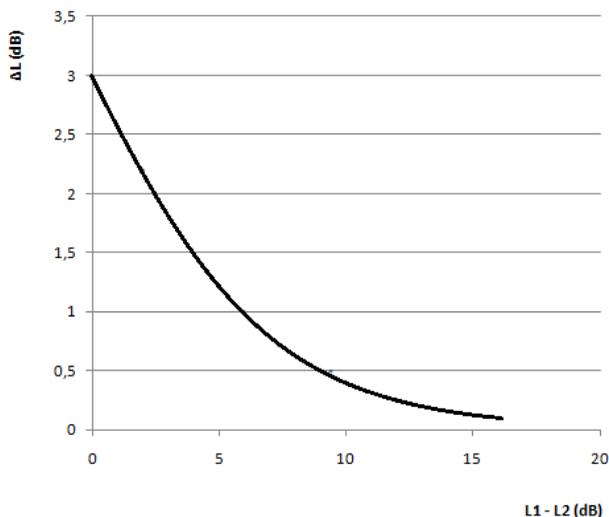


Figura 2.21 - Adição dos níveis de pressão sonora (GERGES e ARENAS, 2010).

Quando se efetuam medições dos níveis de pressão sonora se deve considerar o que é chamado de ruído de fundo, isto é, o ruído ambiente gerado por fontes que não são objetos de estudo. Na prática significa que o nível de pressão sonora em estudo deve estar com no mínimo 3 dB acima do nível pressão sonora de fundo. Se a diferença for menor que 3 dB(A), o nível do ruído de fundo é muito alto para uma medição confiável. Por outro lado, quando a diferença for maior que 10 dB(A) não é necessário fazer a correção da medição. Desta forma, a subtração dos níveis de pressão sonora é calculada através das equações 2.9 e 2.10.

$$\Delta L = 10 \log \left[ 10^{\frac{L_t}{10}} - 10^{\frac{L_f}{10}} \right] \quad (2.9)$$

$$NPS = L_t - \Delta L \quad (2.10)$$

onde:

- $L_t$ : nível de pressão sonora total, em dB(A);
- $L_f$ : nível de pressão sonora de fundo, em dB(A);

- $\Delta L$ : diferença entre os níveis de pressão  $L_t$  e  $L_f$  sendo  $L_t > L_f$ , em dB(A); e
- NPS: nível de pressão total corrigido, em dB(A).

O  $\Delta L$  calculado através da equação 2.9 também pode ser determinado utilizando-se a Figura 2.22, que representa a relação entre  $(L_t - L_f)$  e  $\Delta L$  (GERGES e ARENAS, 2010).

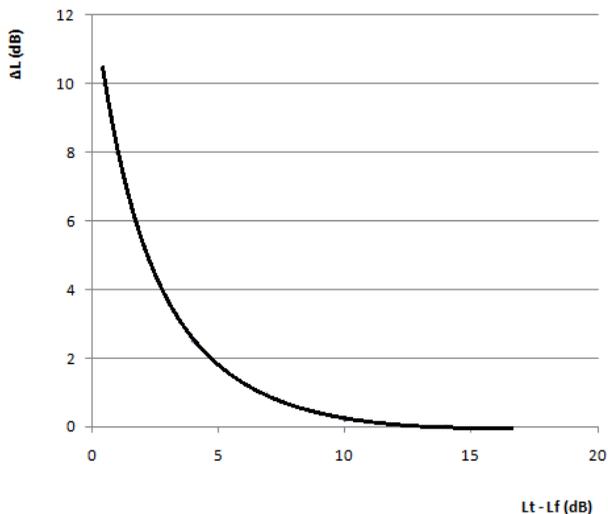


Figura 2.22 - Subtração do ruído de fundo (GERGES e ARENAS, 2010).

## 2.6 ABSORÇÃO SONORA

### 2.6.1 Considerações Iniciais

A absorção sonora de uma superfície representa a capacidade da superfície de não refletir a energia acústica incidente (FEHRL, 2006).

Segundo a NBR 10830 (ABNT, 1989), a absorção sonora significa a dissipação, a condução e a transmissão da energia sonora nas mudanças de meio de propagação, ou, simplesmente, a dissipação desta energia em um meio homogêneo e isotrópico.

A dissipação de energia sonora por materiais absorventes depende da frequência sonora, espessura da amostra e porosidade do material. A absorção sonora do revestimento de uma rodovia é fortemente dependente da frequência acústica da onda sonora incidente. Exemplos de espectros de absorção sonora para um revestimento asfáltico poroso são apresentados na Figura 2.23. Nela pode ser observado que a forma do espectro de absorção sonora é dependente da espessura da camada do revestimento (FEHRL, 2006).

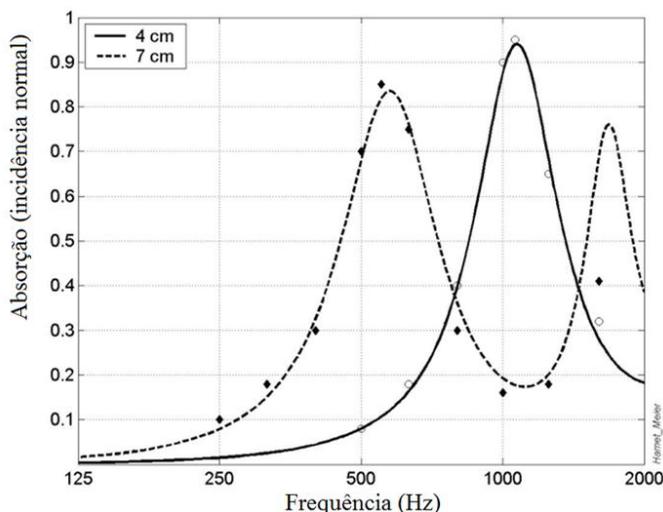


Figura 2.23 - Espectros de absorção em função da espessura do revestimento (FEHRL, 2006).

A Figura 2.24 mostra que para espessuras maiores que 50 mm de revestimento ocorrem dois picos de absorção com o coeficiente um pouco menor comparado com o revestimento de 50 mm e em diferentes frequências (SANDBERG e EJS MONT, 2002). Isso dá a possibilidade de otimizar o coeficiente de absorção na frequência desejada através da espessura do material.

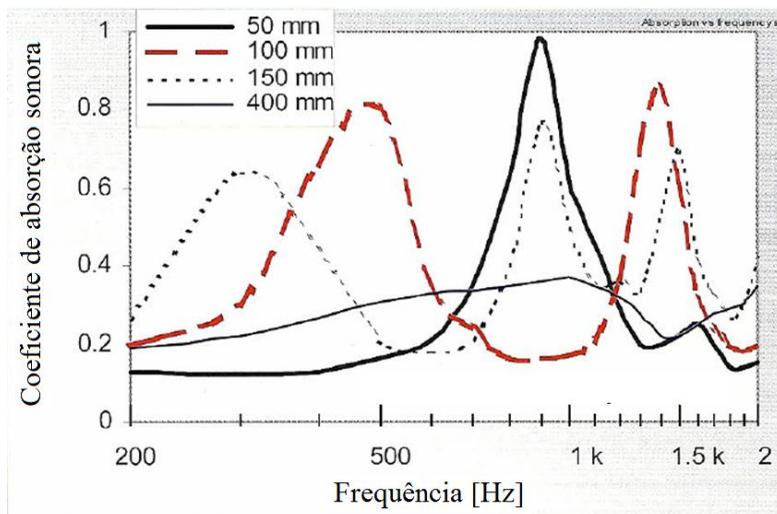


Figura 2.24 - Típica absorção sonora para revestimentos porosos com diferentes espessuras (HAMET *et al*, 1990 *apud* SANDBERG e EJSMONT, 2002)

Algumas pesquisas tem mostrado experimentalmente em campo que revestimentos porosos com maiores espessuras (70 mm) indicam redução de ruído de 7 dB(A) ao invés de 4 dB(A) para espessuras menores (40 mm) em relação ao revestimento denso comum de referência (PIPIEN e BAR, 1990 *apud* SANDBERG e EJSMONT, 2002).

Quando a onda sonora encontra um objeto em sua propagação uma parte dela é refletida, outra parte é absorvida e uma terceira parcela é transmitida. As quantidades de som refletidas, absorvidas e transmitidas dependem do comprimento de onda e da amplitude da onda sonora, e das propriedades do material que compõe o objeto. É possível definir os seguintes coeficientes:

- Coeficiente de reflexão sonora:  $\alpha_r = \frac{\text{Energia acústica refletida}}{\text{Energia acústica incidente}}$
- Coeficiente de absorção sonora:  $\alpha_a = \frac{\text{Energia acústica absorvida}}{\text{Energia acústica incidente}}$
- Coeficiente de transmissão sonora:  $\alpha_t = \frac{\text{Energia acústica transmitida}}{\text{Energia acústica incidente}}$

A transmissão sonora é a propriedade do material que permite que o som passe de um meio para o outro através de uma superfície.

### 2.6.2 Materiais de Absorção Sonora

Os materiais de alta absorção sonora são normalmente porosos e fibrosos. Nos materiais porosos, a energia acústica incidente entra pelos poros e se dissipa por múltiplas reflexões da onda sonora e atrito viscoso entre os poros, transformando-se em energia térmica (ALLARD, 1993).

Para materiais fibrosos, a energia acústica penetra pelos interstícios das fibras, vibrando-as junto com o ar. A dissipação sonora ocorre então pela transformação da energia acústica em energia térmica pelo atrito entre as fibras excitadas (DELANY e BAZLEY, 1970).

Tanto para os materiais porosos como para os fibrosos, é essencial que os mesmo admitam a passagem de um fluxo de ar, ocasionando dessa forma a propagação das ondas sonoras dentro do material (GERGES e ARENAS, 2010).

A caracterização da absorção acústica de um material é determinada pelo coeficiente de absorção  $\alpha_a$  (razão entre a energia acústica absorvida e a energia acústica incidente). O valor de  $\alpha_a$  é sempre positivo e varia de 0 a 1, sendo que um material puramente absorvente possui um valor de  $\alpha_a=1$ , e um material puramente reflexivo, possui coeficiente de absorção sonora  $\alpha_a=0$  (GERGES e ARENAS, 2010).

A magnitude do coeficiente de absorção sonora depende da frequência da onda sonora, do ângulo de incidência da onda sonora, do tipo de campo sonoro, da densidade do material, da espessura do objeto e da estrutura interna do material (BERANEK, 1971).

Para a quantificação das características internas dos materiais geralmente são usados três parâmetros:

#### a) Resistividade ao fluxo de ar

A resistividade específica do fluxo  $R_s$  pode ser definida pela equação 2.11 (GERGES e ARENAS, 2010).

$$R_s = \frac{\Delta P}{\mu} \quad (2.11)$$

onde:

- $R_s$ : é a resistividade específica ao fluxo de ar, em  $\text{Ns}/\text{m}^3$ ;
- $\Delta P$ : é a diferença de pressão do ar medida nos dois lados de uma amostra de material na qual se força a passagem de ar, em  $\text{N}/\text{m}^2$ ; e
- $\mu$ : é a velocidade do ar normal à superfície da amostra, em  $\text{m}/\text{s}$ .

A resistividade de fluxo  $R$  é definida pela resistividade específica de fluxo por unidade de espessura do material dado pela equação 2.12 (NICHOLS, 1947).

$$R = \frac{R_s}{d} \quad (2.12)$$

onde:

- $R$ : resistividade de fluxo, em  $\text{Ns}/\text{m}^4$ ;
- $d$ : é a espessura da amostra de material, em  $\text{m}$ ; e
- $R_s$ : é a resistência ao fluxo de ar, em  $\text{Ns}/\text{m}^3$ .

#### b) Porosidade

A porosidade  $\eta$  é definida como a relação entre o volume de vazios dos poros da amostra e o volume total da amostra, isto é:

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} \quad (2.13)$$

onde:

- $\eta$ : porosidade;
- $V_v$ : é o volume de vazios da amostra; e
- $V_t$ : é o volume total da amostra;

### c) Fator estrutural

Este parâmetro representa a razão entre a densidade efetiva do fluido e a densidade do mesmo fluido em campo livre. As diversas influências da forma geométrica do esqueleto interno, da densidade e da compressibilidade do material, são representadas por um chamado fator estrutural (GERGES e ARENAS, 2010).

Deve-se mencionar que as teorias mais modernas para o fator estrutural, tem uma concepção mais apropriada do ponto de vista físico, denominando-se “tortuosidade” de um material. A tortuosidade é representada, geralmente, pela letra grega  $\chi$  e pode ser quantificada experimentalmente (TOLSTOY, 1992).

## 2.6.3 Medida do Coeficiente de Absorção Sonora

Existem vários métodos normalizados para as medidas dos coeficientes de absorção sonora dos materiais. Um deles é o método do tubo de impedância. O tubo de impedância utilizado para ensaios laboratoriais de medição da absorção e da impedância acústica (de amostras de revestimentos de pavimentos) é prescrito nas normas ASTM E 1050 (ASTM, 2008) e ISO 10534-2 E (ISO, 1998).

O método consiste em excitar um tubo de impedância (com uma amostra do material em sua extremidade) 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 se determinar a curva de absorção sonora em função da frequência.

Os tubos formam guias de ondas sonoras planas entre uma fonte (alto-falante) disposta em uma extremidade, e uma amostra do material disposta na outra extremidade. Além da absorção sonora é possível medir a impedância sonora (vide item 2.6.4) (MASSARANI, 2004).

---

\*Ruído branco é um tipo de ruído que é produzido pela combinação de sons de todas as frequências. Ao se tomar todos os tons imagináveis que um ser humano pode ouvir e combiná-los em conjunto, ter-se-á um ruído branco.

O tubo de impedância (Figura 2.25) possui uma fonte de ruído colocada em um de seus extremos, enquanto no outro, ele é fechado por uma tampa onde se coloca a amostra do 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).

Nesse método são calculadas as pressões sonoras utilizando um microfone em duas posições pré-estabelecidas. Para o cálculo da absorção, é utilizado o método de função de transferência. A partir da medição da função transferência entre as duas posições do microfone, pode-se calcular o coeficiente de reflexão com o qual se determina o coeficiente de absorção de potência sonora e a impedância acústica específica normal à superfície.

As pressões sonoras são medidas pelas seguintes expressões:

$$p_1 = P_i \cdot e^{j(kx_1 - wt)} + P_r \cdot e^{-j(kx_1 - wt)} \quad e;$$

$$p_2 = P_i \cdot e^{j(kx_2 - wt)} + P_r \cdot e^{-j(kx_2 - wt)}$$

Sendo 1 e 2 as posições do microfone e  $P_i$  e  $P_r$  as pressões incidentes e refletidas. As funções transferência para cada posição do microfone é calculada pela equação 2.14.

$$H_i = \frac{P_i \cdot e^{j(kx_1 - wt)}}{P_i \cdot e^{j(kx_2 - wt)}} = e^{-jk(x_2 - x_1)} = e^{-jks} \quad (2.14)$$

$$H_r = \frac{P_r \cdot e^{-j(kx_1 - wt)}}{P_r \cdot e^{-j(kx_2 - wt)}} = e^{jk(x_2 - x_1)} = e^{jks}$$

onde:

- $H_i$ : função transferência para pressão incidente;
- $H_r$ : função transferência para pressão refletida;
- $x_1$ : distância da amostra ao microfone mais próximo;
- $x_2$ : distância da amostra ao microfone mais afastado;
- $S$ : distância entre os dois microfones.

Para o cálculo da reflexão sonora é utilizada a equação 2.15 em que  $H_{12}$  é a função transferência determinado pela razão entre os campos de pressão nas posições 1 e 2.

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} e^{2jkx1} \quad (2.15)$$

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} \quad (2.16)$$

Basicamente  $H_{12}$  será determinado a partir das medições experimentais determinando as funções transferência entre o sinal do alto-falante e do microfone nas posições 1 e 2 de acordo com a equação 2.16. Calculando a razão entre as funções transferências através da equação 2.17 é obtido  $H_{12}$ .

$$H_{A1} = \frac{p_1}{T} \quad (2.17)$$

$$H_{A2} = \frac{p_2}{T}$$

onde:

- $H_{A1}$ : função transferência entre alto-falante e microfone na posição 1;
- $H_{A2}$ : função transferência entre alto-falante e microfone na posição 2;
- $P_1$ : sinais de pressão na posição 1;
- $P_2$ : sinais de pressão na posição 2;
- $T$ : é a tensão

$$H_{12} = \frac{H_{A1}}{H_{A2}} \quad (2.18)$$

Calculado  $H_{12}$  é calculado  $r$  através da equação 2.18 e com isso calcula-se o coeficiente de absorção pela equação 2.19.

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2.19)$$

onde:

- $\alpha$ : Coeficiente de absorção sonora;
- $r$ : coeficiente de reflexão sonora.

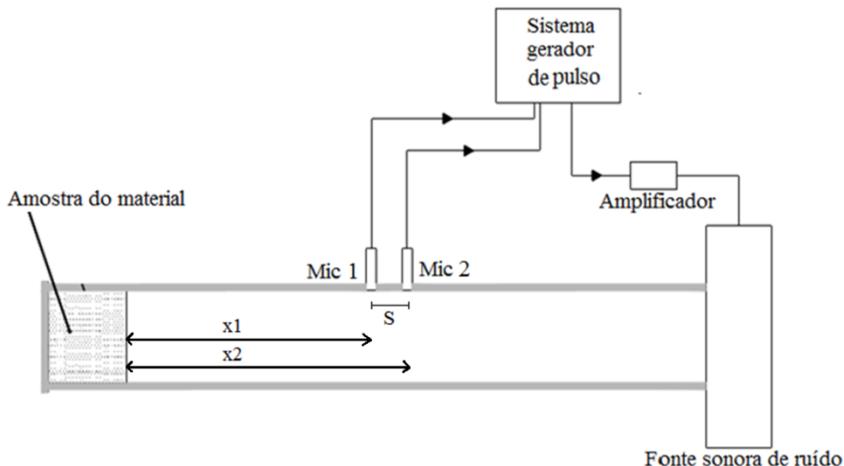


Figura 2.25 - Tubo de impedância (HANSON *et al.*, 2004).

Em um tubo de impedância existem somente ondas planas, excitadas por tons puros abaixo da frequência de corte, composta por uma onda incidente e outra refletora. A frequência de corte é dada pela equação 2.20.

$$f_c = \frac{1,84 \times c}{\pi \times d} \quad (2.20)$$

onde:

- $f_c$ : frequência de corte (abaixo dela só atuam ondas planas);
- $c$ : é velocidade do som no ar a temperatura de 20° C, em m/s; e
- $d$ : é o diâmetro do tubo a ser utilizado, em m.

Abaixo da frequência de corte, somente ondas planas se propagam no meio cilíndrico. Acima da frequência de corte as ondas sonoras não se propagam como ondas planas, mas sim como ondas laterais ou cilíndricas (GERGES e ARENAS, 2010).

Os melhores resultados são obtidos numa determinada faixa de frequência que depende da distância 's' entre os microfones e pode ser calculada pela equação 2.21.

$$\frac{0,1c}{2s} \leq f \leq \frac{0,8c}{2s} \quad (2.21)$$

onde:

- c: é a velocidade do som no ar a 20°C, que é de 343 m/s; e
- s: é a distância entre os centros dos furos nos quais será posicionado o microfone.

As vantagens da utilização da técnica do tubo de impedância são: baixo custo, simplicidade, rapidez nos preparativos do procedimento e pouco equipamento requerido. No entanto, no caso geral de tratamentos acústicos, com a aplicação de materiais absorventes para o controle do ruído, a onda sonora incidente está composta por ondas aleatórias e bandas de frequência (não em tons puros). Com isso o coeficiente de absorção sonora passa a depender fortemente do ângulo de incidência das ondas (GERGES e ARENAS, 2010).

Os resultados dessas medições têm sido usados por empresas de automóveis para a avaliação das características de ruído de rodovias e as interações acústicas com os pneus de um automóvel (HANSON *et al.*, 2004).

#### 2.6.4 Impedância Acústica

Impedância acústica é a oposição que o meio oferece à passagem da onda sonora, em função da frequência e velocidade. Define-se a impedância acústica (Z) de um meio material como a razão entre a pressão sonora (P) e a velocidade das partículas (v) no meio material. A equação 2.22 expressa esta relação.

$$Z = \frac{P}{v} \quad (2.22)$$

onde:

- Z: é a impedância acústica específica de valor real (para ondas planas), em kg/m<sup>2</sup>s;
- V: é a pressão acústica no meio (para ondas planas se propagando no sentido positivo de x); e
- v: é a velocidade de vibração da partícula (para ondas planas se propagando no sentido positivo de x).

O valor da impedância acústica para ondas planas é um valor real. A impedância acústica  $Z$  de um material também pode ser expressa através da equação 2.23, sendo o produto da densidade do material ( $\rho$ ) com a velocidade do som ( $c$ ) no meio. Para ondas estacionárias ou divergentes, o valor de  $Z$  em geral é um número complexo.

$$Z = \rho \times c \quad (2.23)$$

onde:

- $Z$ : é a impedância acústica específica de valor real (para ondas planas), em  $\text{kg/m}^2\text{s}$ ;
- $\rho$ : é a densidade do material, medida em  $\text{kg/m}^3$ ; e
- $c$ : é a velocidade do som no meio, medida em  $\text{m/s}$ .

Para condições normais, temperatura de  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , densidade  $\rho = 1,21\text{ kg/m}^3$  e velocidade do som  $c = 343\text{ m/s}$ , a impedância característica do ar, aplicando-se a equação 2.23, é  $415,03\text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Embora a geração de ruído da interação pneu-pavimento e o processo de propagação do mesmo sejam bastante complexos, verificou-se que para a maioria dos propósitos práticos, a impedância acústica de incidência normal da superfície (método do tubo de impedância) pode ser usada como um meio para determinar os benefícios relativos acústico dos diferentes tipos de pavimentos (FEHRL, 2006).

A Figura 2.27 mostra o resultado encontrado pela M+P (empresa holandesa) do ensaio de absorção sonora utilizando um tubo de impedância em um revestimento poroso com 29 mm de espessura.

Láo 2004 também realizou ensaios de absorção sonora em diferentes revestimentos asfálticos. A Figura 2.26 mostra os resultados do ensaio de absorção sonora com a utilização do tubo de impedância realizado em uma camada porosa de atrito com diferentes espessuras.

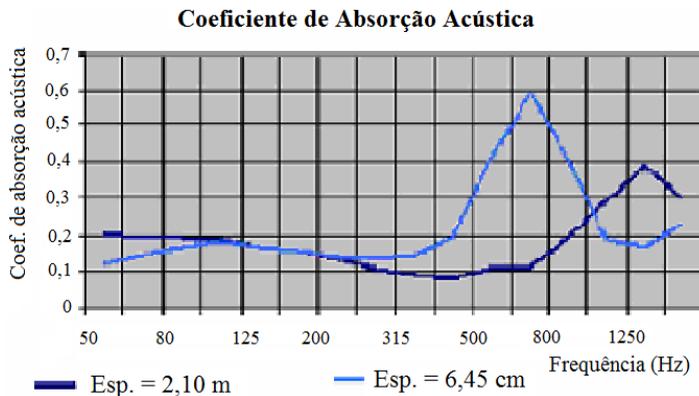


Figura 2.26 - Comparação dos coeficientes de absorção acústica obtidos em corpos de prova de espessuras diferentes, da mistura tipo CPA (LÁO, 2004)

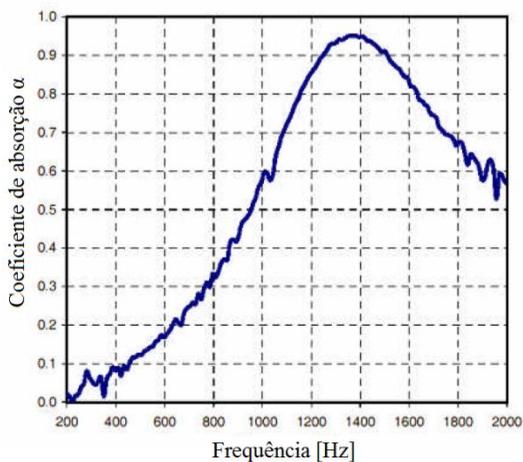


Figura 2.27 - Coeficiente de absorção sonora (FEHRL, 2006)

No estudo realizado por Astrana Junior (2006) também foi utilizado o tubo impedância para verificar a absorção sonora de misturas asfálticas. A Figura 2.28 mostra o resultado do ensaio realizado em uma placa de concreto asfáltico drenante em 3 pontos.

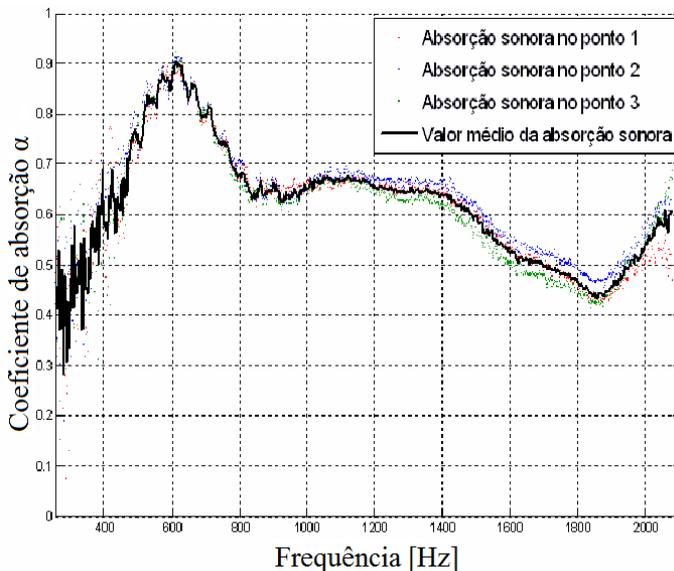


Figura 2.28 - Curva de absorção sonora de uma mistura asfáltica drenante (ASTRANA JUNIOR 2006)

Observa-se um comportamento diferente da curva de absorção da Figura 2.28 em relação a outros trabalhos já realizados, isso pode ser explicado por que o ensaio foi realizado com o tubo aberto, colocado em cima da placa de concreto asfáltico drenante.

O Quadro 2.2 mostra o coeficiente de absorção para alguns materiais utilizados na construção civil segundo a NBR 12.179/1992.

Quadro 2.2 - Absorção Acústica de materiais utilizados na construção civil  
norma NBR 12.179/1992.

Materiais		Frequência (Hz)				
		125	250	500	1000	2000
Materiais usuais densos	Reboco áspero, cal	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
	Reboco liso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
Fibras Naturais	Chapa leve de lã de madeira, de 25 mm, em parede rígida.	0,04	0,13	0,52	0,75	0,61
	Chapa leve de lã de madeira com espaço de 5 cm enchido de absorvente acústico.	0,18	0,33	0,5	0,65	0,65
Materiais Sintéticos	Folha absorvente fina, microporosa, a 50 mm da parede, espaço vazio.	0,04	0,15	0,52	0,95	0,93
Minerais	Parede de pedra-pomes de 100 mm, sem revestimento.	0,03	0,17	0,26	0,5	0,56

## 2.7 SONÔMETROS

O sonômetro é um instrumento que serve para medir níveis de pressão sonora. Nos sonômetros, a medida pode ser realizada manualmente ou de forma programada.

Os sonômetros, também chamados de medidores de nível de pressão sonora (NPS) podem ser modelos simples, os quais registram apenas nível de pressão sonora global em dB(A) ou modelos sofisticados, que registram a pressão sonora em outras escalas ponderadas de frequência (A, B, C, D) (GERGES e ARENAS, 2010).

O processamento do sinal inclui a aplicação de ponderações em frequência e em tempo, especificados em normas internacionais, como por exemplo, a CEI 61672-1 (2003). Como referido anteriormente, a ponderação para o ruído rodoviário é a A (SANTOS, 2007).

Quando o sinal é processado pelos filtros de ponderação, o nível de pressão sonora resultante é mostrado em decibels (dB), com base na pressão sonora de referência  $p_0$  ( $2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ ).

Basicamente um sonômetro é formado pelos seguintes componentes:

- Um microfone com uma resposta em frequência, geralmente, entre 8 Hz e 22 kHz;

- Um circuito que processa eletronicamente o sinal;
- Uma unidade de leitura; e
- Uma saída que permite ligar o sonômetro a um osciloscópio (instrumento de medida eletrônico para a representação gráfica de sinais elétricos) que complementa a medida da pressão sonora com a visualização da forma da onda sonora.

De acordo com a norma ANSI S1-4-1971, existem quatro classes de medidores de NPS:

- Classe 1: de alta precisão usado em laboratório para obter níveis de pressão sonora de referencia;
- Classe 2: para uso geral com precisão para uso em campo;
- Classe 3: para uso comum; e
- Classe 4: para uso especial, sendo os menos precisos.

## 2.8 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO RUÍDO PNEU-PAVIMENTO

A avaliação do ruído de tráfego pode ser feita sobre duas concepções:

- A ambiental: que leva em conta o ruído global gerado pelo tráfego de veículos; e
- A do pneu-pavimento: que leva em conta somente o ruído gerado pelo acoplamento do pneu com o pavimento.

Existem duas concepções usadas para a medição do NPS da interação pneu-pavimento nas rodovias (HANSON *et al.*, 2004):

- Medições distantes dos pneus: quando as medições do nível de pressão sonora são realizadas por microfones colocados ao lado da rodovia; e
- Medições perto dos pneus: quando o nível de pressão sonora é medido por microfones colocados perto da interface pneu-pavimento. Estes procedimentos são classificados como Close Proximity Method (CPX).

Vários são os métodos utilizados para a classificação das superfícies das rodovias quanto à emissão do ruído gerado pela interação

pneu-pavimento. Dentre os métodos mais utilizados, destacam-se os seguintes (SANTOS, 2007):

- Método estatístico de passagem (SPB);
- Método da estrada proximidade (CPX);
- Método da passagem controlada (CPB);
- Método da superfície estendida;
- Método Cost-By (CB) /Método do motor desligado; e
- Método do tambor (Drum-DR).

### 2.8.1 Ruído Ambiental

A previsão e o controle dos níveis de pressão sonora têm como objetivo prevenir e reduzir os seus efeitos prejudiciais causados à população. Com o desenvolvimento das políticas que exigem estudos do impacto ambiental, é necessário desenvolver modelos de previsão de ruído comparáveis com os limites estabelecidos em cada comunidade.

As descrições utilizadas e os limites admissíveis de ruído são modificados a cada ano e depende da legislação de cada país, pois o nível de exigência das populações é diferente e pode mudar com o passar dos anos (CROCKER, 1997).

Via de regra, o poder Público estabelece, através de legislação local, depois de consultados os valores estabelecidos na legislação superior (no caso do Brasil, segue a NBR 10151 – ABNT, 2000 e a NBR 10152 – ABNT, 2000), os limites máximos admitidos de ruído que deverão ser observados nos períodos matutino, vespertino e noturno (SPECHT *et al.*, 2009).

A NBR 10151/2000 fixa as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades, independente da existência de reclamações. Esta norma especifica:

- a) um método para a medição de ruído;
- b) aplicação de correções nos níveis medidos se o ruído apresentar características especiais; e
- c) uma comparação dos níveis corrigidos com um critério.

O método de avaliação envolve as medições do nível de pressão sonora equivalente  $L_{eq}(A)$ . O nível de critério de avaliação (NCA) para ambientes externos é exposto no Quadro 2.3.

Os limites de horário para o período diurno e noturno podem ser definidos pelas autoridades de acordo com os hábitos da população.

Entretanto, o período noturno não deve começar depois das 22 horas e não deve terminar antes das 7 horas do dia seguinte.

O critério utilizado para ambientes internos é indicado no Quadro 2.3 como a correção de -10 dB(A) para janela aberta e -15 dB(A) para janela fechada.

Quadro 2.3 - Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB(A) (NBR 10151/2000).

Tipos de áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

### 2.8.1.1 Nível sonoro dia-noite

Este descritor, nível sonoro dia-noite, é utilizado quando o ruído do horário noturno é relevante. É usado nos Estados Unidos da América e em alguns países da Europa para medir o impacto do ruído em zonas residenciais. Foi desenvolvido pela EPA (Environmental Protection Agency) em 1973 e é calculada através da equação 2.24 (GERGES e ARENAS, 2010).

$$L_{DN} = 10 \log \left[ \frac{1}{24} \left\{ \int_{07:00}^{22:00} 10^{L/10} dt + \int_{22:00}^{07:00} 10^{(L+10)/10} dt \right\} \right] \quad (2.24)$$

onde:

- $L_{DN}$ : é o nível sonoro dia-noite, em dB(A);
- $L$ : é o nível medido previsto, em dB(A); e
- $t$ : é o tempo em horas.

### 2.8.1.2 Índice de ruído do tráfego

Este índice foi desenvolvido como um critério de aceitabilidade para o ruído de tráfego em áreas residenciais (GRIFFITHS e LANGDON, 1968).

Para a sua elaboração foi levado em conta um estudo realizado em Londres que incluía medições em 14 pontos distintos onde o ruído de tráfego era a fonte principal. Este índice (Traffic Noise Index-TNI) é calculado através da equação 2.25 (GERGES e ARENAS, 2010).

$$TNI = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30 \quad (2.25)$$

onde:

- TNI: Traffic Noise Index (índice de ruído de tráfego), em dB(A); e
- $L_{10}$  e  $L_{90}$ : são os níveis sonoros estatísticos (ver item 2.3).

## 2.8.2 Avaliação do Ruído Pneu-Pavimento

### 2.8.2.1 Método estatístico de passagem (SPB)

O método estatístico de passagem (SPB) foi desenvolvido para avaliar a influência da superfície da rodovia sobre o ruído gerado pelo tráfego. A metodologia é definida na norma ISO 11819-1 (FEHRL, 2006).

Este método consiste em medir a maior pressão sonora (com filtro ponderador tipo A) de veículos individuais que estão passando por um ponto de referência na rodovia, assim como a sua velocidade (vide Figura 2.29). Cada veículo em que se faz a medida da pressão sonora é classificado em leve, pesado com dois eixos ou pesado com mais de dois eixos (SPECHT *et al.*, 2009).

Segundo a norma ISO 11819-1, o nível sonoro máximo é medido a 7,5 m do centro da faixa de rolamento e a 1,2 m de altura em relação ao nível da rodovia (vide Figura 2.30). As medições são realizadas para a passagem de 3 diferentes classes de veículos (leves, pesados com dois eixos e pesados com mais de dois eixos) do tráfego normal que passa no local do teste. Os resultados são normalizados para um (o mais adequado) dos três grupos de velocidades [baixa: (menor que 64 km/h);

média: (entre 65 e 99 km/h); alta: (acima de 100 km/h)] e comparados, para as 3 diferentes classes de veículos, com os resultados obtidos em outra superfície, para a mesma velocidade normalizada. Em cada medição é controlada a velocidade do veículo, a temperatura do ar e a temperatura do pavimento (HANSON *et al.*, 2004).



Figura 2.29 - Medida do ruído pelo método estatístico de passagem (SPB) (CERATTI *et al.*, 2009).

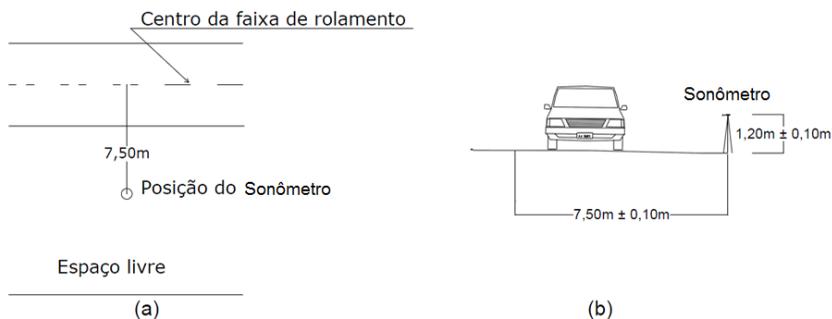


Figura 2.30 - Posicionamento do microfone: (a) vista superior e (b) vista frontal (NORMA ISO 11819-1:1997).

Para assegurar que não ocorram erros aleatórios em número inaceitavelmente elevado, deverá medir-se o seguinte número mínimo de veículos, dentro de cada categoria de veículos (NORMA ISO 11819-1:1997):

- Categoria 1 (automóveis): mínimo 100;
- Categoria 2a (veículos pesados de eixo duplo): mínimo 30;
- Categoria 2b (veículos pesados do eixo múltiplo): mínimo 30; e
- Categorias 2a e 2b em conjunto (veículos pesados): mínimo 80.

Isto significa que, por exemplo, se houver 30 veículos na categoria 2a, serão necessários 50 veículos dentro da categoria 2b a fim de que as categorias 2a e 2b contenham em conjunto, pelo menos, 80 veículos. A estipulação de números mínimos deve-se às exigências de precisão, por oposição ao tempo necessário para medir o número desejado de veículos no tráfego real.

As medições deverão ser efetuadas somente para veículos individuais em passagem (pass-by) que possam ser claramente distinguidos acusticamente de outro tráfego na rodovia (SANTOS, 2007).

Para que a medida da pressão sonora seja confiável, não deverão existir grandes superfícies refletoras tais como barreiras de segurança sólidas ou taludes, no espaço de 10 m a partir de uma linha traçada desde a posição do microfone de medição, cruzando a estrada perpendicularmente à linha de percurso dos veículos como ilustrada na Figura 2.31 segundo a Norma ISO 11819-1:1997.

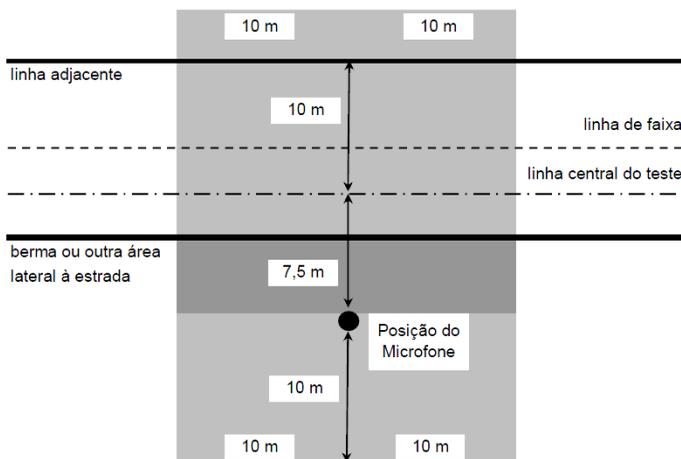


Figura 2.31 - Definição da zona onde não é permitida a existência de quaisquer barreiras de segurança (NORMA ISO 11819-1:1997).

Assim, os níveis de pressão sonora para automóveis, veículos pesados de eixo duplo e veículos pesados de eixo múltiplo são “adicionados”, assumindo-se determinadas proporções destas categorias de veículos, de modo a fornecer um único “índice” que constitua o resultado final. Este índice é designado por Índice Estatístico de Passagem (SPBI) e pode ser usado na comparação de superfícies de

rodovia, de modo que a sua influência no nível de ruído de um fluxo de tráfego possa ser determinada (NORMA ISO 11819-1:1997).

Este índice é calculado a partir da equação 2.26 para os níveis sonoros de cada categoria de veículo, da velocidade de referência e de um fator de ponderação, de acordo com o Quadro 2.4.

$$SPBI = 10 \log \left[ W_1 \times 10^{L_1/10} + W_{2a} \left( \frac{V_1}{V_{2a}} \right) \times 10^{L_{2a}/10} + W_{2b} \left( \frac{V_1}{V_{2b}} \right) + 10^{L_{2b}/10} \right] \quad (2.26)$$

onde :

- SPBI: índice estatístico de passagem (Statistical Pass-By Index), para uma média entre veículos leves e pesados;
- $L_1$ ,  $L_{2a}$ ,  $L_{2b}$ : valores de pressão sonora para as respectivas categorias de veículo, em dB(A);
- $W_1$ ,  $W_{2a}$ ,  $W_{2b}$ : fatores que presumem as proporções das respectivas categorias de veículo, de acordo com o Quadro 2.4; e
- $V_1$ ,  $V_{2a}$ ,  $V_{2b}$ : velocidades de referência das respectivas categorias dos veículos, de acordo com o Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Velocidades de referência ( $V_{ref}$ ) e fatores preponderantes ( $W_x$ ) (NORMA ISO 11819-1:1997).

Categoria do veículo	Grupo de velocidade do veículo					
	Baixa		Média		Alta	
	$V_{ref}$ (km/h)	$W_x$	$V_{ref}$ (km/h)	$W_x$	$V_{ref}$ (km/h)	$W_x$
Automóveis	50	0,900	80	0,800	110	0,700
Pesado de 2 eixos	50	0,075	70	0,100	85	0,075
Pesado multi-eixos	50	0,025	70	0,100	85	0,225

Os valores típicos para os fatores preponderantes  $W_x$  ( $W_1$ ,  $W_{2a}$ ,  $W_{2b}$ ) podem variar consideravelmente de lugar para lugar, de país para país e de acordo com a hora do dia ou da noite. Os valores selecionados no Quadro 2.4 representam globalmente a maioria de casos típicos que permite comparações simples de superfícies de rodovias (SANTOS, 2007).

As principais vantagens deste método são:

- O fato de o operador estar muito próximo da via e ser ele quem seleciona o veículo que vai efetuar o teste, possibilitando uma filtragem de situações anormais, associadas ao comportamento dos

condutores (buzinadas, carga mal condicionada com ruído aerodinâmico excessivo, etc.);

- A caracterização da circulação rodoviária típica da via depende apenas da amostra selecionada; e
- Não é necessário condicionar o tráfego.

Por sua vez tem como desvantagens:

- O ruído do motor não permite saber exatamente a influência do ruído pneu-pavimento;
- Não é controlado o tipo de pneus e a idade dos veículos, o que faz com que, em situações específicas, possam ocorrer incertezas quanto à verdadeira eficácia do pavimento; e
- É necessário um elevado número de medições.

#### 2.8.2.2 Método da estrada proximidade (CPX)

Este método CPX (Close Proximity Method) mede os níveis de pressão sonora a partir de microfones instalados próximos aos pneus.

Para a medida do ruído seguindo essa metodologia, utiliza-se um trailer especialmente projetado para esta finalidade em que são posicionados microfones junto aos pneus do trailer.

Nesse método, prescrito na ISO 11819-2 (ISO, 2010), é medida a pressão sonora resultante da interação pneu-pavimento em velocidades pré-programadas. Sucintamente, o equipamento utilizado consiste na instalação de microfones junto a dois pneus no interior de um trailer, o qual possui uma cobertura para reduzir a incidência do vento e do ruído proveniente dos outros veículos. Isso permite que o ensaio possa ser realizado independente do volume de tráfego na via. O ensaio é relativamente rápido e de resultados bastante confiáveis. Porém apresenta uma limitação, pois permite medições em uma série limitada de tipos de pneus (SPECHT *et al.*, 2009). A norma ISO 11819-2 (ISO, 2010) define os requisitos para o trailer. A Figura 2.32 mostra o equipamento do método CPX (HANSON *et al.*, 2005).



Figura 2.32 - Equipamento de ensaio do método CPX (HANSON *et al.*, 2005).

Os pneus utilizados no trailer são especificados pela norma ISO 11819-3 e denominados pneus de referência.

Os padrões dos pneus de referência usados para as avaliações de pressão sonora com o equipamento do método CPX são os seguintes:

- ASTM SRTT; e
- Avon AV4.

Os resultados médios determinados com o pneu ASTM SRTT representam o ruído gerado entre a interação da superfície da rodovia com os veículos leves, enquanto o pneu do tipo Avon AV4, correlaciona-se razoavelmente bem com o efeito da interação da superfície com caminhões. A Figura 2.33 mostra os pneus de referência utilizados no método CPX (MORGAN *et al.*, 2009).

