

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

BETTINA BUCHHOLZ

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO IMPACTO DA VARIAÇÃO DE CURVAS  
GRANULOMÉTRICAS NO NÍVEL DE ABSORÇÃO SONORA DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES, MUITO DELGADAS E DENSAS

Joinville

2020

BETTINA BUCHHOLZ

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO IMPACTO DA VARIAÇÃO DE CURVAS  
GRANULOMÉTRICAS NO NÍVEL DE ABSORÇÃO SONORA DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES, MUITO DELGADAS E DENSAS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) de Graduação apresentado ao Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra

Joinville

2020

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

Buchholz, Bettina

Avaliação comparativa do impacto da variação de curvas granulométricas no nível de absorção sonora de misturas asfálticas drenantes, muito delgadas e densas / Bettina Buchholz ; orientador, Breno Salgado Barra, 2020.

82 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,  
Graduação em Engenharia de Infraestrutura, Joinville, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Infraestrutura. 2. Curva granulométrica. . 3. Mistura asfáltica.. 4. Absorção sonora.. 5. Ruído. . I. Barra, Breno Salgado. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Infraestrutura. III. Título.

BETTINA BUCHHOLZ

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO IMPACTO DA VARIAÇÃO DE CURVAS  
GRANULOMÉTRICAS NO NÍVEL DE ABSORÇÃO SONORA DE MISTURAS  
ASFÁLTICAS DRENANTES, MUITO DELGADAS E DENSAS

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura.

Joinville, 17 de setembro de 2020.

---

Prof. Marcelo Heidemann, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Breno Salgado Barra, Dr.  
Orientador  
UFSC

---

Prof. Yader Alfonso Guerrero Pérez, Dr.  
Avaliador  
UFSC

---

Prof. Daniel Hastenpflug, Dr.  
Avaliador  
UFSC

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado forças para enfrentar e vencer todos os obstáculos que haviam no caminho e me separavam deste momento.

Agradeço à minha família pelo suporte durante os anos de graduação e apoio nos momentos que precisei. Agradeço em especial à minha mãe Claudia Bindemann Buchholz, à minha tia Elke Bindemann Richter e às minhas irmãs Nicole e Caroline por serem sempre meu porto seguro nos períodos de dificuldade.

Aos amigos que conquistei durante essa caminhada, por me ensinarem todos os dias os valores de uma amizade, e em especial aos amigos integrantes da ESATI, por todo o companheirismo, incentivo e crescimento que vivenciamos juntos.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina, instituição que carregou e sempre carregarei no coração. Sou eternamente grata a todos os professores que me acompanharam nessa trajetória, em especial o meu orientador Breno Salgado Barra, pelo suporte e incentivo.

Por fim, agradeço às empresas Rudnick Minérios, Petrobrás, CBB Asfaltos e ao Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), por disponibilizarem os insumos e equipamentos necessários à pesquisa, bem como ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pelo apoio financeiro através da bolsa de pesquisa.

## RESUMO

A pesquisa desenvolvida contribui com soluções que propiciam qualidade acústica de trafegabilidade tanto aos usuários de estruturas de pavimento quanto à sociedade habitante de áreas lindeiras e zonas urbanas, sob a perspectiva de mitigações dos ruídos causados no meio-ambiente pelo contato pneu-pavimento. O objetivo principal do trabalho é avaliar comparativamente o impacto da variação de curvas granulométricas no nível de absorção sonora de misturas asfálticas. Para tanto, as composições granulares foram compostas com base no método teórico, utilizando a equação de Fuller-Talbot, para determinação da graduação do material. Foram analisadas três curvas granulométricas, com características densa (*Béton Bitumineux Semi-Grenus* - BBSG), semi-densa (*Béton Bitumineux Très Mince* - BBTM) e aberta (*Béton Bitumineux Drainante* - BBDr), compreendendo a variação do diâmetro considerado máximo na série de peneiras, 19,1mm (BBSG) e 12,7mm (BBTM e BBDr), bem como da inserção de descontinuidade fracionária no intervalo 2/6mm (BBTM e BBDr). Os granulares utilizados são oriundos da britagem de rocha gnáissica e os ligantes betuminosos de penetração 30/45 (0,1mm) para a mistura BBSG e com matriz base de penetração 50/70 com adição de 4% de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) (Poliflex 60/85) para as misturas BBTM e BBDr. As misturas asfálticas foram produzidas no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville, a partir da metodologia Marshall, em função de ser oficialmente adotada no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), logo, aplicada nas obras rodoviárias brasileiras. As medidas de absorção sonora foram efetuadas com o equipamento denominado tubo de impedância acústica ou tubo de Kundt, do Centro de Pesquisas (CENPES) da Petrobrás, a fim de determinar o coeficiente de absorção sonora das misturas asfálticas produzidas em laboratório. Os resultados obtidos indicam que a concepção de curvas granulométricas que compreendem descontinuidades em sua distribuição fracionária, como as misturas BBTM e BBDr, a partir da geração de maior volume de vazios na estrutura interna do material, são mais eficientes na propiciação de absorção sonora em relação às misturas densas (BBSG). Sendo assim, são mais recomendadas para uso em camadas superficiais de rolamento nas estruturas de pavimento. Em contrapartida, a natureza do ligante betuminoso parece não influenciar de forma decisiva nesta propriedade.

**Palavras-chave:** Curva granulométrica. Mistura asfáltica. Absorção sonora. Ruído.

## ABSTRACT

The main aim of this research is to evaluate comparatively the impact of distinct aggregate gradations on the sound absorption level of asphalt mixes. The granulometric curves were formulated based on the theoretical method of Füller-Talbot, in order to determine the gradation of the material. Three granulometric curves were analyzed, so-called as dense (*Béton Bitumineux Semi-Grenus* - BBSG), semi-dense (*Béton Bitumineux Très Mince* - BBTM) and opened (*Béton Bitumineux Drainante* - BBDr), comprising the variation of the maximum diameter of the sieve opening series, 19,1mm (BBSG) e 12,7mm (BBTM and BBDr), as well as the insertion of fractional discontinuity in the interval 2/6mm (BBTM and BBDr). The granular fractions are provided by gneissic crushed massive rock and the asphalt binders have penetration 30/45 (0,1mm) for BBSG and a base matrix 50/70 added to 4,0% of polymer Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) for BBTM and BBDr. The asphalt mixes were produced in the Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) from Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville, taking into account the Marshall methodology, due to be officially homologated in Brazil by Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), thus, applied in road works. The sound absorption measurements were carried out at Centro de Pesquisas (CENPES) from Petrobrás, with an equipment so-called acoustic impedance tube or Kundt tube, aiming at to determine the sound absorption coefficients of the asphalt mixes produced in laboratory. The results obtained indicate that the conception of semi-dense and opened granulometric curves, mainly those with fractional discontinuities as BBTM and BBDr, provide higher air void volumes and, consequently, better sound absorption capacity than dense asphalt mixes, such as BBSG, being more recommended to be used as surface layers in pavement structures. In addition, the nature of the asphalt binder seems not to be decisively influent in this property. Therefore, the present research contributes with solutions that provide acoustic quality with regards the trafficability not only to the users but to inhabitant of road bordering and urban zones, considering the perspective of mitigating noise generated in the environment by the tire-pavement contact.

**Palavras-chave:** Aggregate gradation. Asphalt mix. Sound absorption. Noise.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Fluxograma da Pesquisa.	17
Figura 2.1	- Mecanismo da Viscoplanagem.	25
Figura 2.2	- Diferença entre Macrotextura e Microtextura do Pavimento.	26
Figura 2.3	- Drenagem Sobre Revestimento Molhado.	29
Figura 2.4	- Aspectos dos Tipos de Vazios de um Pavimento Poroso.	30
Figura 2.5	- Variação da Pressão Sonora em Relação à Pressão Atmosférica.	31
Figura 2.6	- Gráfico de Audibilidade.	32
Figura 2.7	- Transmissão e Reflexão de uma Onda Incidente.	33
Figura 3.1	- Contribuição das Fontes de Ruído no Automóvel.	39
Figura 3.2	- Ruído Total de um Carro Médio.	39
Figura 3.3	- Contribuição do Ruído do Motor e do Ruído de Rolamento.	40
Figura 3.4	- Vibrações Radiais no Contato da Banda de Rodagem com o Pavimento.	41
Figura 3.5	- Ruído do Fenômeno de Bombeamento de Ar.	42
Figura 3.6	- Radiação Sonora do Efeito Corneta.	43
Figura 3.7	- Reflexão do Ruído de uma Superfície de Pavimento Denso.	44
Figura 3.8	- Reflexão do Ruído na Superfície de Pavimento Poroso.	44
Figura 3.9	- Influência da Textura da Superfície do Pavimento.	47
Figura 3.10	- Aspectos de Textura Positiva e Negativa.	47
Figura 3.11	- Desempenho Acústico dos Pavimentos ao Longo do Tempo para Veículos a 50 Km/h.	55
Figura 3.12	- Desempenho Acústico dos Pavimentos ao Longo do Tempo para Veículos a 110 Km/h.	55
Figura 4.1	- Tubo de Impedância.	56
Figura 4.2	- Esquema de Medição da Absorção Sonora <i>In Situ</i> .	58
Figura 4.3	- Câmara Reverberante.	59
Figura 4.4	- Esquema de Medição do Método do Tubo Guarda.	60
Figura 5.1	- Curvas Granulométricas das Misturas Asfálticas BBSG, BBDr e BBTM.	64



Figura 5.2	- Soquete Marshall.	65
Figura 5.3	- Representação da Estrutura do Pavimento com as Camadas de Rolamento e de Ligação.	67
Figura 5.4	- Aplicação da Emulsão na Interface dos Conjuntos de Amostras.	67
Figura 5.5	- Conjuntos de Amostras após a Aplicação da Emulsão em suas Interfaces: Esquerda (BBDr/BBSG), Centro (BBTM/BBSG) e Direita (BBSG/BBSG).	68
Figura 5.6	- Tubo de Impedância Utilizado na Campanha Experimental.	69
Figura 5.7	- Curva de Absorção Sonora em Relação à Frequência do Conjunto BBSG/BBSG.	72
Figura 5.8	- Curva de Absorção Sonora em Relação à Frequência da Mistura Asfáltica BBTM.	73
Figura 5.9	- Curva de absorção sonora em relação à frequência da mistura asfáltica BBDr.	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	- Influência da Velocidade e Quantidade de Água na Emissão de Ruído.	50
Tabela 5.1	- Caracterização da Matriz Granular Pétreo.	61
Tabela 5.2	- Caracterização do ligante Betuminoso 30/45 (0,1 mm).	62
Tabela 5.3	- Caracterização do ligante Betuminoso 60/85.	62
Tabela 5.4	- Curvas Granulométricas Utilizadas na Composição das Misturas Asfálticas.	63
Tabela 5.5	- Propriedades Volumétricas das Misturas Asfálticas.	66
Tabela 5.6	- Composição dos Conjuntos de Amostras.	66

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
1.1.	OBJETIVOS	15
1.1.1.	Objetivo Geral	15
1.1.2.	Objetivos Específicos	15
1.2.	PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	16
1.3.	JUSTIFICATIVA: RELEVÂNCIA DO TEMA	18
1.4.	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	19
1.5.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2.	<b>ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO E PROPRIEDADES ACÚSTICAS</b>	21
2.1.	QUANTO À ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO	21
2.1.1.	Conceito de Aderência	21
2.1.2.	Presença de Água na Área de Contato Pneu-Pavimento	22
2.1.2.1.	Fenômeno de Hidroplanagem	23
2.1.2.2.	Fenômeno de Viscoplanagem	24
2.1.3.	Textura Superficial do Pavimento	25
2.1.3.1	Microtextura	26
2.1.3.2.	Macrotextura	27
2.1.4.	Drenabilidade e Permeabilidade	28
2.2.	PROPRIEDADES ACÚSTICAS	30
2.2.1.	Frequência	30
2.2.2.	Ruído	32
2.2.3.	Impedância Acústica	32
2.2.4.	Coefficiente de Absorção Sonora	33