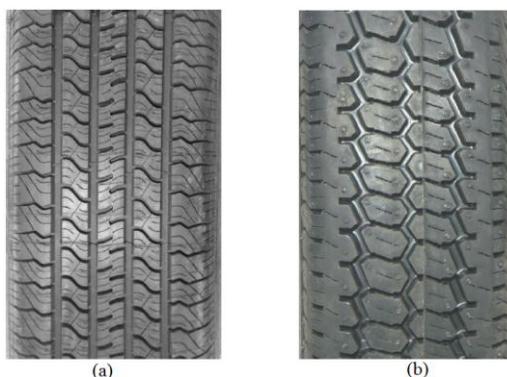


Figura 2.33 - Pneus de referência CPX: (a) ASTM SRTT e (b) Avon AV4 (MORGAN *et al.*, 2009).

Os testes são realizados com o intuito de determinar o "nível de ruído rodoviário", em uma ou mais das velocidades de referência indicada (50, 80 e 110 km/h). Para a finalidade de relatar as características acústicas de superfícies de rodovia o ruído da interação pneu-pavimento é avaliado para os dois tipos de pneus de referência. Pode ser calculada a média das duas avaliações, para ter um "índice único" que constitui o resultado final. Esse índice é chamado de "Close-Proximidade Sound Index (CPXI)" e pode ser usado para comparação de superfícies de rodovias (NORMA ISO 11819-2: 2010).

Cada seção de teste em que será feita uma medição da pressão sonora deve ter um comprimento de pelo menos 100 m. A rodovia deve ser, essencialmente, em linha reta, a menos que a intenção com a medida seja o estudo do efeito da sua curvatura. No entanto, as rodovias com curvas suaves (definida como um raio superior a 250 m para velocidade de 50 km/h, 500 m para 80 km/h, 1000m para 110 km/h) podem ser considerados como locais válidos para os testes (NORMA ISO 11819-2: 2010).

As medidas são feitas por dois microfones montados a 0,20 ( $\pm$  0,02) m do lado do pneu e a uma altura acima do nível do pavimento de 0,10 m ( $\pm$  0,02). A Figura 2.34 ilustra a posição dos microfones.

Este método apresenta como principais vantagens:

- A utilização do trailer diminui a incerteza na determinação da eficácia do pavimento em reduzir o ruído;
- É bem caracterizada a influência do tipo de revestimento no ruído de rolamento;
- Não é necessário condicionar o tráfego normal da via; e
- É necessário um número reduzido de medições.

Tem como desvantagens:

- Os pneus de ensaio podem não ser representativos do tráfego normal da via; e
- Não é conhecida a influência do tipo de revestimento no ruído global da passagem de veículos.

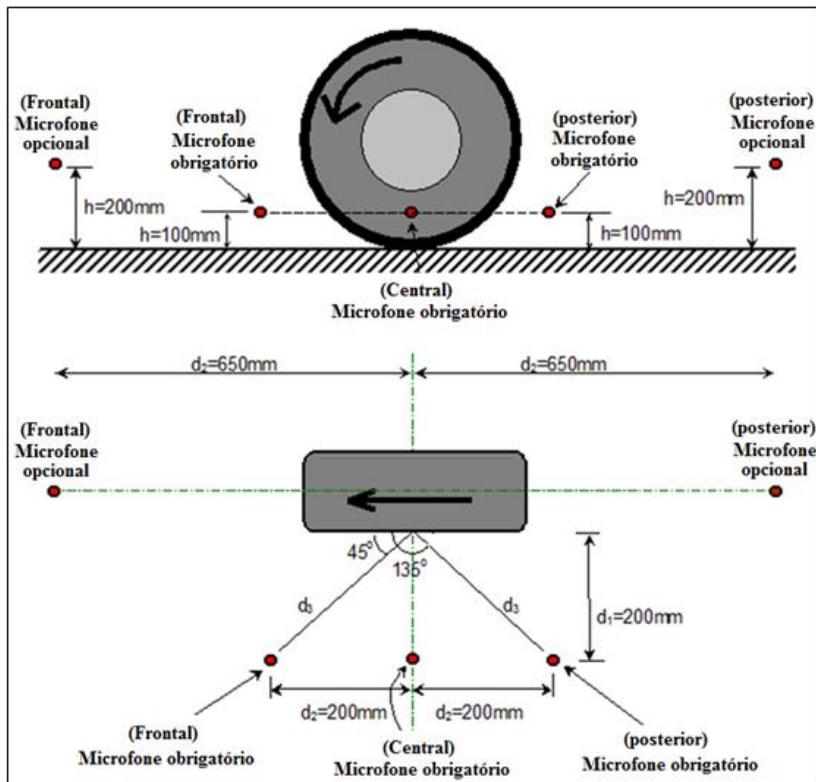


Figura 2.34 - Posicionamento dos microfones no trailer CPX (NORMA ISO 11819-2: 2010).

### 2.8.2.3 Método da passagem controlada (CPB)

O método Controlled Pass-By (CPB) pode ser realizado utilizando um único veículo ou veículos selecionados. Neste método, o ruído gerado por um único automóvel pequeno (de peso inferior a 900 kg, com distância entre os eixos das rodas de 1,45 a 1,55 m) ou um automóvel médio (de peso entre 900 a 1300 Kg, com distância entre os eixos das rodas de 1,75 e 1,95 m) é medido em um local de ensaio especialmente definido.

Este método é executado de acordo com a Norma NF S31-119-2: 2000: “Acústica - Caracterização in situ das propriedades acústicas de

revestimentos de pavimentos - Medidas acústicas de passagem controlada - Parte 2: Procedimento com veículo controlado".

Baseia-se na escolha de 2 automóveis e 4 conjuntos de pneus, que servirão de veículos de ensaio. Cada veículo desloca-se à velocidade constante com o motor em condições normais e é efetuada a medição do respectivo nível sonoro máximo, a 7,5 m da via (Figura 2.35) (LÉDÉE, 2006). São necessárias pelo menos 32 medições por tipo de revestimento. Em cada medição é controlada a velocidade do veículo, a temperatura do ar, a temperatura do revestimento e a velocidade do vento (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

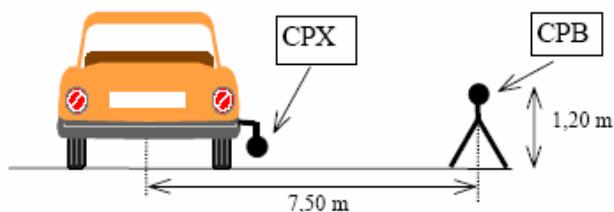


Figura 2.35 – Método da Passagem Controlada (CPB) vs. Método da Estrita Proximidade (CPX) (LÉDÉE, 2006).

As principais vantagens deste procedimento são (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

- A utilização dos mesmos veículos de ensaio que atuam no tráfego diminui a incerteza na determinação da eficácia do revestimento em reduzir o ruído; e
- É necessário um menor número de medições.

Como desvantagens são citadas:

- Os veículos de ensaio podem não ser representativos do tráfego normal da via;
- O ruído do motor não permite saber exatamente a influência do tipo de revestimento no ruído de rolamento; e
- Este tipo de ensaio exige condicionamento do tráfego normal da via ou medições apenas em certas horas do dia ou em pistas de testes.

Um exemplo deste tipo de ensaio é um estudo realizado pela Universidade de Marquette em Milwaukee nos EUA. Neste estudo, os autores usaram um Ford Taurus 1996, que foi operado a 60, 65 e 70

mph, onde eram realizadas três medições por dia para cada velocidade (HANSON *et al.*, 2004).

#### 2.8.2.4 Método da superfície estendida

Este método é utilizado para a caracterização da absorção sonora da superfície do revestimento. Ele é executado de acordo com a Norma ISO 13472-1: 2002 – “Acústica - Medição das propriedades de absorção sonora de pavimento in situ: Método de superfície estendida”.

O método se aplica principalmente a estruturas de pavimento com revestimento poroso. A partir da emissão de uma onda acústica produzida por um alto-falante colocado sobre uma superfície de pavimento (Figura 2.36), é determinada a relação entre a energia do som refletida da superfície do pavimento e a energia inicialmente emitida pelo alto-falante. A partir desta relação de energia, é determinado o coeficiente absorção sonora da estrutura do pavimento (BERENGIER *et al.*, 2001).

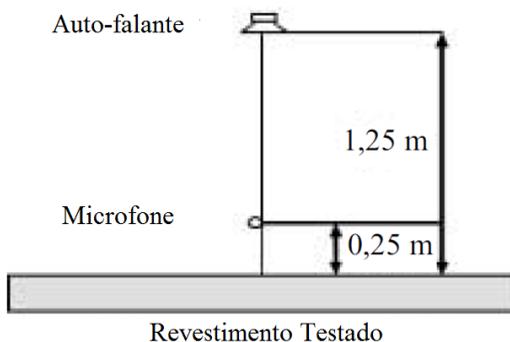


Figura 2.36 - Método da superfície estendida (BERENGIER *et al.*, 2001).

Este método apresenta como vantagens (SANTOS, 2007):

- Conhecer exatamente a capacidade da absorção sonora do revestimento, a qual tem grande influência no desempenho acústico do pavimento; e
- Necessidade de um número reduzido de medições.

Tem como desvantagens:

- Exige condicionamento total, ou pelo menos parcial, do tráfego da via ou medições apenas em certas horas do dia; e
- Não permite conhecer a influência do revestimento no ruído geral gerado pela passagem dos veículos e do ruído da interação pneu-pavimento.

#### 2.8.2.5 Método Coast-By

Esse método é executado de acordo com a Norma ISO 13325:2003, em que é medido o ruído gerado pelo contato pneu-pavimento e leva em conta as mesmas características do método da passagem controlada (CPB). No entanto, neste caso, a passagem do veículo de ensaio ocorre com o motor desligado com o veículo em ponto morto. Assim, é medido exclusivamente o ruído gerado pela interação pneu-pavimento. Em cada medição é controlada a velocidade do veículo, a temperatura do ar, a temperatura do pavimento e a velocidade do vento. A Figura 2.37 mostra um ensaio deste tipo sendo realizado em que neste caso foi verificada a influência da água no ruído da interação pneu-pavimento (LÁO, 2004).



Figura 2.37 - Método Coast-By (LÁO, 2004).

As principais vantagens deste método são:

- O motor desligado e o ponto morto permitem saber a exata influência do tipo de revestimento no ruído gerado pelo rolamento;
- A utilização dos mesmos veículos de ensaio diminui a incerteza na determinação da eficácia do pavimento em reduzir o ruído; e
- É necessário um menor número de medições.

Por sua vez tem como desvantagens:

- Os veículos de ensaio podem não ser representativos do tráfego normal da via;
- Não é conhecida a influência do tipo de revestimento no ruído geral da passagem do veículo com o motor ligado; e
- Este teste exige condicionamento do tráfego normal da via ou medições apenas em certas horas do dia, ou ainda, em pistas de testes.

#### 2.8.2.6 Método do tambor (Drum - DR)

Esse método tem como referência o ensaio feito pela Purdue University, de Indiana (EUA), conhecido como Tyre/Pavement Test Apparatus (TPTA). O equipamento consiste em um cilindro de aproximadamente 3,60 metros de diâmetro, que contém as amostras de superfície do revestimento de 1/6 do diâmetro do cilindro. Nele são colocados dois braços com rodas para simular o tráfego, como mostra a Figura 2.38. A sala onde o equipamento é instalado é isolada evitando, assim, o ruído de fundo e a variabilidade climática. A principal característica desse ensaio é que ele consegue representar o ruído apenas do atrito entre o pneu e o pavimento, sem outras fontes (SPECHT *et al.*, 2009).

As principais vantagens deste método são (SANDBERG e EJSMONT, 2002):

- Condições estritamente controladas;
- Muito adequado para testes de pneus;
- Excelente capacidade de repetibilidade e reprodutibilidade; e
- Requer apenas um pneu.

Por sua vez, tem como desvantagens:

- É necessário equipamento especial de medida;

- Requer réplicas de superfícies de rodovia;
- Não é útil em condições de superfície molhada; e
- Menos representativo que os outros métodos.



Figura 2.38 - Método do tambor (SPECHT *et al.*, 2009).

## 2.9 FATORES QUE INFLUENCIAM O RUÍDO GERADO PELO TRÁFEGO DE VEÍCULOS

O ruído gerado pelo tráfego é influenciado por vários fatores que estão inter-relacionados e exercem impactos sobre os níveis gerais do ruído. Os principais fatores são:

- 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).

### 2.9.1 Características do Revestimento do Pavimento

#### 2.9.1.1 Características físicas

Vários fatores físicos da superfície do revestimento influenciam o ruído gerado pela interação pneu-pavimento, entre eles o tamanho

máximo do agregado e a porosidade da superfície, que está diretamente ligada à granulometria dos agregados.

As superfícies silenciosas desenvolvidas atualmente na Europa têm, na maior parte, uma estrutura porosa e uma textura superficial com tamanho máximo do agregado menor. Em termos gerais, a expectativa é que a porosidade reduza alguns dos mecanismos aerodinâmicos de geração ruído e que os agregados menores, impeçam ou diminuam as vibrações sobre o pneu (HAMET *et al.*, 2000).

#### **a) Tamanho máximo do agregado**

Um das alternativas mais comuns para a redução do ruído é usar um tamanho máximo do agregado menor do que 9,5 mm, pois agregados de tamanho pequeno ajudam a reduzir o ruído gerado pelo mecanismo de impacto e choques (FEHRL, 2006).

Astrana Junior (2006) constatou que um dos parâmetros mais importantes para a maximização da absorção sonora das camadas superficiais drenantes estudadas é a variação do tamanho máximo dos agregados.

Quando os agregados são maiores, a macrotextura da superfície do revestimento é maior, gerando um contato superficial maior entre o pneu e a superfície do revestimento. Isto afeta os mecanismos de geração do ruído mecânico de impactos e choques. Desta forma se os grãos forem menores, o contato superficial entre o pneu e a superfície do revestimento é menor e assim, o ruído gerado pela ação mecânica também será menor.

A Figura 2.39 apresenta a influência do tamanho máximo dos agregados no ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

Na Europa em regiões próximas de povoados, onde já existe a preocupação em minimizar o ruído gerado pelo tráfego, são executadas superfícies de dupla camada de mistura asfáltica porosa, onde a superfície superior tem o tamanho máximo do agregado entre 6 a 8 mm (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

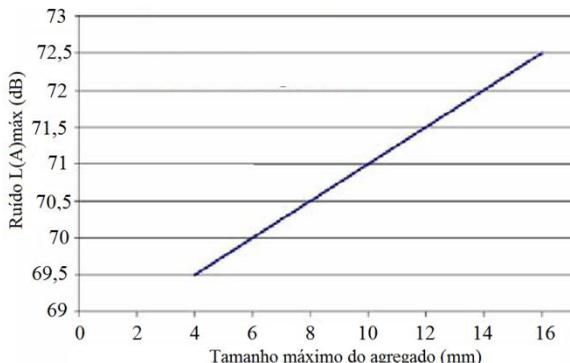


Figura 2.39 - Influência do tamanho máximo dos agregados no ruído gerado pela interação pneu-pavimento (BENDTSEN, 2006).

### b) Porosidade

A porosidade da superfície do revestimento tem um papel fundamental na redução dos níveis de ruído gerado pela interação pneu-pavimento. O aumento da porosidade reduz a compressão e expansão do ar preso sob o pneu, minimizando o ruído gerado pelos mecanismos de aerodinâmica. A porosidade também é importante na absorção sonora, pois o aumento da porosidade geralmente aumenta a absorção acústica e, por consequência, reduz o ruído gerado pelo tráfego (FEHRL, 2006).

De acordo com Sandberg e Ejsmont (2002), uma porcentagem de vazios inicial maior que 20% é um valor mínimo para se atingir uma boa redução de ruído, sendo preferível valores entre 20 e 30%. A espessura da camada porosa deve ser de pelo menos 40 mm, de preferência mais espessa, a fim de propiciar a absorção acústica também em baixas frequências.

Mais importante do que o volume de vazios para redução do ruído são os vazios comunicantes, com eles o som consegue penetrar e fluir pelo material aumentando assim o coeficiente de absorção sonora. Para o cálculo dos vazios comunicantes é medido a quantidade de água que penetra o interior do corpo de prova pela sua face superior enquanto que a face lateral e a inferior são impermeabilizadas por fita adesiva impermeável 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 através da equação 2.27 (AFNOR NF P 98-254-2, 1993):

$$V = \left( \frac{P_{ab}}{A_f \times h_{redu}} \right) \times 100 \quad (2.27)$$

onde:

- V: volume de vazios comunicantes (%);
- P<sub>ab</sub>: peso de água absorvida (g);
- A<sub>f</sub>: área da face (cm<sup>2</sup>);
- h<sub>redu</sub>: altura reduzida (cm).

A altura reduzida é calculada pela equação 2.28

$$h_{red} = h_m - \left( \frac{D_{máx}}{20} \right) \quad (2.28)$$

onde:

- h<sub>m</sub>: altura média do corpo de prova (cm);
- D<sub>máx</sub>: diâmetro máximo do agregado.

No entanto, quanto maior a porosidade do revestimento menor é a sua vida de serviço. Com isso, estudos realizados na Holanda apontam uma porcentagem de vazios inicial entre 10 e 14% como sendo a ideal para a redução do ruído gerado pelo tráfego e para uma maior vida de serviço do revestimento em relação às misturas asfálticas porosas com maiores porcentagens de vazios (entre 25 e 30%).

Os revestimentos asfálticos têm uma porosidade geralmente inferior a 5%. No entanto, quando se aumenta a porosidade para 20% ou mais e quando o ar pode fluir através da mistura, o resultado é a redução sensível do ruído gerado pelo tráfego. A porosidade aumenta a absorção acústica, que é a capacidade de um material de absorver o som, e assim impedir que ele se reflita (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

Os poros da superfície tendem a colmatar com o tempo. Desta forma, a porosidade inicial deve ser tal que diminua ou retarde a ocorrência da colmatação. Também o controle do transporte de carga a granel e restrições do acesso direto de veículos vindos de estradas rurais para a rodovia pavimentada retardam a colmatação (SANDBERG e EJSFONT, 2002).

### 2.9.1.2 Idade das camadas

O desempenho acústico das superfícies tenderá a se degradar ao longo do tempo como resultado do desgaste devido a ação do tráfego, deterioração dos materiais e as mudanças na textura da superfície. No caso de superfícies porosas, a colmatação dos poros na superfície por sujeira também pode reduzir a eficiência acústica ao longo do tempo (FEHRL, 2006).

Raaberg *et al.*, (2001) estudaram a redução do ruído comparando diferentes superfícies asfálticas porosas a longo prazo, tendo como referência uma superfície com revestimento asfáltico denso comum. Durante o período do ensaio de 8 anos não se efetuou qualquer limpeza da superfície e as medições foram realizadas de forma similar ao Método Estatístico de Passagem (SPB). Verificou-se que durante os primeiros seis anos as superfícies porosas geravam menos ruído do que o revestimento de referência.

Em geral, durante os primeiros dois anos considera-se que para as camadas de misturas asfálticas densas os níveis de ruído aumentam, e com o passar dos anos, mantêm-se estáveis até quando começarem a surgir as trincas e as irregularidades longitudinais no revestimento asfáltico (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

Algumas superfícies podem apresentar um significativo aumento dos níveis de ruído gerado à medida que atingem o final das suas vidas. As superfícies betuminosas que apresentam desagregação após longos períodos sob pesada ação do tráfego, bem como o surgimento de trincas e o envelhecimento do ligante, podem também contribuir para elevados níveis de ruído pneu-pavimento (FRANKLIN *et al.*, 1979).

A Figura 2.40 mostra o desempenho acústico de diferentes superfícies ao longo do tempo. Pode ser visto que, para cada uma das superfícies examinadas, há um aumento gradual no nível de ruído durante o período de cinco anos de medições. Os maiores aumentos são observados para a dupla camada de mistura asfáltica drenante (FEHRL, 2006).

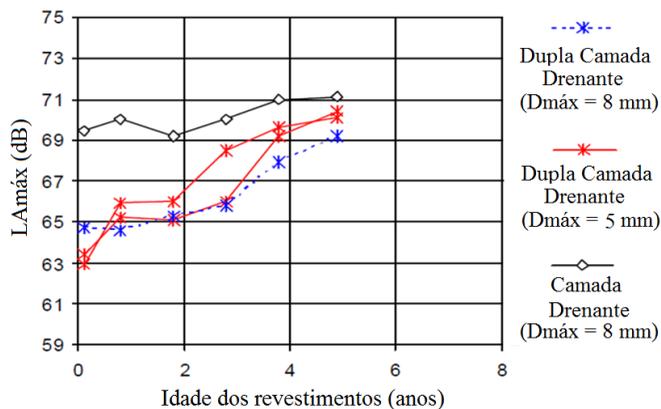


Figura 2.40 - Desempenho acústico ao longo do tempo para automóveis com velocidade de referência de 50 km/h (FEHRL, 2006).

A Figura 2.41, mostra os resultados do desempenho acústico de uma série de superfícies ao longo do tempo. Mais uma vez, pode ser visto que para a maioria das superfícies o ruído aumenta ao longo do tempo. No entanto, algumas superfícies convencionais indicaram uma redução do ruído ao longo do tempo (FEHRL, 2006).

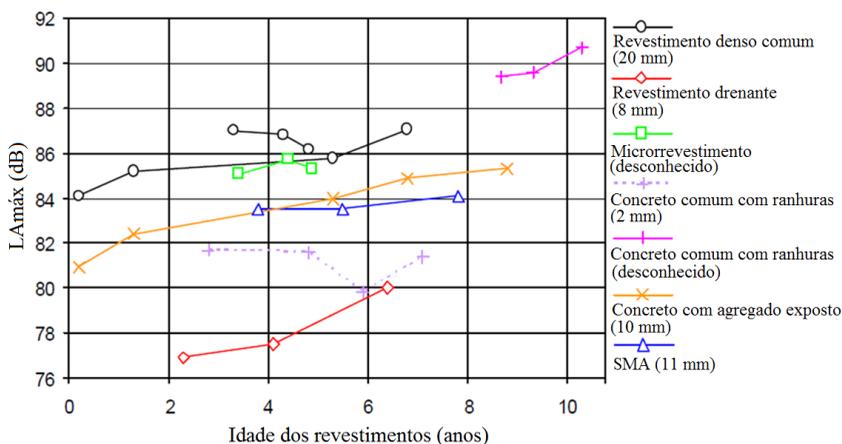


Figura 2.41 - Desempenho acústico do revestimento ao longo do tempo para automóveis com velocidade de referência de 110 km/h (FEHRL, 2006).

As Figuras 2.42 e 2.43 mostram os resultados do desempenho acústico para veículos médios e pesados para velocidades de 85 km/h,

respectivamente. Em ambos os casos, há também um aumento gradual no nível de ruído para maioria das superfícies ao longo do tempo (FEHRL, 2006).

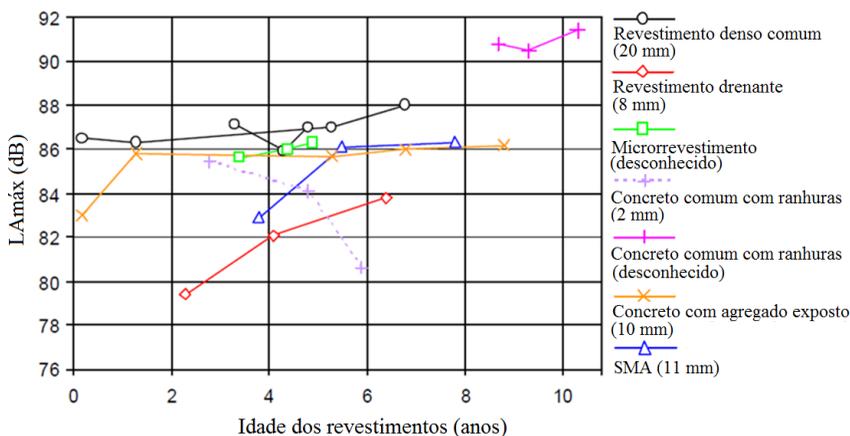


Figura 2.42 - Desempenho acústico ao longo do tempo para os veículos médios com velocidade de referência de 85 km/h (FEHRL, 2006).

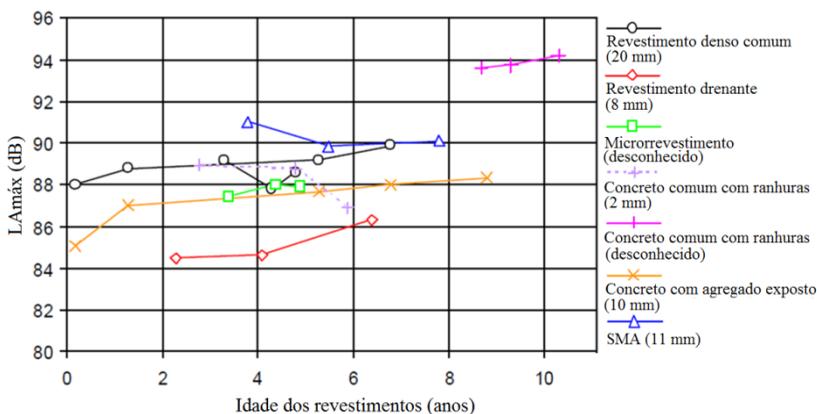


Figura 2.43 - Desempenho acústico ao longo do tempo para os veículos pesados com velocidade de referência de 85 km/h (FEHRL, 2006).

As Figuras de 2.40 a 2.43 mostram para maioria dos revestimentos o aumento do ruído ao longo do tempo. As misturas asfálticas drenantes, de concreto com agregado exposto e de concreto comum com ranhuras de 2 mm foram em média as que apresentaram

menores valores de ruído. Isso era de se esperar, pois o concreto comum apesar de não contribuir na redução do ruído gerado pelo mecanismo aerodinâmico, apresentou o menor tamanho máximo de agregado, reduzindo assim o ruído gerado pelo mecanismo mecânico de impactos e choques. Já a superfície drenante e de concreto com agregado exposto, possuem boa capacidade de reduzir o bombeamento do ar do contato pneu-pavimento reduzindo a parcela do ruído gerado pelo mecanismo aerodinâmico.

### 2.9.1.3 Rigidez da superfície do revestimento

A rigidez da superfície de rolamento também tem sido associada à geração de ruído influenciando os mecanismos mecânicos do ruído. Em geral, a resistência mecânica da superfície do pavimento é muito maior do que a da borracha no pneu. A redução da rigidez da rodovia tenderá a reduzir as forças de impacto transmitidas em um pneu, que por sua vez, reduzirá os níveis de vibração dos pneus e, conseqüentemente, a geração de ruídos. Este parece ser o caso de superfícies feitas de materiais poro-elástico com um teor de borracha de pelo menos 20% em peso (FEHRL, 2006).

A rigidez da superfície influencia a impedância acústica. Se uma onda sonora encontra uma superfície sólida, ela é refletida. A reflexão de uma superfície é diretamente proporcional à rigidez desta superfície. Paredes de concreto, mármore, vidro, entre outros, refletem quase que a totalidade do som incidente.

Houari (2004), *apud* Santos (2006), observou que quanto mais rígida é a superfície mais ruidosa ela se torna. Ele confirma que o nível de ruído sobre uma superfície rígida (por exemplo, pavimento de concreto cimento Portland) é superior ao nível de ruído das superfícies flexíveis (concreto asfáltico). A rigidez do pavimento influencia significativamente a sua resposta dinâmica.

As conclusões relativas às superfícies com misturas de asfalto-borracha são ambíguas. Por um lado, estudos mostraram que as misturas asfálticas com borracha não apresentaram redução do nível de ruído devido a sua menor rigidez (Hamet *et al.*, 2000). No entanto, o projeto SILVIA (SilendaVia – Sustainable Road Surface for Traffic Noise Control) desenvolvido pela FEHRL, demonstrou que a rigidez de uma camada superficial influencia a redução do ruído pneu-pavimento

quando o material que a constitui tem uma rigidez comparável à do pneu do veículo (FEHRL, 2006).

## 2.9.2 Textura Superficial do Pavimento

A relação entre textura superficial e o ruído gerado pela interação pneu-pavimento é bastante complexa. A textura da superfície da rodovia é considerado o parâmetro intrínseco mais importante de uma rodovia que influencia o ruído gerado pelo tráfego.

### 2.9.2.1 Definição da textura e sua relação com o ruído

No trabalho realizado por Sandberg e Descornet (1980), e posteriormente confirmado pela Piarc (1991), foram identificados determinados intervalos de comprimentos de onda da textura da superfície que influenciam no ruído gerado pela interação pneu-pavimento, a resistência ao rolamento dos pneus e a resistência à derrapagem. Os resultados deste trabalho são resumidos na Figura 2.44 segundo PIARC (19991).

A textura da superfície e o tipo de pavimento exercem papel importante na capacidade da absorção sonora do ruído gerado pela interação pneu-pavimento (WAYSON, 1998).

Texturas com comprimento de onda entre 0,5 mm a 500 mm são relevantes para a geração do ruído tanto interno como externamente ao veículo (FERHL, 2006).

A partir dos resultados verificou-se que é conveniente dividir a gama de comprimentos de onda da textura em quatro regiões (na metade superior da Figura 2.44). Estas regiões de textura foram definidas em função do comprimento de onda  $\lambda$  da textura:

- Microtextura:  $\lambda < 0,5$  mm;
- Macrotextura:  $0,5$  mm  $\lambda < 50$  mm;
- MegaTextura:  $50$  mm  $< \lambda < 500$  mm; e
- Irregularidade:  $\lambda > 500$  mm.

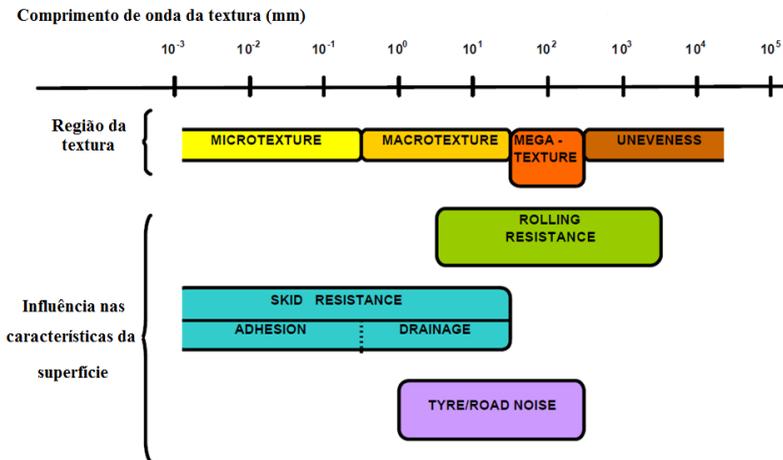


Figura 2.44 - Intervalos de comprimento de onda da textura da superfície e a influência nas características da superfície (PIARC, 1991).

A microtextura indica uma superfície do agregado áspera capaz de interagir com a banda de rodagem do pneu, rompendo o filme de água do contato do pneu com o pavimento. O termo microtextura designa as asperezas de dimensões de comprimentos de onda entre 0 a 0,5 mm e amplitude de onda de 0 a 0,2 mm.

O domínio da macrotextura abrange os desvios de superfície com comprimento de onda entre 0,5 e 50 mm e amplitude de onda entre 0,2 e 10 mm. A macrotextura é função da altura dos agregados salientes à superfície do pavimento e da sua distribuição. A altura do agregado saliente à superfície depende do tamanho máximo do agregado e da composição granulométrica.

A megatextura é responsável pelas vibrações radiais e fenômenos de ressonância associados ao veículo. A megatextura pode ser aumentada pelo desgaste da superfície de rolamento com o tempo e pelo processo de trincamento do pavimento.

A representação da microtextura e da macrotextura difere apenas quanto ao domínio de suas dimensões. Contudo, quanto ao desempenho em relação à aderência pneu-pavimento, elas diferem no papel que desempenham:

- A microtextura tem a função de perfurar o filme d'água no contato da borracha do pneu com o pavimento; e
- A macrotextura tem a função primordial de evacuar a água da área de contato para que a microtextura possa atuar.

A Figura 2.45 mostra a diferença entre micro, macro e mega-textura em termos de comprimento de onda e profundidade (DMRB-HD 36/06, 2006).

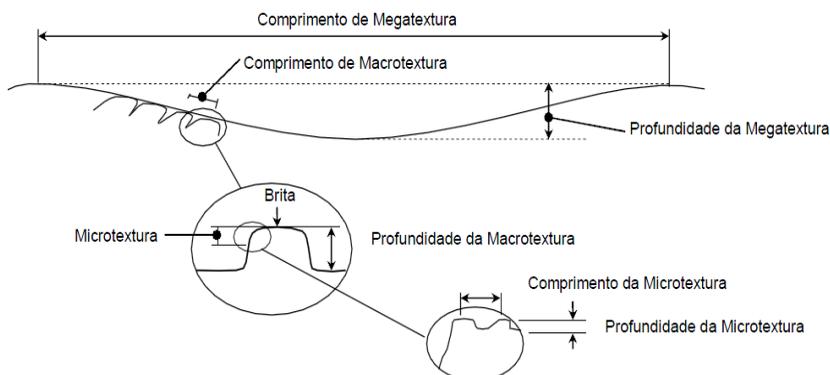


Figura 2.45 - Comprimentos de onda e profundidades de textura (DMRB-HD 36/06, 2006).

A partir da definição de parâmetros da textura é possível classificar a textura da superfície como apresentado no Quadro 2.5. Esta classificação se baseia no critério de comprimento de onda associado à irregularidade, cujos parâmetros característicos são o comprimento de onda e a amplitude (FERNANDES e DOMINGUES, 1993).

Quadro 2.5 - Classificação da textura da superfície de rolamento (FERNANDES e DOMINGUES, 1993).

Domínio da Textura	Intervalo de Dimensões		
	Comprimento	Amplitude	
<b>Microtextura</b>	0 - 0,5 mm	0 - 0,2 mm	
<b>Macrotextura</b>	0,5 - 50 mm	0,2 - 10 mm	
<b>Megatextura</b>	5 - 50 cm	1 - 50 cm	
<b>Irregularidades</b>	<b>Curtas</b>	0,5 - 5 m	1 - 20 mm
	<b>Médias</b>	5 - 15 m	0,5 - 5 cm
	<b>Longas</b>	15 - 50 m	120 cm

Há depressões na superfície que não podem ser vistas a olho nu. Há evidências de que a chamada textura negativa seja uma vantagem na redução do ruído gerado pela interação pneu-pavimento. Textura negativa significa que a superfície do pavimento, é em grande parte, plana no topo, mas tem quedas ocasionais que podem criar caminhos de evacuação do ar ou da água. O fato de ser plana na parte superior propicia que as vibrações no pneu sejam reduzidas, gerando menos ruído de geração mecânica (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

A textura positiva, por sua vez, é formada por partículas ou arestas em protuberâncias acima do plano da superfície. Geralmente, estas texturas são formadas pela aplicação de agregados sobre uma superfície essencialmente lisa durante a construção. Dependendo do tamanho da granulometria, a textura positiva leva a níveis mais elevados de vibrações no pneu em andamento, ao passo que a textura negativa contribui para os níveis de ruído mais baixos (SANTOS, 2007). A Figura 2.46 ilustra o conceito de textura positiva e negativa de uma superfície.

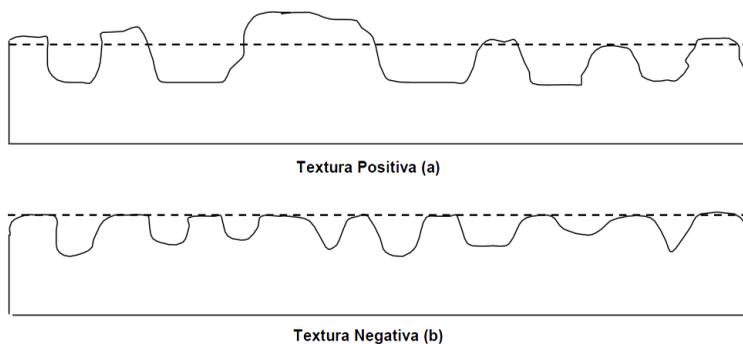


Figura 2.46 - Detalhe da superfície (DMRB-HD 36/06, 2006).

### 2.9.2.2 Métodos de caracterização da textura

O método de caracterização das propriedades da textura de superfícies da rodovia é imprescindível para o estudo do ruído pneu-pavimento. Para caracterizar esta propriedade foram desenvolvidos vários métodos e equipamentos de medição. Os métodos mais utilizados são a mancha de areia, o pêndulo britânico e os perfilômetros a laser.

### a) Método da Mancha de Areia

Este ensaio avalia a rugosidade geométrica da superfície ou a macro-textura. Este método, regulado pelas Normas NLT-335/87 e ASTM E 965, consiste no espalhamento cuidadoso de uma determinada quantidade de areia com granulometria definida (ou esferas de vidro) sobre a superfície de forma circular, medindo-se o raio de espalhamento.

Este ensaio avalia a macrotextura e caracteriza a superfície do pavimento quanto à sua capacidade de drenar a água confinada entre o pneu e o pavimento e quantifica a densidade, ou seja, a distância média entre os grãos individuais de agregados aflorados na superfície do pavimento (DNIT, 2006b).

Consiste em preencher os vazios da textura superficial do pavimento com um volume conhecido de areia padrão (90% passante na peneira de nº 40 e retido na de nº 80), espalhando-a em forma de círculo, com um dispositivo próprio. Trata-se de um método volumétrico. O resultado é expresso em altura de areia, que é igual ao volume de areia espalhado dividido pela área coberta. A altura da areia é calculada de acordo com equação 2.29 (ASTM E 965, 1996).

$$H = \frac{V \times 4}{D^2 \times \pi} \quad (2.29)$$

onde:

- H: é a altura média da areia, em mm;
- V: é o volume de areia padrão (25 cm<sup>3</sup>); e
- D: diâmetro médio da mancha de areia, em mm.

A Figura 2.47 mostra a sequência da condução do ensaio (FONTES, 2009):

- (a) e (b) colocação da areia com volume conhecido sobre o revestimento;
- (c) soquete circular com fundo de borracha, utilizado para o espalhamento da areia;
- (d) e (e) espalhamento da areia; e
- (f) medição do diâmetro da mancha de areia (média de 4 valores).

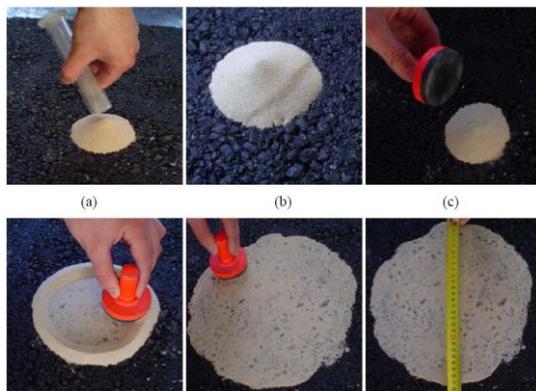


Figura 2.47 - Sequência do ensaio da mancha de areia (FONTES, 2009).

De acordo com o DNIT (2006a), a textura superficial do pavimento é classificada de acordo com o Quadro 2.6. Os limites sugeridos pelo DNIT da altura média da mancha de areia para a segurança do usuário em relação ao atrito pneu-pavimento são  $0,6 \text{ mm} < H < 1,2 \text{ mm}$ .

Quadro 2.6 - Classificação da macrotextura pelo método da Mancha de Areia (DNIT, 2006a)

<b>Altura Média da Mancha de areia (cm)</b>	<b>Textura Superficial</b>
$H < 0,20$	Muito fina ou muito fechada
$0,20 < H < 0,40$	Fina ou fechada
$0,40 < H < 0,80$	Média
$0,80 < H < 1,20$	Grosseira ou aberta
$H > 1,20$	Muito Grosseira ou aberta

Além da classificação apresentada no Quadro 2.6, Pasquet (1968) propõe uma adequação da textura do revestimento para cada rodovia considerando a velocidade de tráfego permitida, como apresentado no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 - Classificação da macrotextura segundo o método da Mancha de Areia (PASQUET, 1968).

Altura Média de Areia HS (mm)	Textura Superficial	Aplicação do Revestimento
$H \leq 0,20$	Muito fina ou muito fechada	Não deve ser utilizado
$0,20 < H \leq 0,40$	Fina ou fechada	Reservado para zonas urbanas ( $V < 80$ km/h)
$0,40 < H \leq 0,80$	Média	Indicado para vias com $80 \text{ km/h} < V < 120 \text{ km/h}$
$0,80 < H \leq 1,20$	Grosseira ou aberta	Indicado para vias rápidas com $V > 120 \text{ km/h}$
$H > 1,20$	Muito aberta	Indicado em casos especiais (zonas de perigo constante com longos trechos retos, zonas onde há uma presença constante de contaminantes, etc.).

### b) Pêndulo Britânico

O ensaio do Pêndulo Britânico é realizado de acordo com a norma ASTM D 303, 1993 (Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Test). Ele permite a medição localizada do coeficiente de atrito cinemático, através da avaliação da energia absorvida por atrito, quando a sapata de borracha do pêndulo desliza sobre a superfície de um pavimento umedecido, ou sobre uma amostra do material a ensaiar.

O equipamento (Figura 2.48) é utilizado para a determinação do valor de resistência à derrapagem (VDR), e simula o atrito dos pneus do veículo sobre a rodovia, a uma velocidade de 50 km/h. Tem-se recomendado o valor mínimo de 47 para garantir pelo menos uma microtextura medianamente rugosa. A microtextura é uma característica muito importante para rompimento da película de água e promoção do contato pneu-pavimento para baixas velocidades de deslocamento, de até cerca de 40 km/h (BERNUCCI *et al.*, 2007).



Figura 2.48 - Ensaio do pêndulo britânico (BERNUCCI *et al.*, 2007).

De acordo com o DNIT (2006b) os conceitos de resistência à derrapagem, em função da macrotextura e das classes de resistência à derrapagem, são apresentadas no Quadro 2.8.

Quadro 2.8 - Avaliação das condições de aderência pneu pavimento ou resistência à derrapagem (DNIT, 2006b)

CLASSES DE RESISTÊNCIA À DERRAPAGEM / MÉTODO DO PÊNDULO BRITÂNICO	
CLASSES	VRD - VALOR DE RESISTÊNCIA À DERRAPAGEM
1 - PERIGOSA	< 25
2 - MUITO LISA	25 - 31
3 - LISA	32 - 39
4 - INSUFICIENTEMENTE RUGOSA	40 - 46
5 - MEDIANAMENTE RUGOSA	47 - 54
6 - RUGOSA	55 - 75
7 - MUITO RUGOSA	> 75

Um estudo realizado no Japão não conseguiu estabelecer uma correlação entre o ruído gerado pela interação pneu-pavimento em condições secas e a resistência à derrapagem medida com o pêndulo britânico (OSHINO *et al.*, 2001 *apud* SANDBERG e EJSMONT, 2002). A Figura 2.49 mostra o resultado da pesquisa.

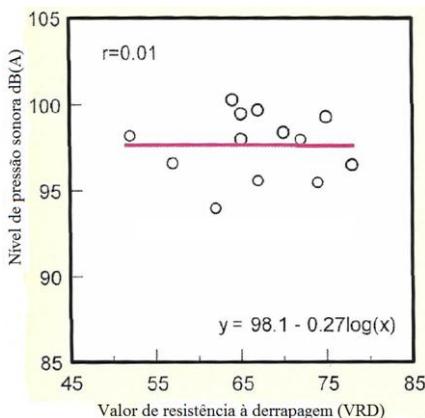


Figura 2.49 - Relação entre a resistência à derrapagem e o ruído gerado pela interação pneu-pavimento (OSHINO *et al.*, 2001 *apud* SANDBERG e EJSMONT, 2002).

### 2.9.3 Geração do Ruído na Presença de Água

Tem sido demonstrado que uma película fina de água na superfície da camada de rolamento pode aumentar a pressão sonora gerada pelo tráfego em vários decibels. No entanto, em uma superfície úmida os níveis de ruído não aumentam em relação à pista seca. Para veículos leves, quando existe uma película de água o aumento da pressão sonora é maior em baixas velocidades, mas para os caminhões pesados, acontece ao contrário (FEHRL, 2006).

A presença de água na superfície dos pavimentos, em função da sua quantidade, do tipo de superfície, do tipo de veículo, das condições de circulação entre outros fatores, pode aumentar o nível de ruído emitido pelos veículos em até 15 dB(A) (DESCORNET *et al.*, 2000 *apud* SANTOS, 2007).