3.	<b>FATORES INFLUENTES NA PRODUÇÃO DO RUÍDO E NA ABSORÇÃO SONORA DO CONTATO PNEU-PAVIMENTO</b>	35
3.1.	QUANTO ÀS FONTES DE RUÍDOS PRODUZIDAS	35
3.1.1.	Fontes de Ruído Advindas dos Veículos	35
3.1.1.1.	Do Motor	35
3.1.1.2.	Do Contato Pneu-Pavimento	36
3.1.1.3.	Dos Efeitos Aerodinâmicos	36
3.1.1.4.	Das Vibrações e Choques dos Componentes de Veículo	37
3.1.1.5.	Da Predominância do Ruído de Rolamento	37
3.1.2.	Fontes de Ruído Advindas do Contato Pneu-Pavimento	40
3.1.2.1.	Vibrações dos Pneumáticos	40
3.1.2.2.	Bombeamento de Ar ( <i>air pumping</i> )	40
3.1.2.3.	Propagação Sonora do Efeito Diedro (Corneta)	41
3.1.2.4.	Propagação do Ruído	42
3.1.3.	Fontes de Ruído Advindas das Características dos Revestimentos	44
3.1.3.1.	Irregularidades Superficiais	44
3.1.3.2.	Porosidade	47
3.1.3.3.	Comportamento Viscoelástico	48
3.1.3.4.	Superfície Molhada	48
3.2.	FATORES INFLUENTES NA ABSORÇÃO SONORA DOS REVESTIMENTOS	49
3.2.1.	Teor de Vazios e Descontinuidade Granulométrica	49
3.2.2.	Redução do Tamanho dos Granulares	50
3.2.3.	Integração de Matrizes Elastoméricas	50
3.2.4.	Velocidade de Rolamento	51
3.2.5.	Constituição de um Revestimento Silencioso	52
3.2.6.	Degradação Acústica	53

4.	<b>MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA EM MISTURAS ASFÁLTICAS</b>	55
4.1.	TUBO DE IMPEDÂNCIA OU DE KUNT	55
4.2.	ONDAS SONORAS COM INCIDÊNCIA NORMAL <i>IN SITU</i>	56
4.3.	CÂMARA REVERBERANTE	57
4.4.	<i>GUARD TUBE MÉTHOD</i> OU MÉTODO DO TUBO GURDA	58
5.	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	60
5.1.	MATRIZ PÉTREA	60
5.2.	LIGANTES BETUMINOSOS	60
5.3.	COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS	61
5.4.	COMPOSIÇÃO DSA AMOSTRAS DE TESTE	64
5.5.	MEDIÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA	67
6.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	71
7.	<b>CONCLUSÕES</b>	75
	<b>REFERÊNCIAS</b>	77

## 1. INTRODUÇÃO

O ruído é um forte tipo de poluição ambiental. Para a população europeia, por exemplo, a poluição sonora se encontra no topo das listas de reclamações. Apontada como de importância equiparada com o aquecimento global, as principais fontes de ruído em meios urbanos contribuintes para a poluição sonora provém do tráfego de carros de passeio, veículos de carga, trens e aviões (OLIVEIRA, 2007).

O som pode ser definido como pequenas flutuações em torno da pressão atmosférica, sendo que toda superfície vibrante pode gerar som por processos aerodinâmicos. Como exemplo, quando a carcaça do pneu entra em contato com a superfície do pavimento, um fenômeno vibratório ocorre no pneu, gerando o som (ASTRANA JUNIOR, 2006).

As percepções auditivas não necessariamente são indesejáveis, visto que o som transmite informações positivas da sua fonte. O som emitido ao fechar a porta de um carro, por exemplo, pode indicar robustez, solidez e conforto. Quando a impressão auditiva é incômoda, uma qualidade negativa é associada ao som que em geral é denominado ruído (VAN DER AUWERAER, 2005).

Segundo Sandberg e Ejsmont (2002), 0 a 130 decibéis é a faixa de nível de pressão sonora sensível ao ouvido humano, sendo que o valor limiar de dor para a audição humana é de 130 decibéis. Relacionado ao ruído total emitido por um veículo, o autor afirma ainda, que a totalidade sonora emitida é determinada pela junção de duas fontes predominantes, sendo elas a interação do pneu com o pavimento e o funcionamento do trem de força do veículo. Quando em velocidades baixas, o ruído dominante provém do trem de força do veículo, já em velocidades altas, acima de 40 Km/h, o ruído dominante é advindo da interação pneu/pavimento.

Uma das maneiras de interferir no nível de ruído gerado pela interação pneu/pavimento é a utilização de pavimentos mais silenciosos. Segundo Knabben (2018), a rigidez do pavimento influencia na geração de ruído pneu/pavimento. Pavimentos rígidos, mesmo apresentando textura mais lisa, produzem maior ruído em comparação com pavimentos flexíveis. Sendo assim, uma mistura asfáltica que apresenta menor rigidez, tenderá a reduzir as forças de impacto transmitidas ao pneu, atenuando assim, o nível de vibração do contato.

Nesse contexto, o presente trabalho avalia o nível de absorção sonora de três tipos distintos de misturas asfálticas, a saber: *Béton Bitumineux Drainante* (BBD<sub>r</sub>), *Béton*

*Bitumineux Très Mince* (BBTM) e *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), de características granulométricas aberta, semi-densa e densa. Os corpos de prova foram moldados no compactador Marshall por ser a metodologia oficialmente adotada no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a absorção sonora foi medida com o uso do tubo de impedância de Kundt.

Segundo Dumke (2005), a mistura BBDr foi desenvolvida para permitir a passagem da água pluvial pelo seu interior, a partir de descontinuidade em sua composição granulométrica, com o intuito de drenar a camada de água remanescente na superfície da pista de rolamento. São misturas asfálticas caracterizadas pelo elevado volume de vazios, na sua composição apresenta acima de 16% de vazios após o espalhamento e a compactação.

O BBTM, concreto betuminoso muito delgado, é uma mistura asfáltica com granulometria descontínua, aplicado em camadas finas e empregado tanto para execução de pavimentos novos quanto para processos de restauração. Na França, país onde a técnica é mais utilizada, o argumento para sua utilização em operações de manutenção das rodovias são os ganhos econômicos e o satisfatório desempenho com relação ao conforto e à segurança dos usuários (FERREIRA, 2006).

De acordo com Siroma (2018), o BBSG se trata de uma mistura asfáltica densa, utilizada em camadas de rolamento ou de ligação, com espessuras variando entre 5,0cm e 9,0cm e apresenta boa resistência à deformação permanente.

## 1.1. OBJETIVOS

Foram definidos objetivos gerais e específicos para orientação acerca do desenvolvimento deste trabalho.

### 1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar comparativamente, em âmbito laboratorial, o impacto da variação de curvas granulométricas no nível de absorção sonora de misturas asfálticas.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram considerados:

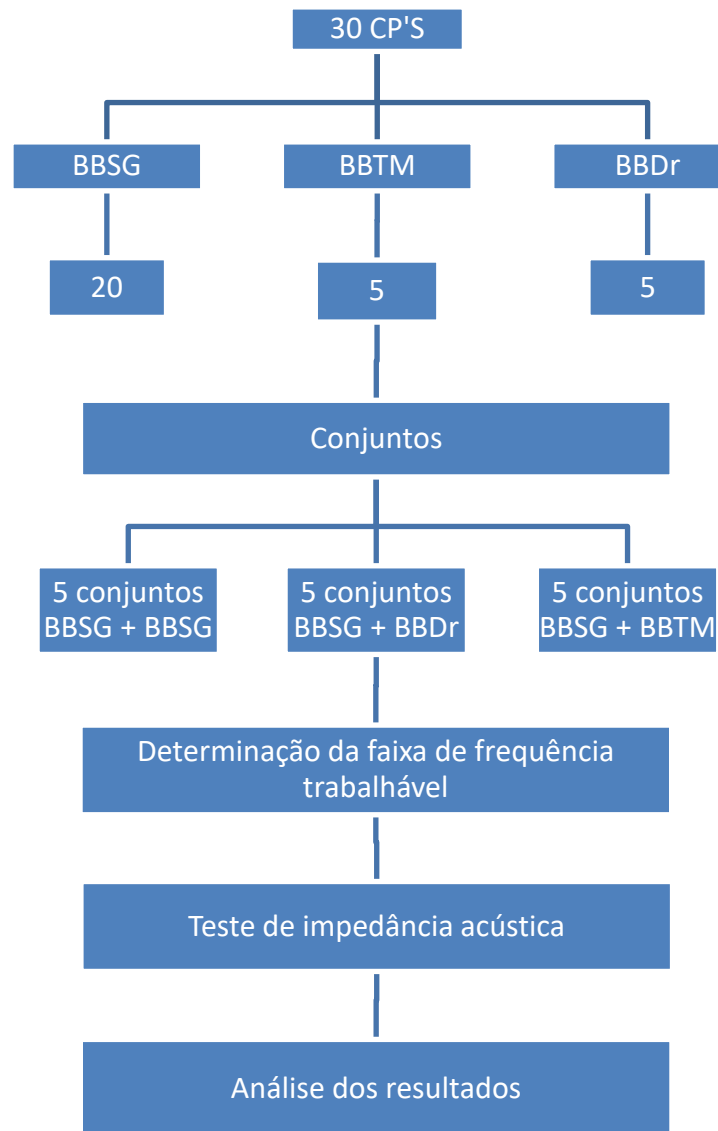
- Compor conjuntos de amostras de misturas asfálticas com características densa (BBSG), semi-densa (BBTM) e aberta (BBD<sub>r</sub>), formuladas granulometricamente a partir da metodologia racional de Füller-Talbot, com base nos princípios conceptivos franceses, oriundas de pesquisas previamente realizadas;
- Determinar a faixa de frequência a ser utilizada na campanha experimental, de modo que seja capaz de compreender os níveis de ruído gerados em campo sob movimento dinâmico no contato pneu-pavimento;
- Verificar, de forma comparativa, como concepções granulométricas distintas influenciam nos indicadores de absorção sonora das misturas asfálticas.

## 1.2. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

A Figura 1.1 ilustra o fluxograma seguido para o cumprimento dos objetivos da pesquisa.



Figura 1.1 - Fluxograma da Pesquisa.



Fonte: Autor (2020).

Para o desenvolvimento do estudo dos concretos asfálticos, os mesmos foram confeccionados utilizando materiais granulares metamórficos provenientes da jazida pétreia de gnaiss da empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada no município de Joinville/SC.

O ligante betuminoso utilizado para a elaboração dos corpos de prova BBSG foi o de penetração CAP 30/45 (0,1mm), fornecido pela empresa CBB Asfaltos de Curitiba/PR, e proveniente da Refinaria de Paulínia (REPLAN) da Petrobrás. No caso das misturas asfálticas BBDr e BBTM foi utilizado um ligante base de penetração 50/70 (0,1mm) com adição de 4% do polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), denominado Poliflex 60/85. Os parâmetros de caracterização dos ligantes asfálticos utilizados foram das pesquisas de Siroma (2018) e Fagundes (2020).

Foram moldados 30 corpos de prova a partir do uso do compactador Marshall, metodologia oficialmente adotada no Brasil pelo Departamento de Infraestrutura de Transporte (DNIT) (DNER-ME 043, 1995), sendo 20 unidades da mistura asfáltica BBSG e 5 cinco para a BBDr e BBTM. Os teores de ligante asfáltico utilizados na dosagem BBDr e BBTM foram previamente definidos por Fagundes (2020), na proporção em peso de 4,22%, enquanto que para a BBSG foi utilizado o teor de 4,86%, também em peso, definido por Barra (2009).

Produzidos os 30 corpos de prova, foram formados conjuntos de 5 amostras superpostas com as seguintes composições: BBSG/BBSG; BBTM/BBSG e BBDr/BBSG, totalizando quinze conjuntos. A adesão das faces amostrais foi realizada a partir de aplicação de emulsão asfáltica RL-1C.

Para a realização dos ensaios de forma coerente com a realidade acústica na qual os pavimentos estão inseridos, foram determinadas as faixas de frequência mínima, central, máxima e de corte para submissão dos corpos de prova aos testes, de tal forma que compreendesse a frequência de 1000Hz, tomada como referência quanto ao incômodo gerado pelos veículos no contato pneu-pavimento nas rodovias (CALLAI, 2011). A medição da absorção sonora foi realizada utilizando um tubo de impedância, também denominado de tubo de Kundt.

### 1.3. JUSTIFICATIVA: RELEVÂNCIA DO TEMA

A relevância desta pesquisa é justificada pela caracterização de materiais a serem utilizados na pavimentação, almejando propriedades que beneficiem a absorção sonora dos ruídos emitidos pela movimentação do tráfego, a fim de reduzir o impacto total destes no ambiente. A mitigação do ruído através da utilização de superfícies absorventes acusticamente é o meio encontrado para abordar o problema, visto que a não produção do ruído durante a rolagem dos pneus é impraticável (ASTRANA JÚNIOR, 2006).

O modal de transporte mais utilizado no Brasil, tanto para cargas quanto para passageiros é o modal rodoviário. O impacto ambiental gerado pelos veículos pertencentes a este modal em centros urbanos e regiões próximas às vias de tráfego, implicam na desvalorização imobiliária da região, visto que na implantação de uma nova rodovia não estão vinculados estudos referentes à agressividade do ruído que poderá afetar os moradores da região e ainda, se este ruído se adequará dentro dos limites toleráveis de emissão (SCHERER *et al.*, 2008).

Além da desvalorização imobiliária, outra dificuldade imposta pela excessiva emissão de ruído de tráfego é o êxodo da região afetada. Na cidade de São Paulo, zonas centrais estão sendo abandonadas pelo fato de estarem expostas a níveis de ruído de tráfego muito acima dos valores toleráveis para audição humana (PIMENTEL-SOUZA, 1999).

O estudo da absorção sonora de diferentes misturas asfálticas que será abordado nesta pesquisa, contribui para a busca de soluções que visam minorar o impacto ambiental proveniente da movimentação do tráfego nas cidades, além de agregar à bibliografia a respeito do tema no país, em razão da escassa abordagem do assunto em produções científicas brasileiras, além de pouco ou não controlada nas rodovias brasileiras.

Segundo Bernucci *et al.*, (2008), as rodovias brasileiras são predominantemente compostas por revestimentos de concreto asfáltico denso. Portanto, o âmbito da pesquisa acerca das propriedades acústicas destes materiais, é de grande importância no que tange a busca por melhorias no nível de ruído emitido pelo tráfego no país, o que implica diretamente na redução do impacto ambiental advindo da demasia de sons provenientes do rolamento dos veículos automotores.

Logo, é necessário o entendimento e aplicação dos conhecimentos acerca de soluções que venham a mitigar o ruído originado nas vias. Cabendo mais especificamente a esta pesquisa a quantificação do ruído absorvido por cada uma das superfícies analisadas, a fim de se obter informações relevantes a respeito dos benefícios adquiridos ao empregar cada uma das misturas asfálticas testadas.

#### 1.4. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa se restringe à análise do nível de absorção sonora de misturas asfálticas em âmbito laboratorial, não sendo parte dos seus objetivos em qualquer momento a execução de procedimentos de campo ou similares.

Reitera-se que a parte experimental foi desenvolvida nos Laboratórios de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), da UFSC/Joinville, e do Centro de Pesquisa (CENPES) da Petrobrás, na Ilha do Fundão/RJ, subdividido da seguinte forma:

- LDTPav: procedimento de peneiramento, separação dos traços e produção das amostras de teste;
- CENPES: execução dos testes de absorção sonora.

Cabe ressaltar que todas as análises feitas neste trabalho são válidas para as condições adotadas nesta pesquisa

## 1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução do tema objeto de pesquisa, deixando o leitor integrado ao problema, aos objetivos do autor e ao panorama do trabalho.

Capítulo 2: Trata dos aspectos conceituais que regem a aderência pneu-pavimento e as principais propriedades acústicas.

Capítulo 3: Discorre sobre os fatores que intervêm na produção do ruído e na absorção sonora no contato pneu-pavimento.

Capítulo 4: Aborda os métodos de medição da absorção sonora em misturas asfálticas.

Capítulo 5: Aborda os materiais e métodos utilizados na execução da pesquisa.

Capítulo 6: Expõe os resultados dos ensaios executados, seguido de uma análise das variáveis de influência dos parâmetros estudados.

Capítulo 7: Apresenta as conclusões advindas da pesquisa realizada e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2. ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO E PROPRIEDADES ACÚSTICAS

O objetivo da apresentação deste capítulo consiste em expor conceitos relevantes acerca das características dos revestimentos de pavimentos e fatores intrínsecos ou externos. Estes fatores podem influenciar no conforto, economia e segurança dos usuários das rodovias, bem como introduzir conceitos de acústica que estão vinculados com o fenômeno de geração de ruído a partir da movimentação do tráfego.

### 2.1. QUANTO À ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

#### 2.1.1. Conceito de Aderência

A aderência pneu-pavimento é comumente analisada através do coeficiente de atrito existente no contato entre as duas superfícies. Segundo Ramalho *et al.* (2007), quando uma superfície sólida desliza sobre outra, uma força de resistência oposta ao movimento relativo dos corpos é gerada, essa força é denominada força de atrito. O módulo desta força é dependente principalmente de dois fatores, o módulo da força normal às superfícies de contato e o material do qual as superfícies são constituídas, o que define o coeficiente de atrito entre elas. A parcela da força de atrito decorrente das características das superfícies de contato, neste caso, estão vinculadas à textura do pavimento e à banda de rodagem do pneu.

O valor do atrito de rolamento varia com diversos fatores, tais como: a estrutura do pneu, tanto no material constituinte quanto na construção da sua estrutura, sendo ela radial ou transversal; condições de operação do pneu, como pressão de enchimento, velocidade e temperatura e as características da superfície de rolamento (RODRIGUES FILHO, 2006).

Segundo Momm (1998), o atrito gerado a partir do contato entre duas superfícies é explicado por dois fenômenos distintos, a adesão molecular e a histerese. A adesão molecular está vinculada o contato direto de uma superfície com a outra em uma interação molécula com molécula, denominada de força de Van der Waals. Como este fenômeno ocorre através da interação direta entre as moléculas de ambas as superfícies, para que o mesmo ocorra é necessário que não haja nenhum outro material obstruindo a interface, por este motivo, a adesão molecular é considerada uma área real de contato em superfície seca, pois a água, no caso se uma superfície molhada, interferiria as forças moleculares entre as superfícies. Quanto

maior a área de contato, maior a adesão molecular, sendo assim, o atrito por adesão molecular é menor quanto maior rugosa for a superfície.

Relacionado ao atrito por histerese, o autor afirma que o termo está relacionado a energia por deformação, a deformação viscoelástica da borracha da banda de rodagem do pneu. É necessário primeiro haver a deformação do material do pneu para depois o movimento acontecer. Quanto mais murcho um pneu estiver, mais ele deformará, sendo assim, mais energia será consumida no fenômeno de deformação, resultando em uma energia menor para fins de locomoção do veículo, bem como, quanto mais áspera a superfície, maior a deformação do pneu.

Segundo Mattos (2009), quanto se trata de segurança viária, a aderência pneu-pavimento é o primeiro item a ser considerado, pois é um fator que possibilita ao motorista manter a trajetória do veículo mesmo quando submetido à condições adversas. Sendo assim, uma boa interação do pneu com o pavimento deve ser garantida e a maneira mais eficaz para que isso ocorra é garantindo uma boa qualidade da superfície de rolamento.

A definição de aderência, por fim, abrange os efeitos da adesão molecular e da histerese. Estes efeitos estão diretamente correlacionados com a velocidade de deslocamento do veículo, com a presença de água entre as duas superfícies, com a forma da superfície de deslocamento, sua microtextura, macrotextura e megatextura, bem como com a forma das esculturas do pneu (MOMM, 1998).

### 2.1.2. Presença de Água na Área de Contato Pneu-Pavimento

A interação entre o pneu e a superfície do pavimento é afetada pela qualidade da área de contato entre esses dois elementos. Sendo assim, de maneira simplificada, quando há elementos que operam como lubrificante entre o pneu e o pavimento a perda de aderência é vinculada a redução da área de contato entre os mesmos. A redução da área de contato com a presença de água na pista está atrelada a velocidade com a qual o veículo se desloca, devido à progressiva ascensão do fluido na parte anterior do pneu com o aumento da velocidade (MATTOS, 2009).

Segundo Momm (1998), a água presente na superfície do pavimento interage de modo muito forte nas relações de forças que ocorrem na área de contato pneu-pavimento e sua espessura variável e interfere no fenômeno que pode ocorrer com o deslocamento do veículo.

Momm (1998), distingue três tipos de contato entre o pneu e o pavimento através da espessura de água presente na interface, são eles: o contato seco, o contato úmido e o contato

molhado. O contato seco não apresenta interferências na aderência. Espessura de lâmina d'água superior a 1 mm é atribuída a contato molhado, já lamina d'água com espessura inferior a este valor é atribuído ao contato apenas úmido.

Essa distinção é importante pelo fato de a quantidade de água na pista interferir nos fenômenos físicos que ocorrem em cada situação. A presença de uma fina película de água, considerada apenas como umidade, geram problemas de viscoplanagem, já um contato molhado pode originar uma hidroplanagem.

#### 2.1.2.1. Fenômeno de Hidroplanagem

Em revestimentos molhados, quando o veículo se movimenta sobre a pista há o acúmulo de água na parte frontal do pneu que faz com que as pressões hidrodinâmicas sejam desenvolvidas na área de contato pneu-pavimento. Dependendo da velocidade de deslocamento e da condição da superfície da pista, a pressão resultante do fenômeno de hidroplanagem pode superar a carga proveniente da pressão exercida pelo pneu sobre o pavimento, a aderência de torna nula e acarreta a perda de contato do veículo com o solo, levando a perda de controle do veículo (OLIVEIRA *et al.*, 2003).

A hidroplanagem pode ocorrer em toda a área de contato pneu-pavimento ou de forma parcial. Porém, a hidroplanagem completa se dará apenas com a perda total de contato entre as superfícies, onde ocorre a separação integral das superfícies pela camada de líquido interposta (MOMM, 1998). O autor afirma ainda que os fatores determinantes para a ocorrência deste fenômeno são a velocidade do veículo e a espessura da lâmina de água presente na pista, porém, outros fatores como a pressão de insuflagem e a escultura dos pneus também são fatores críticos do fenômeno.

Em dias chuvosos, a preocupação com interação pneu pavimento surge principalmente no que diz respeito à quantidade de água sobre a camada de rolamento, bem como, a capacidade de drenagem do pavimento e a evacuação da água através das ranhuras do pneu (CARDOSO *et al.*, 1995).

Momm (1998), afirma que declividades longitudinal e transversal insuficientes, agregadas a alta pluviosidade da região de implantação da rodovia, possibilitam o acúmulo de água na pista de rolamento gerando poças e até corredeiras sobre a superfície que potencializam a ocorrência do fenômeno de hidroplanagem.

Além destes fatores, variáveis como as vibrações no veículo causadas pelas irregularidades da via, além da sua própria geometria, também devem ser considerados,

afirma Dumke (2005). O autor salienta ainda que há dificuldade de o condutor identificar o fenômeno de hidroplanagem com tempo suficiente para impedi-lo, visto que a percepção só se dá quando o controle da direção do automóvel já está comprometido.

Segundo Momm (1998), vários autores tentam determinar a velocidade limiar crítica a partir da qual ocorre a hidroplanagem. Porém, a construção de correlações para realização de tais cálculos é complexa, visto a quantidade de incertezas e variáveis que o fenômeno envolve. Pode-se afirmar que tanto o aumento da espessura de lâmina de água sobre o pavimento quanto a redução da velocidade de deslocamento do veículo, reduz a velocidade limiar crítica de hidroplanagem.

#### 2.1.2.2. Fenômeno de Viscoplanagem

Segundo Do (1995), o fenômeno de viscoplanagem está relacionado com a perda de aderência originada por uma delgada película de água na superfície do pavimento, lâmina de água estimada em cerca de 0,1 mm. O autor afirma que a maioria dos acidentes por derrapagem na água não ocorrem por hidroplanagem, mas sim, por viscoplanagem, que está vinculada apenas a umidade sobre a pista, ou seja, sem ser necessária uma grande quantidade de água.

Um delgado filme de água entre o pneu e o pavimento pode acarretar em um deslocamento relativo entre as duas superfícies no domínio da viscosidade da água, e são as asperezas do pavimento, os elementos capazes de romper este filme de água que impede a interface requerida. Porém, o polimento ao qual os materiais componentes do pavimento estão suscetíveis através do uso, reduz significativamente a capacidade das arestas de romperem a película, se tornando um fator inibidor da aderência dos pavimentos (MOMM, 1998).

De acordo com Do (1995), as causas do fenômeno de viscoplanagem são a existência de um filme de água que não consegue ser totalmente expulso da superfície. Isto se dá devido ao curto período de contato entre o pneu e o pavimento e a aspiração de um filme de água para o pico das asperezas, seguido de uma derrapagem do pneu sobre a superfície do pavimento.

Segundo Momm (1998), a presença de uma fina película, inferior a 0,1 mm de água sobre o pavimento subdivide a área de interação em três zonas distintas:

- a) Zona 1: zona em que a água é empurrada para frente devido o deslocamento do pneu, provocando a formação de uma onda. Neste caso, o contato do pneu com o pavimento é impedido por conta da pressão exercida pela água, potencializadora

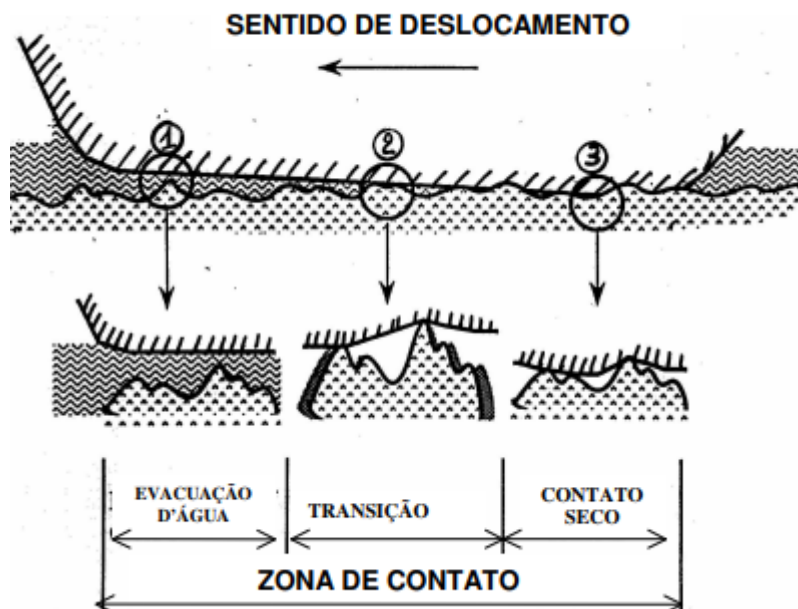


da hidroplanagem. A aderência é praticamente inexistente, pois não há contato direto da pista com o pneu.