Os mecanismos de geração de ruído em condições de superfície molhada são basicamente os mesmos que em condições secas. No entanto, ainda não se sabe exatamente de que forma a presença de água influencia no aumento do ruído (SANDBERG e EJSMONT, 2002). Assim, podem ser referidas os seguintes mecanismos de ruído em condições molhadas:

- Deslocamento de água na frente da área de contato (projeção de água);
- Compressão de água nas ranhuras dos pneus;

- Contato entre a água projetada (em forma de jato ou de gotas) e o corpo do veículo;
- Impacto do relevo dos pneus na superfície da água; e
- Quebra de ligação entre a borracha dos pneus e a água.

Uma estimativa dos efeitos da água na superfície do pavimento sobre os níveis de pressão sonora são apresentados no Quadro 2.9. Porém, nesta estimativa não existe uma quantificação de como, por exemplo, a altura da lâmina de água e/ou a intensidade de precipitação afetam o valor do nível de pressão sonora (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

Quadro 2.9 - Estimativa do efeito da água nos níveis sonoros (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

Grau de umidade	0-60 km/h	61-80 km/h	81-130 km/h
Seco	Referência	Referência	Referência
Umidade, devido ao degelo (usando sal) ou devido a chuviscos	+2 dB	+1 dB	+0 dB
Umidade devido à chuva moderada	+4 dB	+3 dB	+2 dB
Umidade devido à chuva intensa	+6 dB	+4 dB	+3 dB

Freitas *et al.*, (2006) verificaram que o nível de ruído aumenta significativamente com a presença da água. Esse aumento é determinado pelos níveis de pressão sonora correspondente a frequências superiores a 500 Hz, quando se trata de veículos pesados. No caso dos automóveis, esse aumento é mais significativo para frequências superiores a 1000 Hz, particularmente na camada de concreto asfáltico. Verificaram, também, que na presença de água o ruído aumenta cerca de 4 dB(A), exceto na superfície convencional à velocidades altas, onde observaram um aumento de 5 dB(A) (Quadro 2.10). Estes resultados foram obtidos antes da entrada do pavimento em serviço.

Quadro 2.10 - Influência da água na geração de ruído utilizando o método do SPB (FREITAS *et al.*, 2006).

Nível de velocidade	SPBI (dB(A))					
	Mo-D	Mo-C	S-D	S-C	Diferença D	Diferença C
Média	80,2	83,1	76,1	78,9	4	4
Alta	82,6	86,5	78,4	81,5	4	5

Legenda: Mo – superfície molhada; S – superfície seca; D – superfície drenante; C – superfície com mistura densa convencional

### 2.9.4 Condições Climáticas (temperatura e vento)

A influência da temperatura sobre o nível de ruído resultante do acoplamento pneu-pavimento depende das características do pneu e da superfície do pavimento. Com isso, é provável que esta seja diferente para cada tipo de superfície, apesar de estas diferenças não serem muito significativas na maioria dos casos (RAITANEN, 2005 *apud* SANTOS, 2007).

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

De uma forma geral, um aumento de temperatura ou uma redução da velocidade do vento traduz-se numa redução do nível de ruído. Em função do local onde são efetuadas as medições da temperatura (ar, pneu, superfície do pavimento), a correção a ser feita no nível de ruído é variável (FREITAS *et al.*, 2006).

Landsberger (2001) *apud* Sandberg e Ejsmont (2002) apresentaram os níveis de pressão sonora versus a temperatura do ar, obtidos através do método Coast-By para 6 tipos de pneus circulando a 80 km/h. Os resultados mostraram uma pequena mas significativa redução dos níveis de ruído com o aumento da temperatura porém não para todos os tipos de pneus (Figura 2.50).

Um estudo realizado por Kuijpers (2002) determinou a relação do nível de ruído  $L_{m\acute{a}x}(A)$  com a temperatura do ar (Figura 2.51), com objetivo de se encontrar coeficientes de correção de acordo com a temperatura do ar. O estudo também foi realizado para pavimentos de concreto, onde os resultados são semelhantes, mostrando que o ruído tem a tendência de diminuir com o aumento da temperatura do ar (Figura 2.52).

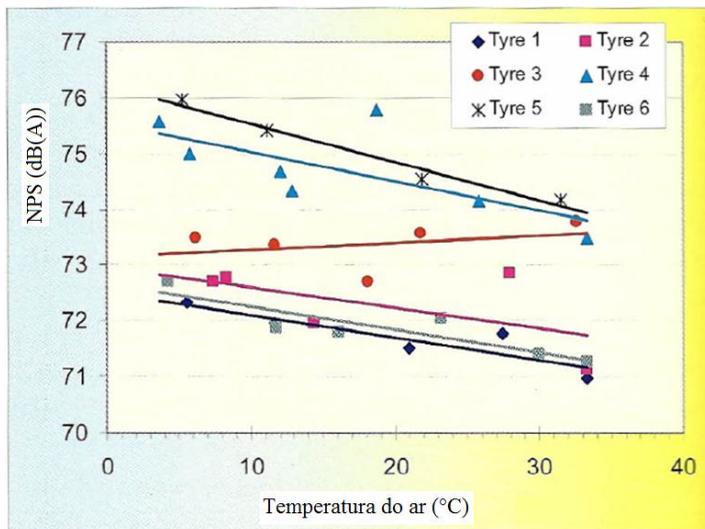


Figura 2.50 - Níveis de pressão sonora versus temperatura do ar para 6 tipos de pneus para 80 km/h (LANDSBERGER, 2001 *apud* SANDBERG e EJSOMT, 2002).

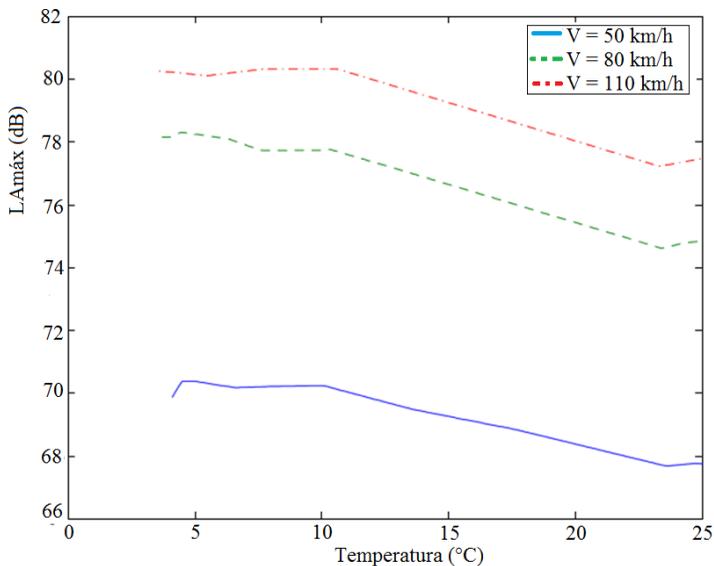


Figura 2.51 - Relação entre temperatura do ar e o nível de pressão sonora para uma Mercedes com pneu Pirelli P600 trafegando em pavimento flexível com velocidades de 50, 80 e 110 km/h (KUIJPERS, 2002).

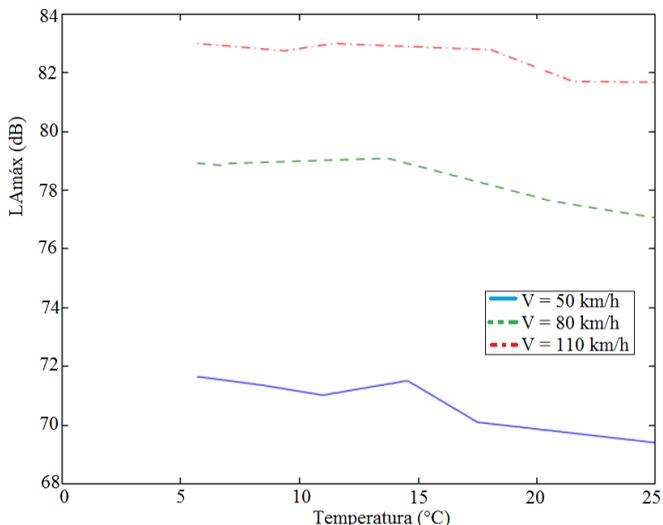


Figura 2.52 - Relação entre temperatura do ar e o nível de pressão sonora para uma Mercedes com pneu da Goodyear Eagle NCT2 trafegando em pavimento rígido para velocidades de 50, 80 e 110 km/h (KUIJPERS, 2002).

## 2.9.5 Veículos

Dentro dos veículos, os fatores responsáveis pela emissão de ruído são basicamente o tipo de veículo (peso, dimensões, n.º de eixos, e potência do motor), a velocidade de circulação e o tipo de pneu.

O ruído gerado pelo tipo de veículo e tipo de pneu tem sido muito estudado pela indústria de automóvel, obtendo-se atualmente uma clara redução das emissões de ruído dos veículos e dos pneus quando comparados com os níveis que se atingiam há uma ou duas décadas atrás.

### 2.9.5.1 Tipo de veículo

O tipo de veículo tem uma forte influência na geração de ruído, pois o ruído de cada unidade de potência é diferente, composto do ruído do motor e todos seus "acessórios", sistema de escape e de transmissão.

O ruído da unidade de potência, assim como o ruído da interação pneu-pavimento, tem um forte relacionamento com a velocidade do veículo (SANDBERG, 2001).

O sistema de exaustão é a principal fonte de ruído do motor. Esta fonte de ruído, forte e de curta duração, situa-se no interior do motor e é, conseqüentemente, bastante atenuada. No entanto, alguma energia escapa como forma de ruído, quer devido à vibração de todo o motor, ou de peças individuais. Os ventiladores de refrigeração do motor produzem também uma parcela substancial de ruído (ROSSING *et al.*, 2002 *apud* SANTOS, 2007).

A União Europeia, a partir dos anos 1970, passou a limitar os valores de ruído dos veículos vendidos na Europa. Com isso, os valores de ruído vêm diminuindo ao longo do tempo, tendo uma redução de 8 a 11 dB. Na tentativa de se chegar aos valores limites, os produtores de automóveis têm buscado diminuir o ruído produzido pelo motor (BENDTSEN e ANDERSEN, 2005).

Outro fator a ser levado em conta é o peso dos veículos. Em geral um acréscimo na carga por roda altera as frequências de vibração da carcaça do pneu, aumentando o valor do NPS. Caminhões pesados, com seus grandes sistemas de propulsão e numerosos pneus estão entre os veículos de maior geração de ruído das rodovias. Um caminhão "típico" pesado, gera um ruído da ordem de 10 dB(A) a mais do que um automóvel "típico", em altas velocidades. Isto significa que um caminhão gera a energia do som equivalente a dez carros e, desta forma, se os caminhões representarem mais de 10% do fluxo de tráfego, provavelmente eles vão dominar o nível geral do ruído gerado (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

#### 2.9.5.2 Pneu

O tipo de pneu tem grande influência na geração do ruído. Há, aproximadamente, 16 mil pneus diferentes no mercado. O desenho da superfície do pneu tem o objetivo não só de diminuir as emissões de ruído e garantir a sua longevidade, mas principalmente, de garantir a aderência pneu-pavimento evitando os riscos de aquaplanagem (HANSON *et al.*, 2004). Na Figura 2.10 é mostrada a estrutura típica de um pneu.

Em um pneu, a escultura da superfície e a profundidade das ranhuras afetam a geração de ruído. Em geral, um padrão de superfície

de pneu silencioso é o que permite que o ar escape por entre as suas ranhuras, à medida que o mesmo entra em contato com a superfície do pavimento. Pneus ruidosos são aqueles em que o ruído devido ao bombeamento do ar aumenta consideravelmente quando o ar não consegue escapar facilmente. O ruído aumenta na medida em que os pneus se desgastam, pois o ar não consegue escapar tão facilmente devido à diminuição da profundidade das ranhuras. (SANDBERG e EJSMONT, 2002). Pneus com predominância de ranhuras transversais geram mais ruído do que pneus com predominância de ranhuras longitudinais.

Diversos estudos têm indicado que outro parâmetro importante na geração do ruído é a largura do pneu. Ejsmont (1997) concluiu que o ruído do pneu aumenta 2,4 dB (A) quando a largura de um pneu passa de 165 mm para 185 mm. Sandberg (2001) verificou que existe um incremento de, aproximadamente, 5 dB (A) quando a largura do pneu aumenta de 140 mm para 200 mm.

Uma pesquisa europeia, sob a liderança da Pirelli, concluiu que a diferença de ruído gerado entre o melhor e o pior pneu foi de apenas 3 dB (A). Um dos principais objetivos da pesquisa era construir um protótipo de pneu com menor emissão de ruído. O resultado foi uma redução de ruído de cerca de 1 dB (A) em relação ao pneu de referência. A Pirelli concluiu que não se pode obter redução de ruído aprimorando o pneu, mas que se devem pesquisar novas superfícies de rodovia (SANDBERG, 2001).

No entanto, no estudo realizado por Sandberg (2001), o autor verificou que existe diferença na geração do ruído entre diferentes pneus. O estudo indica uma diferença de até 10 dB (A) entre o melhor e o pior dos pneus em uma amostra de cerca de 100 tipos de pneus de automóveis de tamanho, aproximadamente, similares. Para os pneus de caminhão, o estudo também indicou uma diferença de 10 dB (A) entre o melhor e o pior pneu de uma amostra de 20 pneus de tamanho semelhante.

Como parte de um trabalho desenvolvido pela NCAT (National Center for Asphalt Technology), foram feitas medições de ruído variando o tipo de pneu, utilizando o Método do CPX. Foram utilizados quatro pneus exigidos pela Norma ISO 11819-2/2000 na execução de trabalhos de investigação e dois pneus para o trabalho de levantamento. Como os pneus listados na norma não são os pneus comumente encontrados nos Estados Unidos, foram realizadas medições em cinco pneus diferentes de automóveis comuns e dois padronizados pela norma.

O Quadro 2.11 apresenta a média do nível de ruído gerado para cada um dos pneus (HANSON *et al.*, 2004).

Quadro 2.11 - Resultados do ruído gerado para diferentes tipos de pneus (HANSON *et al.*, 2004).

Tire Type	CPX Noise Level dB(A)
ASTM Slick (Norma)	91.2
UniRoyal Tiger Paw	92.4
ASTM 501- Ribbed (Norma)	93.8
Firestone FR 380	93.9
MasterCraft Glacier Grip	94.7
Goodyear Aquatread	94.9
Michelin Rain Forest	95.2

### 2.9.5.3 Velocidade do veículo

O ruído gerado pela interação pneu-pavimento está diretamente relacionado com a velocidade do veículo e aumenta de forma aproximadamente logarítmica com o aumento da velocidade.

O VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute) realizou um estudo sobre a geração de ruído para três categorias de veículos e velocidades de deslocamento entre 35 e 130 km/h em um revestimento denso comum, utilizando o método do SPB. A Figura 2.53 mostra os resultados obtidos. Nela pode ser observado que para qualquer categoria de veículo, quando a velocidade aumenta o ruído também aumenta.

A Figura 2.54 mostra o efeito da velocidade do veículo na geração do ruído. As curvas representam a média dos NPS nos EUA em função da velocidade utilizados nos modelos de ruído de tráfego da FHWA (HANSON *et al.*, 2004).

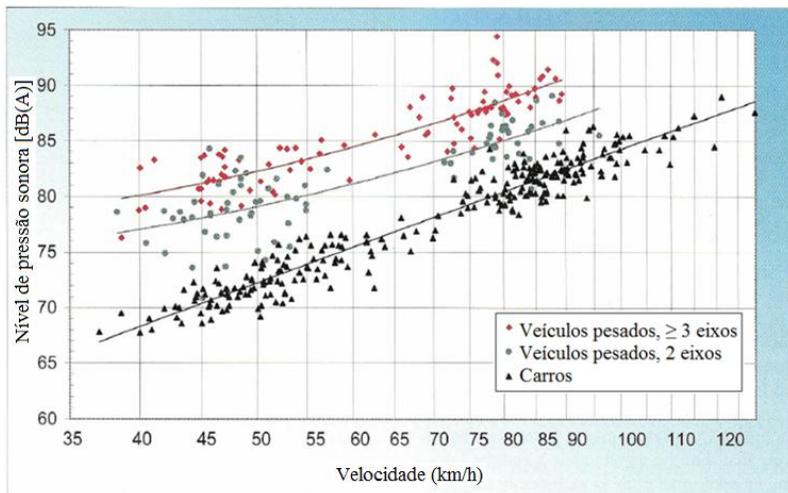


Figura 2.53 - Ruído pneu-pavimento para diferentes categorias de veículo (SANDBERG e EJSMONT, 2002).

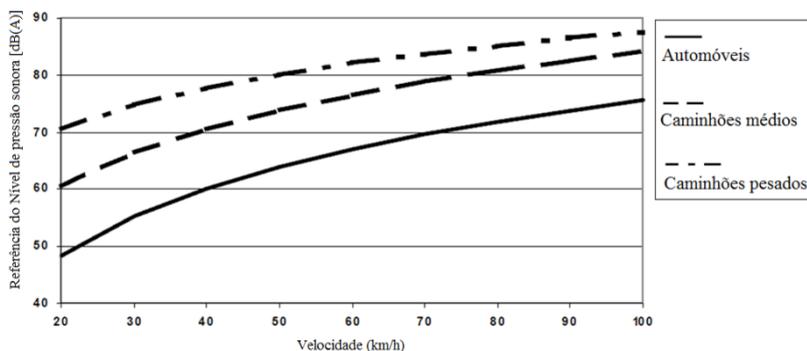


Figura 2.54 - Referência de NPS da FHWA em função da velocidade (HANSON *et al.*, 2004).

## 2.10 TIPOS DE REVESTIMENTO E A REDUÇÃO DO RUÍDO

De acordo com Sandberg e Ejsmont (2002), um "pavimento silencioso" é uma rodovia em que os níveis de ruído gerados pela interação pneu-pavimento são pelo menos a 3 dB (A) menores do que uma superfície convencional de referência (mistura asfáltica densa comum).

A escolha adequada da superfície do pavimento pode ser um procedimento eficaz de redução do ruído. 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.

Um pavimento mais silencioso pode ser projetado e construído em praticamente qualquer local sujeito a qualquer ambiente e qualquer tipo e quantidade de tráfego. Além disso, pavimentos mais silenciosos tanto de revestimento asfáltico ou de concreto podem atingir o mesmo nível de durabilidade e segurança (RASMUSSEN *et al.*, 2007).

Para que se possa alcançar em uma rodovia baixos níveis de emissão de ruído gerados pela interação pneu-pavimento, Sandberg e Ejsmont (2002), afirmam que devem ser seguidos os seguintes passos:

- Mistura asfáltica porosa com agregados de tamanho máximo entre 3 a 6 mm;
- A porosidade deve ser tal que diminua a ocorrência de colmatção, ou que a mesma seja retardada;
- A espessura da camada superficial deve ser em torno de 40 mm, para se obter um pavimento que absorva bem até mesmo ruídos de baixa frequência; e
- Camada superficial deve possuir uma alta percentagem de vazios comunicantes. Esta percentagem de vazios deve ser de no mínimo de 20%, sendo o teor ideal entre 25 a 30%.

### **2.10.1 Revestimento Asfáltico Poroso e Revestimento Asfáltico Drenante**

Esses dois tipos de revestimento tem uma função funcional na estrutura de um pavimento. Diferem-se apenas na característica da porosidade, em que os revestimentos drenantes possuem vazios comunicantes e o revestimento poroso não.

Conhecida como Camada Porosa de Atrito (CPA), essas misturas asfálticas porosas a quente possuem normalmente entre 18 a 25% de vazios de ar – DNER-ES 389/99. A característica importante dessa mistura asfáltica é que ela causa: a) redução da espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento e, conseqüentemente a redução das distâncias de frenagem; b) redução do spray proveniente do borrifo de água pelos pneus dos veículos aumentando a distância de visibilidade; c)

e redução da reflexão da luz dos faróis noturnos (BERNUCCI *et al.*, 2007).

O Quadro 2.12 apresenta a especificação brasileira do DNER-ES 386/99 recomendada para a CPA. Devido à particularidade granulométrica, a quantidade de ligante é geralmente reduzida, ficando em média em torno de 3,5 a 4,5%, dependendo do tipo de agregado, forma, natureza, viscosidade e tipo de ligante. O ligante utilizado deverá ter baixa suscetibilidade térmica e alta resistência ao envelhecimento. Em geral, recomenda-se o emprego de asfalto modificado por polímero para aumentar a durabilidade e reduzir a desagregação.

Quadro 2.12 - Faixas granulométricas e requisitos de dosagem da Camada Porosa de Atrito (DNER-ES 386/99).

Peneira de malha quadrada		Faixas					
		Porcentagem em massa, passando					
ABNT	Abertura mm	I	II	III	IV	V	Tolerância
¾"	19,0	–	–	–	–	100	–
½"	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 modificado por polímero, %		4,0–6,0					±0,3
Espessura da camada acabada, cm		3,0			≤ 4,0		
Volume de vazios, %		18–25					
Ensaio Cântabro, % máx.		25					
Resistência à tração por compressão diametral, a 25°C, MPa, mín.		0,55					

Os revestimentos asfálticos drenantes são misturas asfálticas caracterizadas pelo elevado volume de vazios, obtidos por meio de uma dosagem adequada de agregados minerais britados, filer e cimentos asfálticos comuns ou modificados por polímeros. Os vazios da mistura são comunicantes permitindo a percolação da água superficial proveniente das precipitações chuvosas, resultando num revestimento dito drenante ou permeável (OLIVEIRA, 2003).

Devido à elevada percentagem de vazios da mistura, o ar à frente do pneu tende a penetrar nestes poros, reduzindo o bombeamento do ar. Com a redução do bombeamento do ar, obtém-se a diminuição do ruído, cuja ordem de grandeza é dependente de diversos fatores tais como o tamanho dos agregados, a espessura da camada e a porcentagem de vazios da mistura (SWART, 1997 *apud* MEURER, 2001). A Figura

2.55 ilustra o processo de penetração da bolsa de ar situada à frente do pneu nos poros vazios do concreto asfáltico drenante.

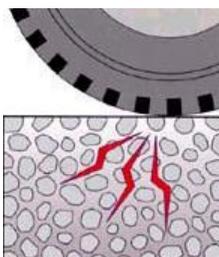


Figura 2.55 - Penetração do ar nos vazios do concreto asfáltico drenante (Japan Highway Research Institute, 1999).

O coeficiente de absorção acústica deste tipo de revestimento, nos intervalos 0-700, 700-1250 e 1250-2000 Hz, alcança, respectivamente, os valores mínimos de 0,00; 0,20 e 0,55 e podem atingir até 0,20; 0,45 e 0,6 em função da espessura do revestimento, da quantidade e da distribuição dos vazios comunicantes e da disposição dos agregados na superfície.

Uma característica fundamental das superfícies drenantes é o elevado volume de vazios comunicantes (20-28%) que proporcionam a circulação de água e a absorção de ruído de superfície (FEHRL, 2006).

Com o elevado volume de vazios proporcionados pela granulometria aberta dos agregados, estas misturas propiciam a drenagem das águas pelos vazios comunicantes, eliminando a lâmina de água existente na superfície aumentando a aderência pneu-pavimento e reduzindo o spray gerado pelos veículos. Posteriormente, verificou-se que além de drenantes, estas misturas propiciam, ainda, uma redução dos ruídos provenientes da rolagem dos pneus sobre o pavimento devido à penetração do ar comprimido pelos pneus no interior dos vazios das misturas (DUNKE, 2005; FEHRL, 2006).

Enquanto nas superfícies fechadas a geração de ruído é condicionada pelas características de textura superficial, para as misturas mais abertas (ou porosas) o ruído emitido não depende unicamente da textura, mas também de suas propriedades de absorção acústica (MEIER, 1995 *apud* MEURER, 2001).

Um parâmetro importante que se deve levar em conta no projeto destas misturas é a porcentagem de vazios comunicantes, pois eles afetam a eficácia da redução do ruído. A porcentagem de vazios comunicantes pode ser avaliada através do ensaio de drenabilidade.

Existem diversos modelos de drenômetros para avaliar a drenabilidade de misturas asfálticas, de campo ou laboratório, mas todos eles contemplam carga hidráulica variável ou carga hidráulica constante. A Figura 2.56 mostra o ensaio de drenabilidade de carga variável com um equipamento do tipo Suíço (DUMKE, 2005).



Figura 2.56 - Ensaio de drenabilidade em placas (carga variável) (DUMKE, 2005).

O ensaio de drenabilidade pode ser conduzido de duas formas:

- Avaliação da drenabilidade vertical: neste caso as laterais do corpo de prova são impermeabilizadas e mede-se a velocidade vertical com que a água percola a mistura. Este parâmetro é utilizado para o projeto de pavimentos drenantes; e
- Avaliação da drenabilidade horizontal: neste caso, a face inferior do corpo de prova é impermeabilizada e mede-se a velocidade horizontal com que a água percola a mistura. Este parâmetro é utilizado para o projeto de revestimentos drenantes.

A Figura 2.57 ilustra o ensaio de drenabilidade horizontal e a equação 2.30 mostra o cálculo da drenabilidade para a carga variável com o drenômetro do tipo Suíço.



Figura 2.57 - Ensaio de drenabilidade horizontal (OLIVEIRA, 2003).

$$D_{re} = \frac{V}{A_p \times t}$$

(2.30)

onde:

- $D_{re}$ : drenabilidade em cm/s;
- $V$ : é o volume de água do drenômetro, ( $747,7 \text{ cm}^3$ ) sendo a maior altura da coluna de água de 24,17 cm e a menor de 14,01 cm com diâmetro do tubo de 9,68 cm;
- $A_p$ : é a área do orifício inferior do drenômetro, pelo qual há o escoamento, ( $20,26 \text{ cm}^2$ ); e
- $t$ : é o tempo necessário para passar pelo corpo de prova o volume de água padronizado, em segundos.

No estudo realizado por Dumke (2005) foram realizados ensaios de drenabilidade em placas de concreto asfáltico drenante com diferentes tipos de ligantes. A Figura 2.58 mostra os resultados do ensaio.

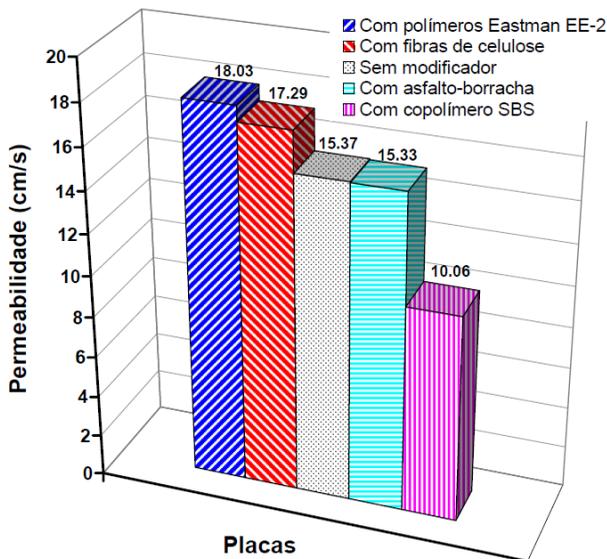


Figura 2.58 - Drenabilidade das placas (DUMKE, 2005)

A Figura 2.59 apresenta valores de pressão sonora provenientes do tráfego de veículos leves e pesados, para diversos tipos de revestimento. Verifica-se que no revestimento drenante a emissão de ruído é cerca de 6 a 10 dB(A) menor que os demais tipos de revestimentos, tanto para veículos leves como para pesados.

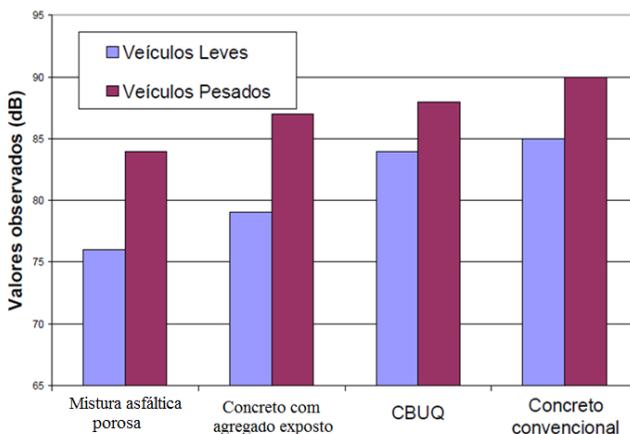


Figura 2.59 - Influência do tipo de revestimento na geração de ruído para  $V=80$  km/h (NELSON e PHILIPS, 1997 *apud* TEIXEIRA *et al.*, 2001).

A Figura 2.60 mostra uma comparação dos níveis de pressão sonora entre o revestimento drenante e o revestimento denso comum para a velocidade de 60 km/h. O método de medição utilizado foi semelhante ao do CPB, sendo utilizados seis veículos diferentes (GOLEBIEWSKI *et al.*, 2002). Na figura observa-se uma redução da pressão sonora de 4 dB(A) para o revestimento drenante na frequência onde o ruído é mais prejudicial ao ouvido humano (região da frequência de 1000 Hz).

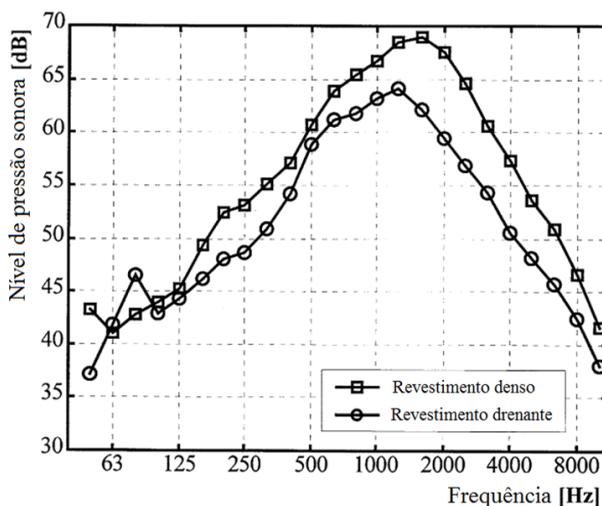


Figura 2.60 - Comparação do ruído entre o revestimento denso e drenante para  $V=60$  Km/h, medido com o carro modelo Toyota Corolla (GOLEBIEWSKI *et al.*, 2002).

Um dado material não absorve da mesma forma os sons graves, médios e agudos. O fator da absorção se dá em função da frequência. Assim, o coeficiente de absorção sonora nos revestimentos drenantes varia com a frequência do som e é mais favorável em torno de 1000 Hz, que é normalmente a frequência na qual o ruído dos pneus ou da rolagem acontece com maior intensidade (Figura 2.61).

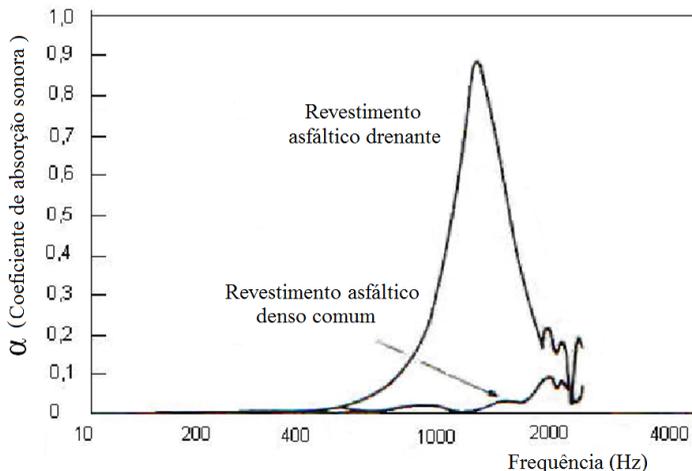


Figura 2.61 - Coeficiente de absorção dos revestimentos drenantes e denso (VAN HEYSTRÆTEN *et al.*, 1990 *apud* MEURER, 2001).

A Figura 2.62 mostra os resultados obtidos por Haider (2010) de medições de ruído utilizando o método do SPB e CPB para vários tipos de revestimentos. Na figura, observa-se que o revestimento drenante é o mais eficaz na redução da pressão sonora.

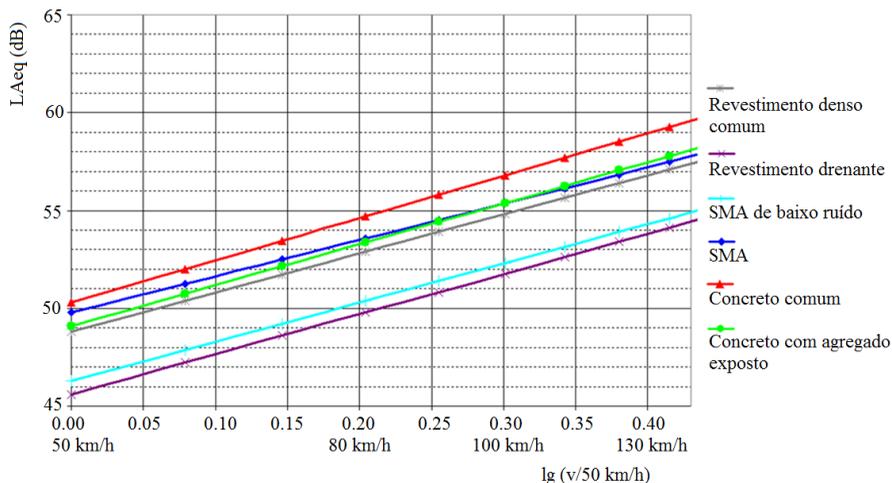


Figura 2.62 - Valores de emissão sonora para diferentes tipos de pavimentos para veículos leves (HAIDER, 2010).

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

Para minimizar a colmatagem, foram desenvolvidos na Holanda, em 1990, revestimentos drenantes com dupla camada porosa. Essa tecnologia consiste em uma camada executada primeiro com tamanho máximo do agregado maior que o da camada superior. A camada superior funciona como uma peneira para que as partículas maiores de detritos não consigam alcançar os vazios maiores da camada inferior, diminuindo a colmatagem. Além disso, como resultado dos agregados menores da camada superior, as vibrações dos pneus são reduzidas e, portanto, o ruído gerado também é reduzido. Essas duas características proporcionam uma superfície de baixo ruído (FEHRL, 2006).

Os revestimentos drenantes constituídos por dupla camada porosa são formados por: a) uma primeira camada, com cerca de 45 mm de espessura, constituída por uma granulometria mais grossa (geralmente com um agregado 11/16), com cerca de 25% de porosidade e; b) por uma segunda camada, com espessura entre 15 e 25 mm, de granulometria mais fina (geralmente com um agregado 4/8), apresentando uma porosidade de cerca de 20%. O ligante utilizado geralmente é modificado. A configuração destas duplas camadas porosas é ilustrada na Figura 2.63 (BENDTSEN e ANDERSEN, 2005).

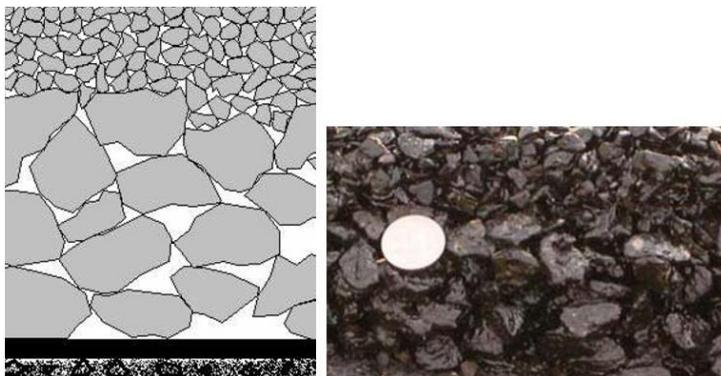


Figura 2.63 - Configuração de um revestimento drenante constituída por duas camadas porosas (BENDTSEN e ANDERSEN, 2005).

## 2.10.2 Revestimento Asfáltico com Borracha (revestimento elástico)

A borracha de pneu moída pode ser incorporada à mistura asfáltica através de dois processos diferentes: o processo seco (dry process) e o úmido (wet process). No processo úmido, a borracha dos pneus é utilizada como um modificador do betume e no processo seco, a borracha moída é usada como uma parcela do agregado fino. No processo úmido a incorporação da borracha ao betume pode ser feita através de dois sistemas: o continuous blend (em que a mistura do ligante asfáltico com a borracha é feita em tanques especiais em uma planta central) e o terminal blend (em que a mistura do ligante asfáltico com a borracha é realizado em unidades industriais móveis junto à obra onde o ligante será aplicado) (FONTES, 2009).

Na Austrália, a integração da borracha nos ligantes asfálticos utilizados em camadas de revestimento tem sido realizada com sucesso, reduzindo a produção de ruído. A quantidade de borracha variou de 16% a 20% por volume de betume (BEATTY *et al.*, 2002). No entanto, Freitas *et al.*, (2006) afirmam que a absorção sonora é relevante apenas em superfícies com porosidade elevada.

Segundo Sandberg e Ejsmont (2002), não existem provas conclusivas de que a adição de pequenas quantidades de borracha em uma camada de desgaste betuminosa pudesse reduzir significativamente o seu ruído.

O Public Works Research Institute (PWRI) da Suécia vem desenvolvendo desde 1970 um pavimento de baixo ruído, denominado "Porous Elastic Road Surface" (PERS). Testes realizados mostraram que para todos os veículos, os menores níveis de pressão sonora são do revestimento poroso elástico (PERS) e que para automóveis, a redução no  $L_{eq}(A)$  é superior a 10 dB(A) (Figura 2.64) (MEIARASHI, 2003).

As superfícies designadas de poro-elásticas são superfícies com um teor muito elevado de vazios interligados, de forma a facilitar a passagem de ar e água, e também possui alguma elasticidade devido ao uso de grânulos de borracha. A formulação destas misturas deve ser elaborada considerando uma porosidade de pelo menos 20% e uma percentagem de borracha na ordem dos 20% (SANDBERG e KALMAN, 2006).

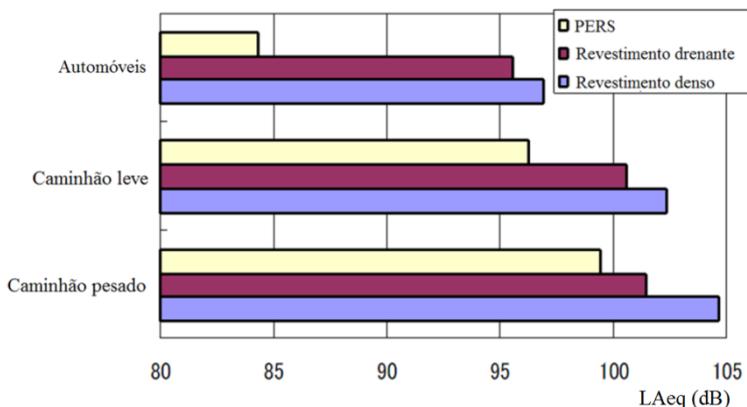


Figura 2.64 - Ruído para 3 tipos de revestimento (MEIARASHI, 2003).

Neste mesmo estudo também foram medidos os níveis de pressão sonora de ruído para diferentes volumes de vazios. As Figuras 2.65 e 2.66 mostram que a redução do ruído dos PERS é maior com volume de vazios de 35% e 40%, tanto para veículos pesados como para leves, respectivamente (MEIARASHI, 2003).

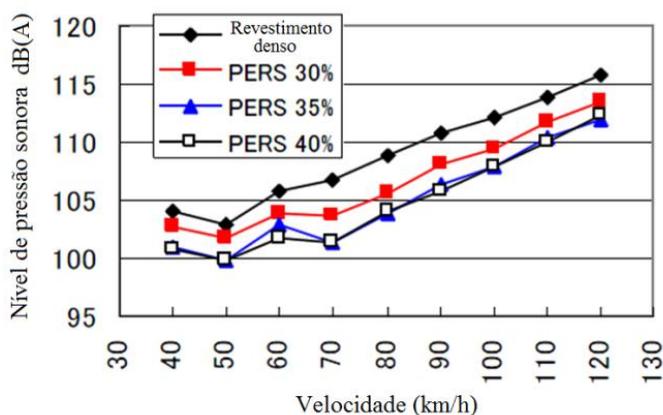


Figura 2.65 - Ruído gerado por caminhões pesados para diferentes volume de vazios do revestimento (MEIARASHI, 2003).

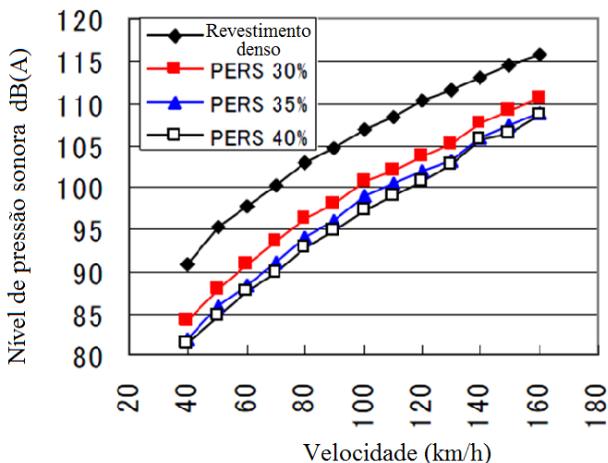


Figura 2.66 - Ruído gerado por automóveis para diferentes volume de vazios do revestimento (MEIARASHI, 2003).

No estudo realizado por Fujiwara *et al.*, (2004) foram avaliados os níveis de pressão sonora para diferentes tipos de revestimentos: Camada densa – DENAP; Camada drenante simples e dupla – SDAP e DDAP; e 3 seções com mistura asfalto-borracha – PERS 1,2 e 3 com 25, 30 e 35% de vazios respectivamente. As Figuras 2.67 e 2.68 mostram os resultados do estudo, onde nota-se maior redução da pressão sonora com a utilização da camada porosa elástica, principalmente quando as velocidades dos veículos são maiores.

Observa-se na Figura 2.67 que não houve diferença na geração do ruído entre a camada drenante simples e a camada dupla. Porém recorda-se que a camada dupla tem a função de minimizar a colmatção dos poros.

Os inconvenientes reportados sobre o PERS são a dificuldade de manter-se unido à camada inferior e problemas relacionados à aderência. Além disso, seu custo de produção é muito alto devido à utilização de resinas no seu processo de fabricação (FEHRL, 2006).

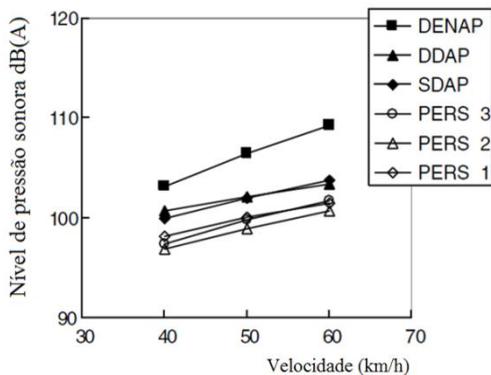


Figura 2.67 - Nível de pressão sonora para veículos leves (FUJIWARA *et al.*, 2004).

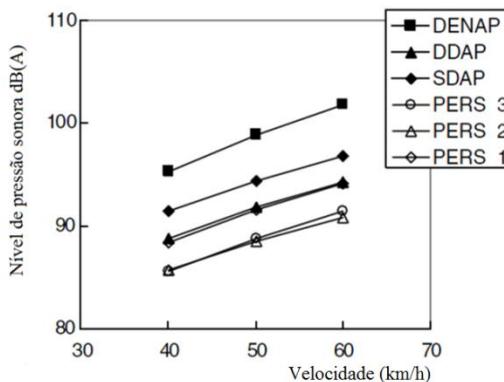


Figura 2.68 - Nível de pressão sonora para veículos pesados (FUJIWARA *et al.*, 2004).