- b) Zona 2: zona onde ainda resta uma película de água entre o pneu e o pavimento, porém, começa a ter o contato direto entre as superfícies novamente. Pode haver o deslocamento relativo do pneu em relação a superfície, por conta da viscosidade da água.
- c) Zona 3: a película de água é rompida e o contato entre as superfícies volta a ser seco.

A figura 2.1 a seguir apresenta o esquema as três zonas citadas:

Figura 2.1 – Mecanismo da Viscoplanagem.



Fonte: Momm (1998).

O fenômeno da viscoplanagem ocorre da zona de contato 2, sendo que o tempo necessário para que haja a perfuração da película de água é função de parâmetros como a espessura da película de água, a dimensão da banda de rodagem do pneu, a pressão de insuflagem do pneu e a textura do pavimento. Porém, a viscoplanagem não é dependente da velocidade de movimento do veículo (MOMM, 1998).

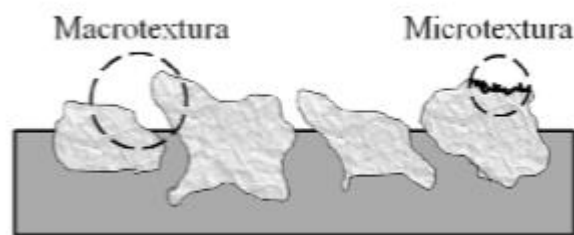
### 2.1.3. Textura Superficial do Pavimento

Se tratando de mecanismos responsáveis pelo atrito entre o pneu e o pavimento, microtextura da superfície, a temperatura e a velocidade de deslocamento influenciam na parcela do atrito por adesão, enquanto a histerese está relacionada à macrotextura do pavimento. Um nível de microtextura adequado facilita o rompimento da película de água entre a interface pneu-pavimento, ou seja, esta vinculada ao fenômeno de viscoplanagem, já o papel da macrotextura é a drenagem da lâmina de água encontrada na interface, atrelada ao fenômeno de hidroplanagem. (BROSSEAUD, 2006).

#### 2.1.3.1. Microtextura

Segundo Pereira *et al.*, (2012), de maneira simplificada pode-se dizer que a microtextura corresponde a aspereza, ou rugosidade da superfície de forma individual, dos agregados que fazem parte da mistura asfáltica e esta é uma propriedade que não pode ser verificada a olho nu. A figura a seguir apresenta a diferença entre a macrotextura e a microtextura da superfície de um pavimento:

Figura 2.2 – Diferença entre Macrotextura e Microtextura do Pavimento.



Fonte: Mattos (2009).

De acordo com Mattos (2009), a microtextura da superfície depende da aspereza dos agregados utilizados na mistura asfáltica, sendo essa aspereza dependente da mineralogia do material agregado que foi empregado e da sua estrutura, como a existência de arestas vivas por exemplo. Para que os agregados apresentem boas características para empregabilidade em misturas asfálticas eles devem apresentar e conservar arestas vivas pelo maior tempo possível, apresentar dureza e resistência para resistir ao tráfego e possuir boa resistência ao polimento.

A microtextura se enquadra em um campo de dimensões de comprimento de onda de 0 a 0,5 mm e amplitude de onda de 0 a 0,2 mm e podem ser caracterizadas baseadas nos

seguintes princípios: medidas subjetivas, que consiste em estimar a microtextura através do contato visual a olho nu, com o uso de microscópios ou com o auxílio de imagens fotográficas. Podendo assim atribuir uma nota pela sua aspereza ou polidez; medidas indiretas, através da utilização de metodologias como o pêndulo inglês e resistência ao polimento. Porém, são métodos que não caracterizam de maneira representativa a microtextura da superfície; e por fim, medidas de perfil, obtidas através do emprego de microscópios ou ainda, captadores a laser que possibilitam obter facilmente informações sobre a forma, tamanho e densidade das microrugosidades (MOMM, 1998).

### 2.1.3.2. Macrotextura

A macrotextura da superfície afeta a segurança do veículo por interferir na drenabilidade da água na área de contato pneu-pavimento, alterando a velocidade crítica de hidroplanagem. A quantidade de água que é introduzida na pista e produz a lamina de água é uma particularidade da região de implantação da rodovia em função da pluviosidade, bem como da geometria da via, atenta-se de que é a partir do conhecimento da espessura da lâmina de água sobre o pavimento que se determina a macrotextura necessária para possibilitar a devida drenagem da água a fim de reduzir os riscos de hidroplanagem (MOMM, 1998).

Segundo Callai (2011), a principal responsável pela geração do ruído de rolamento sobre o pavimento é a macrotextura. A macrotextura também interfere diretamente na resistência ao rolamento, o que pode gerar um maior consumo de combustível e desconforto para os usuários do veículo, bem como o desgaste mais pronunciado do pneu devido ao aumento do fenômeno de histerese provocado pela maior densidade de irregularidades na superfície.

O domínio da macrotextura abrange dimensões de comprimento de onda entre 0,5 e 50 mm e amplitude de onda entre 0,2 e 10 mm. Segundo PIARC (1991), estas dimensões influenciam na aderência pneu-pavimento pelas seguintes características:

- a) Tamanho, forma, espaçamento e arranjo dos granulares que se encontram expostos na superfície do pavimento.
- b) Presença de estrias, considerando suas dimensões, espaçamento, simetria e posicionamento em relação ao veículo.
- c) Comunicação entre a superfície, e entre os poros existentes quando for o caso de materiais permeáveis.

Para Momm (1998), as dimensões dos granulares constituintes da mistura asfáltica são os responsáveis pela presença da macrotextura no pavimento, pois elas se encarregam de formar desvios na superfície que compõem a sua rugosidade. É a rugosidade do pavimento que cria os canais para a drenagem da água, interferindo diretamente no fenômeno de hidroplanagem, bem como no fenômeno de viscoplanagem, pois, para que a microtextura possa atuar rompendo o delgado filme de água, é necessário que a macrotextura tenha eliminado a lâmina de água mais espessa.

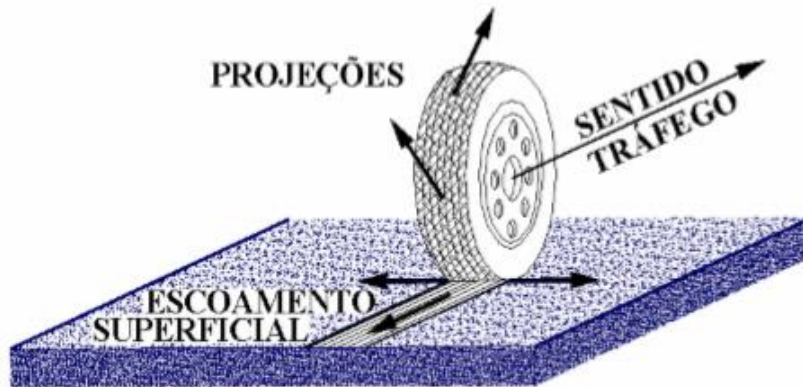
Com o tempo, principalmente devido à ação do tráfego, a macrotextura sofre modificações que levam a perda da capacidade de escoamento e se torna um fator de risco para a segurança viária. Para contornar este problema, é necessário realizar conferências para garantir a eficácia da macrotextura. Os ensaios mais tradicionais que podem ser feitos para medição da macrotextura são os ensaios de mancha de areia, perfilômetro a laser e drenabilidade (MATTOS, 2009).

#### 2.1.4. Drenabilidade e Permeabilidade

Segundo Momm (1998), drenabilidade é a capacidade do pavimento de eliminar a água da superfície através de canais formados entre seus granulares. É esta capacidade, dependente da macrotextura, de eliminar a água da superfície, que evita a ocorrência do fenômeno de hidroplanagem, visto que a característica de um pavimento ser mais ou menos rugoso é função do arranjo e da distribuição do tamanho dos granulares na sua composição.

O escoamento de águas pluviais em pavimentos impermeáveis se dá unicamente na superfície, sendo que a evacuação da água ocorre devido à escultura dos pneus e a macrotextura do revestimento, sendo que, outra parte ainda é levantada pelos pneus que projetam as gotículas de água e interferem na visibilidade do condutor do veículo (GNCSC, 1996, apud DUMKE, 2005, p. 10). A figura a seguir ilustra a drenagem sobre um revestimento impermeável.

Figura 2.3 – Drenagem Sobre Revestimento Molhado.



Fonte: GNCSC, 1996, apud DUMKE, 2005, p. 11.

Em pavimentos impermeáveis, ou seja, de concreto asfáltico convencional, grande parte do escoamento de água pluvial ocorre através do abaulamento da superfície. Já em misturas drenantes, a permeabilidade do material se encarrega de transferir as águas da superfície para uma segunda camada do pavimento, esta sim, impermeável (UNISESKY, 2018).

Segundo Meurer Filho (2001), permeabilidade é a capacidade do material de oferecer canais comunicantes internos para o escoamento de água, não basta a existência de vários no interior do material, eles necessitam estar interligados para que o fluido seja capaz de escoar. Há três tipos diferentes de vazios em concretos asfálticos:

- a) Vazios comunicantes e eficazes, que permitem a estocagem e drenagem da água;
- b) Vazios semi-eficazes, que permitem apenas a estocagem da água;
- c) Vazios ineficazes, que não se comunicam entre si e também não se comunicam com o exterior,

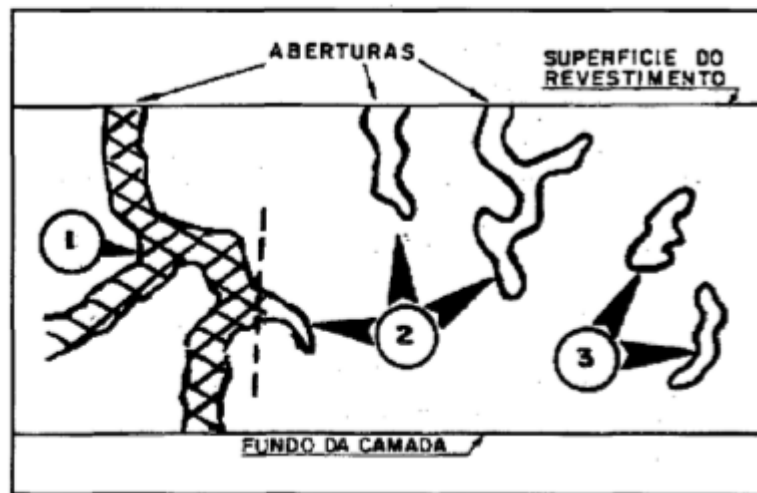
A figura 2.4 a seguir ilustra os aspectos dos tipos de vazios presentes em um revestimento poroso.

Figura 2.4 – Aspectos dos Tipos de Vazios de um Pavimento Poroso.

1= Vazios eficazes

2= Vazios semi-eficazes;

3= Vazios ineficazes.



Fonte: MEURER FILHO, 2001 apud CAMPOS, 1998, p.43.

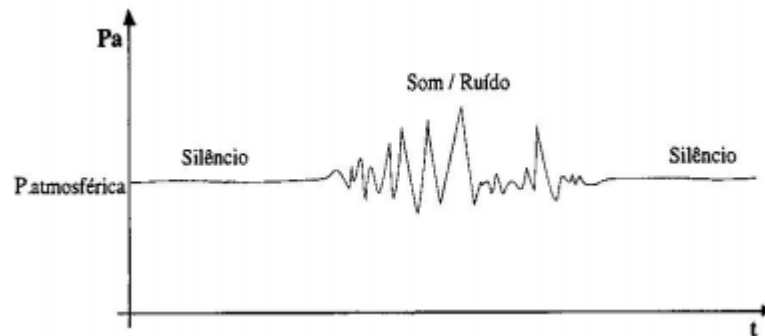
O autor afirma que apenas os vazios eficazes asseguram a permeabilidade do material. Isto porque permitem que haja um caminho para que a água pluvial seja captada na superfície, percorra pelo interior do material e desague no exterior do pavimento.