## 2.11 COMENTÁRIOS RELEVANTES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Através da revisão bibliográfica realizada são relatados alguns conceitos importantes para o entendimento e desenvolvimento do trabalho:

- O ruído é um som indesejado ou que não apresenta interesse pelo receptor. Após períodos longos de exposição, o ruído causa nas pessoas desconforto e uma extensa lista de sintomas e doenças;

- A unidade usada internacionalmente para descrever o ruído é o decibel. O decibel é, por natureza logarítmico, geralmente abreviado pela nomenclatura dB e indica o nível de pressão sonora;
- O uso do logaritmo não só reduz a larga escala de valores com que devem ser tratados os sons, como também, corresponde à forma mais próxima como os ouvidos humanos percebem ou captam o som;
- Um ouvido saudável normal pode distinguir uma mudança de sonoridade quando ocorre uma variação do nível de pressão sonora (NPS) de cerca de 3 dB;
- O ouvido humano não é igualmente sensível a todas as frequências, sendo mais sensível entre 2 à 5 kHz e menos sensível a frequências extremas, sejam altas ou baixas;
- Os mecanismos de emissão do ruído pneu-pavimento podem ser divididos em dois tipos de origem: a) Mecânicos e b) Aerodinâmicos. A geração do ruído mecânico é composta principalmente de "impactos e choques" e do ruído aerodinâmico principalmente do "bombeamento de ar";
- A velocidade do veículo tem forte influência na geração do ruído pneu-pavimento. Quanto maior a velocidade do veículo maior é o ruído gerado pela interação pneu-pavimento. De maneira geral acima de 40 km/h o ruído pneu-pavimento é a fonte dominante, enquanto que o ruído do motor exerce pouca ou nenhuma influência sobre o ruído total emitido pelo veículo;
- Verifica-se que os materiais porosos tem normalmente uma alta absorção sonora, admitindo a passagem de um fluxo de ar, ocasionando dessa forma a propagação das ondas sonoras dentro do material. Com isso é reduzido o ruído gerado pela interação pneu-pavimento provocado pelos mecanismos aerodinâmicos;
- Observa-se que a textura tem grande influência na geração do ruído. As chamadas texturas negativas, o que significa que a superfície do pavimento é em grande parte plana no topo, propicia que as vibrações no pneu sejam reduzidas, gerando menos ruído de geração mecânica. A textura positiva, por sua vez, é formada por partículas ou arestas em protuberância acima do plano da superfície. Dependendo do tamanho máximo dos grãos e da sua distribuição, essa textura leva a níveis mais elevados de vibrações sobre o pneu em movimento;
- Os métodos mais utilizados para a avaliação ruído gerado pela interação pneu-pavimento são o CPX, SPB e o CPB. Esses métodos analisados em conjunto estabelecem o nível de ruído gerado pela interação pneu-pavimento em uma rodovia;

- A absorção sonora de uma superfície representa a capacidade da superfície de não refletir a energia acústica incidente. O coeficiente de absorção sonora pode ser medido através do tubo de impedância. Um revestimento com uma alta absorção acústica, ou seja, alto coeficiente de absorção sonora reduz o ruído gerado pelos mecanismos aerodinâmicos principalmente de bombeamento do ar.

- Verificou-se que uma superfície silenciosa é aquela capaz de reduzir a geração dos mecanismos mecânicos melhorando a textura, principalmente com a redução do tamanho máximo do agregado sem que comprometa a aderência pneu-pavimento e que consiga ainda, através da sua porosidade, com que o ar do contato pneu-pavimento possa escapar e reduzir o ruído gerado pelos mecanismos aerodinâmicos.

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos propostos e com base na revisão bibliográfica realizada, a pesquisa será desenvolvida em duas frentes: a) Estudo de laboratório; e b) Estudo de campo.

### **a) Estudo de Laboratório:**

**Etapa 1 - Caracterização dos Materiais:** Nessa etapa foram caracterizados os materiais para moldagem em laboratório dos corpos de prova das misturas asfálticas e seleção das granulometrias.

**Etapa 2 - Confeção dos Corpos de Prova Marshall:** Essa etapa visou à confeção dos corpos de prova das misturas asfálticas utilizando a metodologia Marshall.

**Etapa 3 - Confeção das Placas de Concreto Asfáltico:** Nessa etapa foram fabricadas placas de concreto asfáltico utilizando a mesa compactadora de placas LCPC.

**Etapa 4 - Ensaio de Drenabilidade e Determinação da Porosidade:** Na terceira etapa foi determinada a drenabilidade e a porosidade dos corpos de prova moldados em laboratório.

**Etapa 5 - Ensaio Mecânicos:** Nesta etapa o objetivo foi realizar os ensaios de cântabro nas misturas asfálticas drenantes e na mistura de CPA. O ensaio de resistência à tração foi realizado para todas as misturas asfálticas. Na mistura asfáltica com borracha e mistura asfáltica comum foram realizados os ensaios de módulo de resiliência.

**Etapa 6 - Ensaio de Absorção Sonora:** Essa etapa teve a finalidade de realizar os ensaios de absorção acústica utilizando o tubo de impedância em todos os corpos de prova extraídos das placas moldadas em laboratório.

### **b) Estudo de Campo:**

**Etapa 7 - Avaliação do Ruído Gerado na Avenida Beira-Mar:** Nessa etapa foram realizados os ensaios de determinação do nível de pressão sonora em campo. Visou avaliar o ruído gerado na Avenida Beira-Mar em dois tipos de revestimentos asfálticos (mistura asfáltica densa comum envelhecida e mistura asfáltica com borracha).

**Etapa 8 - Avaliação do Ruído Gerado na Camada de CPA:** Essa etapa teve como objetivo avaliar ruído gerado na camada porosa de atrito, determinando o nível de pressão sonora  $L_{A\text{máx}}$  em campo.

**Etapa 9 - Avaliação do Ruído Gerado no Microrrevestimento:** Na nona etapa foi avaliado o ruído gerado no microrrevestimento visando a determinação do nível de pressão sonora  $L_{Amáx}$ .

**Etapa 10 - Análise dos Resultados:** Nessa última etapa buscou-se avaliar os resultados encontrados na tentativa de encontrar um revestimento ideal na redução do ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

A Figura 3.1 mostra o diagrama das etapas do trabalho.

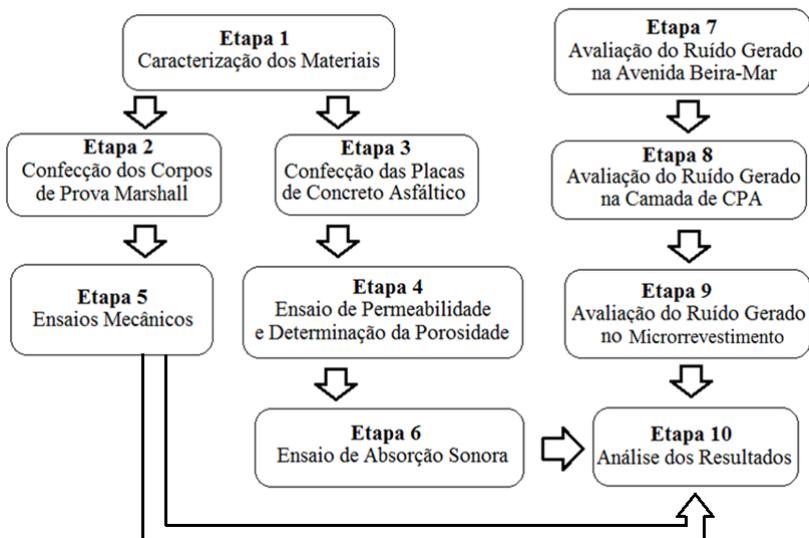


Figura 3.1 - Diagrama das etapas do trabalho

### 3.1 METODOLOGIA UTILIZADA NO ESTUDO EM LABORATÓRIO

Com objetivo de avaliar a absorção sonora através do tubo de impedância de alguns tipos de revestimentos asfálticos, foram moldados corpos de prova de misturas asfálticas (mistura asfáltica densa comum, mistura asfáltica drenante, camada porosa de atrito e uma mistura asfáltica com borracha). Para a mistura drenante, primeiramente definiu-se a curva granulométrica a partir de trabalhos já realizados, que demonstraram desempenho adequado quanto às características

mecânicas e de desempenho. Para as demais misturas, foram utilizados projetos já executados em campo para que se pudessem realizar medidas da absorção em campo possibilitando uma comparação entre laboratório e campo. Os materiais foram selecionados e caracterizados, e em seguida, as misturas foram compactadas pelo método Marshall e no compactador de placas LCPC. Na última etapa foram extraídos três corpos de prova de cada placa através da sonda rotativa para realização de ensaios de capacidade de absorção sonora utilizando o tubo de impedância.

### **3.1.1 ETAPA 1 – Caracterização dos Materiais**

#### **3.1.1.1 Agregados**

Os agregados utilizados na moldagem dos corpos de prova são de origem granítica, fornecidos pela IVAI Engenharia de Obras S/A. da jazida localizada em Paulo Lopes-SC, Km 265 da BR 101-SC. Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização tecnológica segundo as normas vigentes do DNIT:

- Ensaio de granulometria de acordo com o método de ensaio DNER-ME 083/98;
- Ensaio de abrasão Los Angeles de acordo com o método de ensaio DNER-ME 035/98 (1998);
- Ensaio de sanidade determinado pelo método de ensaio DNER-ME 089/94;
- Ensaio de absorção que é a relação entre a massa de água absorvida pelo agregado graúdo após 24 horas de imersão (DNER-ME 081/98);
- Ensaio de adesividade de acordo com o método DNER-ME 078/94;
- Determinação da massa específica de agregados graúdos de acordo com o método de ensaio DNER-ME 081/98; e
- Determinação da massa específica de agregados miúdos de acordo com o método de ensaio DNER-ME 084/95.

### 3.1.1.2 Ligantes asfálticos

Foram utilizados dois tipos de ligante asfáltico na moldagem dos corpos de prova: o CAP 50-70 modificado por borracha moída de pneu (15%) fornecido pela Greca Asfaltos e o CAP 50-70 convencional. Foram realizados ensaios de penetração e ponto de amolecimento.

### 3.1.1.3 Composições granulométricas e teores de CAP das misturas

Para a moldagem dos corpos de prova das misturas asfálticas as curvas granulométricas e os teores de CAP foram definidos a partir de trabalhos e projetos já realizados. Para cada tipo de mistura foi utilizada uma dosagem e uma composição granulométrica diferente.

#### a) Mistura asfáltica densa comum:

Para a moldagem dos corpos de prova da mistura asfáltica densa comum foi utilizada uma composição granulométrica que se encaixou na faixa B do DNIT utilizando o CAP 50-70, que teve como objetivo simular o mesmo revestimento denso comum envelhecido da Avenida Beira Mar em Florianópolis. A dosagem utilizada foi a mesma do projeto da avenida, fornecido pelo DEINFRA-SC e elaborado pela empresa Sinoda S/A. em 1980 com teor de ligante entre 4,78 e 5,04% e volume de vazios entre 3 e 3,5%. A granulometria da mistura do projeto da Avenida Beira-Mar é apresentada no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Granulometria da mistura asfáltica densa comum

Peneira	% Passante
1''	100
3/4''	98,1
3/8''	72,7
Nº 4	47,1
Nº 10	32,5
Nº 40	20,1
Nº 80	11,1
Nº 200	4,1

### b) Mistura asfáltica drenante:

Para a moldagem dos corpos de prova das misturas asfálticas drenantes as curvas granulométricas e os teores de CAP foram definidos por Meurer Filho (2001), que mostrou um desempenho adequado quanto às características de vazios comunicantes, drenabilidade e de deformação permanente.

O CAP utilizado foi o 50-70 modificado com borracha (15%) com teor de ligante da mistura de 4,2%, sendo o diâmetro máximo de 9,5 mm. Também foi utilizada a granulometria com diâmetro máximo de 12,5 mm e teor de CAP de 4,4%. Foram moldados corpos de prova para que o volume de vazios ficasse entre 22 e 28%. A granulometria que foi utilizada para a moldagem dos corpos de prova drenante é apresentada no Quadro 3.2 e na Figura 3.2, sendo D95 e D125 a curva com tamanho máximo do agregado de 9,5 mm e 12,5 mm, respectivamente.

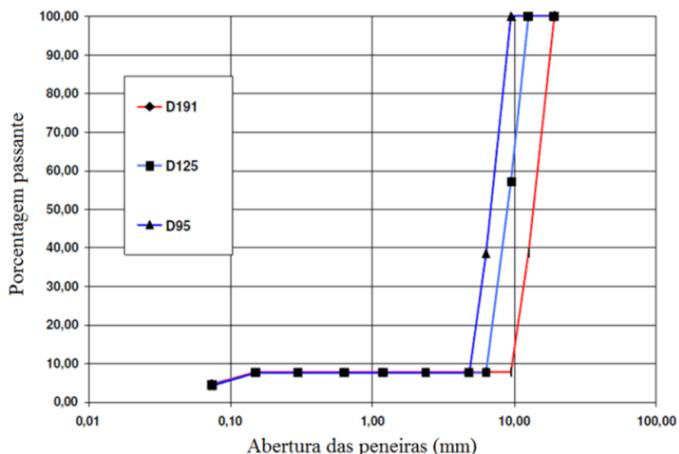


Figura 3.2 - Curva granulométrica da mistura drenante (MEURER FILHO, 2001).

Quadro 3.2 - Granulometria da mistura drenante (MEURER FILHO, 2001).

Abertura das Peneiras (mm)	D <sub>máx</sub> =9,52, n=0,81	D <sub>máx</sub> =12,5, n=0,76
	Porcentagem Passante	Porcentagem Passante
25,4	100,00	100,00
19,1	100,00	100,00
12,5	100,00	100,00
9,5	100,00	57,20
6,3	38,54	7,77
4,75	7,71	7,77
2,8	7,71	7,77
1,18	7,71	7,77
0,6	7,71	7,77
0,3	7,71	7,77
0,15	7,71	7,77
0,075	4,36	4,53

### c) Camada porosa de atrito (CPA):

Para a moldagem dos corpos de prova da mistura porosa (CPA) a composição granulométrica e a dosagem da mistura foram as mesmas utilizadas na execução do trecho da BR – 282 que liga Campos Novos a Lages (SC). A granulometria da mistura se encaixou na faixa V de acordo com a especificação de serviço DNER-ES 386/99, com teor ótimo de CAP de 4,3%, com variação de 4,0 a 4,6%, e volume de vazios de 21,9%. O Quadro 3.3 mostra a granulometria do projeto da mistura elaborado pela Greca Asfaltos.

Quadro 3.3 - Granulometria da camada porosa de atrito

Peneiras (N°)	% passante
3/4"	100
1/2"	79,5
3/8"	62,9
N° 04	28,3
N° 10	15,1
N° 40	6,9
N° 200	4,5

### d) Mistura asfáltica com borracha:

Para a moldagem dos corpos de prova Marshall de mistura asfáltica com borracha foi utilizada uma composição granulométrica que se encaixou na faixa C do DNIT com teor de CAP de 5,6% e volume de vazios entre 3,68 e 5,00% de acordo com o projeto da mistura asfáltica

que foi aplicada no recapeamento da Beira-Mar fornecido pela empresa Sulcatarinense Engenharia S/A. Para moldagem das placas, a mistura asfáltica foi coletada diretamente da vibro-acabadora que realizava o recapeamento da Avenida Beira-Mar Norte em Florianópolis. O material foi levado ao laboratório de pavimentação da UFSC para ser compactado no compactador de placas LCPC. A granulometria da mistura do projeto é apresentada no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Granulometria da mistura asfáltica com borracha

Peneiras (N°)	% passante
3/4"	100
1/2"	86,8
3/8"	81,06
N° 04	60,71
N° 10	41,82
N° 40	18,44
N° 80	12,37
N° 200	8,01

### 3.1.2 ETAPA 2 – Confeção dos Corpos de Prova Marshall

Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizada a metodologia Marshall de acordo com a norma DNER-ME 043/95. O Quadro 3.5 ilustra a configuração dos corpos de prova que foram moldados em laboratório.

Quadro 3.5 - Configurações dos corpos de prova

Corpo de Prova	Ligante	Teor de ligante	Diâmetro (máximo)
Mistura asfáltica densa comum	CAP 50/70	4,91%	25,4 mm
Mistura asfáltica drenante	CAP 50/70 com borracha	4,20%	9,5 mm
Mistura asfáltica drenante	CAP 50/70 com borracha	4,40%	12,5 mm
Camada porosa de atrito	CAP 50/70 com borracha	4,30%	19,1 mm
Mistura asfáltica densa com borracha	CAP 50/70 com borracha	5,60%	19,1 mm

A moldagem dos corpos de prova Marshall teve como objetivo realizar os ensaios de resistência mecânica das diferentes misturas asfálticas.

### **3.1.3 ETAPA 3 – Confeção das Placas de Concreto Asfáltico**

Nessa etapa foram confeccionadas placas de diferentes misturas asfálticas utilizando o compactador de placas LCPC (Figura 3.3) com objetivo de extrair 3 corpos de prova de cada placa para realização dos ensaios de absorção sonora. Os moldes utilizados foram de 18x50 cm com altura variando de acordo com tipo de mistura. Para a placa de mistura asfáltica com borracha o molde utilizado foi de 40x60 cm. O Quadro 3.6 mostra a configuração das placas.



Figura 3.3 - Compactador de placas LCPC.

Quadro 3.6 - Configuração das placas das misturas asfálticas

Placa	Espessura Média	Tipo de Ligante	Ligante	D(máx) do agregado
Mistura asfáltica densa comum (MC)	5,0 cm	CAP 50/70	4,91%	25,4 mm
Mistura asfáltica drenante P1 (D <sub>máx</sub> 9,5 mm)	4,0 cm	CAP 50/70 com borracha	4,20%	9,5 mm
Mistura asfáltica drenante P1 (D <sub>máx</sub> 12,5 mm)	4,0 cm	CAP 50/70 com borracha	4,40%	12,5 mm
Mistura asfáltica drenante P2 (D <sub>máx</sub> 9,5 mm)	4,2 cm	CAP 50/70 com borracha	4,20%	9,5 mm
Mistura asfáltica drenante P2 (D <sub>máx</sub> 12,5 mm)	4,2 cm	CAP 50/70 com borracha	4,40%	12,5 mm
Mistura asfáltica drenante P3 (D <sub>máx</sub> 9,5 mm)	4,4 cm	CAP 50/70 com borracha	4,20%	9,5 mm
Mistura asfáltica drenante P3 (D <sub>máx</sub> 12,5 mm)	4,5 cm	CAP 50/70 com borracha	4,40%	12,5 mm
Camada porosa de atrito (CPA)	4,0 cm	CAP 50/70 com borracha	4,30%	19,1 mm
Mistura asfáltica densa com borracha (MB)	12,0 cm	CAP 50/70 com borracha	5,6%	19,1 mm

### 3.1.4 ETAPA 4 – Determinação da Drenabilidade, Porosidade e Macrot textura

Nessa etapa foi realizado o ensaio de drenabilidade nas placas utilizando um drenômetro construído no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina. A Figura 3.4 mostra o equipamento utilizado.



Figura 3.4 - Drenômetro.

A percentagem de volume de vazios foi determinada para todos os corpos de provas extraídos das placas, pois esse parâmetro tem grande influência nos resultados das medições de absorção sonora. Para as misturas porosas (drenante e a CPA), também foi determinada a percentagem de vazios comunicantes.

Nessa etapa foi determinada a macrotextura de todas as placas moldadas em laboratório. A macrotextura superficial foi avaliada pelo Método da Mancha de Areia utilizando as diretrizes da Norma ASTM E 965. Para a realização do ensaio foi utilizado  $7,69 \text{ cm}^3$  dos  $25 \text{ cm}^3$  padronizado pela norma, pois as placas não tinham superfície suficiente para o volume inicial de areia.

### **3.1.5 ETAPA 5 – Ensaio Mecânicos**

Essa etapa visou a realização do ensaio de Cântabro de acordo com a especificação DNER-ME 383/99 nas misturas asfálticas drenantes e na mistura de CPA. Nas demais misturas moldadas em laboratório (mistura asfáltica com borracha e mistura asfáltica comum) foi realizado o ensaio de módulo de resiliência de acordo com norma DNIT 135/2010 – ME. O ensaio de resistência à tração conforme a norma do DNIT 136/2010 – ME foi realizado para todas as misturas asfálticas.

### **3.1.6 ETAPA 6 – Ensaio de Absorção Acústica**

Foram realizados os ensaios de absorção acústica em todos os corpos de prova extraídos das placas moldadas em laboratório. Os ensaios foram realizados de acordo com o procedimento especificado na ISO 10534-2:1998 E. O ensaio de absorção consistiu em excitar um tubo de impedância com um ruído branco e medir a pressão sonora no seu interior. O processo de medição foi baseado na interação de duas ondas planas: uma incidente e a outra refletida. Com isso foi possível determinar a curva de absorção sonora em função da frequência. Basicamente o sistema funcionou emitindo um ruído incidente e medindo o ruído refletido pelo material. Essa diferença foi a energia absorvida pelo material, e a razão entre a energia acústica absorvida e a energia acústica incidente determinou o coeficiente de absorção sonora.

## 3.2 METODOLOGIA UTILIZADA NO ESTUDO DE CAMPO

A avaliação do ruído de tráfego em campo foi realizada em 3 vias: Avenida Beira-Mar sobre dois diferentes tipos de revestimento (mistura densa comum envelhecida com 30 anos de idade e mistura asfalto-borracha com 6 meses de idade) e para diferentes macrotexturas constadas através do ensaio da mancha de areia; na BR-282 sobre um revestimento poroso (CPA) com 5 anos de idade; e em um microrrevestimento com 2 anos de idade na Rua Vereador Osni Ortiga, Florianópolis. As medições de nível de ruído máximo ( $L_{Amáx}$ ) utilizando apenas um veículo foram realizadas para 3 diferentes velocidades (60, 80 e 100 km/h), utilizando algumas diretrizes do ensaio do método do CPB. Também foram realizadas medições de nível de ruído equivalente ( $L_{Aeq}$ ) para 3 pontos na Avenida Beira-Mar com duração de 15 minutos em cada medida, com objetivo de verificar a modificação do ruído global com a mudança do tipo de revestimento após a restauração da Avenida Beira-Mar.

### 3.2.1 ETAPA 7 - Avaliação do Ruído Gerado na Avenida Beira-Mar

#### 3.2.1.1 Escolha dos locais de avaliação

Foram escolhidos 3 locais de ensaio onde foi possível determinar o ruído antes (mistura asfáltica densa comum envelhecida) e depois da restauração da Avenida Beira-Mar (mistura asfáltica com borracha). As estações de teste foram selecionadas tanto para a realização das medidas de  $L_{Amáx}$ , utilizando um veículo teste, como para as medidas do  $L_{Aeq}$  de 15 minutos de duração. As estações de teste compreendem de 50 metros antes e depois do ponto onde foram realizadas as medições do ruído.

Os locais foram escolhidos levando em conta também a necessidade de se reduzir ao máximo a influência do ruído de fundo do espaço acústico local, das características das seções transversal e longitudinal da via e de seu entorno, e o ruído do motor do veículo.

### 3.2.1.2 Macrotextura e drenabilidade

Foi determinada a macrotextura dos revestimentos dos pavimentos das estações de teste. A macrotextura superficial foi avaliada com o Método da Mancha de Areia utilizando as diretrizes da Norma ASTM E 965. O Figura 3.5 mostra os equipamentos utilizados no ensaio. O ensaio de drenabilidade foi realizado utilizando um drenômetro de modelo Suíço.



Figura 3.5 - Equipamentos do ensaio da mancha de areia

### 3.2.1.3 Método de medição do ruído

#### ***a) Medição do ruído individual (com um veículo de teste)***

Para realizar a comparação do nível de ruído máximo  $L_{Amáx}$  das superfícies estudadas (mistura asfáltica densa comum envelhecida com diferentes macrotexturas e mistura asfáltica com borracha) em campo, foram utilizadas diretrizes do método do CPB (Método da Passagem Controlada) que pode ser realizado utilizando um único veículo. Neste método, o ruído gerado por um único automóvel foi medido em um local de ensaio especialmente concebido. Este método é executado de acordo com a Norma NF S31-119-2: 2000.

O veículo de teste estava sempre com os pneus calibrados e com o mesmo peso. As medições foram realizadas com o condutor do veículo treinado para não influenciar nos resultados, pois qualquer aceleração ou frenagem poderia comprometer a medição.

O equipamento utilizado para a medição do ruído externo foi um sonômetro, com sensibilidade de 0,1 dB modelo SOLO N° 1163q da marca 01 dB-Metravib, que é um instrumento de medida que serve para

medir níveis de pressão sonora, de acordo com a norma ANSI S1-4-1971.

***b) Medição do  $L_{Aeq}$  em 15 minutos para cada medição (ruído global)***

Foram realizadas medições de nível de ruído equivalente ( $L_{Aeq}$ ) para 3 pontos na Avenida em diferentes dias da semana com duração de 15 minutos em cada medida. Teve como objetivo verificar se existiu a redução do ruído global com a mudança do tipo de revestimento do pavimento. Nesta medição, todo o ruído do fluxo do tráfego foi medido. Os horários das medições foram entre 9:00 a 10:30 h e 14:30 a 16:00 h.

A medição foi realizada com o mesmo sonômetro das medições individuais. As medições realizadas no tempo de 15 minutos são suficientes quando os resultados a cada 5 minutos não se diferem de 1 decibel.

### **3.2.2 ETAPA 8 – Avaliação do Ruído Gerado na Camada de CPA**

#### **3.2.2.1 Escolha do local de avaliação**

O local escolhido para avaliação do ruído na camada porosa de atrito (CPA) foi o trecho situado na BR-282 com idade de 4 anos que liga a cidade de Lages a Campos Novos. A estação de teste foi selecionada para a realização das medidas de  $L_{Amáx}$ , utilizando um veículo teste.

#### **3.2.2.2 Macrotextura e drenabilidade**

A macrotextura superficial do revestimento do pavimento foi avaliada com o Método da Mancha de Areia utilizando as diretrizes da Norma ASTM E 965.

O ensaio de drenabilidade foi realizado utilizando um drenômetro de modelo Suíço construído no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina.

### 3.2.2.3 Método de medição do ruído

Para avaliação do ruído gerado no revestimento poroso foram realizadas medições do nível de ruído máximo  $L_{Amax}$ , onde foram utilizadas algumas diretrizes do método do CPB utilizando apenas um veículo de teste. Este método é executado de acordo com a Norma NF S31-119-2: 2000.

## **3.2.3 ETAPA 9 – Avaliação do Ruído Gerado no Microrrevestimento**

### 3.2.3.1 Escolha do local de avaliação

O local escolhido para avaliação do ruído na camada de microrrevestimento com idade de 2 anos foi a Rua Vereador Osni Ortiga, localizada em Florianópolis.

De acordo com os dados fornecidos pela empresa Esteio Pavimentação e Construção Ltda, a granulometria do microrrevestimento se encaixou na Faixa II do DNIT 035/2005-ES com teor ótimo de emulsão asfáltica catiônica RC-1C de 10,5%.

A estação de teste foi selecionada para a realização das medidas de  $L_{Amax}$ , utilizando um veículo teste.

### 3.2.3.2 Macrotextura e drenabilidade

Para a caracterização do microrrevestimento asfáltico, também foi determinada a macrotextura da camada nos locais de teste com o Método da Mancha de Areia utilizando as diretrizes da Norma ASTM E 965.

O ensaio de drenabilidade foi realizado utilizando um drenômetro de modelo Suíço construído no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina.

### 3.2.3.3 Método de medição do ruído

Para avaliação do ruído gerado no microrrevestimento asfáltico foram realizadas medições do nível de ruído máximo  $L_{Amáx}$  utilizando diretrizes do método do CPB com medições apenas com um veículo de teste.

### **3.2.4 ETAPA 10 – Análise dos Resultados**

Nessa última etapa foram realizadas as análises dos resultados da macrotextura, absorção sonora, drenabilidade e nível de pressão sonora do diferentes tipos de revestimentos estudados nessa pesquisa. Com o objetivo de encontrar um revestimento ideal na redução do ruído provocado pela interação pneu-pavimento.



## CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EM LABORATÓRIO

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos em laboratório: a caracterização dos materiais, a confecção dos corpos de prova e os resultados do estudo da absorção sonora para os diferentes tipos de misturas asfálticas.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Agregados

Os agregados minerais miúdo e graúdo são de origem granítica e foram fornecidos pela IVAI Engenharia de Obras da jazida localizada em Paulo Lopes-SC, Km 265 da BR 101-SC.

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização tecnológica segundo as normas vigentes do DNIT:

##### a) Ensaio de abrasão Los Angeles

O ensaio foi realizado de acordo com o método de ensaio DNER-ME 035/98 (1998). O Quadro 4.1 mostra os resultados.

Quadro 4.1 - Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles

Agregado mineral retido na peneira 9,5 e 6,3 mm.		
Massa inicial (kg)	Massa final (kg)	Abrasão Los Angeles (%)
4998,70	3060,00	39

Os resultados mostram um valor alto de desgaste. Entretanto, atende as especificações que limitam o valor de abrasão entre 40 e 55 %, dependendo do órgão e do emprego.

##### b) Ensaio de sanidade

O ensaio foi determinado utilizando a norma DNER-ME 089/94. Foi utilizado o sulfato de sódio de anidro para a solução, com duas frações de agregados diferentes: c e d, de acordo com a norma. O Quadro 4.2 mostra os resultados dos ensaios para as duas frações.

Quadro 4.2 - Resultados do ensaio de durabilidade para fração "c" e "d"

Fração	Perda total (%)	Perda por peneira (%)	
		12,5 mm	9,5 mm
"c"	6,47	3,17	13,2
"d"	1,67	-	-

Os resultados mostraram um desgaste maior nas pedras maiores, tal fato pode ser explicado pela maior área de contato da solução e maior probabilidade de existência de poros provocando maiores fendilhamentos na pedra.

### c) Ensaio de absorção

O ensaio foi realizado utilizando a norma DNER-ME 081/98. De acordo com o tamanho máximo do agregado foram utilizadas duas amostras com 3 kg com os resultados da absorção mostradas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Resultados do ensaio de absorção do agregado graúdo

Ensaio de Absorção	Amostra	Peso Inicial (kg)	Peso Final (kg)	Absorção (%)
	1	2990	3000,4	0,348
	2	3055,1	3066,7	0,378

Agregados com elevada porosidade normalmente não devem ser utilizados em misturas asfálticas, pois consomem maior quantidade de ligante e apresentam porosidade variável para diferentes amostras. Os resultados mostraram uma pequena absorção. Com isso não houve nenhuma restrição ao uso desse agregado.

### d) Ensaio de adesividade

O ensaio de adesividade foi executado de acordo com a norma DNER-ME 078/94, com dois ligantes diferentes: CAP 50/70 comum e modificado com borracha. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram as amostras antes e depois do ensaio para o ligante comum e modificado com borracha, respectivamente.



Figura 4.1 - Preparação do ensaio de adesividade (a esquerda: ligante comum, a direita: ligante modificado com borracha)



Figura 4.2 - Resultado do ensaio de adesividade (a esquerda: ligante comum, a direita: ligante modificado com borracha)

Os resultados mostraram uma menor adesividade, porém satisfatória da pedra com o ligante comum. Isso era de se esperar porque o ligante modificado por borracha melhora a adesividade entre o agregado e o ligante.

#### **4.1.2 Ligantes Asfálticos**

Os ligantes asfálticos utilizados na pesquisa foram o CAP 50-70 modificado por borracha moída de pneu (15%) e CAP 50-70 convencional. As características destes cimentos asfálticos podem ser visualizadas nas Figuras 4.3 e 4.4.

## CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

DATA	03/09/10
PRODUTO	ECOFLEX B
FINALIDADE	AMOSTRA GRATIS

ENSAIO	NORMA	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS
Penetração (100g, 5s, 25°C), 0,1mm	NBR 6576	25 a 75	50
Ponto de Amolecimento, °C	NBR 6560	55 (mínimo)	59,5
Recuperação Elástica, %	NLT 329 / 91	50 (mínimo)	78,5
Ponto de Fulgor, °C	NBR 11341	235 (mínimo)	> 240
Densidade Relativa, 25°C/25°C	NBR 6296	Anotar	1,032
Visc Brookfield à 175°C, cP, Sp 3, 20 rpm	ASTM D 2196-99	800 - 2500	1665,0
Temperatura de Carregamento, °C	-	Anotar	175

Figura 4.3 - Características do CAP modificado por borracha

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRAÇÃO	D 5	50 a 70	54	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	46 min	49,2	grau C
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROL A 135 GC	E 102	141 min	177,0	s
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SP21 20RPM	D 4402	274 min	342	cp
VISC. SSF. 150GC	E 102	50 min	89,0	s
VISCOSIDADE BROKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	112 min	168	cp
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROL A 177 GC	E 102	30 a 150	34,5	s
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177GC SP21	D 4402	57 a 285	63	cp
RTFOT PENETRAÇÃO RETIDA	D 5	55 min	58	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 max	4,2	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25GC	D 113	20 min	>100	cm
RTFOT VARIACAO EM % MASSA	D 2872	-0,50 a 0,50	-0,258	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min	>100	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99,5 min	99,9	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min	304	grau C
INDICE DE SUSCETIBILIDADE TERMICA	X 018	-1,5 a 0,7	-1,2	N/A
DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GC	D 70	Anotar <sup>(1)</sup>	1,008	N/A
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP <sup>(2)</sup>	NESP	N/A

Figura 4.4 - Características do CAP 50-70 convencional

As informações referentes às características dos CAPs foram fornecidas pela Greca Asfaltos. O Quadro 4.4 mostra os resultados dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento realizados no laboratório de pavimentação da UFSC.

Quadro 4.4 - Resultados do ensaio de penetração

CAP	Ponto de Amolecimento (°C)	Determinação da penetração (0,1 mm)
50-70 Convencional	49	51
50-70 Borracha	61	55

### 4.1.3 Composições granulométricas

Os corpos de prova Marshall e as placas de concreto asfáltico foram moldados com curvas granulométricas definidas a partir de trabalhos já realizados.

#### a) Mistura asfáltica densa comum

Para a moldagem dos corpos de prova dessa mistura foram utilizados dois agregados: um pedrisco; e uma brita 3/4". O Quadro 4.5 mostra a granulometria dos agregados e a composição granulométrica da mistura e a Figura 4.5 mostra a curva granulométrica, sendo utilizado 60% de pedrisco e 40% de brita 3/4" na composição. O Quadro 4.6 apresenta as características físicas dos dois agregados.

Quadro 4.5 - Granulometria dos agregados e composição da mistura asfáltica densa comum faixa B do DNIT

Peneiras	Abertura (mm)	% PASSANTE		
		Brita 3/4"	Pedrisco	Composição granulométrica (*)
3/4"	19,05	100,00	100,00	100,0
1/2"	12,50	83,59	100,00	93,4
3/8"	9,50	47,53	100,00	79,0
Nº 04	4,75	6,96	73,55	46,9
Nº 10	2,00	3,50	45,00	28,4
Nº 40	0,42	2,30	25,00	15,9
Nº 80	0,18	1,53	17,00	10,8
Nº 200	0,075	0,91	11,32	7,2

(\*) 40% de brita 3/4" e 60% de pedrisco

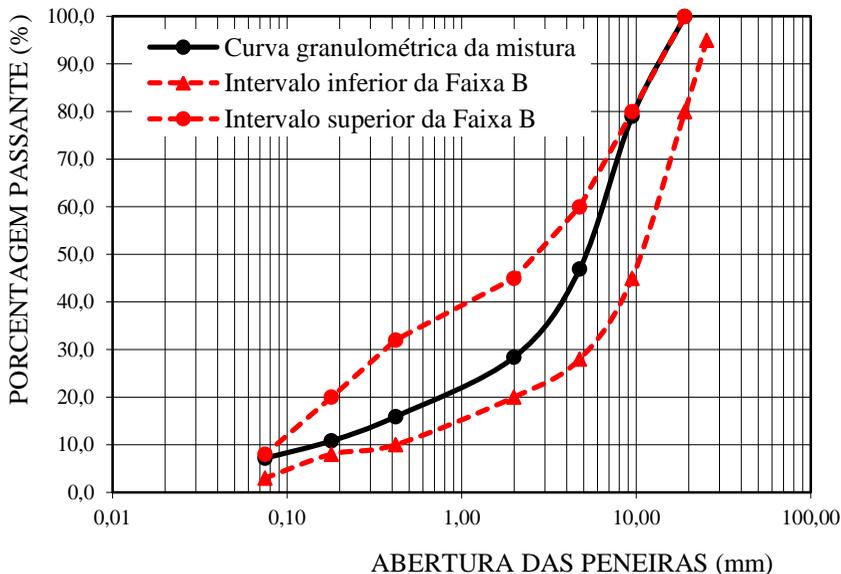


Figura 4.5 - Curva granulométrica da mistura densa comum Faixa B do DNIT

Quadro 4.6 - Características físicas dos agregados

Características	Pedrisco	Brita 3/4"
Material pulverulento (%)	7,79	1,38
Massa específica aparente do agregado saturado superfície seca ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	2,64	2,61
Massa unitária solta do agregado seco ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	1,53	1,42

### b) Mistura asfáltica drenante

Para a montagem das curvas granulométricas drenantes os materiais primeiramente foram separados por peneiras e foi realizada a composição granulométrica de acordo com as curvas definidas no trabalho realizado por Meurer Filho (2001). O Quadro 4.7 mostra a granulometria para os dois tamanhos máximos de agregados e a Figura 4.6 ilustra as duas curvas granulométricas.

Quadro 4.7 - Granulometria da mistura drenante

Abertura (mm)	Porcentagem passante (%)	
	Diâmetro máximo	
	9,5 mm	12,5 mm
12,5	100	100
9,5	100	57,2
6,3	38,5	7,71
4,75	7,71	7,71
2,8	7,71	7,71
1,18	7,71	7,71
0,6	7,71	7,71
0,3	7,71	7,71
0,15	7,71	7,71
0,075	4,36	4,53

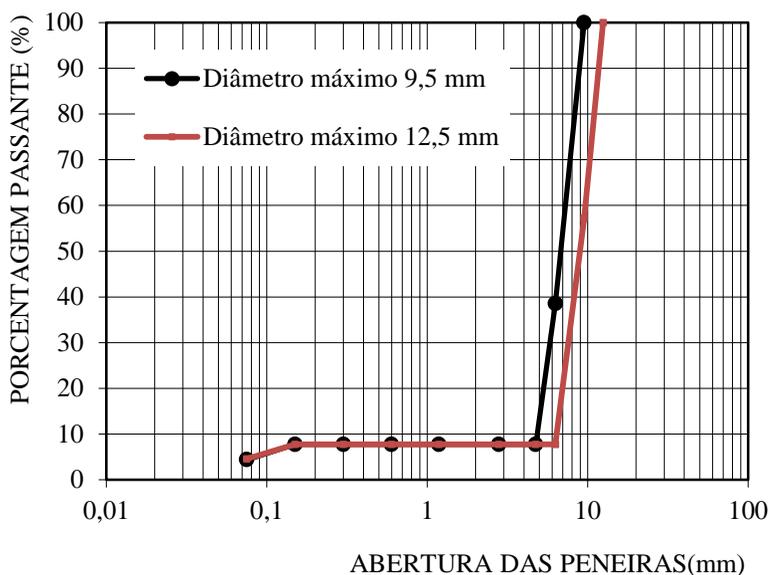


Figura 4.6 - Curvas granulométricas das misturas drenantes

As densidades dos agregados de cada granulometria foram encontradas realizando o ensaio da massa específica máxima – procedimento com vácuo. A Figura 4.7 mostra a execução do ensaio e o Quadro 4.8, os resultados.



Figura 4.7 - Ensaio da massa específica máxima – procedimento à vácuo

Quadro 4.8 - Densidade dos agregados das misturas drenantes

Tamanho máximo do agregado	Massa específica máxima dos agregados
12,5 mm	2,619 g/cm <sup>3</sup>
9,5 mm	2,612 g/cm <sup>3</sup>

### c) Camada porosa de atrito (CPA)

Para a moldagem dos corpos de prova da CPA foram utilizados 4 agregados para a composição granulométrica: uma brita ¾", dois pedriscos com granulometrias diferentes e um material fino passante na peneira 0,075 mm. O Quadro 4.9 apresenta a granulometria de cada agregado e sua porcentagem para a composição final. A Figura 4.8 mostra a curva granulométrica da mistura encaixada na faixa V do DNIT e na faixa de projeto.

Quadro 4.9 - Composição granulométrica da CPA

Peneiras (mm)	% PASSANTE				
	Brita ¾"	Pedrisco	Pedrisco 2	Fino	Composição granulométrica
	41%	28%	29%	2%	
12,5	38,32	100,00	100,00	100,00	74,7
9,5	7,14	100,00	98,74	100,00	61,6
4,75	0,13	73,55	3,61	100,00	23,7
2,0	0,10	45,00	0,90	100,00	14,9
0,42	0,09	25,00	0,88	100,00	9,3
0,075	0,07	11,32	0,70	100,00	5,4

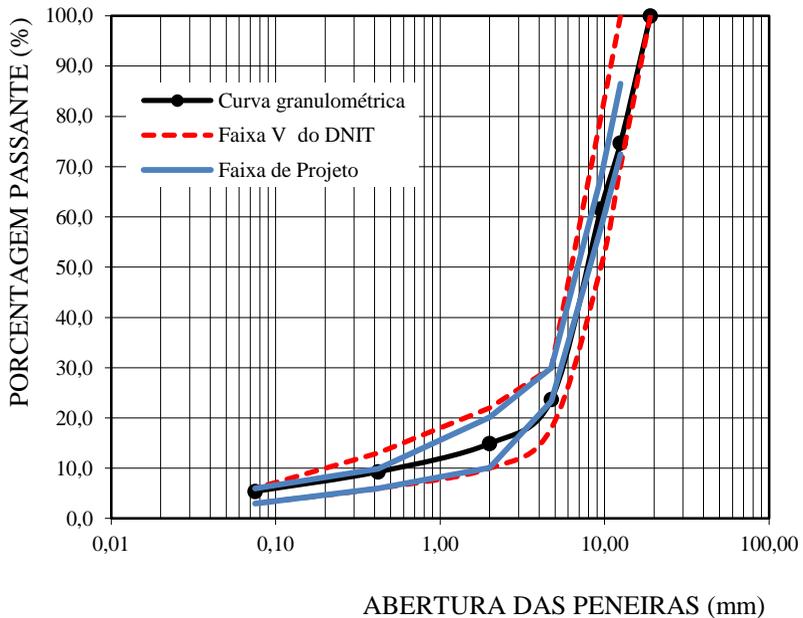


Figura 4.8 - Curva granulométrica da CPA

#### d) Mistura asfáltica com borracha

Para a confecção dos corpos de prova da mistura asfáltica com borracha foi realizada a composição granulométrica com dois agregados: um pedrisco; e uma brita  $\frac{3}{4}$ ". O Quadro 4.10 apresenta a granulometria dos agregados e a composição final. Foram utilizados na composição 18% de brita  $\frac{3}{4}$ " e 82% de pedrisco. A Figura 4.9 mostra a granulometria da mistura encaixada na faixa C do DNIT e na faixa de projeto da mistura.

Quadro 4.10 - Granulometria dos agregados e composição da mistura asfáltica densa com borracha faixa C

Peneiras	Abertura (mm)	% PASSANTE		
		Brita 3/4"	Pedrisco	Composição granulométrica
3/4"	19,05	100,00	100,00	100,0
1/2"	12,50	38,32	100,00	88,90
3/8"	9,50	7,14	100,00	83,33
Nº 04	4,75	0,13	73,55	60,30
Nº 10	2,00	0,10	45,00	36,90
Nº 40	0,42	0,09	25,00	20,50
Nº 80	0,18	0,09	17,00	14,00
Nº 200	0,075	0,07	11,32	9,30

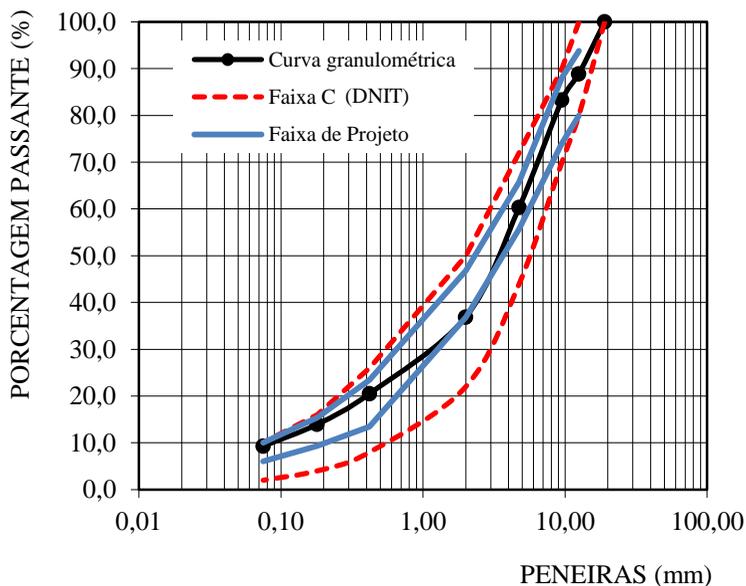


Figura 4.9 - Curva granulométrica da mistura asfáltica com borracha

A Figura 4.10 mostra o gráfico de todas as curvas granulométricas das misturas estudadas nesse trabalho.

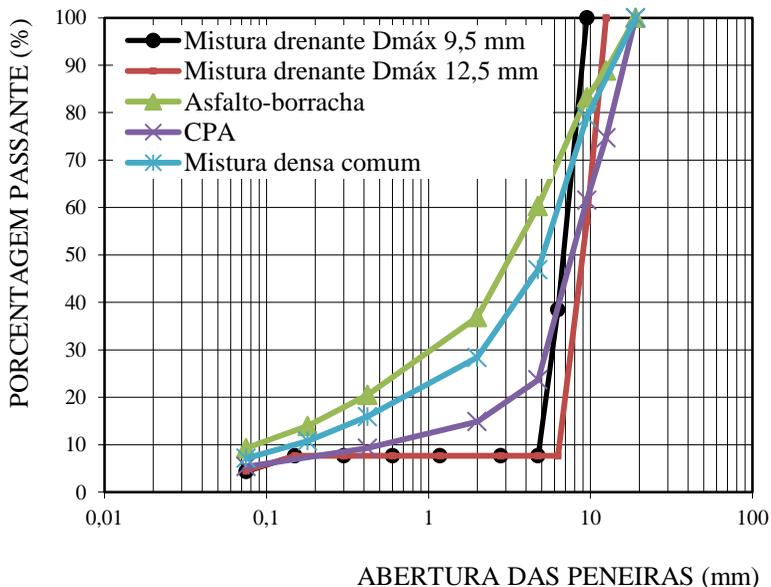


Figura 4.10 - Curvas granulométricas das misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa

## 4.2 CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA MARSHALL

### 4.2.1 Mistura asfáltica densa comum

Para realização de ensaios mecânicos foram moldados 5 corpos de prova Marshall de mistura asfáltica densa comum com teor de ligante de 5,04 % com CAP 50-70 convencional e granulometria na faixa B do DNIT. Foram efetuados 75 golpes por face. As Figuras 4.11 e 4.12 mostram a execução do ensaio e os corpos de prova moldados.



Figura 4.11 - Execução da compactação Marshall



Figura 4.12 - Corpos de prova Marshall (mistura asfáltica densa comum)

A porosidade dos corpos de prova foi calculada com a determinação da massa específica aparente utilizando o procedimento da pesagem hidrostática de acordo com o método de ensaio DNER-ME 117/94. Quadro 4.11 mostra o resultado com as espessuras de cada corpo de prova.

Quadro 4.11 - Volume de vazios dos corpos de prova Marshall (mistura asfáltica densa comum)

Corpos de prova Marshall (mistura asfáltica densa comum)				
Corpos de prova	Espessura	Massa específica aparente	Massa específica máxima teórica	Volume de vazios
	(cm)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
CP 1	6,28	2,300	2,432	5,42
CP 2	6,40	2,285	2,432	6,04
CP 3	6,35	2,290	2,432	5,83
CP 4	6,32	2,294	2,432	5,67
CP 5	6,27	2,320	2,432	4,60

#### 4.2.2 Mistura asfáltica drenante

Com o objetivo de realizar o ensaio de cântabro e de resistência a tração, foram moldados 5 corpos de prova Marshall de mistura asfáltica drenante com CAP 50-70 com borracha para cada granulometria, totalizando 10 corpos de prova. O teor de ligante foi de 4,2 % para a curva granulométrica de tamanho máximo de 9,5 mm e 4,4 % para a curva de tamanho máximo do agregado de 12,5 mm. O número de golpes por face foi controlado para atingir a altura de 6,3 cm, com o objetivo de alcançar a porcentagem de vazios calculada inicialmente de 25%. O número de golpes em média foi de 40 por face. A Figura 4.13 mostra os corpos de prova moldados.



Figura 4.13 - Mistura asfáltica drenante

O volume de vazios dos corpos de prova foi calculado determinando a massa específica aparente utilizando o método de ensaio DNER-ME 117/94 com a utilização da parafina já que se tratava de uma mistura aberta. A Figura 4.14 ilustra a execução do ensaio utilizando a parafina e o Quadro 4.12 mostra os resultados com as espessuras de cada corpo de prova.



Figura 4.14 - Ensaio da determinação da massa específica aparente com parafina

Quadro 4.12 - Volume de vazios dos corpos de prova Marshall (mistura drenante)

Corpos de prova Marshall (mistura asfáltica drenante)				
Corpos de prova	Espessura	Massa específica aparente	Massa específica máxima teórica	Volume de vazios
	(cm)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
CP 1 (9,5mm)	6,19	1,920	2,454	21,70
CP 2 (9,5mm)	6,13	1,940	2,454	20,90
CP 3 (9,5mm)	6,00	1,967	2,454	19,84
CP 4 (9,5mm)	6,50	1,805	2,454	26,44
CP 5 (9,5mm)	6,45	1,815	2,454	26,03
CP 6 (12,5mm)	6,17	1,905	2,453	22,33
CP 7 (12,5mm)	6,16	1,916	2,453	21,80
CP 8 (12,5mm)	6,23	1,898	2,453	22,58
CP 9 (12,5mm)	6,15	1,902	2,453	22,46
CP 10(12,5mm)	6,10	1,900	2,453	22,54

### 4.2.3 Camada porosa de atrito (CPA)

Os corpos de prova Marshall foram confeccionados com objetivo de realizar os ensaios de resistência à tração e de cântabro. Foram moldados 5 corpos de prova sendo efetuado 50 golpes por face. O teor de ligante foi de 4,3% e a curva granulométrica se encaixou na Faixa V do DNIT para CPA. O volume de vazios foi calculado pelo mesmo procedimento realizado para os corpos de prova drenantes (vide item 4.2.2). O Quadro 4.13 mostra os resultados com as espessuras e o volume de vazios de cada corpo de prova.

Quadro 4.13 - Volume de vazios dos corpos de prova Marshall (camada porosa de atrito)

Corpos de prova Marshall (Camada porosa de atrito)				
Corpos de prova	Espessura	Massa específica aparente	Massa específica máxima teórica	Volume de vazios
	(cm)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
CP 1	6,20	1,945	2,451	20,64
CP 2	6,15	1,996	2,451	18,56
CP 3	6,15	1,992	2,451	18,72
CP 4	6,20	1,949	2,451	20,48
CP 5	6,25	1,940	2,451	20,84

#### 4.2.4 Mistura asfáltica densa com borracha

Foram moldados 5 corpos de prova Marshall com o objetivo de realizar os ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração. A granulometria se encaixou na faixa C do DNIT e teor de ligante foi de 5,0 %. Foram efetuados 75 golpes por face. A Figura 4.15 mostra os corpos de prova moldados.



Figura 4.15 - Corpos de prova Marshall (mistura asfalto-borracha)

O volume de vazios dos corpos de prova foi calculado pelo mesmo procedimento realizado nos corpos de prova da mistura densa comum (vide item 4.2.1). O Quadro 4.14 mostra os resultados com as espessuras e o volume de vazios de cada corpo de prova.

Quadro 4.14 - Volume de vazios dos corpos de prova Marshall (mistura asfáltica com borracha)

Corpos de prova Marshall (mistura asfáltica com borracha)				
Corpos de prova	Espessura (cm)	Massa específica aparente	Massa específica máxima teórica	Volume de vazios
	(cm)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
CP 1	6,47	2,261	2,409	6,14
CP 2	6,37	2,265	2,409	5,97
CP 3	6,37	2,260	2,409	6,18
CP 4	6,37	2,263	2,409	6,06
CP 5	6,40	2,255	2,409	6,39

### 4.3 CONFECÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

Foram confeccionadas placas de concreto asfáltico no compactador de placas LCPC com o molde de 18x50 cm para as misturas drenantes, densa comum e para CPA, com energia de compactação forte de acordo com a norma Francesa AFNOR NF P-98-250-2. Para a mistura asfáltica com borracha a compactação foi realizada no molde de 60x40 cm também com energia de compactação forte.

No entanto, para as misturas asfálticas drenantes a energia de compactação foi variada com o objetivo de moldar placas com diferentes volumes de vazios. Foram moldadas placas com porcentagens de vazios entre 22 e 28% para dois tamanhos máximos de agregados, sendo 3 placas para tamanho máximo do agregado de 12,5 mm e 3 placas para tamanho máximo de 9,5 mm, totalizando 6 placas drenantes. Para a mistura asfáltica porosa (CPA), mistura densa com borracha e mistura densa comum foram confeccionadas uma placa de cada.

Primeiramente os agregados foram aquecidos a uma temperatura de 170 °C para mistura densa comum e 180 °C para mistura drenante e porosa, sendo o ligante aquecido de acordo com o ensaio de viscosidade. Os agregados eram colocados no tacho misturador e em seguida era adicionado o CAP de acordo com a temperatura especificada (160 °C para o CAP 50-70 comum e 170 °C para o CAP 50-70 com borracha). A Figura 4.6 ilustra o procedimento.



Figura 4.16 - Preparação da massa para confecção das placas

Concluída a homogeneização, a mistura era despejada na bandeja e colocada na estufa (temperatura de 160 °C para mistura com CAP comum e 170 °C para mistura com CAP borracha) por duas horas para posteriormente ser compactada no compactador LCPC. A compactação foi realizada utilizando apenas um pneu porque se tratava do menor molde. Para a compactação foi utilizado uma chapa metálica com o objetivo de homogeneizar a superfície da placa e melhorar a densificação principalmente quando eram realizadas as compactações das misturas drenantes. Observou-se que todas as misturas apresentaram maior facilidade de aceitar a densificação no centro da amostra do que nas bordas. A Figura 4.17 ilustra o procedimento de compactação das placas.



Figura 4.17 - Procedimento de compactação das placas

Para a moldagem das placas de mistura asfáltica densa com borracha, o material foi coletado diretamente da vibro-acabadora que realizava o recapeamento da Avenida Beira-Mar norte em Florianópolis.

O material foi transportado em caixas ao Laboratório de Pavimentação da UFSC para ser compactado na mesa compactadora LCPC. O trajeto foi realizado em 15 minutos, não se perdendo temperatura de compactação. Foi utilizado o molde de 60x40 cm com a utilização de dois pneus na compactação já que se tratava do molde de maiores dimensões.

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DA DRENABILIDADE E MACROTEXTURA DAS PLACAS

Nessa etapa foram realizados os ensaios de drenabilidade para todas as placas moldadas utilizando um drenômetro. A drenabilidade foi calculada utilizando a equação 2.30. Foram realizadas 3 medidas para cada placa sendo o resultado final a média desses valores. A Figura 4.18 mostra a execução do ensaio e o Quadro 4.15 os resultados encontrados.



Figura 4.18 - Drenabilidade das placas de concreto asfáltico

Como era de se esperar, os resultados mostraram maior drenabilidade nas misturas drenantes. A camada porosa de atrito (CPA) mostra boa drenabilidade, porém muito menor que a mistura drenante. Isso é explicado pelo sua menor porcentagem de vazios comunicantes apesar do volume de vazios ser parecido com os volumes de vazios das misturas drenantes.

Quadro 4.15 - Drenabilidade das placas de concreto asfáltico

Placa	Tamanho máximo do agregado (mm)	Drenabilidade (cm/s)
MC	25,4	7,64
MD (P1)	9,5	24,45
MD (P1)	12,5	27,26
MD (P2)	9,5	23,35
MD (P2)	12,5	26,22
MD (P3)	9,5	23,12
MD (P3)	12,5	25,89
CPA	19,1	12,37
MB	19,1	6,53

MC – Mistura asfáltica densa comum; MD – Mistura asfáltica drenante; CPA – Camada porosa de atrito; MB – Mistura asfáltica densa com borracha.

Foi determinada a macrotextura através do ensaio de mancha de areia em três pontos para todas as placas moldadas. No entanto, devido à pouca área das placas, foi utilizado um volume de areia 7,69 cm<sup>3</sup>, e a Norma ASTM E 965 prescreve 25 cm<sup>3</sup> para a realização do ensaio. Foram realizadas 3 medidas da mancha de areia para cada placa. A Figura 4.19 ilustra a realização do ensaio e o Quadro 4.16 os resultados obtidos.



Figura 4.19 - Ensaio de mancha de areia nas placas de concreto asfáltico

Quadro 4.16 - Macrotextura das placas de concreto asfáltico

Placa	Altura (mm)			Média	Classificação
	1	2	3		
MC	0,98	0,95	0,94	0,96	Grosseira
MD (P1) 9,5 mm	2,12	2,00	2,10	2,07	Muito grosseira
MD (P1) 12,5 mm	2,55	2,40	2,45	2,47	Muito grosseira
MD (P2) 9,5 mm	1,53	1,45	1,59	1,52	Muito grosseira
MD (P2) 12,5 mm	2,32	2,24	2,20	2,25	Muito grosseira
MD (P3) 9,5 mm	1,49	1,40	1,55	1,48	Muito grosseira
MD (P3) 12,5 mm	2,32	2,30	2,15	2,26	Muito grosseira
CPA	1,49	2,40	2,45	2,11	Muito grosseira
MB	0,81	0,78	0,77	0,79	Média

MC – Mistura asfáltica densa comum; MD – Mistura asfáltica drenante; CPA – Camada porosa de atrito; MB – Mistura asfáltica densa com borracha.

Os resultados mostram a dificuldade de caracterizar a textura através do ensaio da mancha de areia quando se trata de um revestimento poroso ou drenante, pois esses revestimentos apresentam uma textura negativa e a areia do ensaio acaba penetrando entre os vazios da mistura, gerando um resultado geralmente de textura muito grosseira.

#### 4.5 EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DAS PLACAS MOLDADAS

Foram extraídos 3 corpos de prova de cada placa e calculado o volume de vazios determinando a massa específica aparente utilizando o procedimento da balança hidrostática. Quadro 4.17 mostra os resultados com as espessuras de cada corpo de prova e a Figura 4.20 mostra a extração dos corpos de prova das placas de concreto asfáltico.



Figura 4.20 - Extração dos Cps das placas de concreto asfáltico

Quadro 4.17 - Volume de vazios dos corpos de prova extraídos das placas de misturas asfálticas

Placa	Cp	Espessura	Massa específica aparente	Massa específica máxima teórica	Volume de vazios
		(cm)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
MC (25,4 mm)	1	5,3	2,330	2,432	4,2
	2	5,1	2,344	2,432	3,6
	3	5,2	2,337	2,432	3,9
MD (P1) (9,5 mm)	1	4,1	1,854	2,454	24,4
	2	4,1	1,842	2,454	25,0
	3	4,0	1,843	2,454	24,9
MD (P1) (12,5 mm)	1	3,8	1,752	2,453	28,6
	2	4,3	1,863	2,453	24,6
	3	3,9	1,768	2,453	27,9
MD (P2) (9,5 mm)	1	4,0	1,817	2,454	26,0
	2	4,3	1,853	2,454	24,5
	3	Danificou durante a extração			
MD (P2) (12,5 mm)	1	4,5	1,852	2,453	24,5
	2	4,2	1,867	2,453	23,9
	3	4,3	1,906	2,453	22,3
MD (P3) (9,5 mm)	1	4,3	1,830	2,454	25,4
	2	4,2	1,893	2,454	22,9
	3	4,5	1,895	2,454	22,8
MD (P3) (12,5 mm)	1	4,6	1,870	2,453	23,8
	2	4,5	1,901	2,453	22,5
	3	Danificou durante a extração			
CPA	1	4,0	1,902	2,451	22,4
	2	4,1	1,950	2,451	20,4
	3	4,0	1,935	2,451	21,1
MB (19,1 mm)	1	6,2	2,321	2,409	3,6
	2	6,5	2,322	2,409	3,6
	3	6,5	2,316	2,409	3,9

MC – Mistura asfáltica densa comum; MD – Mistura asfáltica drenante; CPA – Camada porosa de atrito; MB – Mistura asfáltica densa com borracha.

Para a placa P2 e P3 com tamanho máximo de agregado de 9,5 mm e 12,5 mm respectivamente foi possível extrair apenas 2 corpos de prova, pois a sonda rotativa ainda em começo de operação, não estava bem ajustada.

Também foi determinada a porcentagem de vazios comunicantes para todos os corpos de prova drenantes e porosos extraídos das placas

moldadas em laboratório. Os vazios comunicantes foram calculados de acordo com a equação 2.27. O Quadro 4.18 mostra o resultado.

Quadro 4.18 - Vazios comunicantes (misturas drenante e CPA)

Placa	Cp	Espessura (cm)	Vazios comunicantes (%)	Volume de vazios (%)
MD (P1) (9,5 mm)	1	4,1	28,3	24,4
	2	4,1	28,9	25,0
	3	4,0	29,4	24,9
MD (P1) (12,5 mm)	1	3,8	30,8	28,6
	2	4,3	24,7	24,6
	3	3,9	30,2	27,9
MD (P2) (9,5 mm)	1	4,0	21,1	26,0
	2	4,3	21,0	24,5
	3	Danificado		
MD (P2) (12,5 mm)	1	4,5	21,2	24,5
	2	4,2	21,7	23,9
	3	4,3	21,8	22,3
MD (P3) (9,5 mm)	1	4,3	28,5	25,4
	2	4,2	22,5	22,9
	3	4,5	21,2	22,8
MD (P3) (12,5 mm)	1	4,6	24,7	23,8
	2	4,5	25,3	22,5
	3	Danificado		
CPA	1	4,0	15,0	22,4
	2	4,1	13,7	20,4
	3	4,0	14,1	21,1

Os resultados mostraram que para a camada porosa de atrito (CPA) os resultados de vazios comunicantes foram menores em comparação com as misturas drenantes, apesar do volume de vazios ser parecido entre essas duas misturas. Isso já era esperado porque a mistura drenante tem um gap em sua granulometria aumentando a porcentagem de vazios comunicantes.

#### 4.6 ENSAIOS MECÂNICOS

Foi realizado o ensaio de Cântabro de acordo com a norma DNER-ME 383/99 para os 6 corpos de prova Marshall drenantes e para 3 corpos de prova da mistura porosa (CPA). A Figura 4.21 mostra um corpo de prova antes e depois do ensaio. O desgaste é calculado pela equação 4.1. O Quadro 4.19 mostra o resultado do ensaio.

$$A = \frac{p - p'}{p} \times 100 \quad (4.1)$$

onde:

- A: desgaste da mistura asfáltica;
- p: peso do corpo de prova antes do ensaio;
- p': peso do corpo de prova depois do ensaio.



Figura 4.21 - Corpo de prova Marshall antes e depois do ensaio de Cântabro (CPA)

Quadro 4.19 - Resultados do ensaio de Cântabro

D(máx) do agregado	CP's	Volume de vazios (%)	Desgaste Cântabro (%)	Média (%)
9,5 mm	MD (CP 1)	21,70	27,8	28,7
	MD (CP 2)	20,90	30,2	
	MD (CP 3)	19,84	28,0	
12,5 mm	MD (CP 6)	22,33	31,1	31,8
	MD (CP 7)	21,80	32,0	
	MD (CP 8)	22,58	32,3	
19,1 mm	CPA (CP 1)	20,64	20,1	21,3
	CPA (CP 4)	20,48	22,1	
	CPA (CP 5)	20,84	21,6	

Foram realizados ensaios de módulo de resiliência de acordo com a norma DNIT 135/2010 para as demais misturas com o objetivo de analisar a sua influência na geração e absorção do ruído. Para determinar a carga a ser aplicada no ensaio de resiliência foi necessário realizar o ensaio de resistência à tração. A resistência à tração foi determinada de acordo com a norma DNIT 136/2010 para 2 corpos de prova de cada mistura asfáltica. A Figura 4.22 ilustra a realização dos ensaios em que para o ensaio de tração foi utilizado dois frisos metálicos. Os Quadros 4.20 e 4.21 mostram os resultados.

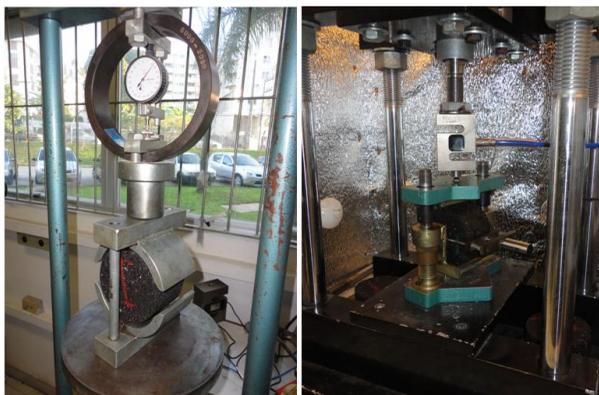


Figura 4.22 - Ensaio de resistência à tração e de módulo de resiliência

Quadro 4.20 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Tipo de mistura	Cp	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume de vazios (%)	Resistência à tração (MPa)
Mistura asfáltica densa comum	4	10,16	6,32	5,67	1,15
	5	10,16	6,27	4,60	1,12
Mistura asfáltica com borracha	1	10,16	6,47	6,14	1,04
	2	10,16	6,37	5,97	1,04
Camada porosa de atrito	2	10,16	6,15	18,56	0,74
	3	10,16	6,15	18,72	0,76
Mistura drenante (9,5mm)	4	10,16	6,50	26,44	0,42
	5	10,16	6,45	26,03	0,44
Mistura drenante (12,5mm)	9	10,16	6,15	22,46	0,39
	10	10,16	6,10	22,54	0,40

Quadro 4.21 - Ensaio de módulo de resiliência

Módulo de resiliência (MPa)					
Mistura asfáltica densa comum			Mistura asfáltica com borracha		
CP 1	CP 2	CP 3	CP 3	CP 4	CP 5
6680	6598	6589	5156	5045	5098
6780	6780	6532	5166	5012	5078
6600	6658	6520	5173	5014	5048
6700	6689	6612	5188	5017	5048
6740	6675	6578	5191	5018	5056
6805	6580	6521	5233	5028	5024
6740	6621	6580	5230	5098	5023
6805	6578	6710	5230	5047	5047
6687	6632	6789	5257	5023	5028
6502	6540	6617	5253	5097	5069
Média total		6648	Média total		5100
Desvio padrão		91	Desvio padrão		84

#### 4.7 ENSAIO DE ABSORÇÃO SONORA

Foram realizados os ensaios de absorção acústica em todos os corpos de prova extraídos das placas moldadas em laboratório. Os ensaios foram realizados de acordo com o procedimento especificado na ISO 10534-2:1998 E. O ensaio de absorção consistiu em excitar um tubo de impedância com um ruído branco e medir a pressão sonora no seu interior. O processo de medição foi baseado na interação de duas ondas planas: uma incidente e a outra refletida. Com isso foi possível determinar a curva de absorção sonora em função da frequência.

Primeiramente, foi definida a frequência de corte  $f_c$  de acordo com a equação 2.20. Com o diâmetro do tubo de 10 cm a frequência de corte é de 2009 Hz.

O ensaio foi realizado com distância de 50 mm entre os microfones e de 50 mm entre o microfone mais próximo e a amostra. Utilizando a distância dos microfones de 50 mm foi calculada a faixa de frequência de trabalho através da equação 2.21. Esse cálculo determina em que faixa de frequência os resultados de absorção devem ser analisados. O resultado mostrou uma faixa calculada de 343 a 2744 Hz. Porém, como a frequência de corte é menor que o valor máximo encontrado, o intervalo em que os resultados devem ser analisados é de 343 a 2009 Hz.

A Figura 4.23 mostra a colocação da amostra dentro do tubo de impedância. Vale ressaltar que todas as amostras encaixaram perfeitamente, não sendo necessária a utilização de material especial para vedar possíveis folgas entre o tubo e a amostra.



Figura 4.23 - Colocação da amostra no tubo de impedância

Para a realização dos ensaios os microfones foram calibrados antes de cada dia de medição. Além dos microfones, a Figura 4.24 mostra os equipamentos utilizados para a realização do ensaio de absorção sonora.

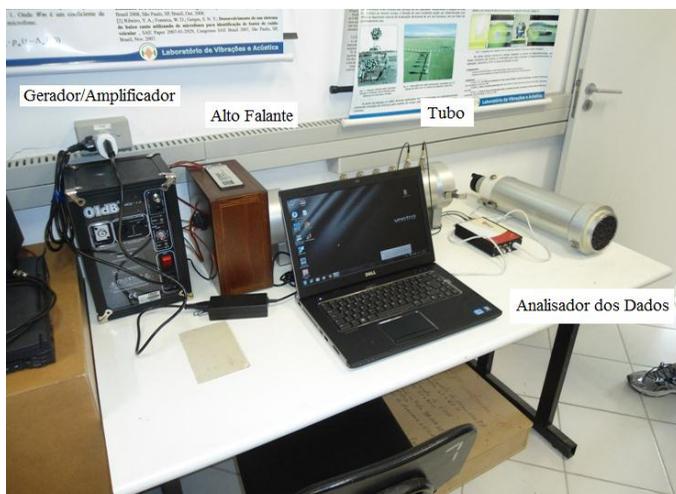


Figura 4.24 - Equipamentos para medição da absorção sonora (Laboratório de vibrações acústicas LVA-UFSC)

Com os resultados obtidos foram construídos os gráficos de frequência x absorção de cada corpo de prova ensaiado.

Antes da realização do ensaio nas amostras extraídas das placas, foi realizado o ensaio de absorção sem amostra, a fim de verificar se o equipamento estava calibrado. A Figura 4.25 mostra o resultado encontrado.

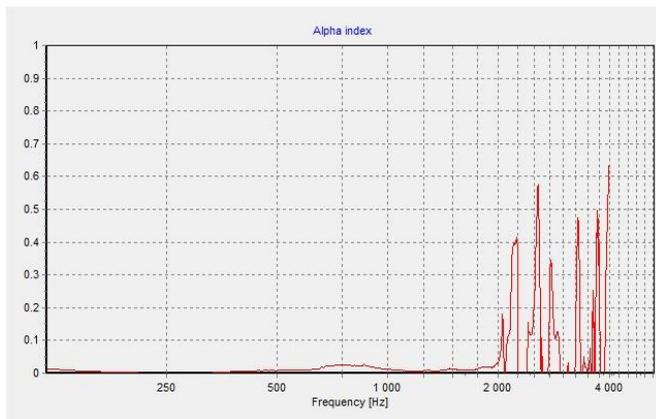


Figura 4.25 - Ensaio de absorção sem amostra

O resultado mostra que o equipamento estava em perfeitas condições, verificando um erro insignificante perto dos 800 Hz. Lembrando que os resultados devem ser analisados entre as frequências de 343 a 2009 Hz.

- **Mistura asfáltica drenante (P1,  $D_{\text{máx}} = 12,5$  mm)**

A Figura 4.26 mostra os resultados da absorção sonora para a placa 1 de mistura asfáltica drenante com 12,5 mm de diâmetro máximo e volume de vazios entre 24 e 28,6%, na qual  $V_v$  é o volume de vazios e  $VC$  os vazios comunicantes.

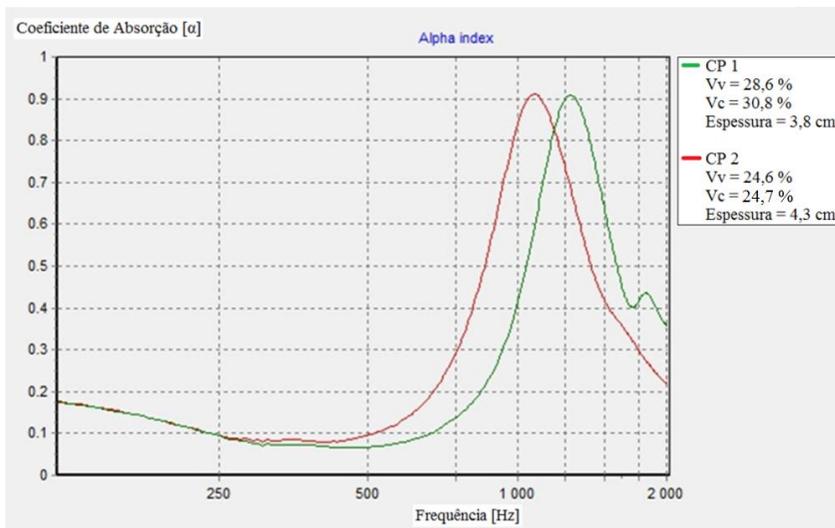


Figura 4.26 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P1 com 12,5 mm de diâmetro máximo do agregado)

Foram plotados os resultados apenas de duas amostras já que a terceira amostra não se encontrava em boas condições. Apesar do diferente volume de vazios e vazios comunicantes os resultados mostraram o mesmo valor do pico de absorção (0,9), no entanto em frequências diferentes. Isso pode ser explicado pela espessura da amostra, em que quanto maior a sua espessura, em frequências menores se encontra o pico de absorção.

Analisando os resultados, observa-se que as curvas de absorção sonora se comportam como um ressonador de Helmholtz, ou seja, existe um pico de absorção sonora na frequência de ressonância de Helmholtz. Esse comportamento também é observado no estudo realizado pela empresa holandesa M+P, pela FEHRL e por Hamet mostrados nas Figuras 2.27, 2.23 e 2.24 respectivamente.

A ressonância de Helmholtz é um fenômeno que ocorre quando o ar passa por uma cavidade e, devido a isso, ressoa. Um exemplo do ressonador de Helmholtz é o som criado quando alguém assopra pelo gargalo de uma garrafa vazia. Um ressonador ideal consiste em uma cavidade de volume  $V$  com um gargalo de área  $A$  e de comprimento  $L$  (Figura 4.27).

Se o comprimento de onda  $\lambda$  é muito maior que suas dimensões  $L$ ,  $A$  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 é calculado pela equação 4.2 e a frequência de ressonância de Helmholtz é calculada pela equação 4.3 (GERGES, 2000).

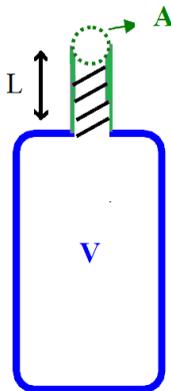


Figura 4.27 - Esquema do ressonador Helmholtz

$$L' = L + \frac{16a}{3\pi} \quad (4.2)$$

onde:

- $L$ : comprimento do gargalo;
- $a$ : raio da abertura do gargalo.

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{A}{V \times L'}} \quad (4.3)$$

onde:

- $A$ : área da seção do gargalo;
- $V$ : volume;
- $L'$ : comprimento efetivo do gargalo;
- $c$ : velocidade som no ar.

- **Mistura asfáltica drenante (P1,  $D_{m\acute{a}x} = 9,5$  mm)**

A Figura 4.28 mostra os resultados do ensaio de absorção para a placa 1 de mistura asfáltica drenante de tamanho máximo do agregado de 9,5 mm com volume de vazios entre 24,4 e 25%.

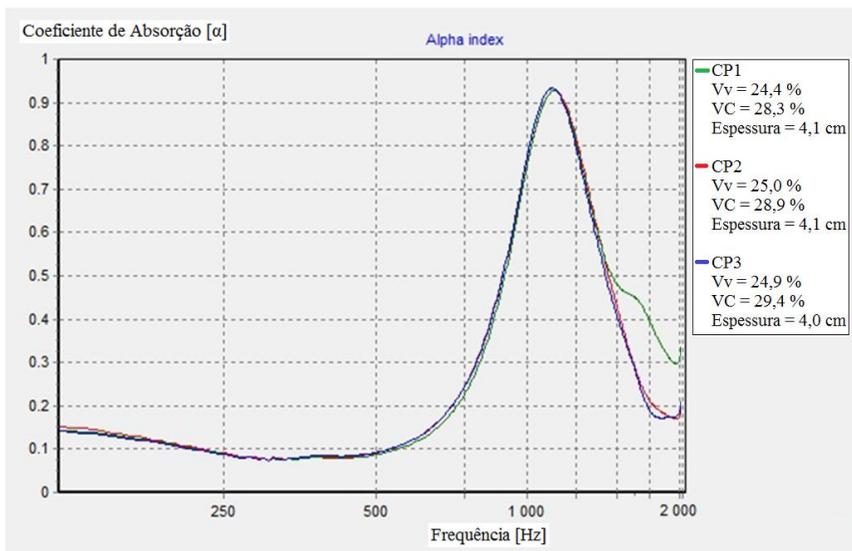


Figura 4.28 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P1 com 9,5 mm de diâmetro máximo do agregado)

Os três corpos de prova mostraram resultados idênticos, pois o volume de vazios e os vazios comunicantes foram parecidos, assim como a espessura de cada corpo de prova. Isso mostra a homogeneidade da placa moldada em laboratório. Assim como na mistura drenante P1 com  $D_{m\acute{a}x}$  de 12,5 mm as curvas de absorção para a mistura da Figura 4.28 se comportaram como um ressonador de Helmholtz. Esse comportamento foi observado em todos os ensaios em misturas porosas.

- **Mistura asfáltica drenante (P2,  $D_{m\acute{a}x} = 12,5$  mm)**

A Figura 4.29 mostra os resultados do ensaio de absorção para a placa 2 de mistura asfáltica drenante com tamanho máximo do agregado de 12,5 mm e volume de vazios entre 22,3 e 24,5%.

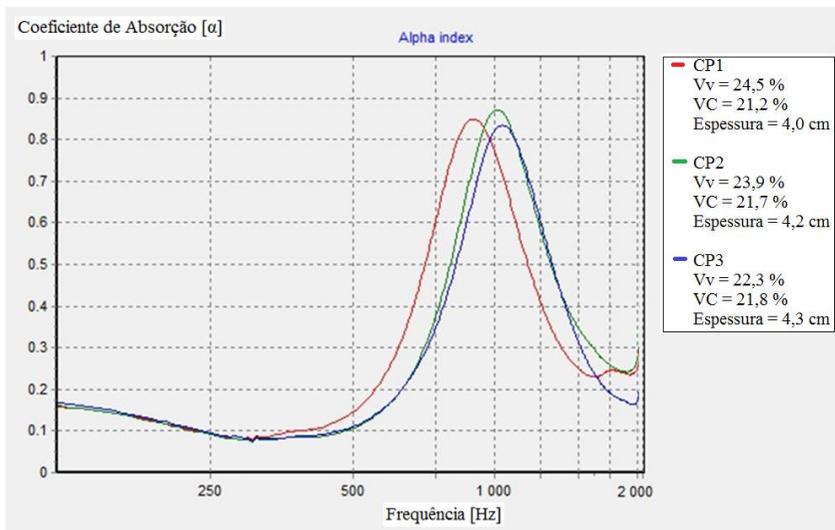


Figura 4.29 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P2 com 12,5 mm de diâmetro máximo do agregado)

Observa-se que os três corpos de prova obtiveram resultados semelhantes, no entanto o CP3 mostra menor pico de absorção em relação aos outros corpos de prova. Isso pode ser explicado pelo seu menor volume de vazios.

- **Mistura asfáltica drenante (P2,  $D_{\text{máx}} = 9,5$  mm)**

A Figura 4.30 mostra os resultados do ensaio de absorção para a placa 2 de mistura asfáltica drenante com tamanho máximo do agregado de 9,5 mm e volume de vazios entre 24,5 e 26%.

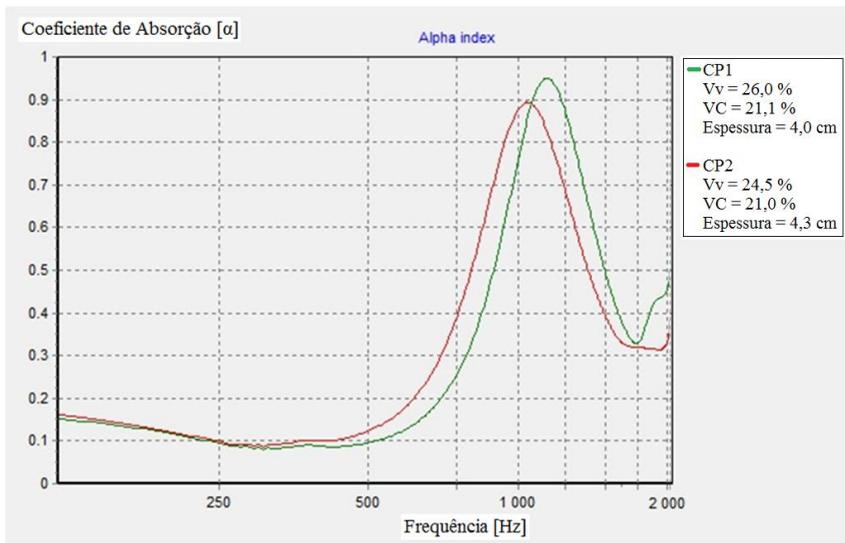


Figura 4.30 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P2 com 9,5 mm de diâmetro máximo do agregado)

Foram realizados os ensaios em apenas dois corpos de prova, pois o CP3 foi danificado quando era extraído da placa através da sonda rotativa.

O coeficiente de absorção foi bastante elevado para o CP1 chegando a um pico de 0,95. O CP2 mostrou menor pico de coeficiente de absorção e em frequência diferente quando comparada com o CP1. Essas diferenças podem ser explicadas pela maior espessura do CP2 e menor volume de vazios, mesmo que a porcentagem de vazios comunicantes tenha sido praticamente igual entre os dois corpos de prova.

- **Mistura asfáltica drenante (P3,  $D_{\text{máx}} = 12,5$  mm)**

A Figura 4.31 mostra os resultados do ensaio de absorção na placa 3 de mistura asfáltica drenante com tamanho máximo do agregado de 12,5 mm e volume de vazios entre 22,5 e 23,8%.

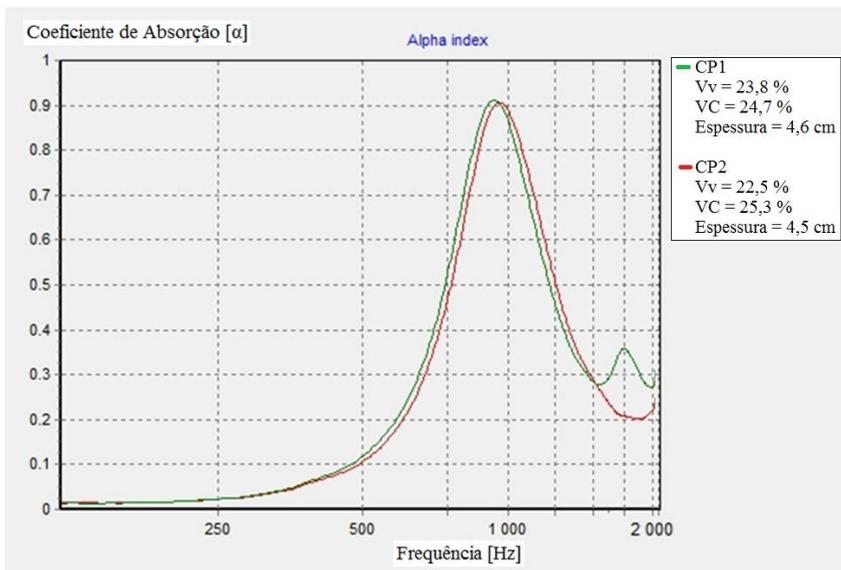


Figura 4.31 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P3 com 12,5 mm de diâmetro máximo do agregado)

Os ensaios foram realizados em apenas dois corpos de prova. O CP3 foi extraído da placa, porém não se encontrava em boas condições para realização do ensaio de absorção.

Os resultados mostraram o mesmo coeficiente de absorção sonora para os dois corpos de prova (0,9). Isso já era esperado, pois os dois corpos de prova apresentaram volume de vazios e vazios comunicantes semelhantes.

- **Mistura asfáltica drenante (P3,  $D_{m\acute{a}x} = 9,5$  mm)**

A Figura 4.32 mostra os resultados do ensaio de absorção sonora da placa 3 de mistura drenante com diâmetro máximo do agregado de 9,5 mm e volume de vazios entre 22,8 e 25,4%.

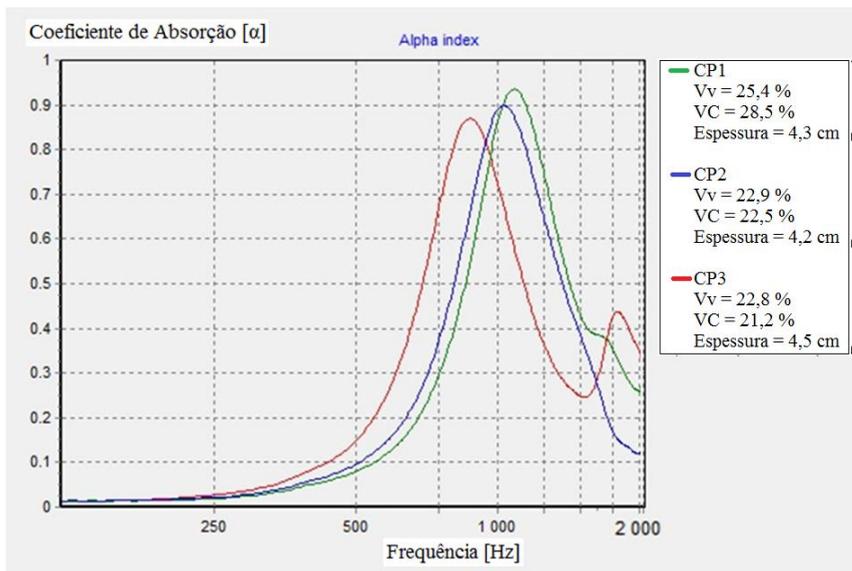


Figura 4.32 - Curva de absorção sonora (mistura drenante P3 com 9,5 mm de diâmetro máximo do agregado)

Os resultados mostraram um pico de absorção sonora elevado, chegando a 0,92 para o CP1, que possuía a maior porcentagem de volume de vazios e vazios comunicantes dentre os três corpos de prova.

- **Mistura asfáltica drenante de dupla camada (P1)**

Foram realizados ensaios de absorção sonora simulando uma dupla camada drenante. Para isso foram colocadas duas amostra juntas no tubo de impedância em que na camada superior foi utilizada a mistura drenante com tamanho máximo do agregado de 9,5 mm e na camada inferior de 12,5 mm. Para cada placa drenante P1, P2 e P3 foi utilizado uma amostra da placa com tamanho máximo do agregado de 9,5 mm e 12,5 mm cada. Para o ensaio da dupla camada P1 foi utilizado o CP2 para  $D_{\text{máx}} = 12,5$  mm e o CP2 para  $D_{\text{máx}} = 9,5$  mm. O critério de escolha do corpo de prova de cada placa foi a sua qualidade.

A Figura 4.33 mostra o ensaio de absorção realizado na dupla camada drenante P1.