## 2.2. PROPRIEDADES ACÚSTICAS

### 2.2.1. Frequência

Segundo Astrana Junior (2006), a definição de som é vista como o resultado de uma vibração provocada por variações de pressão em relação à pressão atmosférica. Essa variação de pressão, que é transmitida pelo ar, flexiona o tímpano humano, criando a sensação de som no sistema auditivo. Toda a superfície vibrante é capaz de produzir sons, no caso em questão, o pneu, a banda de rodagem e a carcaça vibram ao entrar em contato com a superfície do pavimento, gerando assim o som. A figura 2.5 a seguir ilustra a variação da pressão sonora em relação à pressão atmosférica.

Figura 2.5 – Variação da Pressão Sonora em Relação à Pressão Atmosférica.



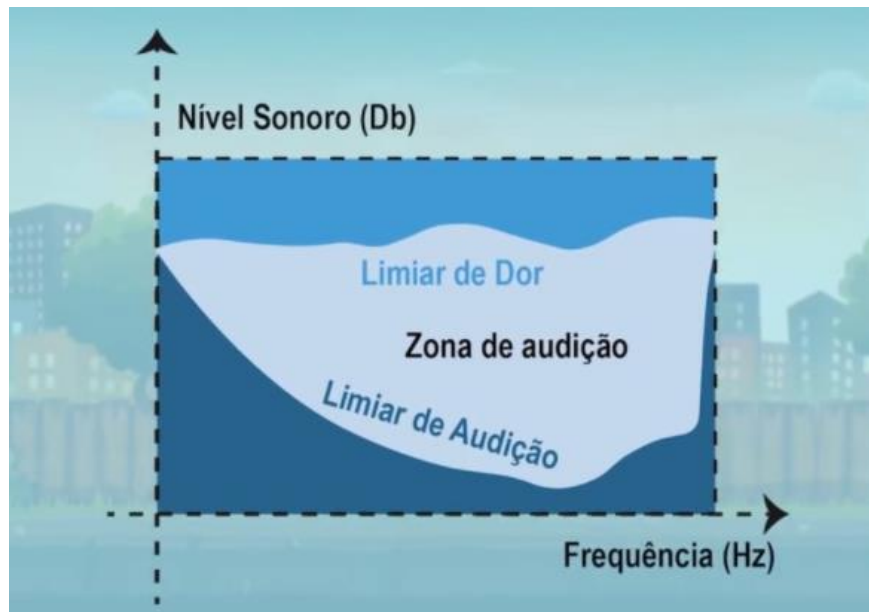
Fonte: Michalski (2017).

Segundo Michalski (2017), dentro do espectro sonoro tem-se os infra-sons, sons audíveis e ultra-sons, que são classificados através da frequência. Os infra-sons, sons com valores de frequência inferiores a 20 Hz, não são captados pelo ouvido humano, bem como os ultra-sons, que se enquadram na faixa de frequências superiores a 20000 Hz.. Os sons audíveis se encontram na faixa de frequência de 20 à 20000 Hz, sendo que, quanto mais baixo o valor da frequência mais grave será o som percebido e quanto mais alto o valor da frequência, mais agudo.

A frequência é a componente do som que fornece a qualidade tonal, sendo que, sons com apenas uma frequência são caracterizados como de tom puro, porém, são raramente encontrados na prática. Os ruídos de forma geral se encontram em uma banda larga de frequências (ASTRANA JUNIOR, 2006).

Segundo Michalski (2017), o ouvido humano transforma as pressões sonoras em pressões auditivas, porém, a sensibilidade limitada do sistema auditivo não permite com que sejam percebidas todas as frequências de maneira similar e padronizada, ou seja, o ouvido não é igualmente sensível para todas as faixas de frequência. A figura 2.6 a seguir apresenta o gráfico da audibilidade ao analisar frequência versus intensidade sonora.

Figura 2.6 – Gráfico de Audibilidade.



Fonte: Adaptado de Cavaleiro (2017).

O autor afirma ainda que um som emitido em 50 dB a 100 Hz não soa tão alto quanto um som emitido em 50 dB a 500 Hz, ou seja, sons emitidos com o mesmo nível de intensidade (decibel), porém, com frequências (Hertz) diferentes, não são percebidos como se fossem igualmente intensos. A máxima sensibilidade auditiva é encontrada na faixa de frequências próximas a 4000 Hz, a excitabilidade é atenuada nas frequências mais altas e tem sua menor percepção quanto menor for a frequência em questão.

### 2.2.2. Ruído

Segundo Pimentel-Souza (1999), os veículos automotores são a maior causa de geração de poluição sonora no Brasil. Os sons emitidos podem ser vistos como agradáveis ou desagradáveis. O som gerado pela interação do pneu com o pavimento é desagradável ao ouvido humano, podendo classificá-lo como ruído. Dependendo da amplitude e da duração do ruído, ele pode acarretar uma série de malefícios ao ser humano, ruídos altos e de longa duração, por exemplo, podem causar surdez e alteração da pressão sanguínea, já ruídos com amplitude moderada afetam o conforto, impactam na conversação e podem gerar distúrbios de sono, entre outros fatores que levam a perda da qualidade de vida dos cidadãos.

Para fins de determinação de tolerâncias, entende-se como ruído intermitente o ruído que não seja classificado como ruído de impacto. Esses níveis de ruído intermitentes devem ser medidos em decibéis, sendo que para um indivíduo sem uso de equipamentos de



segurança, o limite de tolerância de ruído é fixado em 115 dB, caso contrário, o cidadão estará exposto a riscos graves e iminentes (NR15, 2015).

Segundo Astrana Junior (2006), o incomodo é o efeito inicial causado pelos ruídos gerados pelo tráfego ao ser humano. A análise do incomodo é de difícil mensuração por se tratar de uma medida subjetiva, porém, relaciona-se com a amplitude e a frequência do ruído, bem como parâmetros de tonalidade, duração e comportamento transiente dos veículos.

O autor afirma ainda que o ruído total emitido por um veículo é na verdade a combinação de fatores geradores de ruído de cada parte do automóvel, sendo que duas fontes são preponderantes no problema, o ruído gerado pela interação pneu-pavimento e os ruídos emitidos pelo trem de força do veículo. De forma geral, um veículo trafegando em baixa velocidade ocasionará maiores efeitos de ruído por conta do seu trem de força, já em velocidades mais elevadas, o problema se encontra no que tange a interação pneu-pavimento.

### 2.2.3. Impedância Acústica

Segundo Chaix (2016), impedância acústica é resistência à passagem do som que caracteriza um objeto. Esta propriedade corresponde à relação entre a pressão sonora em um dado ponto e a velocidade de vibração das moléculas neste mesmo ponto, o que não está atrelado com a velocidade do som. Quando a energia sonora incide sobre uma superfície, parte dela é refletida, parte absorvida e parte transmitida, no momento em que uma onda sonora entra em contato com um meio de alta impedância acústica, uma grande parte desta onda será refletida e não transmitida, como podemos exemplificar na Figura 2.7 a seguir.



Fonte: CHAIX (2016).

Segundo Astrana Junior (2006), impedância acústica é um dos parâmetros aplicados à caracterização de materiais no que tange o comportamento na presença de sons, mais

especificamente de ruídos. Reconhecer este parâmetro é particularmente importante quando objetiva-se conhecer as propriedades de absorção e reflexão de uma superfície. A capacidade de absorção e reflexão de um material depende de suas propriedades mecânicas, sua composição, da forma e incidência da onda sonora sobre o corpo, bem como da frequência na qual o som foi emitido.

O som se propaga em um meio pela movimentação das partículas que compõe esse meio, a velocidade com a qual ocorre essa movimentação depende da velocidade do som. A impedância acústica é a grandeza de um meio físico, que se opõe a essa movimentação, esta grandeza está relacionada com a pressão sonora e a velocidade de deslocamento das partículas no meio. Materiais com valores altos de impedância acústica apresentam dificuldades em transmitir o som para outros meios, porém são bons refletores (BUSULO, 2017).

Segundo Astrana Junior (2006), impedância acústica e impedância mecânica são parâmetros considerados para a caracterização acústica dos pavimentos. A impedância acústica, abordada neste trabalho, é dependente dos vazios presentes na superfície do pavimento, já a impedância mecânica esta relacionada com a rigidez relativa do pneu com o pavimento.

#### 2.2.4. Coeficiente de Absorção Sonora

A capacidade de uma superfície de absorver a onda sonora sobre ela incidida é dada pelo coeficiente de absorção sonora. O coeficiente de absorção sonora e coeficiente de reflexão, propriedades acústicas de materiais absorventes, podem ser determinados em tubo de impedância, câmara reverberante ou em campo livre simulado. Porém, a determinação do coeficiente de absorção sonora em tubos de impedância possui a vantagem do tamanho das amostras, que são relativamente pequenas, com diâmetros inferiores a 0,120 m, dependendo do tubo. Outra vantagem da utilização de tubos de impedância é que o equipamento avalia apenas o coeficiente normal de absorção, enquanto os outros ensaios avaliam o coeficiente de absorção sonora aleatória (DEMOLINER, 2013).

Segundo Busulo (2017), o coeficiente de absorção sonora representa a quantidade de energia sonora incidida na superfície que não foi refletida, essa energia pode ser transmitida para o meio adjacente ou dissipada pelo material. A capacidade de um material absorver a energia sobre ele incidente também esta relacionada com sua estrutura química, em materiais fibrosos, grande parte da energia incidida é absorvida, pois a energia desta onda é gasta se

movimentando pela estrutura fibrosa, porém, todo material é capaz de absorver alguma quantidade de energia, não apenas os que possuem características fibrosas.

A capacidade de determinados materiais de não permitir a reflexão do som através da sua superfície chama-se absorção sonora. O som absorvido é a quantidade de som que foi dissipado pelo material somado com a parcela que foi transmitida. A frequência do som, espessura e porosidade do material são fatores que influenciam a dissipação de energia sonora pelos materiais. Um material puramente absorvente possui seu coeficiente de absorção sonora igual à um, um material puramente reflexivo possui seu coeficiente de absorção sonora igual à zero (ASTRANA JUNIOR, 2006).

Segundo Meurer Filho (2001), um material não absorve de maneira similar os sons agudos, médios e graves, o fator de absorção é dependente da frequência. Sendo assim, o coeficiente de absorção sonora dos pavimentos asfálticos varia com a frequência do som. O autor afirma que a frequência de 1000 Hz é a frequência na qual os ruídos de rolagem acontecem com maior intensidade.

### **3. FATORES INFLUENTES NA PRODUÇÃO DO RUÍDO E NA ABSORÇÃO SONORA DO CONTATO PNEU-PAVIMENTO**

O objetivo da apresentação deste capítulo consiste em expor conceitos acerca das fontes de ruído geradas pelo tráfego, estas fontes de ruído podem estar vinculadas diretamente ao veículo, ao pavimento, ou ainda à interação entre ambos. O capítulo aborda também fatores que influenciam na absorção sonora dos revestimentos, estejam eles vinculados de forma intrínseca ao pavimento, bem como à variações de utilização das vias.

#### **3.1. QUANTO ÀS FONTES DE RUÍDOS PRODUZIDAS**

As fontes de ruído de tráfego podem ser classificadas em duas famílias principais, as fontes de ruído que dependem da velocidade de funcionamento do motor do automóvel e as fontes oriundas da velocidade de deslocamento na pista. Isto resulta em um ruído composto por várias fontes sonoras combinadas, porém, a predominância de geração de ruído está, sobretudo na velocidade de movimento do veículo (BRUITPARIF, 2011).

##### **3.1.1. Fontes de Ruído Advindas dos Veículos**

###### **3.1.1.1. Do Motor**

Segundo Bruitparif (2011), as fontes de ruído vinculadas ao motor incluem a unidade de potência, sendo elas a entrada e saída de ar e ventoinha de transmissão e o eixo traseiro, ambos são influenciados pela velocidade de funcionamento do motor.

Veículos de carga e transporte de passageiros expõem seus usuários, operadores e tripulação a longos períodos de exposição a ruídos, porém, este não é um problema apenas para os ocupantes, visto que a poluição sonora figura no topo da lista de reclamações dos cidadãos europeus. O controle deste problema pode ser feito por meio de atuação acústica no interior do veículo, o que solucionaria o problema apenas para os usuários internos, ou atuando mecanicamente sobre as principais fontes irradiantes de som, buscando obter a maior redução de energia sonora irradiada (OLIVEIRA, 2007).

Crescentes avanços nas regulamentações europeias que estabelecem valores mínimos para emissão de ruídos provenientes dos automóveis para que os mesmos possam ser

aprovados para a venda no mercado europeu, tem gerado progressos significativos de redução de ruído vinculados ao motor, escapamento e transmissão de carros e caminhões (BRUITPARIF, 2011).

#### 3.1.1.2. Do Contato Pneu Pavimento

A geração de ruído devido à interação pneu-pavimento se deve por dois mecanismos: os de geração de energia acústica e os de amplificação da energia acústica gerada. Os mecanismos de geração estão atrelados à excitação da carcaça do pneu durante o movimento, esta excitação pode ser ocasionada pelo impacto do pneu na superfície do pavimento, pelas perturbações tangenciais do pneu devido ao atrito e pelo bombeamento de ar próximo à banda de rodagem. Estas vibrações são então amplificadas por outros mecanismos de acústica, como a vibração da carcaça do pneu, efeito corneta, ressonador de Helmholtz, vibrações laterais, entre outras (GERGES, 2012).