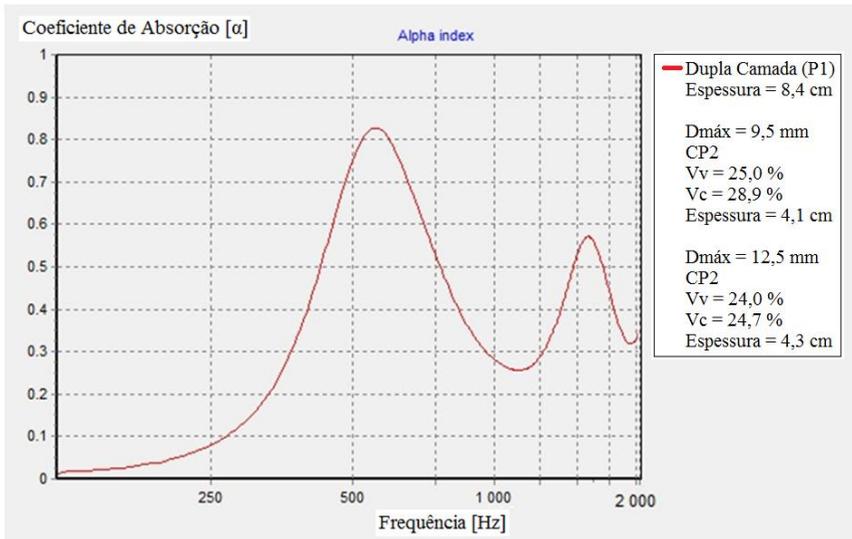


Figura 4.33 - Curva de absorção sonora (mistura drenante de dupla camada P1)

Os resultados mostraram dois picos de absorção em que o maior deles encontrou-se numa frequência mais baixa. Esse comportamento pode ser observado, por exemplo, no trabalho realizado pela FEHRL e por Hamet já mostrados nas Figuras 2.23 e 2.24 respectivamente.

Observa-se maior absorção da camada dupla em relação à camada simples quando é analisada a absorção sonora em todo espectro da frequência. No próximo item desse capítulo (4.6.1) serão realizadas comparações e uma análise mais profunda dos resultados encontrados.

- **Mistura asfáltica drenante de dupla camada (P2)**

A Figura 4.34 mostra o resultado do ensaio de absorção sonora na mistura asfáltica drenante de dupla camada P2. Para esse ensaio foi utilizado o CP2 para  $D_{m\acute{a}x} = 12,5$  mm e o CP1 para o  $D_{m\acute{a}x} = 9,5$  mm.

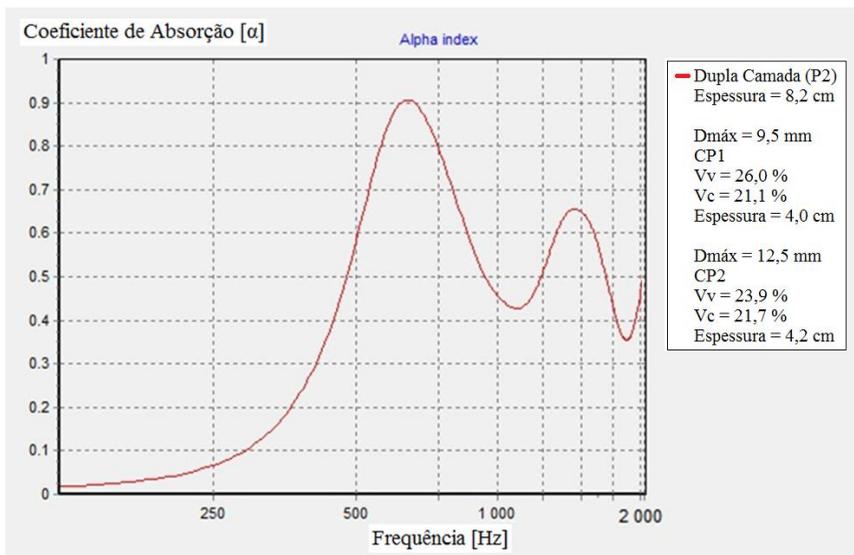


Figura 4.34 - Curva de absorção sonora (mistura drenante de dupla camada P2)

Assim como no ensaio de dupla camada P1 os resultados para mistura drenante de dupla camada P2 mostrou o mesmo comportamento, ou seja, dois picos de absorção sonora.

- **Mistura asfáltica drenante de dupla camada (P3)**

A Figura 4.35 mostra o resultado do ensaio de absorção sonora na mistura drenante de dupla camada P3. Nesse ensaio foi utilizado o CP2 para  $D_{máx} = 12,5$  mm e o CP1 para  $D_{máx} = 9,5$  mm.

O mesmo comportamento anterior para as misturas drenantes (P1 e P2) foi observado para a curva de absorção sonora para mistura drenante de dupla camada P3. Observaram-se dois picos de absorção sonora, em que no maior deles o coeficiente de absorção foi de 0,80 na frequência de 510 Hz. E para o menor pico, o coeficiente de absorção sonora foi de 0,55 em 1500 Hz.

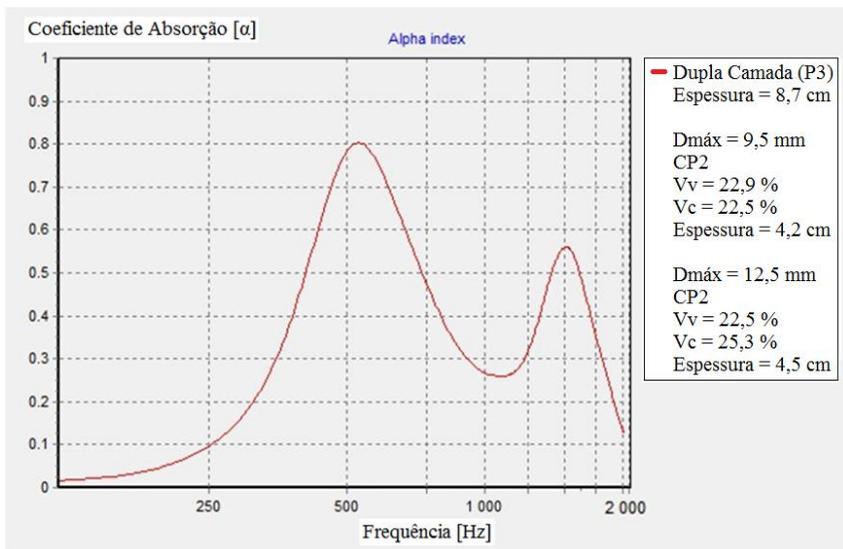


Figura 4.35 - Curva de absorção sonora (mistura drenante de dupla camada P3)

- **Camada porosa de atrito (CPA)**

A Figura 4.36 mostra os resultados do ensaio de absorção sonora na camada porosa de atrito (CPA).

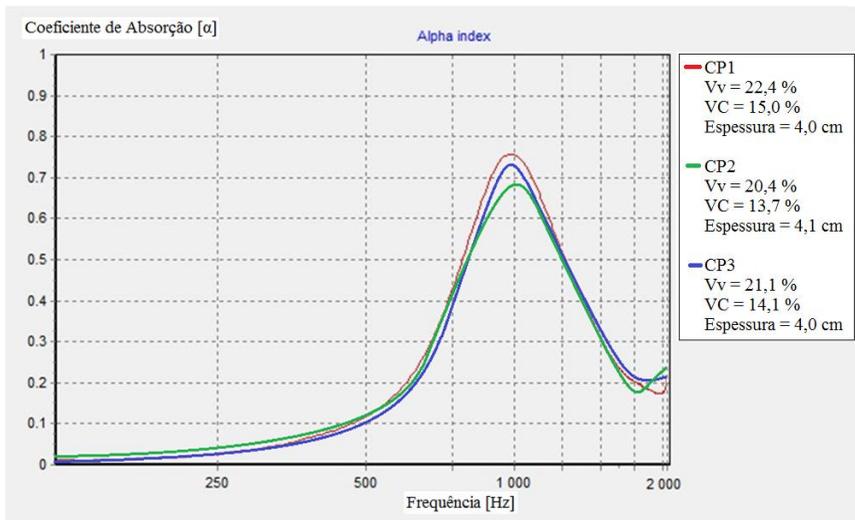


Figura 4.36 - Curva de absorção sonora (camada porosa de atrito - CPA)

Os resultados mostraram que a camada porosa de atrito possui um elevado coeficiente de absorção, apesar do seu baixo valor de volume de vazios comunicantes quando comparado com as misturas drenantes. O CP1 foi o que apresentou maior coeficiente de absorção (0,75) entre os corpos de prova da mesma placa. Isso é explicado pelo seu maior volume de vazios e vazios comunicantes.

Observa-se que os três corpos de prova por terem praticamente a mesma espessura obtiveram seus picos de absorção na mesma frequência, isso ressalta que o valor onde se encontra o pico da frequência é comandado pela espessura do material.

- **Mistura asfáltica densa com borracha**

A Figura 4.37 mostra os resultados do ensaio de absorção sonora na mistura asfáltica densa com borracha.

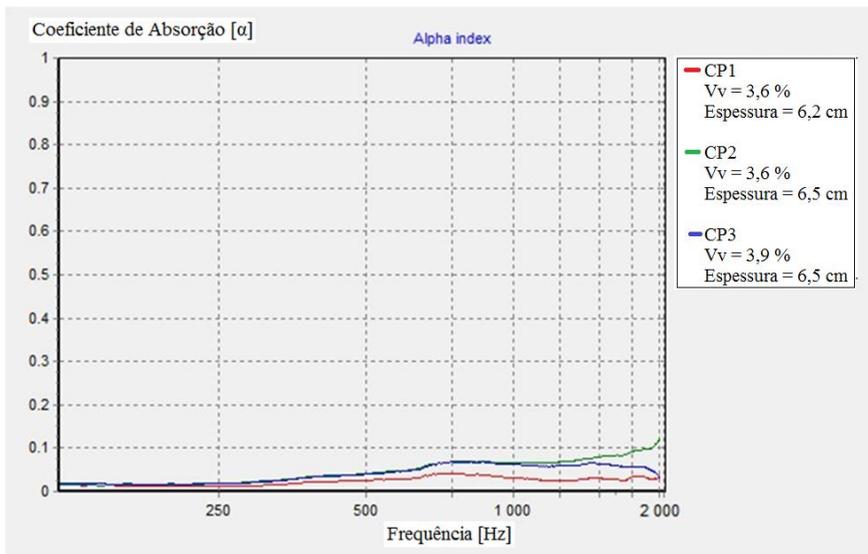


Figura 4.37 - Curva de absorção sonora (mistura asfáltica densa com borracha)

Os resultados mostraram que não houve absorção sonora na mistura asfáltica densa com borracha. Como se trata de uma mistura densa com baixa porcentagem de volume de vazios, o som não consegue penetrar na amostra. Assim quase todo som é refletido e muito pouco é absorvido pelo material.

- **Mistura asfáltica densa comum**

A Figura 4.38 mostra os resultados do ensaio de absorção sonora na mistura asfáltica densa comum.

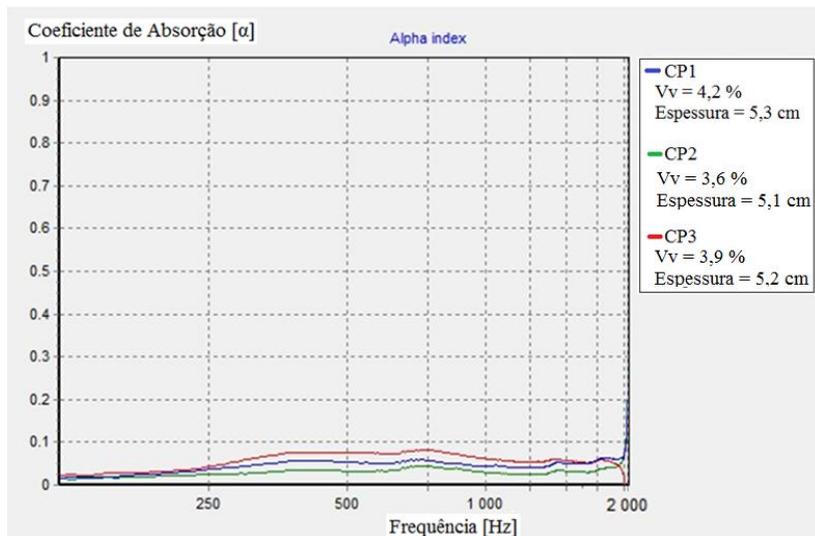


Figura 4.38 - Curva de absorção sonora (mistura asfáltica densa comum)

Assim como na mistura asfáltica densa com borracha, a mistura asfáltica densa comum não apresentou absorção sonora. Tal fato é explicado também pela baixa porcentagem de volume de vazios da amostra estudada. O som não consegue penetrar no revestimento e quase todo som emitido é refletido pelo material.

#### 4.7.1 Análise e comparação dos resultados do ensaio de absorção sonora

Neste item serão analisados e comparados os resultados do ensaio de absorção sonora. Foram realizadas comparações entre os tamanhos máximos de agregados (12,5 mm e 9,5mm), as diferentes espessuras, os diferentes tipos de misturas e porcentagens de vazios, além da comparação entre as misturas drenantes de dupla camada. Também foram realizadas correlações entre os picos de absorção sonora e o volume de vazios e vazios comunicantes.

- **% do volume de vazios**

Com o objetivo de verificar a influência do volume de vazios no pico do coeficiente de absorção sonora, foi plotado o gráfico da Figura 4.39 em que o diâmetro máximo do agregado e volume de vazios comunicantes dos corpos de prova foram os mesmos.

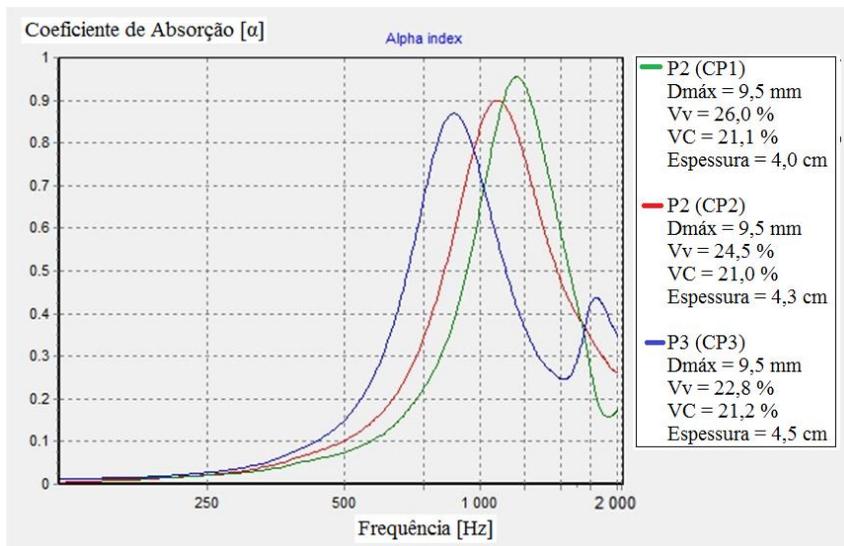


Figura 4.39 - Influência do volume de vazios no pico de absorção sonora (mistura drenante)

Os resultados mostraram que quanto maior o volume de vazios, maior é o coeficiente de absorção sonora. O gráfico também mostra que os picos de absorção de cada corpo de prova estão em diferentes frequências. Isso pode ser explicado pelas suas diferentes espessuras, comprovando mais uma vez que a espessura do material determina em que frequência se encontra o pico de absorção, ou seja, quanto maior a espessura do corpo de prova, o pico de absorção estará em uma menor frequência.

- **% de vazios comunicantes**

Com o objetivo de comprovar a influência da porcentagem de vazios comunicantes na absorção sonora, foram plotadas curvas de absorção sonora de corpos de prova com mesmo tamanho máximo do agregado e para mesma porcentagem de volume de vazios. A Figura

4.40 e 4.41 mostram os resultados para o diâmetro máximo do agregado de 9,5 mm e 12,5 mm respectivamente.

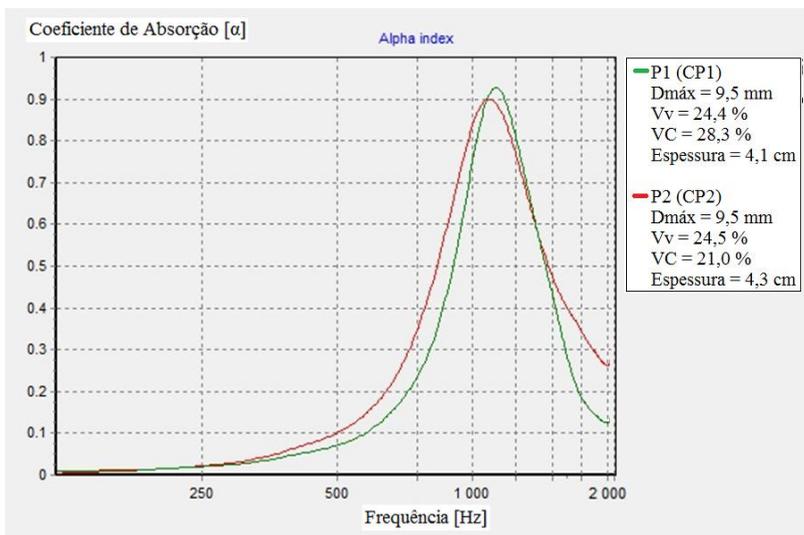


Figura 4.40 - Influência do volume de vazios comunicantes no pico de absorção sonora para  $D_{\text{máx}} = 9,5 \text{ mm}$  (mistura drenante)

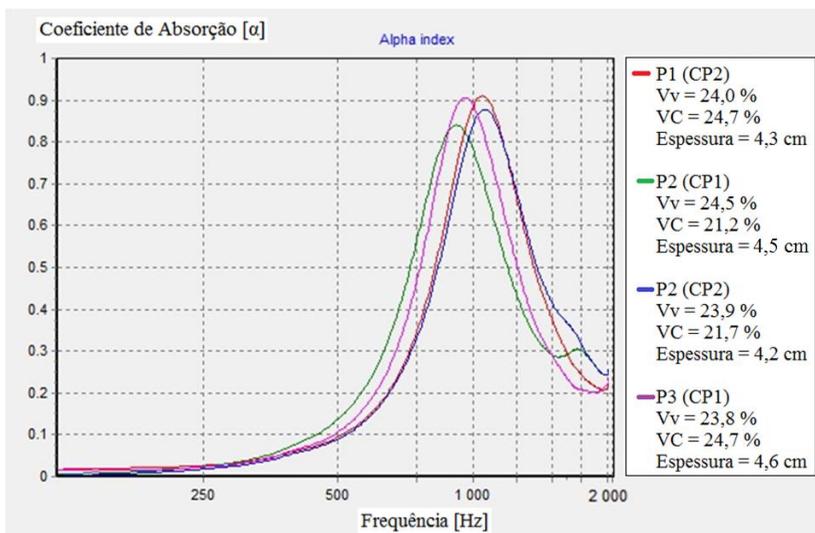


Figura 4.41 - Influência do volume de vazios comunicantes no pico de absorção sonora para  $D_{\text{máx}} = 12,5 \text{ mm}$  (mistura drenante)

Os resultados mostraram que o coeficiente de absorção sonora é influenciado pelo volume de vazios comunicantes. Quanto maior o volume de vazios comunicantes maior é o pico de absorção sonora. Isso pode ser observado para os dois tamanhos máximo do agregado.

- **Tamanho máximo do agregado**

Com a finalidade de verificar se existe influência do tamanho máximo do agregado na absorção sonora foram plotados os gráficos das misturas drenantes P1, P2 e P3 de acordo com as Figuras 4.42, 4.43 e 4.44 respectivamente.

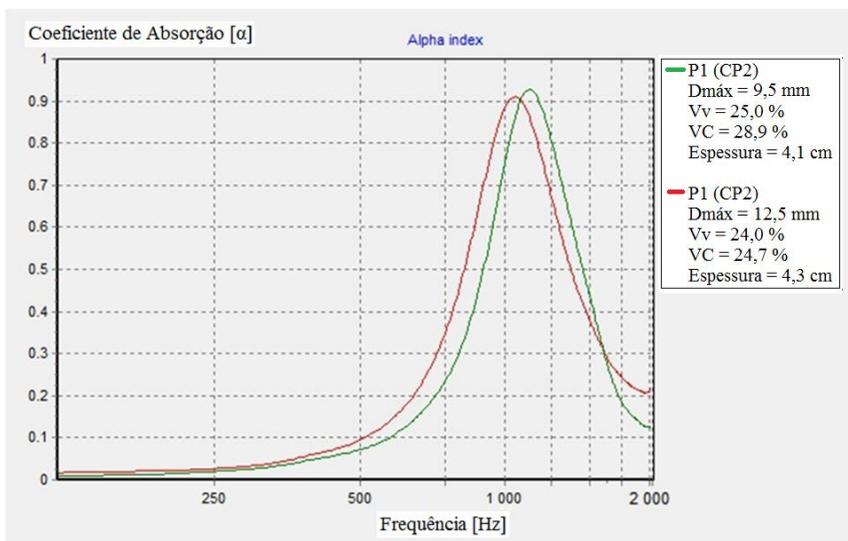


Figura 4.42 - Comparação entre as curvas de absorção com  $D_{máx} = 9,5 \text{ mm}$  e  $12,5 \text{ mm}$ , para P1

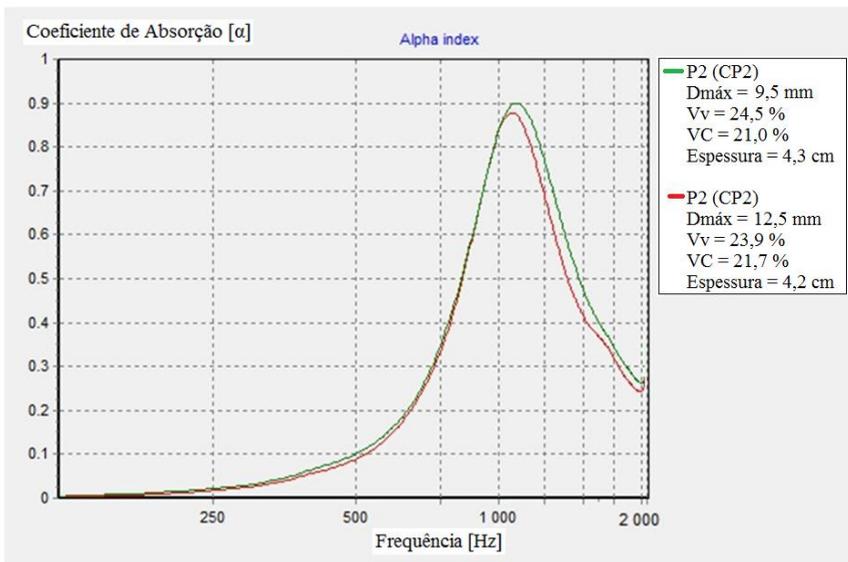


Figura 4.43 - Comparação entre as curvas de absorção com Dmáx = 9,5 mm e 12,5 mm, para P2

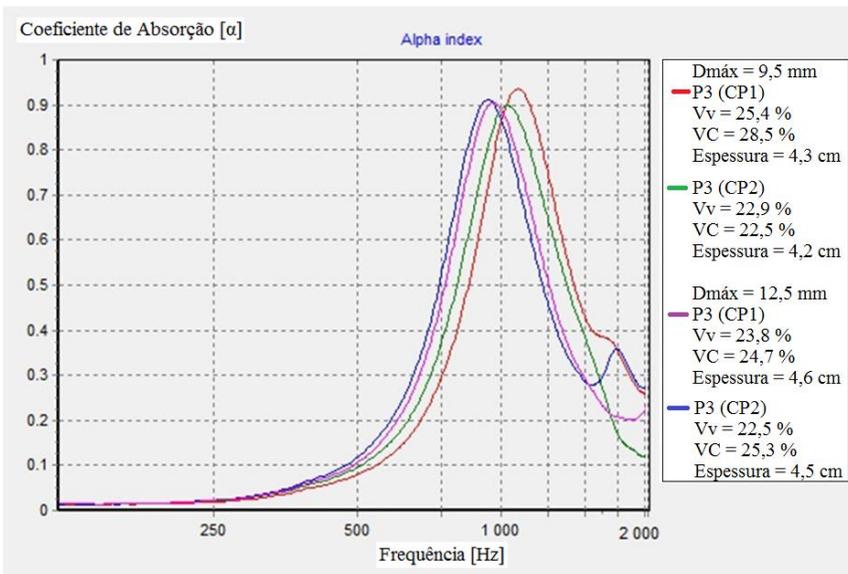


Figura 4.44 - Comparação entre as curvas de absorção com Dmáx = 9,5 mm e 12,5 mm, para P3

Os resultados mostraram uma tendência um pouco maior do pico do coeficiente de absorção para as misturas com tamanho máximo do agregado de 9,5mm.

No entanto, não se pôde afirmar que o tamanho máximo do agregado influencia na absorção sonora, pois outros parâmetros podem ter influenciado os resultados, como por exemplo: volume de vazios e vazios comunicantes.

Na tentativa de confirmar a influência do tamanho máximo do agregado no pico de absorção sonora foi plotado o gráfico da Figura 4.45 onde o volume de vazios e vazios comunicantes são os mesmos para os dois corpos de prova.

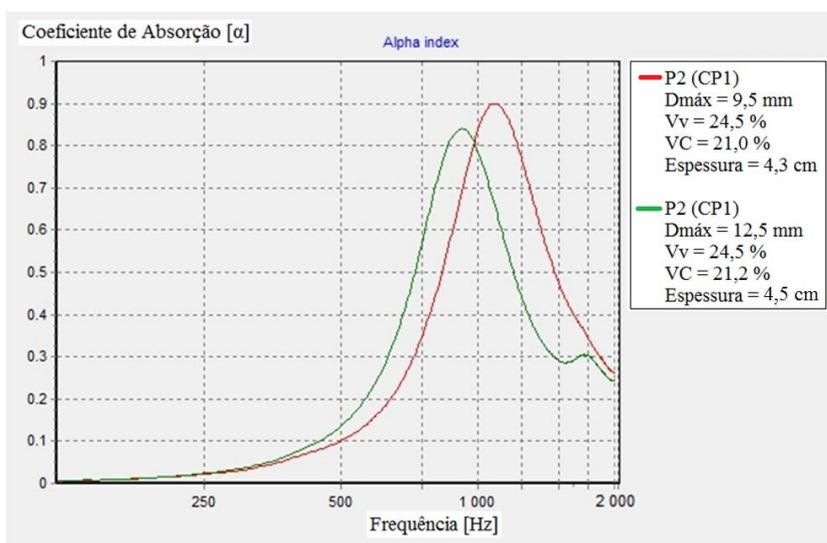


Figura 4.45 - Influência do tamanho máximo do agregado no pico de absorção sonora

A Figura 4.45 mostrou que para o corpo de prova com tamanho máximo do agregado de 9,5 mm o pico de absorção sonora foi maior. Isso mostra que o tamanho máximo do agregado influencia no pico de absorção sonora.

O tamanho máximo do agregado também influencia no ruído mecânico gerado pelo mecanismo de impactos e choques, em que quanto maior o tamanho máximo do agregado do revestimento asfáltico maior será o ruído provocado por essa parcela. Portanto, é aconselhável

a utilização de revestimentos asfálticos com tamanho máximo do agregado menor, para a redução do ruído em rodovias.

- **Diferentes tipos de misturas asfálticas**

As Figuras 4.46 e 4.47 mostram as curvas de absorção sonora para os diferentes tipos de revestimentos estudados. As misturas drenantes foram separadas de acordo com o tamanho máximo do agregado para melhor visualização do gráfico. Foram plotadas as curvas de absorção de uma amostra de cada placa, em que o critério de escolha foi a qualidade da amostra.

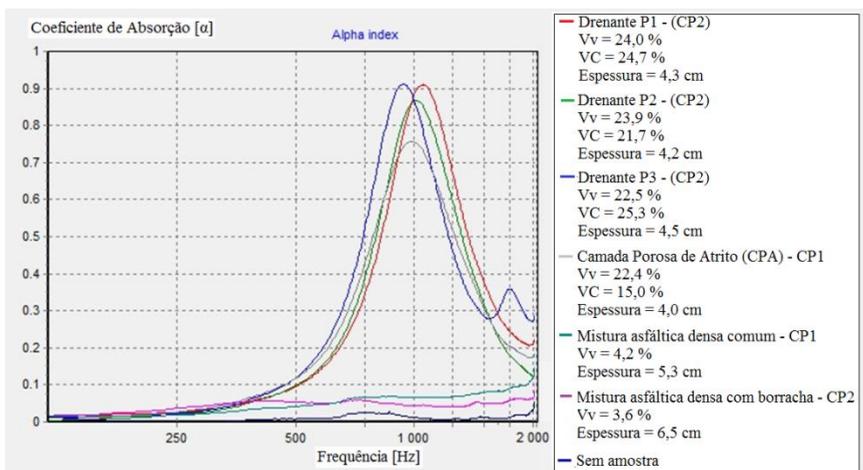


Figura 4.46 - Curva de absorção sonora para diferentes tipos de revestimentos asfálticos (misturas drenantes com  $D_{\text{máx}} = 12,5\text{mm}$ )

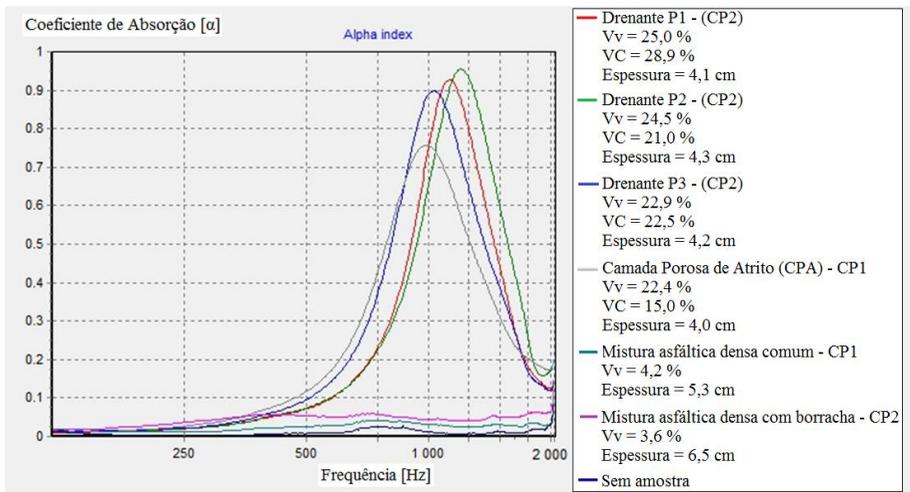


Figura 4.47 - Curva de absorção sonora para diferentes tipos de revestimentos asfálticos (misturas drenantes com  $D_{\max} = 9,5\text{mm}$ )

Os resultados mostraram que todas as curvas de absorção sonora das misturas porosas se comportaram como um ressonador de Helmholtz, ou seja, existe um pico de absorção sonora na frequência de ressonância de Helmholtz.

Como era de se esperar todos os revestimentos porosos (drenante e CPA) obtiveram valores de absorção maiores que as misturas densas (mistura densa comum e mistura densa com borracha). Isso é explicado pelo alto volume de vazios das amostras porosas em que o som consegue penetrar entre os poros e ser absorvido pelo material em certas frequências.

Apesar do volume de vazios semelhante, observa-se que a camada porosa de atrito tem menor pico de absorção sonora quando comparada com as misturas drenantes. Isso pode ser explicado pela sua baixa porcentagem de vazios comunicantes quando comparada com as misturas drenantes. O ruído emitido é absorvido apenas superficialmente pela CPA, diferentemente da mistura drenante onde o som consegue penetrar em toda a amostra.

Entretanto, a camada porosa de atrito apresentou um alto valor de absorção, chegando a um pico de 0,75 na frequência de 1000 Hz. Portanto assim como na mistura drenante, a camada porosa de atrito apresenta a capacidade do ar do contato pneu-pavimento poder escapar entre seus poros, e assim reduzir o ruído gerado pelos mecanismos aerodinâmicos principalmente de bombeamento do ar.

A mistura CPA estudada apresenta maior resistência à tração e menor desgaste Cântabro em relação a camada drenante. Assim essa mistura apresentará melhor desempenho mecânico em campo em relação às misturas drenantes. Como a diferença na capacidade de absorção sonora é baixa (0,75 para 0,91) acredita-se que seja mais recomendável a execução em campo de camadas tipo CPA em detrimento de camadas drenantes com elevado volume de vazios. A Figura 4.48 mostra os resultados de absorção sonora para dois corpos de prova drenante e um de CPA e ainda apresenta um resumo da resistência à tração e do desgaste de Cântabro das duas misturas.

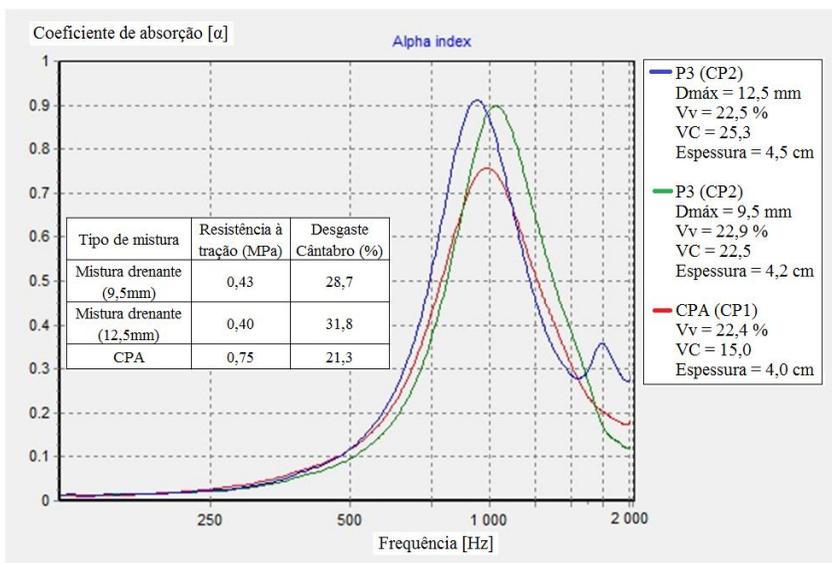


Figura 4.48 - Absorção sonora, resistência à tração e desgaste de Cântabro para mistura drenante e CPA

### • Mistura asfáltica drenante de dupla camada

Na análise dos resultados encontrados no ensaio de absorção para os corpos de prova drenantes de dupla camada, primeiramente foi realizada uma comparação entre os resultados do ensaio em dupla camada com os resultados dos ensaios em uma camada. O comparativo foi realizado entre a dupla camada drenante e a camada simples drenante sendo o corpo de prova da camada simples drenante o mesmo da camada superior drenante de dupla camada. Para cada P1, P2 e P3 foi realizado um comparativo. As Figuras de 4.49 a 4.51 mostram os

resultados da comparação entre as curvas de absorção sonora de dupla camada e uma camada drenante.

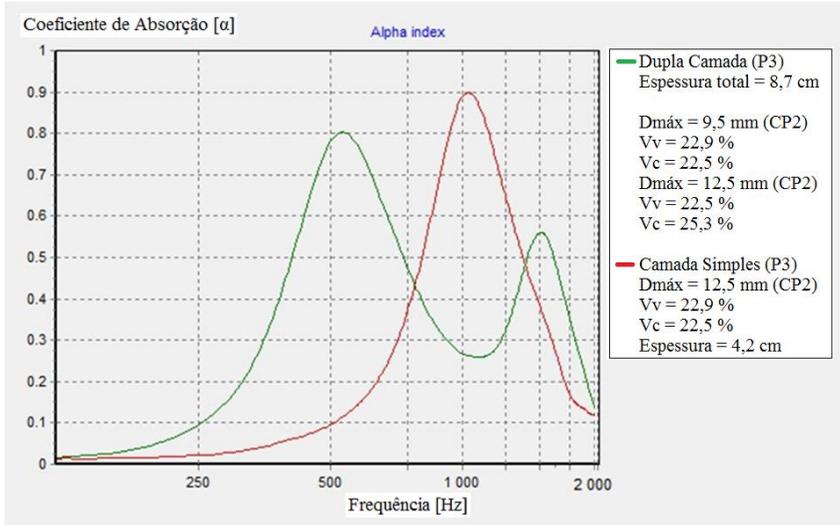


Figura 4.49 - Comparativo entre a misturara drenante de dupla camada e camada simples (P3)

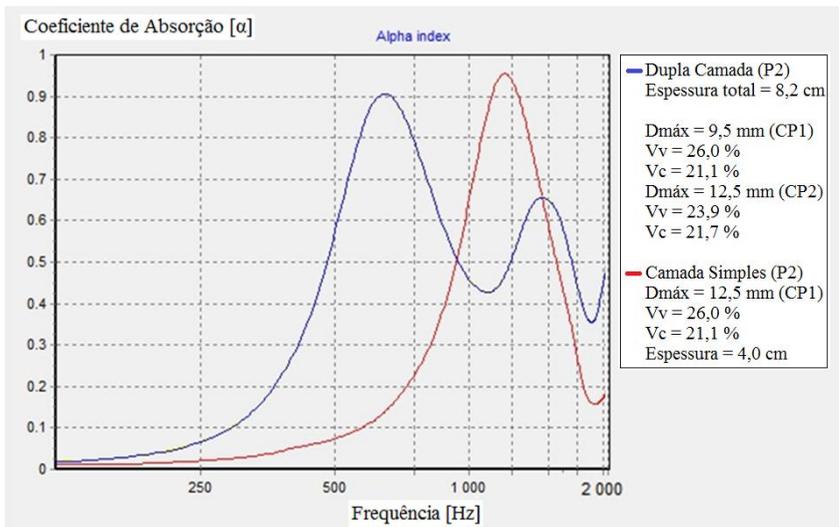


Figura 4.50 - Comparativo entre a misturara drenante de dupla camada e camada simples (P2)

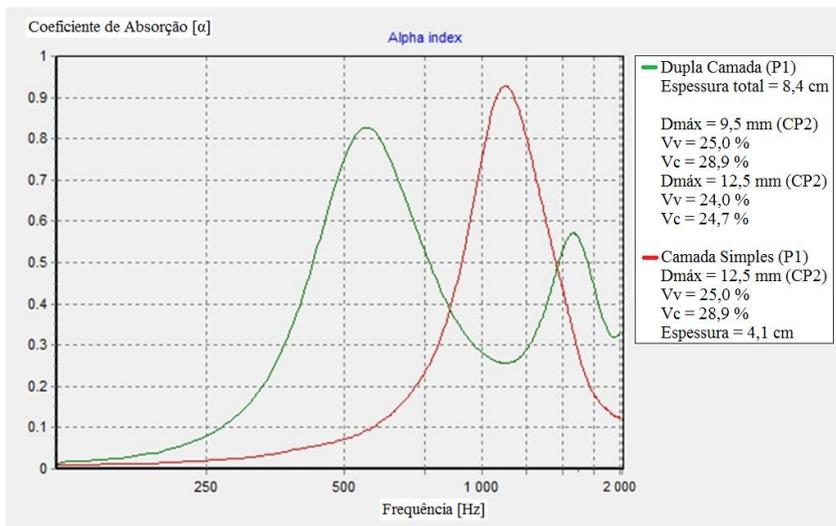


Figura 4.51 - Comparativo entre a mistura drenante de dupla camada e camada simples (P1)

Os resultados mostraram uma redução do pico de absorção sonora na curva das amostras drenantes de dupla camada em comparação com a camada simples. No entanto observaram-se dois picos de absorção na camada dupla e com isso uma absorção maior quando analisada em todo espectro da frequência de trabalho (343 a 2009 Hz).

Então se conclui que quanto maior a espessura do revestimento asfáltico maior será sua absorção sonora quando analisado em todo espectro da frequência de trabalho. Entretanto, para a redução do ruído de tráfego é mais importante que se tenha absorção sonora nas frequências entre 800 e 1000 Hz. Com isso, neste caso, seria aconselhável a utilização da camada simples, pois é ela que apresenta maior coeficiente de absorção sonora entre as frequências de 800 a 1000 Hz.

Observa-se que a espessura determina a frequência onde ocorrem os picos de absorção. Isso dá a possibilidade de otimizar o coeficiente de absorção sonora na frequência desejada através da espessura do material.

A Figura 4.52 mostra as três curvas das misturas asfálticas drenantes de dupla camada.

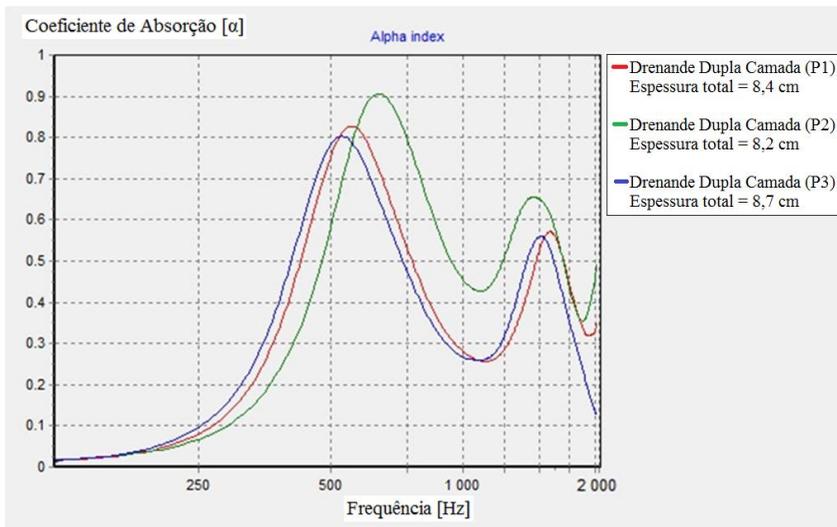


Figura 4.52 - Curvas de absorção sonora dos revestimentos drenantes de dupla camada

Os resultados mostraram uma diferença entre a curva de absorção sonora da mistura drenante de dupla camada P2 para as demais duas curvas da Figura 4.52. Seus dois picos de absorção sonora foram maiores que nas misturas drenantes de dupla camada P1 e P3. Isso pode ser explicado por que os resultados de absorção sonora da camada drenante simples P2 com  $D_{\text{máx}}$  do agregado de 9,5 mm (CP 2) foi o maior entre todos os ensaios realizados, já que seu volume de vazios foi o maior dentre todos os corpos de prova (26,0%).

- **Espessura dos corpos de prova**

Como já visto nos itens anteriores, a espessura do corpo de prova determina em que frequência o pico de absorção se encontra. O gráfico da Figura 4.53 foi plotado com o objetivo de encontrar a espessura ideal na redução do ruído pneu-pavimento, ou seja, em que o pico de absorção sonora fique entre 800 e 1000 Hz, que é normalmente a frequência na qual o ruído da rolagem dos pneus acontece com maior intensidade.

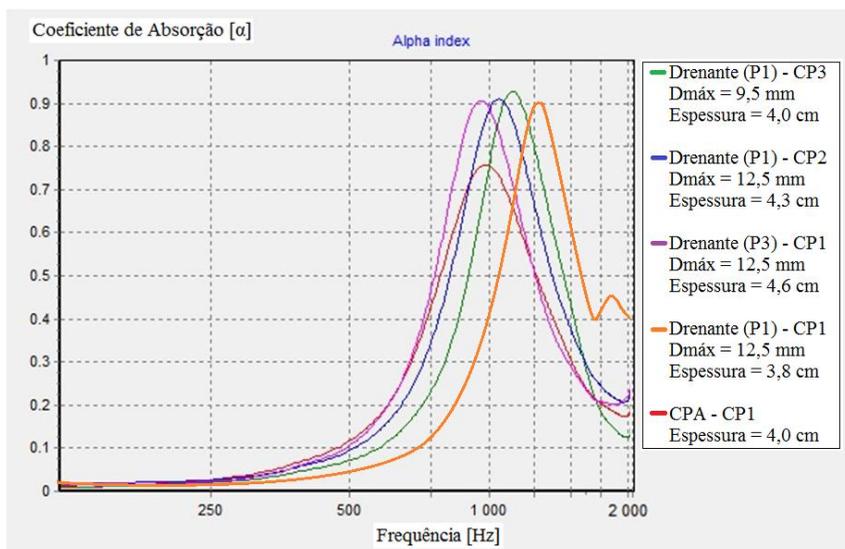


Figura 4.53 - Influência da espessura na absorção sonora

Os resultados mostraram que para mistura drenante a espessura ideal do revestimento deve ficar entre 4,3 e 4,6 cm. Já para a CPA a espessura ideal deve ser em torno de 4,0 cm.

- **Correlação entre a absorção sonora e a porcentagem de volume de vazios e vazios comunicantes**

As Figuras 4.54 e 4.55 mostram a tentativa de correlacionar os picos de absorção sonora com o volume de vazios e vazios comunicantes. Foram plotados todos os valores ensaiados dos corpos de prova porosos, em que o pico de absorção sonora ficou entre as frequências de 900 a 1200 Hz.

Com os gráficos plotados, tendo o volume de vazios e vazios comunicantes é possível estimar o pico do coeficiente de absorção sonora da mistura asfáltica.

As Figuras 4.54 e 4.55 mostram que quanto maior o volume de vazios e vazios comunicantes, maior é o coeficiente de absorção sonora.

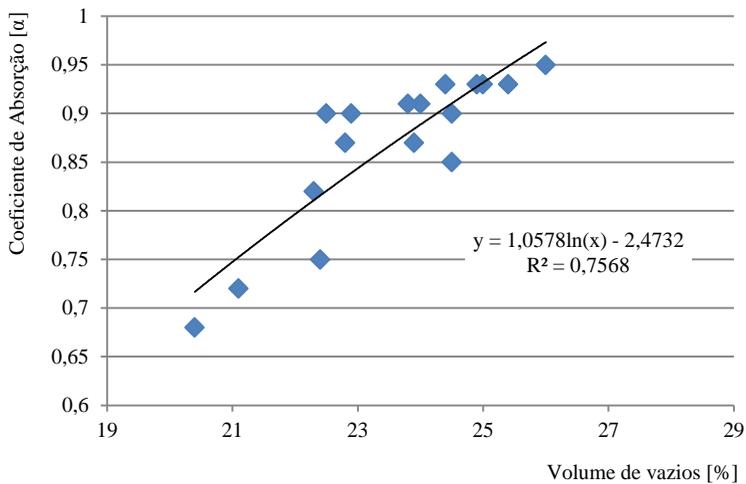


Figura 4.54 - Correlação entre o coeficiente de absorção sonora e a porcentagem de volume de vazios

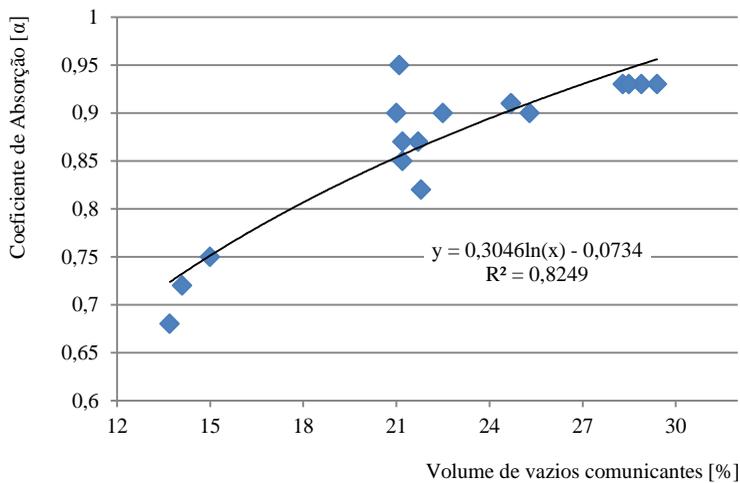


Figura 4.55 - Correlação entre o coeficiente de absorção sonora e a porcentagem de volume de vazios comunicantes

## **CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EM CAMPO**

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados em campo. São apresentados os estudos realizados na Avenida Beira Mar (Avenida Rubens de Arruda Ramos) sobre dois diferentes tipos de revestimento (mistura asfáltica densa comum envelhecida e mistura com asfalto-borracha) e para diferentes macrotexturas constadas através do ensaio da mancha de areia. Também é apresentado um estudo sobre um microrrevestimento localizado na Rua Vereador Osni Ortiga (Florianópolis-SC) e sobre uma camada porosa de atrito localizada na BR-282 no trecho que liga a cidade de Lages a Campos Novos (SC).

### **5.1 ANÁLISE DO RUÍDO GERADO NA BEIRA MAR**

#### **5.1.1 Resultados das Medições em Campo do $L(A)_{máx}$**

O objetivo desta medição foi avaliar o nível de ruído produzido pela passagem de um veículo a diversas velocidades sobre três texturas de revestimento envelhecido (mais de 30 anos), para poder-se comparar os resultados com o nível de ruído produzido pela passagem do mesmo veículo nos mesmos locais sobre uma textura de mistura de asfalto-borracha, após a restauração do revestimento.

Neste método foi considerada a medição do nível de ruído máximo produzido por um veículo nas velocidades de 60, 80 e 100 km/h.

##### **5.1.1.1 Locais das medições**

Os locais de medição foram escolhidos tomando-se como condicionamento a possibilidade do veículo desenvolver velocidade constante, sem presença de semáforos e em tangente. Os locais selecionados com a suas latitudes e longitudes foram os seguintes:

- Km 9+400 perto da UFSC (-27.598638; -48.516001);

- Terminal de Integração da Trindade (TITRI) (-27.580878; -48.52300); e
- Pizzaria Papparella (-27.589186; -48.559849).

As Figuras de 5.1 a 5.3 mostram a localização dos pontos de medição.

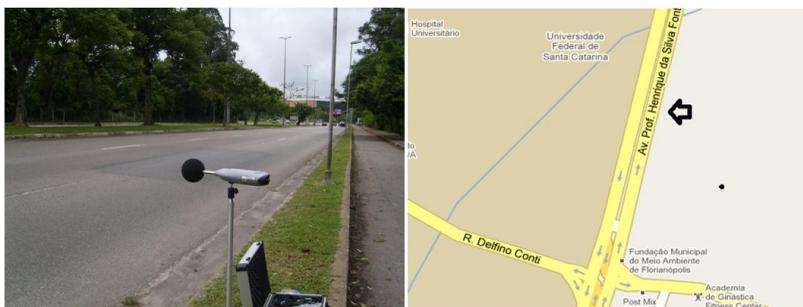


Figura 5.1 – Local de medição Km 9+400 UFSC.



Figura 5.2 - Local de medição TITRI.



Figura 5.3 - Local de medição Pizzaria Papparella.

As Figuras de 5.4 a 5.7 mostram o aspecto das três texturas da mistura asfáltica densa comum envelhecida e da mistura asfalto-borracha após a restauração.



Figura 5.4 - Textura da superfície Km 9+400 UFSC (envelhecida).



Figura 5.5 - Textura da superfície TITRI (envelhecida).



Figura 5.6 - Textura da superfície Pizzaria Paparella (envelhecida).



Figura 5.7 - Textura da superfície com mistura Asfalto-Borracha (segmento já restaurado).

#### 5.1.1.2 Equipamento utilizado

As medições dos níveis de pressão sonora foram realizadas utilizando um sonômetro com sensibilidade de 0,1 dB modelo SOLO N<sup>o</sup> 1163q da marca 01 dB-Metravib (Figura 5.8). A Figura 5.9 mostra o sonômetro instalado no campo.



Figura 5.8 - Equipamento SOLO N<sup>o</sup> 1163q Classe 1 da marca 01 dB-Metravib.



Figura 5.9 - Sonômetro instalado no campo.

### 5.1.1.3 Veículo de teste

O veículo utilizado neste método foi um Peugeot 307, ano 2009, motor 1.6 com peso de 1.268 Kg e quilometragem de 35.542. A calibragem dos pneus foi de 30 libras, como é recomendada pelo fabricante. As dimensões do veículo são mostradas na Figura 5.10.

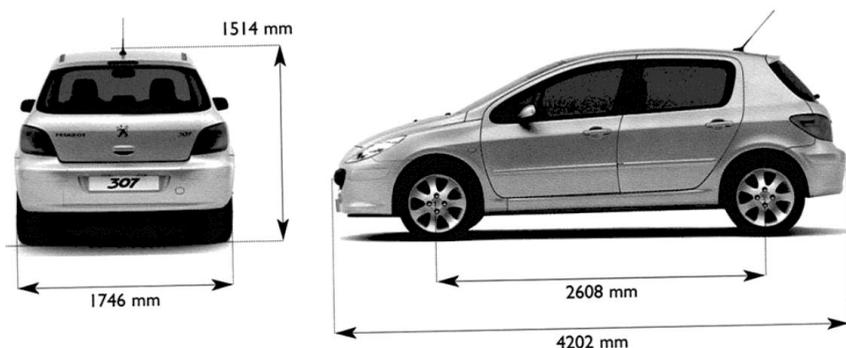


Figura 5.10 - Dimensões do veículo de teste usado nesta pesquisa.

Os pneus utilizados são de tamanho 195/65R15 original de fábrica, da marca Goodyear 205/55 R15 91V com as seguintes características:

- Índice de velocidade máxima:  $W = 270$  km/h;
- Índice de carga máxima: 615 Kg;
- Largura da seção: 21,4 cm; e
- Diâmetro externo: 63,2 cm.

A Figura 5.11 mostra as condições do pneu utilizado nas medições. A profundidade média das ranhuras na superfície de rolagem é de 3 mm.



Figura 5.11 - Detalhes das ranhuras de um dos pneus Goodyear 205/55 R15 91V usado neste experimento.

#### 5.1.1.4 Determinação da macrotextura dos revestimentos e da drenabilidade

A macrotextura foi determinada através do ensaio da mancha de areia. A Figura 5.12 mostra o ensaio antes da restauração, enquanto que a Figura 5.13 mostra os passos do ensaio realizado na Avenida Beira-Mar para a mistura asfalto-borracha (após a restauração).

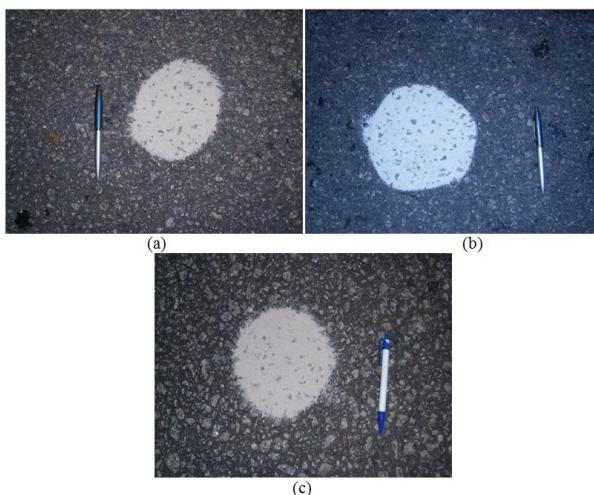


Figura 5.12 - Ensaio da mancha de areia ((a) Papparella, (b) TITRI, (c) UFSC).



Figura 5.13 - Ensaio da mancha de areia realizado no revestimento asfalto-borracha.

Foram realizadas seis medições da mancha de areia em cada estação de teste anotando-se quatro medidas para cada ensaio. A altura da macrotextura é calculada de acordo com a equação 2.29. Os Quadros de 5.1 a 5.4 apresentam os resultados das medições e o Quadro 5.5 apresenta o resumo das medições efetuadas.

Quadro 5.1 - Macrotextura Km 9+400 UFSC (mistura asfáltica densa comum envelhecida com desgaste da argamassa).

Macrotextura							
	Medida	Diâmetros medidos (cm)				Diâmetro médio (cm)	Altura média (mm)
		Km 9+400 UFSC	1	16,0	15,0		
2	15,2		16,0	14,5	15,0	15,2	1,33
3	14,5		14,5	14,0	14,5	14,4	1,48
4	14,0		14,1	15,0	14,9	14,5	1,46
5	14,6		15,0	16,0	15,0	15,2	1,33
6	16,2		14,6	14,8	15,4	15,3	1,32
						Altura média final	<b>1,38</b>
						Classificação	<b>Muito grosseira</b>

Quadro 5.2 - Macrotextura TITRI (mistura asfáltica densa comum envelhecida com desgaste da argamassa).

Macrotextura							
	Medida	Diâmetros medidos (cm)				Diâmetro médio (cm)	Altura média (mm)
		TITRI	1	20,0	20,0		
2	18,0		17,5	16,5	17,0	17,3	1,03
3	18,0		18,0	18,0	18,5	18,1	0,93
4	19,3		19,0	20,0	20,1	19,6	0,80
5	18,5		18,9	19,0	20,0	19,1	0,84
6	18,0		20,0	20,0	16,5	18,6	0,88
						Altura média final	<b>0,88</b>
						Classificação	<b>Grosseira</b>

Quadro 5.3 - Macrotextura Papparella (mistura asfáltica densa comum envelhecida com desgaste da argamassa).

Macrotextura							
	Medida	Diâmetros medidos (cm)				Diâmetro médio (cm)	Altura média (mm)
		Papparella	1	14,5	16,5		
2	16,5		13,5	16,0	13,5	14,9	1,38
3	16,0		13,0	15,0	13,5	14,4	1,48
4	14,5		15,0	16,0	15,5	15,3	1,32
5	13,5		15,0	16,0	15,0	14,9	1,38
6	16,5		15,5	16,0	13,5	15,4	1,30
						Altura média final	<b>1,36</b>
						Classificação	<b>Muito Grosseira</b>

Quadro 5.4 - Macrotextura Papparella Após a Restauração (Asfalto-Borracha)

Macrotextura							
	Medida	Diâmetros medidos (cm)				Diâmetro médio (cm)	Altura média (mm)
		Asfalto-borracha	1	26,0	23,0		
2	25,0		27,0	22,0	24,0	24,5	0,51
3	25,0		24,5	23,0	25,0	24,4	0,52
4	26,0		23,5	24,1	25,0	24,7	0,50
5	25,2		24,5	24,2	24,1	24,5	0,51
6	25,0		24,0	25,2	25,4	24,9	0,49
						Altura média final	<b>0,50</b>
						Classificação	<b>Média</b>

Quadro 5.5 - Resumo da macrotextura.

Macrotextura	Altura (mm)	Velocidade Recomendada	Geração do Ruído (pneu-pavimento)
Mistura Densa - Km 9+400 UFSC	1,38	Indicado para casos especiais (zonas de perigo constante)	Alta geração do ruído mecânico de impactos e choques
Mistura Densa -TITRI	0,88	Para vias rápidas com $V > 120$ Km/h	Média geração do ruído mecânico de impactos e choques
Mistura Densa – Papparella (antes da restauração)	1,36	Indicado para casos especiais (zonas de perigo constante)	Alta geração do ruído mecânico de impactos e choques
Asfalto-Borracha (após a restauração)	0,50	Para vias com $80 \text{ km/h} < V < 120 \text{ km/h}$	Pouca geração do ruído mecânico de impactos e choques

Com os resultados obtidos pode-se afirmar de acordo com o Quadro 2.6 que as texturas do revestimento do km 9+400 UFSC e do Papparella são classificadas como muito grosseiras, já a do TITRI fica com uma classificação grosseira. No entanto, muito próxima de uma textura de classificação média. O revestimento com asfalto-borracha se mostra com classificação média chegando muito próxima de ser considerada fina ou fechada.

Os resultados mostram que o revestimento antes da restauração estava bastante desgastado, fato causado pelo envelhecimento do revestimento em que a argamassa, principalmente com ação do tráfego, vai se desgastando deixando os agregados mais expostos. Isso acarreta o aumento do ruído provocado pela parcela do mecanismo de impactos e choques. Diferentemente por exemplo do concreto com agregado exposto que devido à distribuição uniforme e o pequeno tamanho máximo dos grãos expostos, diminui o mecanismo de impactos e choques e ainda propicia a fuga do ar do contato pneu-pavimento reduzindo os mecanismos aerodinâmicos de geração de ruído.

Após a restauração, a macrotextura foi classificada como média, chegando muito próxima de ser considerada como fina. Isso diminui a parcela do ruído provocado pelo mecanismo de impactos e choques. No entanto, quando o revestimento está com a textura muito lisa aparecem problemas como: aumento do “spray” gerado pela rolagem dos pneus de um veículo em condições molhadas e diminuição da aderência pneu-pavimento gerando menor segurança ao usuário.

Portanto, um revestimento ideal na redução do ruído gerado pelo contato pneu-pavimento é aquele capaz de diminuir os mecanismos mecânicos principalmente de impactos e choques melhorando a textura da sua superfície diminuindo o contato pneu-pavimento sem comprometer a aderência pneu-pavimento e que ainda consiga com que o ar do contato pneu-pavimento possa escapar e reduzir o ruído gerado pelos mecanismos aerodinâmicos, principalmente de bombeamento do ar.

Foram realizadas medições da macrotextura em outros pontos da Avenida Beira-Mar. Os resultados apresentados nos Quadros de 5.6 a 5.9 mostram uma macrotextura muito grosseira para o revestimento antes da restauração e classificação média para o revestimento depois da restauração, chegando muito próxima de fina.

Quadro 5.6 - Macrotextura antes da restauração, na praça perto do Shopping Beira-Mar.

Mistura asfáltica densa comum					
Medida	Medida	Medida	Medida	Média	Altura
14,5	14,3	15,0	14,3	14,5	1,45
13,6	15,0	13,5	14,3	14,1	1,54
15,0	15,2	13,6	13,5	14,3	1,49
				Média	<b>1,49</b>
				Classificação	<b>Muito Grosseira</b>

Quadro 5.7 - Macrotextura antes da restauração, perto do El Divino.

Mistura asfáltica densa comum						
Diâmetro (cm)					Média (cm)	Altura (mm)
14,5	15,0	14,8	15,2	14,7	14,8	1,39
16,8	14,3	14,2	15,0	13,9	14,8	1,39
14,6	17,0	15,6	15,0	16,0	15,6	1,25
15,6	15,3	15,4	15,5	16,1	15,6	1,26
15,0	15,1	15,7	15,0	14,6	15,1	1,35
15,0	15,1	16,0	16,8	15,5	15,7	1,25
					Média	<b>1,31</b>
					Classificação	<b>Muito Grosseira</b>

Quadro 5.8 - Macrotextura depois da restauração, perto do Shopping Beira-Mar.

Asfalto-Borracha							
Diâmetro (cm)						Média (cm)	Altura (mm)
22,7	23,3	22,3	22,8	23,4	24,1	23,1	0,57
22,8	24,0	22,3	24,0	22,3	22,1	22,9	0,58
23,0	23,5	21,2	23,3	21,3	23,5	22,6	0,60
						Média	<b>0,58</b>
						Classificação	<b>Média</b>

Quadro 5.9 - Macrotextura depois da restauração, perto do El Divino.

Asfalto-Borracha						
Diâmetro (cm)					Média (cm)	Altura (mm)
25,0	24,1	23,8	24,5	24,0	24,3	0,52
24,0	23,9	23,6	22,8	24,5	23,8	0,54
29,0	29,0	28,5	28,0	28,5	28,6	0,37
22,0	21,4	21,5	22,0	21,0	21,6	0,66
29,0	26,0	25,0	25,0	25,2	26,0	0,45
					Média	<b>0,51</b>
					Classificação	<b>Muito Grosseira</b>

Foi realizado o ensaio de drenabilidade em cada estação de teste utilizando o drenômetro de modelo suíço e a drenabilidade foi calculada utilizando a equação 2.30. A Figura 5.14 ilustra o ensaio sendo realizado e o Quadro 5.10 os resultados calculados.



Figura 5.14 - Ensaio de drenabilidade (Av. Beira-Mar)

Quadro 5.10 - Drenabilidade das estações de teste (Av. Beira-mar para o ensaio de  $LA_{m\acute{a}x}$ )

Estação de teste	Tempo de escoamento (s)			Drenabilidade (cm/s)
	Med. 1	Med. 2	Med. 3	
Mistura Densa - km 9+400 UFSC	2,42	2,31	2,62	15,06
Mistura Densa -TITRI	6,12	6,31	6,49	5,85
Mistura Densa – Papparella (antes da restauração)	2,74	2,63	2,57	13,94
Asfalto-Borracha (após a restauração)	10,21	10,52	12,11	3,37

#### 5.1.1.5 Determinação dos níveis de pressão sonora ( $LA_{m\acute{a}x}$ )

Para a determinação dos níveis de pressão sonora  $L(A)_{m\acute{a}x}$  o sonômetro foi instalado horizontalmente a 2,8 m do eixo do veículo de teste, ou a 1m do bordo da pista, e verticalmente, a 1,2 m da superfície da pista (Figura 5.15). Em seguida, o sonômetro foi calibrado antes de todas as medições realizadas. A calibração consiste em gerar no sonômetro um nível de pressão sonora conhecido de 140 dB. Para a realização das medições, os pneus do veículo de teste foram sempre calibrados (30 libras) antes de cada medição.



Figura 5.15 - Posicionamento do Sonômetro (km 9+400).

As medições foram realizadas nos meses de novembro e dezembro de 2010 em dias aleatórios, entre os horários de 1:00 AM a 4:00 AM, devido ao baixo fluxo de carros podendo-se assim avaliar o

ruído apenas do veículo de teste. Em cada estação de teste foram realizadas de 6 a 9 medições para cada velocidade em dias diferentes.

A temperatura do ar estava sempre entre 20 °C e 30 °C. Assim a superfície da avenida situava-se entre os 5°C e 50°C recomendados pelo método do CPB. Nos dias com vento não foram realizadas medições, pois a velocidade do vento à altura do sonômetro afetam as medidas não devendo ultrapassar os 5 m/s. Os testes foram realizados em dias sem chuvas.

Os Quadros 5.11 e 5.12 mostram os resultados dos níveis de pressão sonora (NPS) medido nas estações de teste. A Figura 5.16 mostra a variação do ruído gerado (NPS) com o tipo de revestimento e velocidade do veículo.

Quadro 5.11 - Nível de pressão sonora (Mistura asfáltica densa comum km 9+400 USFC e mistura asfáltica densa comum TITRI), ambas envelhecidas.

Km 9+400 UFSC				TITRI			
Velocidade (km/h)	NPS máx. dB(A)	Média dB(A)	Desvio padrão dB(A)	Velocidade (km/h)	NPS máx. dB(A)	Média dB(A)	Desvio padrão
60	82,2	82,33	0,42	60	79,2	79,18	0,43
60	82,5						
60	81,5						
60	82,8						
60	82,3						
60	82,4						
60	82,6						
80	85,4	85,31	0,76	80	84,9	84,27	0,95
80	85,1						
80	85,2						
80	85,0						
80	86,7						
80	84,4						
100	88,8			88,41	0,47		
100	88,7						
100	88,6						
100	88,5						
100	88,5						
100	88,4						
100	87,4						

Quadro 5.12 - Nível de pressão sonora da estação de teste Papparella (Mistura asfáltica densa comum envelhecida e mistura asfáltica com borracha).

Papparella antes da restauração				Papparella depois da restauração (asfalto-borracha)			
Velocidade (km/h)	NPS máx. dB(A)	Média dB(A)	Desvio padrão dB(A)	Velocidade (km/h)	NPS máx. dB(A)	Média dB(A)	Desvio padrão dB(A)
60	81,8	81,61	0,46	60	77,3	77,04	0,38
60	81,9						
60	82,0						
60	81,2						
60	81,3						
60	81,2						
60	81,4						
60	81,2						
60	82,5						
80	84,2	84,33	0,43	80	82,9	82,06	0,40
80	84,5						
80	84,0						
80	84,1						
80	84,6						
80	84,1						
80	84,3						
80	83,9						
80	85,3						
100	88,0	88,74	0,68	100	85,1	85,19	0,55
100	88,2						
100	88,5						
100	88,7						
100	88,2						
100	88,3						
100	89,4						
100	89,6						
100	89,8						

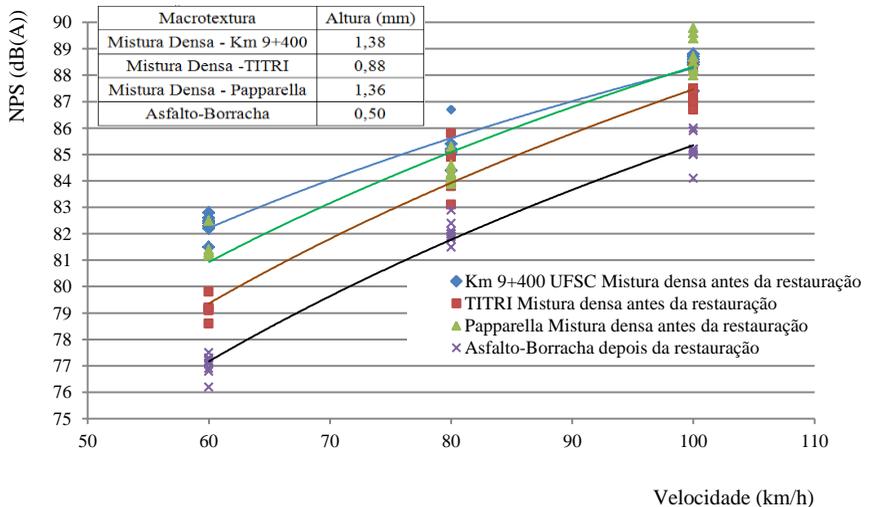


Figura 5.16 - Medida do nível de pressão sonora máximo individual gerado pela ação do tráfego na Beira Mar.

Foi realizada uma análise estatística para verificar se existe diferença significativa entre os revestimentos e as diferentes macrotexturas com 95% de confiança na geração do ruído. As curvas foram linearizadas e posteriormente encontradas as hipérbolas de confiança com confiabilidade de 95%. Para tal análise, foram consideradas: a normalidade dos resíduos, valores espúrios, a linearidade da reta, a significância e a correlação. A Figura 5.17 mostra o resultado final com a linearização realizada e as hipérbolas de confiança plotadas.

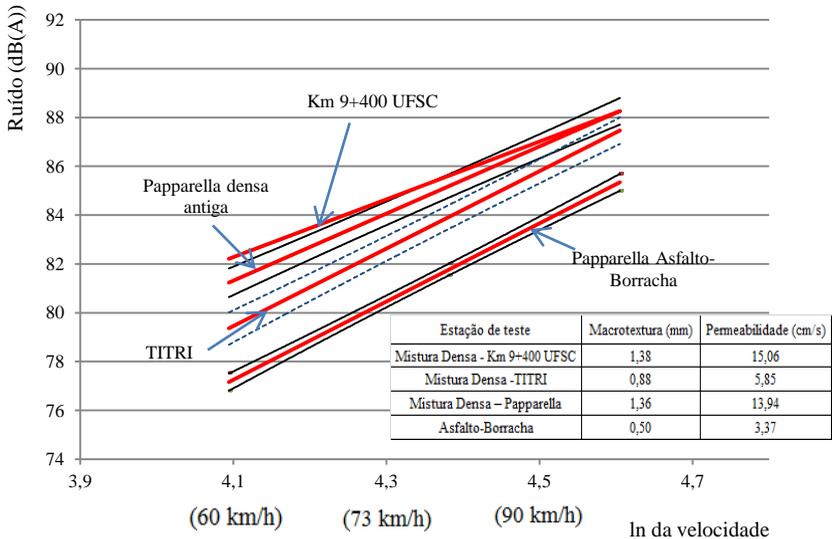


Figura 5.17 - Análise estatística dos resultados

A análise estatística mostra que para os tipos de revestimento avaliados, o comportamento velocidade x ruído gerado pela interação pneu-pavimento, pode ser explicado por uma função linear.

Nota-se que as hipérbolas de confiança da reta km 9+400 UFSC não foram plotadas. Isso se deve ao fato que não seria necessário, pois visivelmente sem as hipérbolas, o gráfico mostra que a reta km 9+400 UFSC e a reta Papparella não tem uma diferença significativa, pois estão muito próximas e ainda se cruzam.

O gráfico da Figura 5.17 mostra que existe uma diferença significativa entre as retas Papparella e TITRI até certa velocidade, depois disso as hipérbolas de confiança se cruzam.

Os resultados mostram, por exemplo, uma redução de 3 a 4 decibels entre os revestimentos das estações de teste da Papparella com mistura asfáltica densa envelhecida e Papparella com mistura asfalto-borracha. Essa redução de acordo com a Figura 2.3 foi como reduzir o tráfego entre 50 e 60%.

Os resultados apresentados mostraram que o ruído diminuiu estatisticamente com 95% de confiança quando o revestimento foi restaurado. Isso pode ser explicado principalmente pelas diferentes texturas encontradas nos revestimentos estudados. O pavimento restaurado, com uma textura mais lisa, provoca menor parcela do ruído mecânico gerado pelo mecanismo de impactos e choques, que está

diretamente ligado com a textura do revestimento. Como os revestimentos estudados são todos de baixa porosidade, o ruído gerado pela parcela aerodinâmica é praticamente o mesmo para todos os revestimentos, com isso, neste caso, a textura se torna a variável predominante na geração do ruído.

Outro fator que pode explicar a diminuição do ruído no revestimento restaurado é a diferença de rigidez das camadas estudadas, já que a camada restaurada tem o módulo menor por ser uma mistura asfáltica com borracha.

### **5.1.2 Resultados das Medições em Campo do $L(A)_{eq}$**

As medições de nível de ruído equivalente ( $L_{Aeq}$ ) para 3 pontos da Avenida Beira Mar teve duração de 15 minutos em cada medida.

Neste método foi considerada a medição do nível de ruído de um fluxo de veículos com velocidade de moderada a alta (>60 km/h).

O objetivo desta medição foi avaliar o nível de ruído produzido por um fluxo contínuo de veículos sobre três texturas de pavimento envelhecido (antes da restauração), e poder-se comparar os resultados com o nível de ruído produzido por um fluxo similar sobre uma textura de mistura asfáltica com borracha (após a restauração).

O tempo de medição foi de quinze minutos. As medições foram feitas entre os horários de 9:00 a 10:30 h e 14:30 a 16:00 h. Assim, fazendo-se as medidas no mesmo horário no revestimento restaurado (mistura asfáltica com borracha), espera-se que o fluxo seja o mesmo, mesmo em dias úteis diferentes.

#### **5.1.2.1 Localização dos pontos das medições**

Os locais de medição do ruído têm como referência as seguintes estações de teste:

- Em frente à Papparella (-27.589186; -48.559849);
- Em frente ao Habbib's (-27.574340; -48.540130); e
- Em frente ao prédio da Superintendência Regional da Polícia Federal (-27.571869; -48.533596).

Os locais de medição do ( $LA_{eq}$ ) não foram os mesmos em que se mediu o ( $LA_{máx}$ ) pois, em alguns locais em que foi medido o ruído

individual não foi realizada a restauração do revestimento. As Figuras de 5.18 a 5.20 mostram a localização dos pontos de medição.

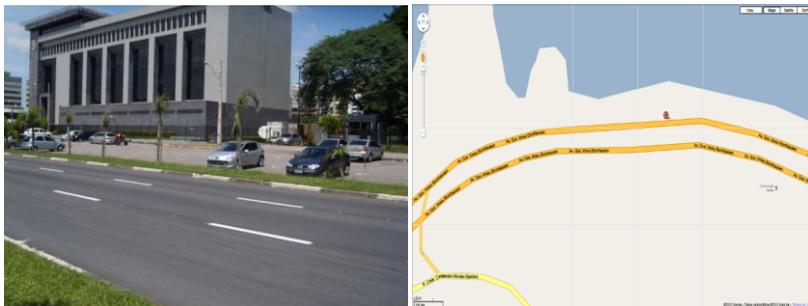


Figura 5.18 - Local de medição próximo a Superintendência Regional da Polícia Federal.

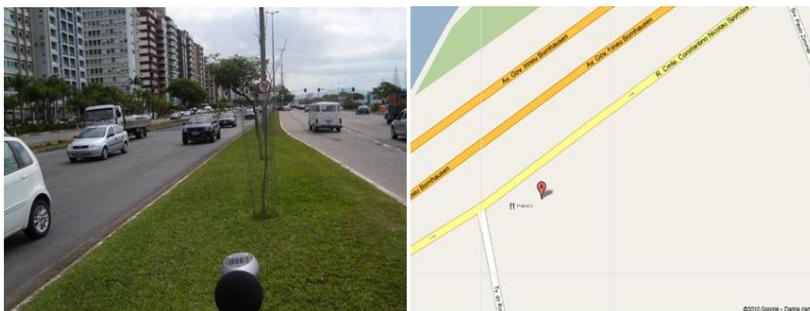


Figura 5.19 - Local de medição próximo ao restaurante Habib's

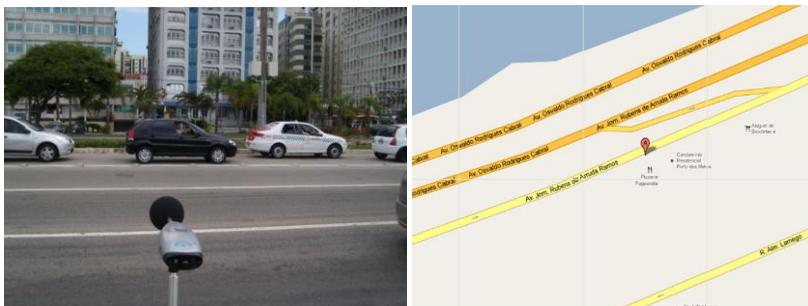


Figura 5.20 - Local de medição próximo a Pizzaria Papparella.

As Figuras de 5.21 a 5.24 mostram o aspecto da textura superficial do revestimento envelhecido e da mistura asfalto-borracha após a restauração.



Figura 5.21 - Textura da Superfície local de medição próximo Superintendência Regional da Policia Federal (antes da restauração).



Figura 5.22 - Textura da Superfície local de medição próximo Restaurante Habib's (antes da restauração).



Figura 5.23 - Textura da Superfície local de medição próximo Pizzaria Paparella (antes da restauração).



Figura 5.24 - Textura do revestimento com Asfalto-Borracha (após a restauração).

### 5.1.2.2 Determinação da macrotextura dos revestimentos

A macrotextura foi determinada através do ensaio da mancha de areia. Os Quadros de 5.13 a 5.16 mostram os resultados dos ensaios realizados.

Quadro 5.13 – Macrotextura do local próximo a Superintendência Regional da Polícia Federal (Mistura densa envelhecida, antes da restauração)

Macrotextura							
	Medida	Diâmetros medidos (cm)				Diâmetro médio (cm)	Altura média (mm)
		Km 9+400 UFSC	1	19,0	21,0	20,0	19,5
2	19,0		18,5	17,3	19,0	18,5	0,90
3	21,0		20,0	22,0	20,0	20,8	0,71
4	20,5		20,5	21,0	19,0	20,3	0,75
5	19,5		17,5	21,0	20,0	19,5	0,81
6	20,0		21,0	20,5	18,0	19,9	0,78
						Altura média final	<b>0,79</b>
						Classificação	<b>Média</b>

Quadro 5.14 – Macrotextura do local próximo ao Restaurante Habib's (Mistura densa envelhecida, antes da restauração).

Macrotextura							
	Medida	Diâmetros medidos (cm)				Diâmetro médio (cm)	Altura média (mm)
		TITRI	1	20,0	19,0		
2	20,0		18,5	18,5	21,0	19,5	0,81
3	19,5		19,5	20,0	21,0	20,0	0,77
4	20,0		19,5	20,0	18,5	19,5	0,81
5	18,0		18,5	20,0	19,0	18,9	0,86
6	20,0		21,0	19,0	18,0	19,5	0,81
						Altura média final	<b>0,80</b>
						Classificação	<b>Média</b>

Quadro 5.15 – Macrotextura do local próximo a Papparella (Mistura densa envelhecida, antes da restauração).

Macrotextura							
	Medida	Diâmetros medidos (cm)				Diâmetro médio (cm)	Altura média (mm)
		Papparella	1	14,5	16,5		
2	16,5		13,5	16,0	13,5	14,9	1,38
3	16,0		13,0	15,0	13,5	14,4	1,48
4	14,5		15,0	16,0	15,5	15,3	1,32
5	13,5		15,0	16,0	15,0	14,9	1,38
6	16,5		15,5	16,0	13,5	15,4	1,30
						Altura média final	<b>1,36</b>
						Classificação	<b>Muito grosseira</b>

Quadro 5.16 - Macrotextura em frente ao Papparella (Mistura asfáltica com borracha, após a restauração).

Macrotextura							
	Medida	Diâmetros medidos (cm)				Diâmetro médio (cm)	Altura média (mm)
		Asfalto-Borracha	1	26,0	23,0		
2	25,0		27,0	22,0	24,0	24,5	0,51
3	25,0		24,5	23,0	25,0	24,4	0,52
4	26,0		23,5	24,1	25,0	24,7	0,50
5	25,2		24,5	24,2	24,1	24,5	0,51
6	25,0		24,0	25,2	25,4	24,9	0,49
						Altura média final	<b>0,50</b>
						Classificação	<b>Média</b>

Quadro 5.17 - Resumo da macrotextura

Macrotextura	Altura (mm)	Velocidade recomendada
Mistura Densa – Polícia Federal (antes da restauração)	0,79	Para vias com $80 \text{ km/h} < V < 120 \text{ km/h}$
Mistura Densa – Habib's (antes da restauração)	0,80	Para vias com $80 \text{ km/h} < V < 120 \text{ km/h}$
Mistura Densa – Papparella (antes da restauração)	1,36	Indicado para casos especiais (zonas de perigo constante)
Mistura de Asfalto-Borracha (após a restauração)	0,50	Para vias com $80 \text{ km/h} < V < 120 \text{ km/h}$

### 5.1.2.3 Determinação dos níveis de pressão sonora ( $L_{Aeq}$ )

As medições em cada uma das estações de teste foram realizadas em três posições em relação à faixa de rolamento: lado do mar, canteiro central e lado dos prédios. No entanto, não foram feitas tantas medições no canteiro central devido ao limite de tempo, pois a Beira Mar já estava sendo restaurada.

A temperatura do ar estava sempre entre 20 °C e 30 °C. Nos dias com vento e chuva não foram realizadas medições.

Os Quadros de 5.18 a 5.20 apresentam os resultados dos níveis de pressão sonora ( $L(A)_{eq}$ ) para cada local e o dia da semana do ensaio antes da restauração e os Quadros 5.21 a 5.23 os resultados depois da restauração. O Quadro 5.24 apresenta a média e o desvio padrão dos resultados dos níveis de pressão sonora ( $L_{Aeq}$ ) para cada estação teste antes e depois da restauração do revestimento. A Figura 5.25 apresenta uma média geral dos níveis de pressão sonora para cada estação antes e depois da restauração.

Quadro 5.18 - Nível de pressão sonora na Superintendência Regional da Polícia Federal (antes da restauração).

Lado do mar/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
			81,6	81,9	82,0	0,29
			82,0	82,3		
Canteiro central/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
			81,6		81,6	-
Prédios/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
			80,1		80,4	0,44
		80,2	80,9			
Prédios/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
			80,3	80,7	80,6	0,30
		80,5	81,0			
Lado do mar/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
			80,8	81,0	81,1	0,28
		80,9	81,2			

Quadro 5.19 - Nível de pressão sonora restaurante Habibs (antes da restauração).

Lado do mar/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão		
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira				
		79,8	80,5		80,1	0,62		
		80,0	81,0	79,4				
Canteiro central/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão		
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira				
		78,6	77,9				78,0	0,70
			77,2					
	78,2							
Prédios/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão		
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira				
		74,8	75,9				74,8	0,81
	75,0	74,1	74,3					
Prédios/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão		
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira				
		75,5		75,1			75,3	0,42
		75,2	75,9	74,8				
Lado do mar/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão		
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira				
		80,5	80,2	81,0			80,5	0,43
		80,0		80,9				

Quadro 5.20 - Nível de pressão sonora pizzaria Papparella (antes da restauração).

Lado do mar/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
	77,6	77,3	77,0	77,5		
	77,5	77,7				
Canteiro central/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
	77,9	77,8				
	77,6					
Prédios/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
		75,6	75,6	75,5		
	75,6	75,4				
Prédios/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
		75,6		75,9		
	74,7		75,8			
Lado do mar/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
		78,0		77,3		
	77,5	78,0	77,3			
	77,7	78,1				
Canteiro central/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
		77,1		77,2		
	76,7					

Quadro 5.21 - Nível de pressão sonora na Superintendência Regional da Polícia Federal (depois da restauração).

Lado do mar/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
			80,1	80,9	80,5	0,40
			80,5			

Prédios/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
		80,3	79,8	80,2	80,3	0,45
			80,9			

Prédios/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
	80,5	79,7	81,1		80,3	0,61
			80,0			

Lado do mar/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
		82,4	82,9		82,4	0,60
		82,6	81,5			

Quadro 5.22 - Nível de pressão sonora restaurante Habibs (depois da restauração).

Lado do mar/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
	80,3	79,7		78,6		
	79					

Prédios/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
	75,5	75,9		76,9		
75,4	75,7					

Prédios/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
	77,1	77,2	77,4			
		77,0				

Lado do mar/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
		79,0	79,6			
	78,9	79,5				

Quadro 5.23 - Nível de pressão sonora pizzaria Papparella (depois da restauração).

Lado do mar/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
		76,1	76,7	77,1		
	76,9					

Prédios/Manhã	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
		75,0	74,6	74,9		

Prédios/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
		76,2	77,0	75,9		
			76,0			

Lado do mar/Tarde	L(A)eq (dB(A))				Média	Desvio Padrão
	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira		
		77,6	77,0			
	76,9	77,1				

Quadro 5.24 - Nível de pressão sonora (LAeq) nas três estações de testes

Local	Antes da Restauração		Depois da Restauração	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Papparella				
Manhã/Prédios	75,5	0,26	74,8	0,21
Manhã/Mar	77,4	0,09	76,7	0,43
Tarde/Prédios	75,5	0,55	76,3	0,50
Tarde/mar	77,7	0,36	77,2	0,31

Local	Antes da Restauração		Depois da Restauração	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Habib's				
Manhã/Prédios	74,8	0,81	75,9	0,60
Manhã/Mar	80,1	0,62	79,4	0,75
Tarde/Prédios	75,3	0,42	77,2	0,17
Tarde/mar	80,5	0,43	79,3	0,35

Local	Antes da Restauração		Depois da Restauração	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Polícia Federal				
Manhã/Prédios	80,4	0,44	80,3	0,45
Manhã/Mar	82,0	0,29	80,5	0,40
Tarde/Prédios	80,6	0,30	80,3	0,61
Tarde/mar	81,1	0,28	82,4	0,60

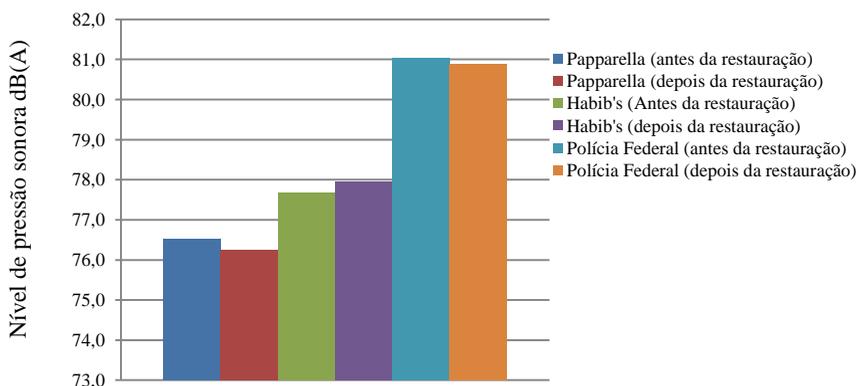


Figura 5.25 - Nível de Pressão Sonora Médio dos Pontos Avaliados.

Pode-se verificar que a média do ruído  $L(A)_{eq}$  na Polícia Federal foi a maior. Isso se deve ao fato que os veículos trafegam em

velocidades maiores nesse trecho, pois não há semáforos com dispositivos de controle de velocidade.

Foi realizado um tratamento estatístico de comparação entre médias. Os resultados mostraram que não existe diferença significativa entre os níveis de pressão sonora medidos antes e depois da restauração. A dificuldade de se medir o ruído da interação pneu-pavimento utilizando a medição de 15 minutos do LAeq é a incerteza da igualdade do fluxo de veículos antes e depois da restauração. Outro agravante é a interferência do ruído provocado pelo motor de caminhões e de ônibus que contaminam a medida do ruído gerado pela interação pneu-pavimento.

## 5.2 AVALIAÇÃO DO RUÍDO GERADO NA CAMADA DE CPA

O objetivo desta medição foi avaliar o nível de ruído produzido pela passagem de um veículo a três velocidades em uma camada porosa de atrito (CPA), para posteriormente comparar os resultados com o nível de ruído produzido pela passagem do mesmo veículo em diferentes superfícies. Neste método foi considerada a medição do nível de ruído máximo ( $LA_{máx}$ ) produzido por um veículo nas velocidades de 60, 80 e 100 km/h.