Segundo Bruitparif (2011), esta fonte de ruído está relacionada com a velocidade do movimento do veículo, entretanto, é afetado também por características como: tipo de pneu utilizado, seu material, estrutura, largura e pressão de inflação; textura da superfície da estrada; capacidade de absorção sonora da estrada.

Os principais parâmetros que afetam o ruído de rolagem são: a velocidade do veículo, o tipo de ranhura dos pneus, o peso do veículo, a estrutura e desgaste dos pneus, as características superficiais da capa de rolamento, a absorção acústica, a presença de água na superfície da pista e a largura dos pneus (MEURER FILHO, 2001).

#### 3.1.1.3. Dos Efeitos Aerodinâmicos

Os ruídos de aerodinâmica são causados pela turbulência do ar nas ranhuras dos pneus em movimento (PEREZ-JIMENEZ *et al*, 1997 apud MEURER FILHO, 2001, p. 92). Bruitparif (2011), afirma que os ruídos causados por efeitos aerodinâmicos são devidos à turbulência do ar, o autor ressalta que se o automóvel trafegar em velocidades normais, este mecanismo de geração de ruído tem impactos relativamente pequenos em comparação com outras fontes emissoras do veículo.

A origem do ruído aerodinâmico provém da interação entre a carroceria do veículo e o ar, este fenômeno é dependente do formato da carroceria e da velocidade de circulação do

veículo. Normalmente a análise desta forma de ruído é feita na indústria automobilística através de testes em um túnel de vento (PEREIRA, 2010).

#### 3.1.1.4. Das Vibrações e Choques dos Componentes do Veículo

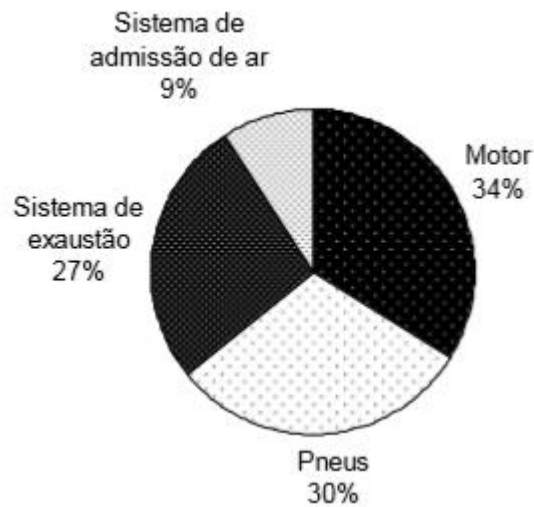
As vibrações e colisões dos elementos do veículo, devido à imperfeições na estrada pelas quais o condutor teve que passar, como choques de peças da carroceria, por exemplo, especialmente se tratando de veículos pesados, provocam radiação acústica da própria estrutura do veículo quando se têm batidas dos seus próprios elementos entre si (BRUITPARIF, 2011).

#### 3.1.1.5. Da Predominância do Ruído de Rolamento

O ruído gerado por um veículo é composto principalmente por duas parcelas, o ruído provindo da rolagem do pneu sobre o pavimento e o ruído advindo do trem de força, podendo citar mais especificamente o motor e a transmissão. Ambas as fontes de ruído mencionadas, sofrem grande interferência da velocidade de deslocamento do automóvel (GERGES, 2012).

De forma abrangente, o autor afirma ainda que para um veículo trafegando a baixa velocidade, a preponderância de ruído proverá do seu trem de força, a medida que a velocidade aumenta, cresce juntamente a parcela da interação pneu-pavimento do ruído total emitido. Pode-se definir uma velocidade de intersecção na qual as duas parcelas atuam de forma análoga quantitativamente, esta velocidade é assumida como sendo de 40 a 50 Km/h para veículos leves e 60 a 70 Km/h para veículos pesados. A Figura 3.1 a seguir apresenta as contribuições de ruído no automóvel.

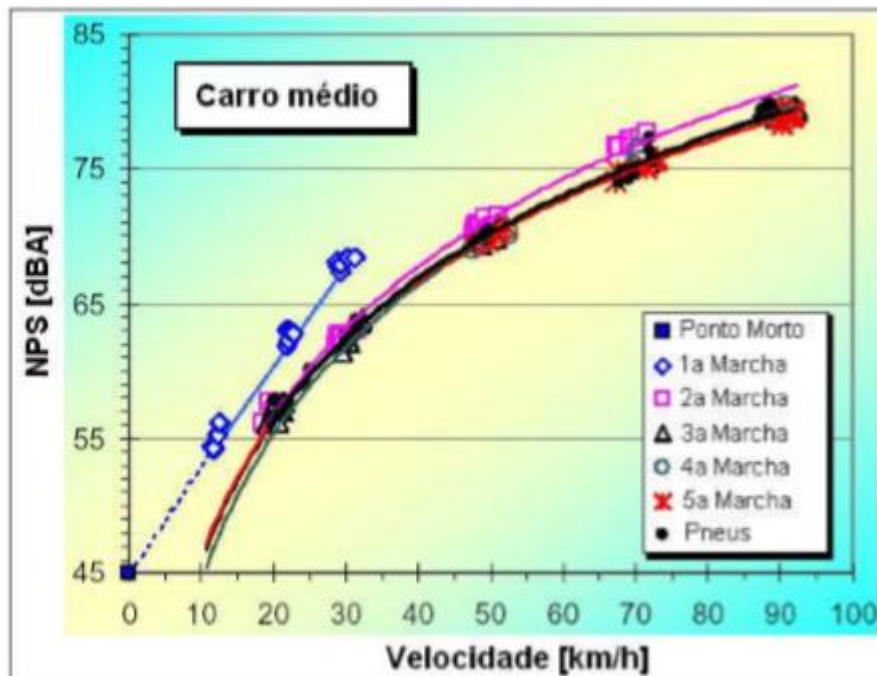
Figura 3.1 – Contribuição das Fontes de Ruído no Automóvel.



Fonte: GERGES (2012).

A Figura 3.2 a seguir mostra a um exemplo de níveis de ruído para um automóvel de médio porte em distintas velocidades.

Figura 3.2 – Ruído Total de um Carro Médio.



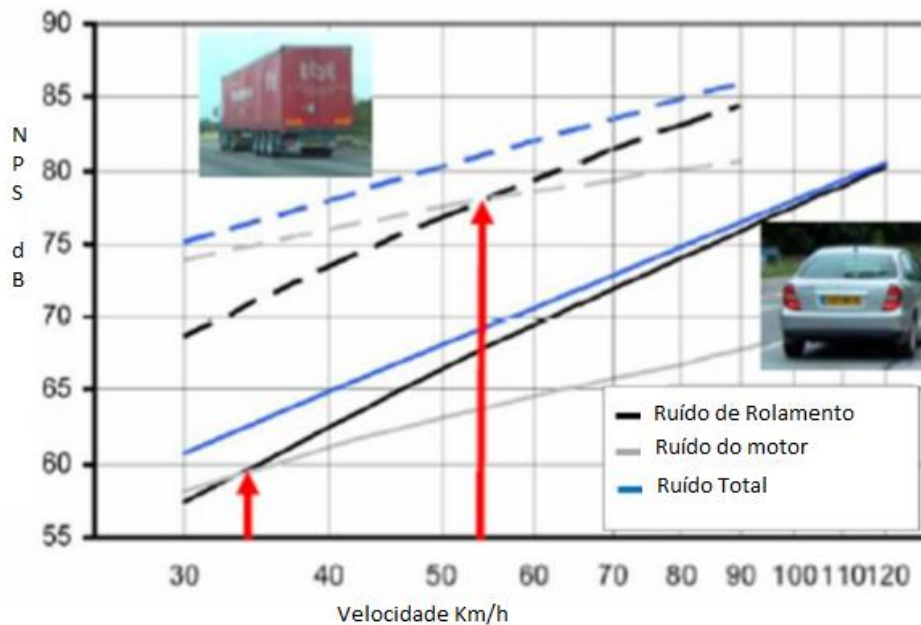
Fonte: GERGES (2012).

Nota-se que com exceção da primeira marcha, todas as demais condições de ensaio apresentaram um nível de emissão de ruído muito semelhante àquele identificado apenas como ruído advindo da rolagem dos pneus (GERGES, 2012).

Segundo Bruitparif (2011), o ruído advindo do rolamento do pneu sobre o pavimento aumenta com o acréscimo de velocidade e passa a ser a fonte de ruído dominante a partir de 50 Km/h, entretanto, a velocidade de funcionamento do motor em particular pode produzir níveis de ruído muito elevados.

No entanto, o autor afirma ainda que em veículos novos, os fabricantes conseguiram reduzir o ruído emitido pelo trem de força, sendo assim, o ruído proveniente do rolamento passa a ser predominante a partir da faixa de velocidades de 30 a 40 Km/h para veículos leves e de 50 a 60 Km/h para veículos pesados. A Figura 3.3 a seguir ilustra o modelo simplificado de previsão de ruído nas estradas para veículos leves e pesados.

Figura 3.3 – Contribuição do Ruído do Motor e do Ruído de Rolamento.



Fonte: Adaptado de BRUITPARIF (2011).

Nota-se que para este modelo, o ruído de rolamento se torna predominante sobre o ruído do motor para velocidades de 35 Km/h para veículos leves e de 55 Km/h para veículos pesados. Para veículos leves em alta velocidade, é clara a prevalência da emissão de ruído proveniente do rolamento em comparação com o emitido pelo motor, sendo assim, considera-se viável agir contra os ruídos advindos de veículos leves no contexto urbano, focando nas características dos pneus e da superfície das estradas, fatores que estão intimamente relacionados quando se trata da movimentação do veículo (BRUITPARIF, 2011).



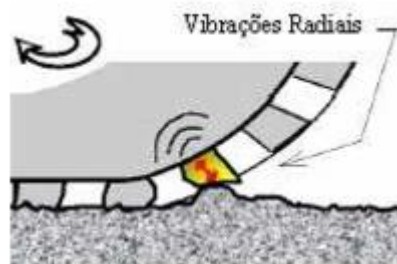
### 3.1.2. Fontes de Ruído Advindas do Contato Pneu-Pavimento

#### 3.1.2.1. Vibração dos Pneumáticos

Segundo Bruitparif (2011), o rolamento do pneu em uma superfície que não é perfeitamente lisa, as irregularidades da mesma causam vibrações no piso e nas laterais dos pneus. A radiação acústica dessas vibrações contribui para a geração de ruído total do contato pneu-pavimento. Quanto mais irregular se apresentar a superfície, mais vibrações ela gerará.

Segundo Astrana Junior (2006), a geração de ruído causada pela vibração da banda de rodagem está atrelada aos blocos da banda de rodagem dos pneus. Os blocos da banda de rodagem são encarregados de proporcionar tração e frenagem ao veículo, e durante o movimento, ocorre o impacto dos blocos da banda de rodagem com o pavimento. Esse fenômeno pode ser comparado a um pequeno martelo de borracha que bate no pavimento causando vibração ao pneu. A Figura 3.4 a seguir ilustra o fenômeno descrito.

Figura 3.4 – Vibrações Radiais no Contato da Banda de Rodagem com o Pavimento.



Fonte: OLEK, 2004 apud ASTRANA JUNIOR, 2006, p.23.

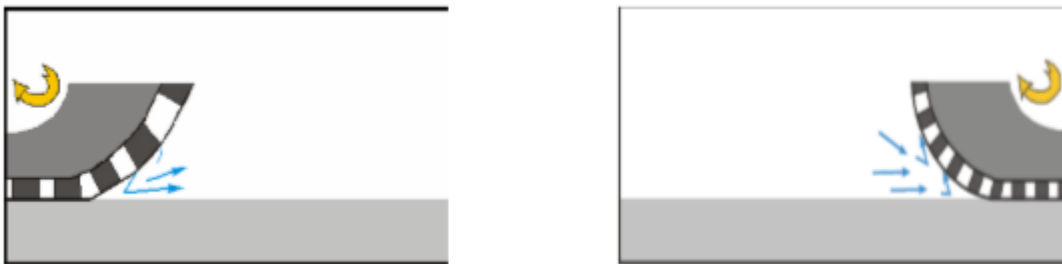
Essa vibração dos pneus produzida por movimentos devido à textura do revestimento e da estrutura dos pneus geram ruído na faixa de baixa frequência, entre 80 e 1250 Hz, dependendo da velocidade do veículo e seu peso (BRUITPARIF, 2011).

#### 3.1.2.2. Bombeamento de Ar (*air pumping*)

As vibrações pneumáticas e o bombeamento de ar são vistas como as principais fontes de ruído vinculadas à interação pneu-pavimento. O bombeamento de ar é resultante do fluxo turbulento mantido pelas diferenças de pressão de ar no ponto antes do contato do pneu com a pista e no ponto posterior ao contato (MEURER FILHO, 2001).