As medições foram realizadas com o mesmo equipamento e o mesmo veículo de teste das avaliações do nível de ruído produzido pela passagem de um veículo na Avenida Beira-Mar (vide item 5.1).

### 5.2.1 Local das medições

As medições foram realizadas em uma camada porosa de atrito situado na BR 282 no trecho que liga as cidades de Campos Novos e Lages. O local da estação de teste foi o Km 245, escolhido tomando-se como condicionamento a possibilidade do veículo desenvolver uma velocidade constante de 100, 80 e 60 km/h, em tangente. A Figura 5.26 mostra o aspecto da textura da mistura asfáltica (CPA).



Figura 5.26 - Aspecto da textura da camada porosa de atrito

### 5.2.2 Determinação da macrotextura do revestimento e da drenabilidade

A macrotextura foi determinada através do ensaio da mancha de areia. A Figura 5.27 mostra a realização do ensaio. Assim como no estudo da textura na Avenida Beira-Mar foram realizadas seis medições da mancha de areia na estação de teste anotando-se quatro medidas para cada ensaio. A altura da macrotextura é calculada de acordo com a equação 2.29. O Quadro 5.25 apresenta os resultados das medições com a classificação de acordo com o Quadro 2.6. Foi realizado o ensaio de drenabilidade na estação de teste utilizando o mesmo drenômetro dos ensaios na Avenida Beira-Mar. O Quadro 5.26 mostra os resultados calculados.



Figura 5.27 - Ensaio da mancha de areia realizado na CPA

Quadro 5.25 - Macrotextura na Camada Porosa de Atrito.

Macrotextura							
	Medida	Diâmetros medidos (cm)				Diâmetro médio (cm)	Altura média (mm)
CPA	1	15,50	14,00	14,00	13,00	14,13	1,53
	2	14,50	14,00	15,00	15,40	14,73	1,41
	3	14,20	13,50	14,50	14,00	14,05	1,55
	4	15,00	14,50	15,00	14,00	14,63	1,43
	5	15,00	15,40	14,50	14,00	14,73	1,41
	6	14,00	13,50	14,00	14,00	13,88	1,59
						Altura média final	<b>1,49</b>
						Classificação	<b>Muito grosseira</b>

Observando apenas o resultado da mancha de areia para a camada porosa de atrito pode-se pensar a princípio que se trata de uma camada desgastada e envelhecida. No entanto por ser um revestimento poroso a sua superfície apresenta uma textura negativa com a face plana do agregado virada para cima. Tal configuração reduz o ruído provocado pela parcela mecânica de impactos e choques principalmente.

Essa configuração também contribui com a redução do ruído provocado pela parcela aerodinâmica, pois o ar consegue escapar devido a textura negativa do revestimento. No entanto, essa redução é considerada pequena já que o ar consegue escapar apenas superficialmente, pois essa mistura não apresenta seus vazios comunicantes como seria em um revestimento drenante por exemplo.

Quadro 5.26 - Drenabilidade da estação de teste (Camada Porosa de Atrito)

Estação de teste	Tempo de escoamento (s)			Drenabilidade (cm/s)
	Med. 1	Med. 2	Med. 3	
CPA	2,51	2,85	2,68	13,77

### 5.2.3 Determinação dos níveis de pressão sonora ( $L_{A_{máx}}$ )

Para a determinação dos níveis de pressão sonora  $L(A)_{máx}$  o sonômetro foi instalado horizontalmente a 2,8 m do eixo do veículo de teste, ou a 1m do bordo da pista, e verticalmente, a 1,2 m da superfície da pista. Da mesma forma que se procedeu nas medições na Avenida

Beira-Mar o sonômetro foi calibrado assim como os pneus do veículo de teste sempre antes de cada medição.

As medições foram realizadas no mês de setembro de 2011. Como a rodovia é de baixo volume de tráfego o horário escolhido foi entre 10:00 AM a 12:00 AM. Foram realizadas 9 medições para cada velocidade.

A temperatura do ar estava entre 20 °C e 30 °C. Assim a superfície da rodovia situava-se entre os 5°C e 50°C recomendados pelo método do CPB. O teste foi realizado em um dia sem chuva com a velocidade do vento menor que os 5 m/s recomendados pelo método do CPB. O Quadro 5.27 mostra os resultados dos níveis de pressão sonora (NPS) medido na estação de teste. A Figura 5.28 mostra a variação do ruído gerado (NPS) com a velocidade do veículo.

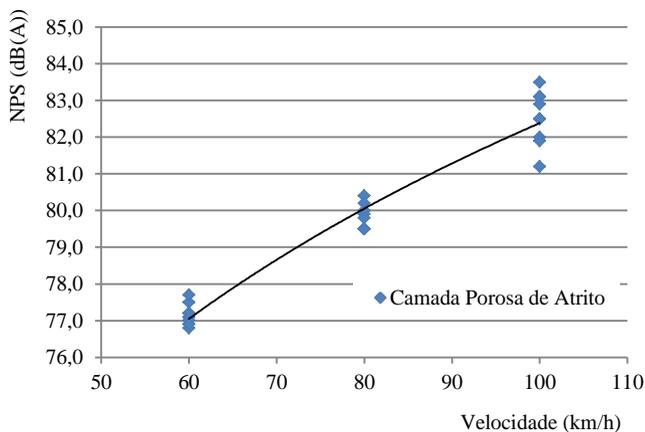


Figura 5.28 - Medida do nível de pressão sonora máximo individual gerado pela ação do tráfego na Camada Porosa de Atrito.

Quadro 5.27 - Nível de pressão sonora (Camada Porosa de Atrito).

BR-282 Trecho Lages à Campos Novos (CPA)			
Velocidade (km/h)	NPS máx. dB(A)	Média dB(A)	Desvio padrão dB(A)
60	77,0	77,2	0,29
60	77,5		
60	77,1		
60	77,2		
60	76,8		
60	77,7		
60	77,0		
60	76,9		
60	77,2		
80	80,4	79,8	0,34
80	79,9		
80	79,5		
80	79,5		
80	80,2		
80	80,0		
80	79,5		
80	79,8		
80	79,5		
100	83,1	82,5	0,72
100	81,2		
100	83,1		
100	82,5		
100	82,9		
100	82,5		
100	82,0		
100	81,9		
100	83,5		

Assim como no estudo da Avenida Beira-Mar foi realizada uma análise estatística dos dados para verificar se existe diferença significativa entre os diferentes revestimentos com 95% de confiança na geração do ruído. A curva foi linearizada e posteriormente encontrada as hipérbolas de confiança com confiabilidade de 95%. Para tal análise, foi testada a normalidade dos resíduos, valores espúrios, a linearidade da

reta, a significância e a correlação. A Figura 5.29 mostra o resultado final com a linearização realizada e as hipérboles de confiança plotadas.

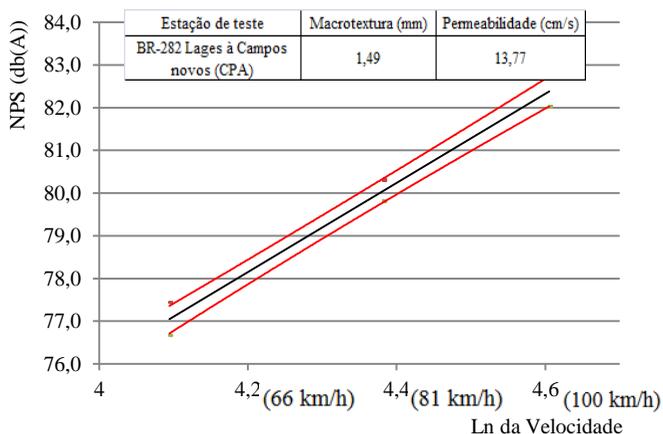


Figura 5.29 - Análise estatística do nível de pressão sonora máxima na CPA

### 5.3 AVALIAÇÃO DO RUÍDO GERADO NO MICRORREVESTIMENTO

Da mesma forma do estudo realizado na CPA e na Avenida Beira-Mar ( $LA_{máx}$ ), o objetivo desta medição foi avaliar o nível de ruído produzido pela passagem de um veículo a três velocidades em um microrrevestimento, para logo poder-se comparar os resultados com o nível de ruído produzido pela passagem do mesmo veículo em diferentes superfícies. Neste método foi considerada a medição do nível de ruído máximo ( $LA_{máx}$ ) produzido por um veículo nas velocidades de 60, 80 e 100 km/h.

As medições foram realizadas com o mesmo equipamento e o mesmo veículo de teste das avaliações do nível de ruído produzido pela passagem de um veículo na Avenida Beira-Mar (vide item 5.1).

De acordo com os dados fornecidos pela empresa Esteio Pavimentação e Construção Ltda, a granulometria do microrrevestimento se encaixou na Faixa II do DNIT 035/2005-ES com teor ótimo de emulsão asfáltica catiônica RC-1C de 10,5%.

### 5.3.1 Local das medições

As medições foram realizadas em um microrrevestimento situado na Rua Vereador Osni Ortiga em Florianópolis. O local da estação de teste foi escolhido tomando-se como condicionamento a possibilidade do veículo desenvolver uma velocidade constante de no máximo 100 km/h e no mínimo de 60 km/h, sem presença de semáforos e em tangente. A Figura 5.30 mostra o local da medição.

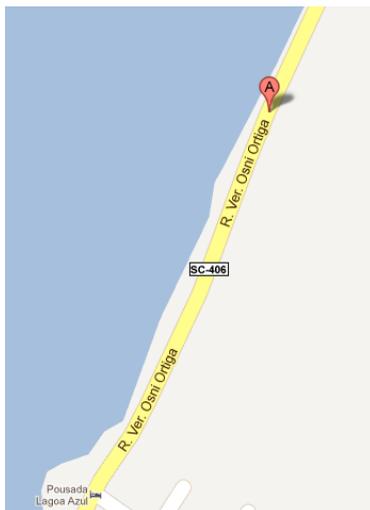


Figura 5.30 – Esquema do local das medições (Rua Vereador Osni Ortiga)

### 5.3.2 Determinação da macrotextura do revestimento e da drenabilidade

A macrotextura foi determinada através do ensaio da mancha de areia. A Figura 5.31 ilustra a realização do ensaio.



Figura 5.31 - Ensaio da mancha de areia realizado no microrrevestimento

Da mesma forma que nos demais revestimentos estudados, foram realizados seis medições da mancha de areia na estação de teste anotando-se quatro medidas para cada ensaio. O Quadro 5.28 apresenta os resultados das medições.

Foi realizado o ensaio de drenabilidade na estação de teste utilizando o mesmo drenômetro dos ensaios na Avenida Beira Mar e na Camada Porosa de Atrito. O Quadro 5.29 mostra os resultados calculados.

Quadro 5.28 - Macrotextura Rua Vereador Osni Ortiga (Microrrevestimento).

Macrotextura							
	Medida	Diâmetros medidos (cm)				Diâmetro médio (cm)	Altura média (mm)
Microrrevestimento	1	13,5	14,7	14,2	14,5	14,23	1,51
	2	14,3	14,2	15,0	13,9	14,35	1,49
	3	15,0	15,5	14,5	15,0	15,00	1,36
	4	15,3	15,4	15,5	14,0	15,05	1,35
	5	15,1	15,7	15,0	14,8	15,15	1,33
	6	15,1	16,0	15,2	14,5	15,20	1,33
						Altura média final	<b>1,40</b>
						Classificação	<b>Muito Grosseira</b>

Quadro 5.29 - Drenabilidade da estação de teste (Rua Vereador Osni Ortiga)

Estação de teste	Tempo de escoamento (s)			Drenabilidade (cm/s)
	Med. 1	Med. 2	Med. 3	
Rua Vereador Osni Ortiga (Microrrevestimento)	2,21	2,42	2,36	15,84

### 5.3.3 Determinação dos níveis de pressão sonora ( $L_{A_{máx}}$ )

Para a determinação dos níveis de pressão sonora  $L(A)_{máx}$  o sonômetro foi instalado horizontalmente a 2,8 m do eixo do veículo de teste, ou a 1m do bordo da pista, e verticalmente, a 1,2 m da superfície da pista. Da mesma forma que se procedeu nas medições na Avenida Beira-Mar e na CPA o sonômetro foi calibrado assim como os pneus do veículo de teste sempre antes de cada medição.

As medições foram realizadas no mês de setembro de 2011, entre os horários de 1:00 AM a 4:00 AM, devido ao baixo fluxo de carros podendo-se assim avaliar o ruído apenas do veículo de teste. Foram realizadas 9 medições para cada velocidade.

A temperatura do ar estava entre 20 °C e 30 °C. Assim a superfície do revestimento situava-se entre os 5°C e 50°C recomendados pelo método do CPB. O teste foi realizado sem chuva com a velocidade do vento menor que os 5 m/s recomendados pelo método do CPB.

O Quadro 5.30 mostra os resultados dos níveis de pressão sonora (NPS) medido na estação de teste. A Figura 5.32 mostra a variação do ruído gerado (NPS) com a velocidade do veículo.

Quadro 5.30 - Nível de pressão sonora (Microrrevestimento).

Rua Vereador Osni Ortiga (microrrevestimento)			
Velocidade (km/h)	NPS máx. dB(A)	Média dB(A)	Desvio padrão dB(A)
60	82,2	82,3	0,38
60	82,5		
60	81,5		
60	82,8		
60	82,0		
60	82,4		
60	82,3		
60	82,1		
60	82,6		
80	86,3	86,3	0,29
80	86,0		
80	86,4		
80	86,0		
80	86,5		
80	85,9		
80	86,7		
80	86,0		
80	86,5		
100	89,4	89,4	0,29
100	89,5		
100	89,2		
100	89,6		
100	89,5		
100	89,9		
100	89,3		
100	88,9		
100	89,7		

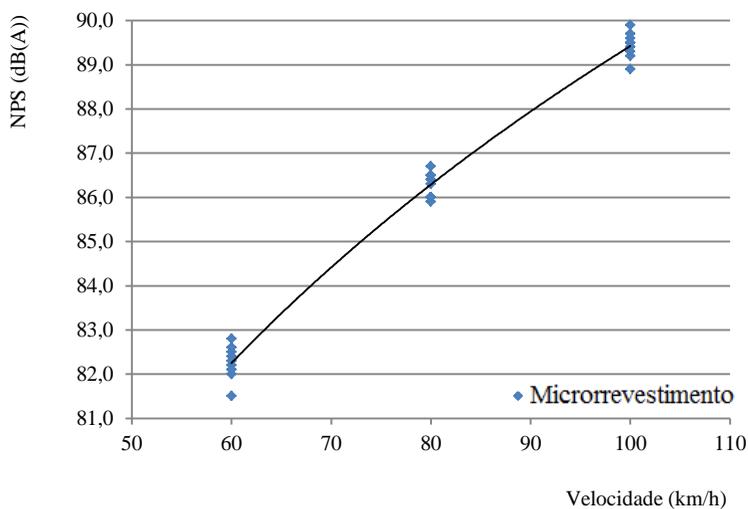


Figura 5.32 - Medida do nível de pressão sonora máximo individual gerado pela ação do tráfego no microrrevestimento.

Assim como no estudo na Avenida Beira-Mar e na CPA foi realizada uma análise estatística dos dados para posteriormente verificar se existe diferença significativa na geração do ruído entre os revestimentos estudados com 95% de confiança. A curva foi linearizada e encontrada as hipérboles de confiança com confiabilidade de 95%. Para tal análise, foi testada a normalidade dos resíduos, valores espúrios, a linearidade da reta, a significância e a correlação. A Figura 5.33 mostra o resultado final com a linearização realizada e as hipérboles de confiança plotadas.

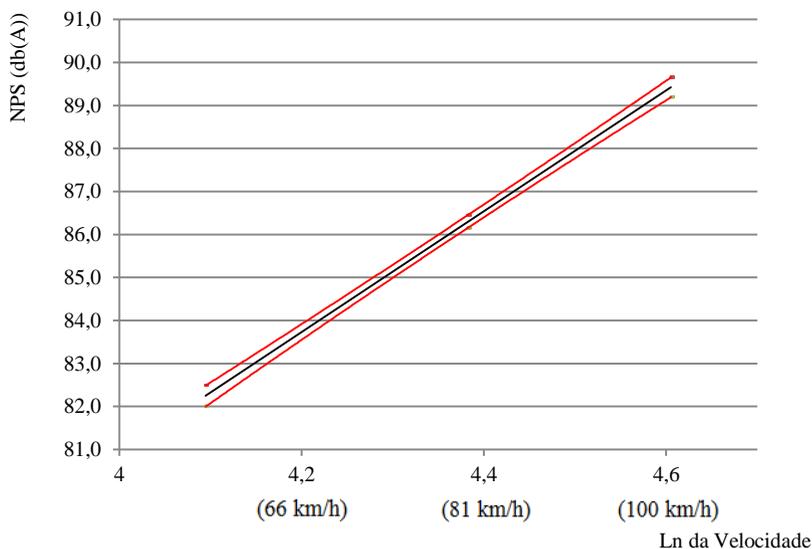


Figura 5.33 - Análise estatística do nível de pressão sonora máxima no microrrevestimento

#### 5.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO NPS PARA OS DIFERENTES REVESTIMENTOS

Neste item foi realizada a comparação dos resultados dos revestimentos estudados nos itens 5.1, 5.2 e 5.3. A Figura 5.34 mostra os resultados do nível de pressão sonora em função da velocidade de 3 revestimentos (mistura de asfalto-borracha da Avenida Beira-Mar, microrrevestimento localizado na Rua Vereador Osni Ortiga e a CPA situada na BR 282 trecho Lages à Campos Novos). Para verificar se existiu diferença significativa entre os revestimentos a Figura 5.35 mostra as retas linearizadas e as hipérbolas de confiança plotadas com confiabilidade de 95%.

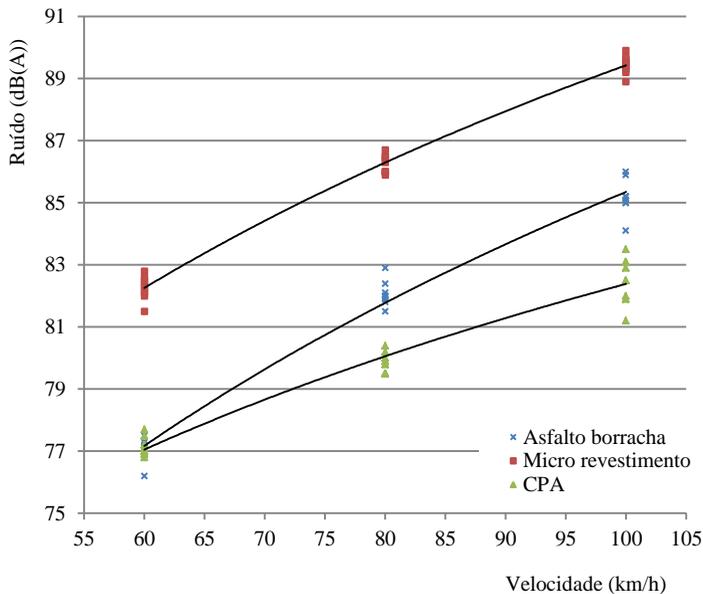


Figura 5.34 - Medida do nível de pressão sonora máxima individual gerado pela ação do tráfego para três revestimentos asfálticos deste estudo

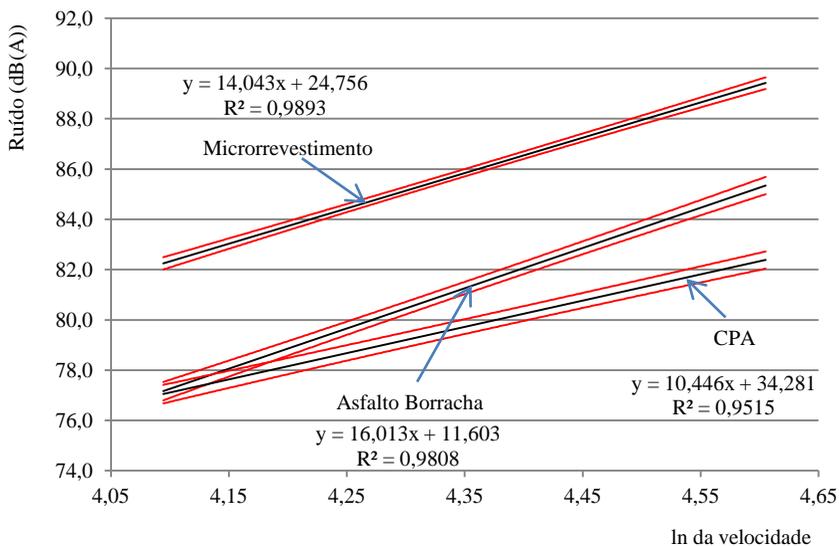


Figura 5.35 - Análise estatística do nível de pressão sonora para três revestimentos asfálticos deste estudo

Os resultados mostraram que a camada porosa de atrito (CPA) foi a que apresentou menor geração do ruído individual quando comparada com os demais revestimentos. Essa redução foi significativa para velocidades acima de 65 km/h.

A redução do ruído pode ser explicada pela textura negativa da superfície da CPA, reduzindo os mecanismos de geração do ruído mecânico. Também pela alta porosidade do revestimento é possível reduzir a parcela do ruído de geração aerodinâmica. Apesar de não se tratar de um revestimento com tantos vazios comunicantes, o ar, ainda que superficialmente, consegue escapar e reduzir essa parcela de ruído aerodinâmico provocada pelo contato pneu-pavimento.

Os estudos mostraram que o microrrevestimento foi o mais ruidoso dos revestimentos estudados. Isso pode ser explicado pelo desgaste da superfície constatada pelo ensaio da mancha de areia, gerando um ruído causado principalmente pelo mecanismo mecânico de impactos e choques.

Com o objetivo de verificar a influência da macrotextura no ruído gerado pelo acoplamento pneu-pavimento foi plotado o gráfico da Figura 5.36. A Figura mostra o nível de pressão sonora para cada altura de macrotextura encontrada no ensaio de mancha de areia. Os resultados apresentados são para todas as misturas fechadas (baixa porosidade). Isso por que, para a mistura aberta (CPA), o ensaio da mancha de areia não é apropriado, pois a areia penetra entre os poros do revestimento e não caracteriza bem a sua macrotextura.

Os resultados mostraram que a macrotextura tem influência nos resultados dos níveis de pressão sonora. Quanto maior a altura da macrotextura maior é o ruído provocado pelo mecanismo mecânico principalmente de impactos e choques. Observa-se também, como já visto anteriormente, que quanto maior a velocidade do veículo, maior é o nível de pressão sonora gerado.

Na tentativa de relacionar os resultados de drenabilidade com os níveis de pressão sonora foi plotado o gráfico da Figura 5.37. Foram plotados os resultados de drenabilidade apenas dos revestimentos densos. Os resultados mostram que quanto maior a drenabilidade maior é o nível de pressão sonora medido. Isso pode ser explicado, pois quanto maior a drenabilidade maior é a altura da macrotextura.

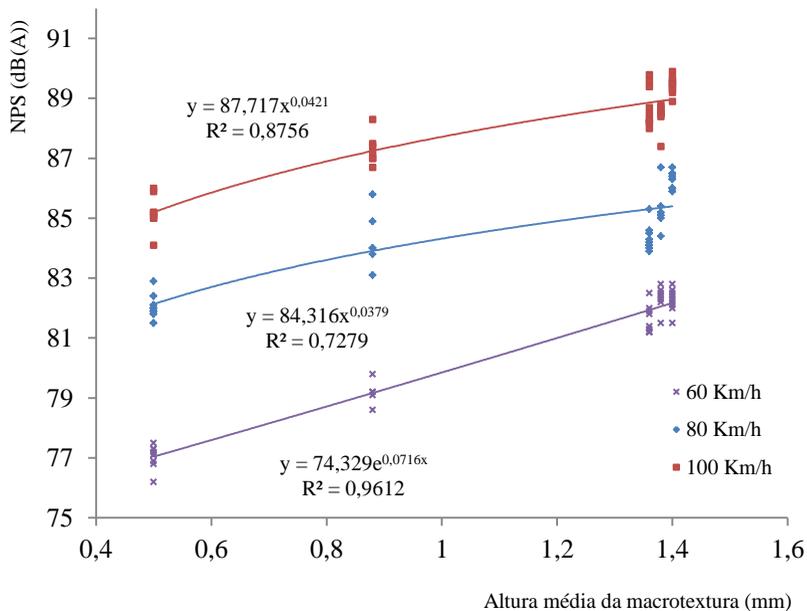


Figura 5.36 - Influência da macrotextura no nível de pressão sonora

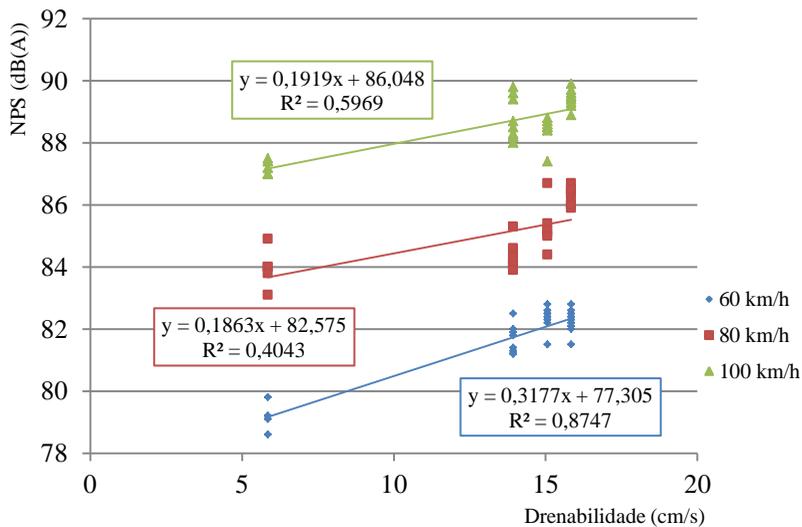


Figura 5.37 - Influência da drenabilidade no nível de pressão sonora

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

Para todos os ensaios de absorção sonora as misturas porosas (mistura drenante e camada porosa de atrito) apresentaram coeficiente de absorção superior em comparação com as misturas densas (mistura densa comum e mistura densa com borracha). Isso é explicado pelo alto volume de vazios das amostras porosas em que o som consegue penetrar entre os poros e ser absorvido pelo material em certas frequências.

Os resultados mostraram que todas as curvas de absorção sonora das misturas porosas se comportaram como um ressonador de Helmholtz, ou seja, existe um pico de absorção sonora na frequência de ressonância de Helmholtz.

Verificou-se uma pequena diferença no comportamento acústico entre as misturas drenantes com tamanho máximo do agregado de 9,5 mm e 12,5 mm. Em que, para o tamanho máximo do agregado menor (9,5 mm) o pico de absorção sonora foi um pouco maior.

Não se verificou diferença significativa da absorção sonora entre a mistura densa comum e a mistura densa com borracha.

Nos ensaios de absorção para dupla camada drenante observou-se que quanto maior a espessura do revestimento asfáltico maior será sua absorção analisando em todo espectro da frequência de trabalho. No entanto, para a redução do ruído de tráfego é mais importante que se tenha absorção sonora nas frequências entre 800 e 1000 Hz. Com isso, nesse caso, seria mais interessante a utilização da camada drenante simples em detrimento a dupla camada drenante.

Observa-se que a espessura do material determina a frequência onde ocorrem os maiores picos de absorção. Isso dá a possibilidade de otimizar o coeficiente de absorção sonora na frequência desejada através da espessura do material. Os resultados mostraram que para mistura drenante a espessura ideal do revestimento deve ficar entre 4,3 e 4,6 cm. Já para a CPA a espessura ideal deve ser de 4,0 cm.

Os resultados mostraram que o volume de vazios comunicantes é um parâmetro importante na absorção sonora. Apesar do volume de vazios semelhantes, a camada porosa de atrito possui volume de vazios comunicantes menores que as misturas drenantes. Com isso a sua absorção sonora foi menor, já que o ruído emitido é absorvido apenas superficialmente pela CPA, diferentemente da mistura drenante onde o som consegue penetrar em toda a amostra.

Nesse estudo dentre as misturas porosas, somente a CPA apresentou valores aceitáveis de desgaste Cântabro, ou seja, menor que 25%, além de ter apresentado valores maiores de resistência à tração.

Assim essa mistura apresentará um melhor desempenho mecânico em campo em relação às misturas drenantes. Como a diferença na capacidade de absorção sonora é baixa (0,75 para 0,93) acredita-se que seja mais recomendável a execução em campo de camadas tipo CPA em detrimento de camadas drenantes com elevado volume de vazios.

Com resultados encontrados, conclui-se que a absorção sonora é fortemente dependente do volume de vazios, vazios comunicantes e espessura do material.

A drenabilidade das misturas asfálticas é função do diâmetro máximo dos agregados, do volume de vazios e do volume de vazios comunicantes. Para todos os corpos de prova drenantes, aqueles que possuíam em sua mistura agregados com diâmetro máximo maior, obtiveram valores de drenabilidade maiores. Todos os corpos de prova de misturas drenantes obtiveram valores maiores de drenabilidade em comparação com a camada porosa de atrito, já que possuíam volume de vazios comunicantes maiores que a CPA.

Os resultados de campo mostraram que a textura do revestimento tem forte influência sobre o ruído gerado pelo acoplamento pneu-pavimento. Texturas chamadas positivas, ou seja, com alta rugosidade, geram o ruído provocado pela parcela do mecanismo mecânico de impactos e choques.

Os resultados mostraram que a camada porosa de atrito (CPA) foi a que apresentou menor geração do ruído individual quando comparada com os demais revestimentos. Essa redução foi significativa para velocidades acima de 65 km/h.

Essa redução do ruído da CPA pode ser explicada pela textura negativa da sua superfície, reduzindo os mecanismos de geração do ruído mecânico. Também pela alta porosidade do revestimento é possível reduzir a parcela do ruído de geração aerodinâmica. Apesar de não se tratar de um revestimento com elevado volume de vazios comunicantes, apresentou nos ensaios de laboratório um alto valor do coeficiente de absorção. Assim o ar, ainda que superficialmente, consegue escapar e reduzir essa parcela de ruído aerodinâmico provocada pelo contato pneu-pavimento.

Com os resultados encontrados é possível concluir que um revestimento ideal na redução do ruído gerado pelo contato pneu-pavimento é aquele capaz de diminuir os mecanismos mecânicos principalmente de impactos e choques melhorando a textura da sua superfície diminuindo o contato pneu-pavimento sem comprometer a aderência pneu-pavimento e que ainda consiga com que o ar do contato

pneu-pavimento possa escapar e reduzir o ruído gerado pelos mecanismos aerodinâmicos principalmente de bombeamento do ar.

## 6.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Recomenda-se para futuras pesquisas o estudo da absorção sonora para outros revestimentos de pavimento, como por exemplo, o revestimento de concreto exposto.

Na tentativa de encontrar um revestimento menos poroso, porém com um coeficiente de absorção significativo, recomenda-se o estudo de novas curvas granulométricas que atendam porosidades na faixa de 10 a 12%.

Para os ensaios de campo recomenda-se a utilização do trailer CPX em diferentes revestimentos e macrotextura das rodovias brasileiras. O trailer CPX está em processo de construção em um projeto conjunto entre a Engenharia Civil e a Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - NBR 10151: 2000. **Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento**. Associação Brasileira de Normas técnicas, 2000.
- ABNT - NBR 10152: 2000. **Nível de Ruído para Conforto Acústico**. Associação Brasileira de Normas técnicas, 2000.
- ABNT - NBR 12.179/1992. **Tratamento acústico em recintos fechados**. Disponível em: <<http://www.vibrasom.ind.br/produtos-acusticos/absorcao-acustica-construcao-civil.php>>. Acesso em: 11 abr. 2012.
- AFNOR NF P 98-250-2 - **Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage dès Plaques**. Association Française de Normalisation, 1991.
- AFNOR NF P 98-254-2. **Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés, partie 2**. Association Française de Normalisation, 1993.
- AFNOR NF S31-119-2: 2000. **Acoustique – Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées – Mesurages acoustiques au passage – partie 2: Procédure véhicule maîtrisé**. Association Française de Normalisation. Paris, 2000.
- AHAMMED, M. A.; TIGHE, S. L. **Acoustic Absorption of Conventional Pavements**. International Journal of Pavement Research and Technology. ISSN 1997-1400 Int. J. Pavement Res. Technol. 4(1):41-47. 2011.
- ALLARD, J. F., **Propagation of Sound in Porous Materials**. Elsevier Applied Science, London, 1993.
- ALVES FILHO, J. M., **O ruído no ambiente de trabalho: sua influência nos aspectos biopsicossociais do trabalhador**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2002.

ASTM E 303-93. **Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester**, 1993.

ASTM E 965, 1996. **Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. Annual Book of ASTM Standards, USA, 1996.

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

BEATTY, T. L., et al. **Pavement Preservation Technology in France, South Africa, and Australia**. Report FHWA-PL- 3-001. Federal Highway Administration, Washington, USA, 2002.

BENDTSEN, H. **Review of existing low noise surfaces**. Technical Conference, Madrid, 2006.

BENDTSEN, H.; ANDERSEN, B. **Noise-Reducing Pavements for Highways and Urban Roads**. State of the Art in Denmark, 2005.

BERANEK, L. L., **Noise and Vibration Control**. McGraw Hill, New York, 1971.

BERENGIER, M.; BESNARD, F.; DUPONT, P.; FÜRST, N.; DOISY, S.; BENSE, P.; MEUNIER, Y.; VERHEE, F. **Influence de la couche de roulement de la chaussée sur le bruit du trafic routier**. Comité français pour les techniques routières, SETRA, 2001.

BERGLUND, B.; LINDVALL, T.; SCHWELA, D. H. **Guidelines for Community Noise**. London, United Kingdom. 1999.

BERNHARD, R. J.; WAYSON, R. L. **A Introduction to tire/pavement noise**. The Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways Purdue University, 2005.

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

CERATTI, J. A.; SPECHT, L. P.; KOHLER, R.; KHATCHATOURIAN, O. A.; CALLAI, S. C. **Avaliação do Ruído Causado pelo Tráfego de Veículos em Diferentes Rodovias**, 2009.

CROCKER, M. J., **Rating measures, descriptors, criteria, and procedures for determining human response to noise**. Handbook of Acoustics, NEW York, 1997.

DELANY, M.E.; BAZLEY, N.E., **Acoustical Properties of Fibrous Materials**. Applied Acoustic 3, 1970)

DMRB - HD 36/06. Design Manual for Roads and Bridges. **Surfacing Materials for New and Maintenance Construction**. Volume 7, Section 5, 2006.

DNER-ME 081/98 Método de ensaio - **Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. p. 01/06.

DNER-ME 035/98 Método de ensaio - **Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles"**. p. 01/06.

DNIT, (2006a). **Manual de Pavimentação**. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ; Brasil.

DNIT (2006b). **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ; Brasil, 2006.

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.

EPA, US Environmental Protection Agency. **Public health and welfare criteria for noise**, Washington DC, 1973.

45th GRB. **Road vehicle noise reduction by low noise road surfaces in Japan**. Transmitted by expert in japan. 2007.

EJSMONT, J. A. **Tire/Road Noise Generating Mechanisms and Possible Ways of their Reduction.** Proc. of the Second International Seminar TIRE/ROAD NOISE, TUG, Polonia, 1997.

FEHRL. **Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces.** SILVIA - Sustainable road surfaces for traffic noise control. Brussels, Belgium, 2006.

FERNANDES, A. G. **Impacto de Ruído de Tráfego em Edificações Escolares: Metodologia de Avaliação para Diretrizes de Planejamento Urbano.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2002.

FERNANDES, E. S; DOMINGUES, F. A. A. **Considerações sobre a Micro e a Macrot textura de Pavimentos.** in 27<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, São Paulo, SP, 1993.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos.** Tese de Doutorado, UFSC, 2009.

FRANKLIN, R.; HARLAND, D; NELSON, P. **Road Surfaces and Traffic Noise.** TRRL Report. TRL Limited, Crowthorne, 1979.

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.

FUJIWARA, T.; MEIARASHI, S.; NAMIKAWA, Y.; HASEBE, M. **Reduction of equivalent continuous A-weighted sound pressure levels by porous elastic road surfaces.** Published by Elsevier Ltd. 2004.

GERGES, S. N. Y. **Ruído - Fundamentos e Controle.** 2<sup>a</sup> Edição, NR Editora. Florianópolis, 2000.

GERGES, S. N. Y.; ARENAS, J. P. **Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones.** NR Editora, Florianópolis, 2010.

GOLEBIEWSKI, R.; MAKAREWICZ, R.; NOWAK, M.; PREIS, A. **Traffic noise reduction due to the porous road surface**. Institute of Acoustics, Adam Mickiewicz University. Poland, 2002.

HAIDER, M. **Investigation and Classification of Low-Noise Concrete Roads**. Austrian Institute of Technology (AIT), Mobility Department. Vienna, Austria, 2010.

HANSON, D. I.; DONAVON, P.; JAMES, R. **Tire/pavement noise characteristics for HMA pavements**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Lino Lakes, 2005.

HANSON, D. I.; JAMES, R. S.; NESMITH, C. **Tire/Pavement Noise Study**. National Centes for Asphalt Technology. Alabama. NCAT Report 04-02. 2004.

HAMET, J. F.; KLEIN, P.; ANTOSSE, F.; DUHAMEL, D.; FADARI, A.; BÉGUET, B. **Road Profile Textura and Tire Noise. Pavement Surface Characteristic**. IV th International Symposium – SURF 2000. Nantes, 2000.

HENDRICKX, L. **Noiseless Concrete Pavements**. Technical sheet n° 18 of the FEBELCEM DOSSIER CEMENT, 1998.

ISO 10534-2 E: **Acoustics -- Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes -- Part 2: Transfer-function method**. 1998.

ISO 11819-1: **Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 1: Statistical Pass-By Method**. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, Switzerland, 1997.

ISO 11819-2: **Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on traffic noise – Part 2: The Close Proximity Method**. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, Switzerland, 2010.

ISO 13325: **Tyres - Coast-by methods for measurement to tyre-to-road sound emission**. International Organization for Standardization (ISO). Geneva: ISO, 2003.

ISO 13472-1: **Acoustics – Measurement of Sound Absorption Properties of Road Surfaces In Situ: Extend Surface Method.** International Organisation for Standardisation (ISO), Switzerland, 2002.

JURRIAANS, G.; KEULEN, W. V.; LUBBERHUIZEN, S.; BOKHOVEN, T. V. **New Design of Exposed Aggregate Surface for Northern Entrance of Apeldoorn Constructional and Acoustical Aspects.** Espanha, Sevilha, 2010.

KUIJPERS, A. **Temperature effects on tyre/road noise and on tyre stiffness.** Research Memo. Noise and Vibration Control, 2002.

KUIJPIERS, A.; VAN BLOKLAND, G. **Tyre/Road Noise Models in the Last Two Decades: a Critical Evaluation.** The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Hague, Netherlands. 2001.

LÁO, V. L. E. S. T. **Estudo Comparativo do Desempenho Acústico de Diferentes Tipos de Revestimento dos Pavimentos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. UFRJ, Rio de Janeiro. 2004.

LÉDÉE, A. F. **The Propagation Filter Between CPX and CPB Measurements.** Silvia Project Report, LCPC, 2006.

LEEUWEN, H. V.; KOK, A.; REUBSAET, J. **The uncertainty of acoustical measurements on road surfaces using the CPX-method.** INTER- NOISE, Istanbul, Turkey, 2007.

MASSARANI, M. P., **Método in situ de medição de absorção sonora de superfícies de rodagem.** Laboratório de Ensaios Acústicos LAENA, Duque de Caxias, RJ, Brasil, 2004.

MEIARASHI, S. **Porous Elastic Road Surface as an Ultimate Highway Noise Measure.** PWRI-The Public Works Research Institute. Japan, 2003.

MEURER FILHO, E. **Estudos de Granulometria para Concretos Asfálticos Drenantes**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

MOON, H.; HA, S. **The Effect of the Exposed Aggregate Concrete Pavement on the Reducing Traffic Noise Emission**. Korea Concrete Institute, 2003.

MORGAN, P.; SANDBERG, U.; BLOKLAND, G. V. **The selection of new reference test tyres for use with the CPX method, to be specified in ISO/TS 11819-3**. Inter Noise, Ottawa, Canadá, 2009.

NELSON, P. M.; PHILLIPS, S. **Designing Porous Road Surfaces to Reduce Traffic Noise**. Transportation Research Laboratory, Crow Thorne, Inglaterra, 1994.

NICHOLS, R.H., **Flow Resistance Characteristics of Fibrous Acoustical Materials**. J. Acoust. Soc. Am., 1947.

NLT 327/88. **Permeabilidade in situ de pavimentos drenantes com el permeámetro LCS**.

OLIVEIRA, C. G. M. **Estudo de Propriedades Mecânicas e Hidráulicas do Concreto Asfáltico Drenante**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

PASQUET, A. **Campagne Nationale de Glissance 1967 en France**, in Colloque International sur la Glissance et la Circulation sur Routes Mouillées, Berlin, 1968.

PIARC - **Report of the Technical Committee on Surface Characteristics**. World Road Congress, Marrakesh, 1991.

PICCOLI, C. **Concreto com Agregado Exposto para Pavimento Rígido**. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civi. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

PORTO, H. G., **Pavimentos Drenantes**. Editora D & Z, São Paulo, 105p, 1999.

RAABERG, J.; SCHMIDT, B.; BENDTSEN, H. **Technical Performance and Long-Term Noise Reduction of Porous Asphalt Surfaces**. Danish Road Institute, 2001.

RASMUSSEN, R. O.; BERNHARD, R. J.; SANDBERG, U.; MUN, E. P. **The Little Book of Quieter Pavements**. FHWA, USA. FHWA-IF-08-004. 2007.

SANZ, J. **Evaluación del Ruido de Rodadura en Carreteras**. UCLM, Ciudad Real. 2006.

SANDBERG, U. **Tyre/road noise - Myths and realities**. International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Hague, Netherlands, 2001.

SANDBERG, U.; DESCORNET, G. **Road Surface Influence on Tire/Road Noise**. Proceedings Inter-Noise 80. Miami, Estados Unidos da América, 1980.

SANDBERG, U.; EJSMONT J. **Tyre/Road Noise Reference Book**. Informex, Kisa, Sweden, 2002.

SANDBERG, U.; KALMAN, B. **The Poroelastic Road Surface – Results of an Experiment in Stockholm**. SILVIA PROJECT REPORT. Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control, 2006.

SANTOS, A. P. S. **Estudo da Eficácia na Redução do Ruído de Tráfego em Pavimentos Drenantes**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, Portugal, 2007.

SEVERO, L. E. P.; RUWER, P.; KLEIN, R. J.; MARELLA, R. M.; MASSARA, S.; GONÇALVES, F. P. **Utilização de Perfilômetro Laser para a Medida de Irregularidade Longitudinal e do Afundamento em Trilha de Roda**. 9º ENACOR-Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Natal-RN, 2004.

SPECHT, L. P.; KOHLER, R.; POZZOBON, C. E.; CALLAI, S. C. **Causas, formas de medição e métodos para mitigação do ruído decorrente do tráfego de veículos**. Fortaleza, v.30, n.1, p.12-26, 2009.

TEIXEIRA, G.L.; FREITAS, E.; YAMASHITA, Y. **Pavimentos modificados como forma de redução do nível de ruído do tráfego urbano.** 6º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Brasília, DF, 2001.

TOLSTOY, I. **Acoustics, Elasticity, and Thermodynamics of Porous Media.** Acoustic Society of America, New York. 1992.

TREVINO, M.; DOSSEY, T. **A Research Plan for Measuring Noise Levels in Highway Pavements in Texas.** VCTR, Center for Transportation Research, Texas, 2006.

WAY, G.B. **Where the Rubber Meets the Rubber.** Department of Transportation, Materials Group. Arizona, USA, 1998.

WAYSON, R. L. **Relationship Between Pavement Surface Texture and Highway Traffic Noise.** Transportation research board, 1998.