Segundo Bruitparif (2011), o fenômeno de bombeamento de ar é associado à compressão e, em seguida expansão repentina do ar localizado entre os pneus e os espaços vazios não comunicantes da pista. Este fenômeno gera ruídos na faixa da alta frequência, com níveis de emissão entre 1 e 5 KHz e pode ser atenuado com o emprego de uma superfície com rugosidades de pequenas dimensões, normalmente menores que 1 cm ou materiais que possuam uma boa porosidade que facilitará a circulação de ar. A Figura 3.5 a seguir ilustra o fenômeno de bombeamento de ar.

Figura 3.5 – Ruído do Fenômeno de Bombeamento de Ar.



Fonte: BRUITPARIF (2011).

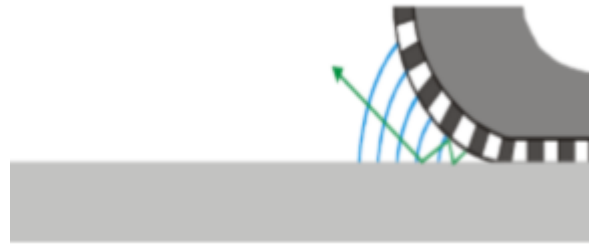
Para Astrana Junior (2006), a geração de ruído causado pelo bombeamento de ar está atrelada aos sulcos constituintes do pneu, que são responsáveis pela drenagem da água. Na área de contato do pneu com o pavimento, os canais formados pelos sulcos do pneu são comprimidos e distorcidos, o ar que se encontra nestes sulcos é bombeado e comprimido para dentro e para fora destas passagens, gerando dessa forma o ruído.

### 3.1.2.3. Propagação Sonora por Efeito Diedro (Corneta)

O efeito corneta é o mais importante e mais conhecido mecanismo de amplificação de ruído. O ruído gerado é amplificado pelo próprio formato da região existente diretamente atrás ou à frente do contato pneu-pavimento (ASTRANA JUNIOR, 2006).

Segundo Bruitparif (2011), o efeito corneta não é um mecanismo de geração de ruído propriamente dito, mas sim, um mecanismo de amplificação do mesmo. O princípio deste fenômeno é o mesmo que o de um megafone, o som é refletido pela forma diédrica formada pelo pneu e pela superfície da pista, que tem o efeito de intensificar o som. A amplificação pelo efeito corneta ocorre principalmente na faixa de frequência audível de 1 a 3 Hz e ocorre tanto na parte frontal quanto na parte traseira do pneu. A Figura 3.6 ilustra o fenômeno do efeito corneta.

Figura 3.6 – Radiação Sonora do Efeito Corneta.



Fonte: BRUITPARIF (2011).

Segundo Callai (2011), o efeito corneta, mecanismo de amplificação do ruído pneu-pavimento, também chamado de *horn effect*, ocorre devido ao formato da região existente diretamente atrás e a frente do contato do pneu com a superfície da pista. A forma de corneta tornam propícias as múltiplas reflexões das ondas sonoras.

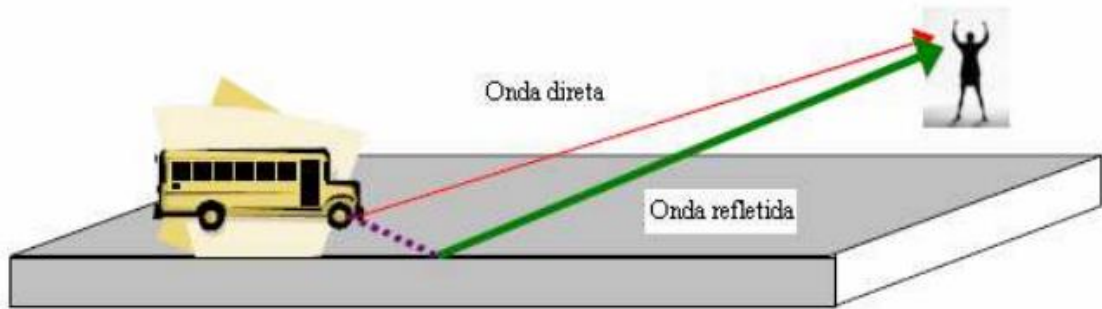
#### 3.1.2.4. Propagação do Ruído

Segundo Bruitparif (2011), o ruído propagado de uma fonte sonora em campo livre é suavizado pela distância da fonte, o abrandamento do ruído varia de acordo com uma taxa de atenuação que é dependente da forma de frente da onda. Quando a fonte e o receptor estiverem próximos à superfície, ocorrerá a reflexão sonora.

Reflexão sonora corresponde à fração de energia sonora que retorna ao meio de origem após interação com outro material. Quando as ondas encontram uma superfície sólida, os pontos desta barreira vibram, tornando-se uma nova fonte para a onda refletida. A reflexão superficial é diretamente proporcional à dureza do material. Concreto, mármore, azulejos e vidro, por exemplo, refletem quase toda a totalidade do som incidente, sendo assim, o emprego de materiais com propriedades de amortecimento acústico é um meio para o controle da poluição sonora (BRESSANE *et al*, 2010).

Segundo Astrana Junior (2006), para um revestimento de concreto asfáltico denso, a diferença entre a onda emitida e a refletida é pequena, pois não ocorrem interposições destrutivas entre elas. Desta maneira, como ilustra a Figura 3.7 abaixo, as ondas sonoras que chegam ao receptor provenientes diretamente do emissor e também da reflexão da onda sobre o pavimento adicionam a intensidade sonora em 6 dB sobre a amplitude de campo livre.

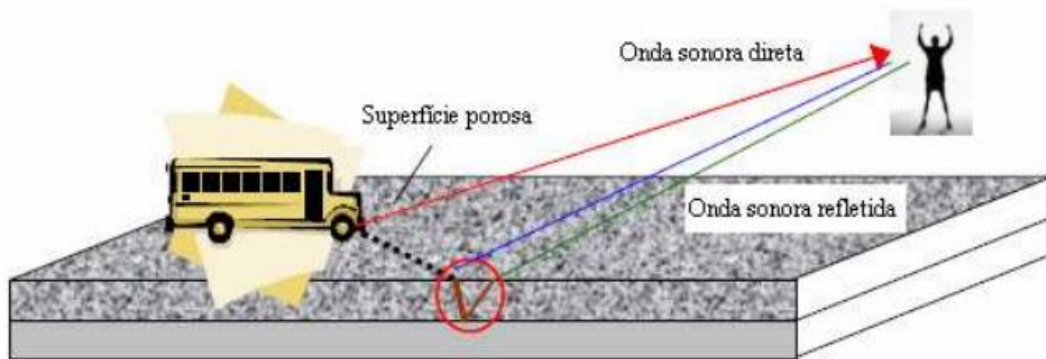
Figura 3.7 – Reflexão do Ruído em uma Superfície de Pavimento Denso.



Fonte: OLEK, 2004 apud ASTRANA JUNIOR, 2006.

Já quando a superfície do revestimento é porosa, existe uma diferença considerável entre as ondas sonoras diretas e as refletidas, pois ocorrem interposições destrutivas no percurso, desta forma, a intensidade de ruído final que alcança o receptor é menor se comparado com o pavimento denso (ASTRANA JUNIOR, 2006). Este fenômeno é mostrado a seguir na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Reflexão do Ruído na Superfície de Pavimento Poroso.



Fonte: OLEK, 2004 apud ASTRANA JUNIOR, 2006.

Quando a superfície é porosa, as interferências ocorrem na faixa de frequência de 250 a 1000 Hz. Esta faixa de frequência é a mesma do ruído gerado pelos veículos, sendo assim, é possível reduzir o ruído emitido por um veículo para o receptor criando interferências acústicas destrutivas através da utilização de propriedades de absorção sonora dos revestimentos (BRUITPARIF, 2011).

### 3.1.2.5. Efeitos Não Exclusivos aos Revestimentos

Bruitparif (2011), aborda dois tópicos como contribuintes para o ruído do tráfego, são eles: as características do pneu e a projeção de gotículas de água em dias de chuva. Trataremos os dois itens separadamente a seguir.

- Características do pneu: os principais parâmetros deste item são as características do material, como rigidez; a geometria do pneu, como a largura e a escultura da superfície e por fim, as características relacionadas ao uso do pneu, como carga imposta, pressão de inflação e velocidade de rotação.
- Projeção de gotículas de água: em uma superfície molhada, um ruído adicional é produzido em frequências na faixa de 1000 Hz por conta da projeção de gotículas de água. A quantificação deste impacto no ruído final depende do tipo de revestimento da via e da velocidade de operação. Este fenômeno é mais pronunciável quanto menor a velocidade, pode-se atingir um acréscimo de 6 dB para velocidades inferiores a 60 Km/h e 2 a 3 dB para altas velocidades, considerando um revestimento convencional, utilizando revestimentos drenantes, o impacto deste fenômeno é reduzido.

### 3.1.3. Fontes de Ruído Advindas das Características dos Revestimentos

#### 3.1.3.1. Irregularidades Superficiais

As irregularidades presentes na superfície dos pavimentos influenciam diretamente a geração de ruído. No que tange este aspecto, os dois parâmetros de maior relevância são a textura e o relevo da pista, parâmetros que não são exclusivos do estudo do ruído, mas também do desempenho mecânico do pavimento, sendo assim, é preciso balancear estes dois ramos para que haja equilíbrio entre ambos os objetivos (BRUITPARIF, 2011).

Segundo Meurer Filho (2001), a textura de um revestimento asfáltico é um parâmetro atrelado ao comportamento da pista quanto a aderência e está relacionada com o aspecto macroscópico da superfície. Inclui-se a forma do agregado empregado, seu tamanho, aspereza e disposição na mistura, bem como rugosidades e irregularidades.

A textura do pavimento implica na frenagem, resistência à derrapagem, drenagem superficial, conforto ao dirigir, dirigibilidade, consumo de combustível e geração de ruído. Porém, não é possível obter todos os benefícios de maneira conjunta, muitas vezes é

necessário abdicar da supremacia de um parâmetro para que se possa atender outro que para aquela situação seja mais requerido, pois, em algumas situações deve-se priorizar um aspecto sobre outro, como segurança, por exemplo, visto que a preservação do bem estar da vida do usuário da via é sempre primordial. A seleção das características para um pavimento seguro, que atenda satisfatoriamente parâmetros de resistência a derrapagem e aderência, pode levar a uma geração de ruído mais intensa (CALLAI, 2011).

Segundo Bruitparif (2011), as irregularidades são definidas em quatro diferentes classes de textura, caracterizadas a partir do seu comprimento de onda (L):

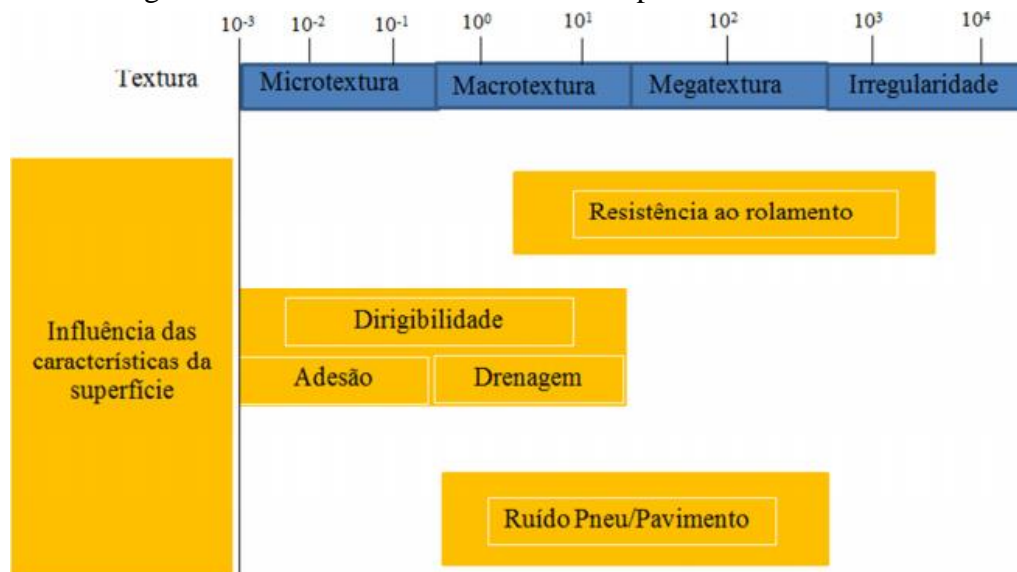
- Microtextura: Dimensão das irregularidades  $L < 0,5 \text{ mm}$
- Macrotextura: Dimensão das irregularidades  $0,5 \text{ mm} < L < 50 \text{ mm}$
- Megatextura: Dimensão das irregularidades  $50 \text{ mm} < L < 500 \text{ mm}$
- Defeitos de Nivelamento: Dimensão das irregularidades  $L > 500 \text{ mm}$

O autor detalha a influência da microtextura, macrotextura e megatextura no desempenho do pavimento:

- Microtextura: afeta a aderência, o desgaste dos pneus e a geração de ruído de alta frequência.
- Macrotextura: afeta a aderência, a aspersão de água, a geração de ruído e a resistência ao rolamento, implicando na emissão de gás carbônico e consumo de combustível.
- Megatextura: afeta a geração de ruído em baixa frequência, controle e estabilidade do veículo, acúmulo de água, degradação dos pneus e resistência ao rolamento.

Segundo Callai (2011), um estudo realizado por Sandberg (1997), apresenta os comprimentos de onda que tem influência no ruído, resistência ao rolamento e resistência à derrapagem, como mostrado na Figura 3.9 a seguir:

Figura 3.9 – Influência da Textura da Superfície do Pavimento.



Fonte: SANDBERG, 1997 apud CALLAI, 2011.

Verifica-se que os principais responsáveis pela geração de ruído são a macrotextura e a megatextura, além de influenciarem na resistência ao rolamento e conseqüentemente causar maior consumo de combustível, desconforto dos ocupantes do veículo e desgaste dos pneus. Portanto, os comprimentos de onda importantes para o controle do ruído estão da faixa de 0,5 mm a 500 mm (CALLAI, 2011).

Já com relação ao relevo da superfície, Bruitparif (2011), afirma que esta é uma propriedade essencial das superfícies das estradas que não podem ser descritas com a utilização dos termos de textura, pois durante a geração de ruído do contato do pneu com o pavimento, o fato de a superfície possuir formas côncavas, chamadas de texturas positivas, ou convexas, chamadas de texturas negativas, causam diferenças perceptíveis. A diferença entre o formato de um pavimento com superfície côncava e convexa, respectivamente, é ilustrado na Figura 3.10 a seguir:

Figura 3.10 – Aspectos de Textura Positiva e Negativa.



Fonte: BRUITPARIF (2011).

O plano vertical de distribuição de textura define se a mesma é positiva ou negativa, a textura positiva, ou convexa, apresenta cumes acima do plano definido como plano da superfície. A textura negativa, ou concava, é encontrada quando o revestimento é composto por agregados que contenham uma relação de vazios interconectados e a superfície de acabamento superior plana. Dependendo do tamanho dos cumes da textura positiva, as mesmas incentivam níveis mais altos de vibração dos pneus em comparação com a textura negativa (FEHLR, 2006).

### 3.1.3.2. Porosidade

Segundo Astrana Junior (2006), porosidade é a relação entre o volume de vazios dos poros do material com relação ao volume total da amostra. Esta propriedade aplicada aos pavimentos reduz de maneira eficaz o efeito de bombeamento de ar, pois os canais formados pelos sulcos do pneu, que aprisionariam o ar comprimindo-o, não o farão com tanta intensidade devido a presença de vazios intercomunicantes que proporcionam uma área de escape para o ar que seria aprisionado. Este fator, conseqüentemente diminui o impacto do ruído gerado pela passagem dos veículos na pista. O efeito corneta também é reduzido com a aplicação de revestimentos porosos, além da diminuição do efeito spray causado pela rolagem dos pneus em superfície molhada.

Os vazios contidos internamente ao pavimento permitem que a propagação das ondas sonoras seja atenuada, porém, para obter estes resultados, os vazios precisam ser intercomunicantes, formando canais que comuniquem com a superfície do revestimento, possibilitando a entrada das ondas sonoras, os revestimentos BBDr e BBTM são considerados revestimentos de alta porosidade, os revestimentos chamados de densos, como BBSG apresentam volume de vazios muito baixos, da ordem de 4 a 6%, essa quantidade de vazios não permite a entrada de água e ar, estes revestimentos são considerados impermeáveis (CALLAI, 2011).

Segundo FEHLR (2006), a medida de porosidade pode ser definida como a porcentagem de vazios abertos ao ar em um determinado volume de mistura total de pavimento. Identificam-se quatro famílias diferentes de revestimentos de acordo com o nível de porosidade:

- Pavimento denso: 4 a 9%
- Pavimento Semi-denso: 9 a 14%
- Pavimento Semi-aberto: 14 a 19%



- Pavimento aberto/drenante: >19%

Segundo *Bruitparif* (2011), a redução do ruído causado pela porosidade presente no material deve-se a redução do fenômeno de bombeamento de ar, pois a porosidade do pavimento facilita o fluxo de ar e evita o aumento da pressão do fluido na área de contato pneu-pavimento. Parte desta redução também se dá durante as reflexões sucessivas das ondas sonoras onde parte da energia acústica é perdida, a absorção do som no que tange o processo de propagação é um dos fatores mais relevantes, e por fim, a redução do efeito corneta é um efeito direto a vista da porosidade.

### 3.1.3.3. Comportamento Viscoelástico

Segundo Santos (2016), viscoelasticidade é um termo designado à materiais que possuem tanto comportamento líquido quanto sólido quando sujeitos a algum tipo de carregamento. Materiais viscoelásticos são aqueles para os quais a relação tensão deformação é dependente do tempo.

Segundo *Bruitparif* (2011), o comportamento viscoelástico da camada de revestimento é vista como um importante atenuador de ruído, desde que a elasticidade do pavimento seja comparável com a elasticidade do pneu, assim, os níveis de ruído podem ser reduzidos em 4 dB para veículos leves e 6 dB para veículos pesados.

O autor afirma ainda que essa redução de ruído é derivada dos seguintes fatos: a vibração do pneu é menor durante o impacto no revestimento devido à natureza da viscoelasticidade à temperatura ambiente; o tempo de contato pneu-pavimento é mais longo quando se tem um revestimento elástico, este efeito de amortecimento reduz as vibrações do pneu; a vibração causada pelo rolamento se propaga também pelo revestimento, dependendo do fator de perda e do amortecimento interno do revestimento, a propagação da vibração é atenuada.

### 3.1.3.4. Superfície Molhada

Segundo Astrana Junior (2006), a superfície do pavimento se encontrar molhada eleva consideravelmente o nível de pressão sonora emitido, podendo haver acréscimos de até 10 dB em comparação com o ruído gerado por uma superfície seca.

Segundo Bruitparif (2011), a presença de água no revestimento pode ter grande influência na produção de ruído, sendo este, preponderante quando a velocidade de deslocamento do veículo é considerada baixa, além disso, o impacto da água presente na pista depende em grande parte da textura deste revestimento. Em concreto asfáltico drenante, a água aparentemente não aumenta em grandes níveis o ruído gerado, pois percola nos vazios, não permanecendo na superfície do pavimento. Porém, o oposto é observado em concreto asfáltico convencional, que mostra grande acréscimo nos níveis de emissão. A Tabela 3.1 a seguir apresenta valores aproximados que refletem a influência da umidade no concreto asfáltico denso, em dependência da quantidade de água presente no revestimento e da velocidade do veículo no ruído emitido.

Tabela 3.1 – Influência Velocidade e Quantidade de Água na Emissão de Ruído.

Quantidade de Água no Revestimento	0 - 60 Km/h	61 - 80 Km/h	81 - 130 Km/h
Seco	Referência	Referência	Referência
Úmido	+ 2 dB	+ 1 dB	+ 0 dB
Moderadamente Molhado	+ 4 dB	+ 3 dB	+ 2 dB
Molhado	+ 6 dB	+ 4 dB	+ 3 dB

Fonte: Adaptado de BRUITPARIF (2011).

## 3.2. FATORES INFLUENTES NA ABSORÇÃO SONORA DOS REVESTIMENTOS

### 3.2.1. Teor de Vazios e descontinuidade Granulométrica

Segundo Bruitparif (2011), um alto teor de vazios comunicantes fornece uma boa capacidade de absorção sonora. Esta propriedade pode ser melhorada através da aplicação de uma descontinuidade na seleção do tamanho dos agregados da mistura.

Segundo Meurer Filho (2001), o ruído do contato pneu-pavimento sofre reduções quando é aplicado o uso de revestimentos drenantes. A proporção de redução do ruído depende de fatores como o tamanho dos agregados, espessura da camada e teor de vazios. Os asfaltos drenantes são misturas asfálticas com grande teor de vazios comunicantes que são obtidos através da dosagem adequada da mistura. A granulometria dos concretos asfálticos drenantes apresentam uma descontinuidade, é esta descontinuidade a responsável pelo teor de vazios comunicantes, assim, oferecendo permeabilidade à mistura.

A eliminação de uma classe granular intermediária favorece a criação de lacunas no pavimento finalizado, melhorando a porosidade e, portanto o desempenho em termos de

absorção sonora, além da adesividade, sem afetar as propriedades mecânicas (BRUITPARIF, 2011).

Segundo Meurer Filho (2001), para algumas formulações, esta descontinuidade granulométrica pode não ser bem definida, ou seja, sem a eliminação completa de determinado diâmetro de peneira, já em outras misturas, para a obtenção de um alto teor de vazios, são determinadas ausências de peneiras bem definidas na curva granulométrica. A descontinuidade pode variar de acordo com o tamanho máximo dos granulares adotados na mistura, em geral, os concretos asfálticos drenantes mais eficientes são aqueles com uma lacuna bem definida na curva granulométrica, com ausência de areia e presença de filler.

### 3.2.2. Redução do Tamanho dos Granulares

Astrana Junior (2006), afirma que o parâmetro mais importante para a maximização da absorção sonora das misturas asfálticas é a variação do tamanho máximo dos agregados. Para a faixa de frequência de 1000 Hz, reportada na bibliografia como a faixa de frequência mais incomodativa gerada pelo ruído de rolagem, os maiores valores de coeficiente de absorção sonora correspondem aos materiais com tamanho máximo de agregados menores, ou seja, a diminuição do tamanho máximo dos agregados favorece a absorção sonora.

Segundo Bruitparif (2011), a redução do tamanho do agregado deve considerar algumas propriedades da rocha em questão, como a resistência ao polimento e resistência ao desgaste por atrito. O autor afirma ainda, que a redução do tamanho das partículas na mistura pode afetar a resistência ao deslizamento, isto porque as arestas agudas justapostas das pequenas partículas contribuem para a microtextura, desta forma, pode-se empregar uma rocha menos resistente no que tange o polimento desde que a mesma apresente uma boa resistência ao desgaste por atrito.

### 3.2.3. Integração de Matrizes Elastoméricas

Segundo Astrana Junior (2006), a utilização de polímeros para a modificação de ligantes asfálticos é benéfica no que tange o nível de envolvimento do agregado pelo betume, visto que o polímero induz a uma formação mais espessa da película betuminosa, conservando a mistura mais coesa além de melhorar a adesividade. As principais classes de polímeros utilizados para este fim são os plastômeros, que possuem características plásticas em suas propriedades e os elastômeros que oferecem mais características elásticas ao material.

Segundo Dumke (2005), a modificação do ligante asfáltico pela incorporação de polímero na mistura permite alcançar características como:

Melhoria da suscetibilidade térmica: a consistência do ligante permanece inalterado mesmo submetendo-o a uma larga faixa de temperatura. Quando inserido em um clima frio, este ligante se apresentará mais flexível e com uma maior capacidade de resistir a trincamentos e a fissuração. Já quando implantado em um local com temperaturas mais elevadas, a deformação permanente é mais bem controlada devido ao maior ponto de amolecimento e maior viscosidade do material;

Resistência maior ao envelhecimento: por manifestar maior viscosidade, o emprego do ligante modificado aumenta a espessura de película sobre o agregado, esta característica protege o pavimento contra o envelhecimento;

Resistência coesiva: ligantes modificados possuem maior capacidade de manter os agregados da mistura unidos;

Poder de adesão: melhora a propriedade da mistura no que tange o arrancamento do agregado, principalmente quando submetido à ação da água;

Recuperação elástica: preserva a integridade do revestimento mesmo quando sujeito a altos níveis de deformação, diferente dos ligantes convencionais que apresentam comportamento dúctil;

Asfaltos modificados por polímero visam conferir à mistura melhor durabilidade. Os polímeros termoplásticos possuem comportamento similar ao do betume, que amolecem quando submetidos a temperaturas elevadas. Já os elastômeros, contribuem para propriedades como elasticidade e coesão. Os elastômeros SBS (estireno-butadieno-estireno), agregam características de grande elasticidade em uma larga faixa de temperaturas, tanto altas como baixas, além de benefícios relacionados à viscosidade. Sendo assim, ligantes modificados por SBS diminuem a suscetibilidade térmica do pavimento, principalmente ao frio, aumentam a coesão, arrancamento e cisalhamento (MEURER FILHO, 2001).

Os ligantes modificados por polímero possuem como principal vantagem a sua relação temperatura/viscosidade não linear. Este material é mais viscoso que o ligante convencional, porém, sem perder a ductilidade, e ainda, quando submetido à altas temperaturas, não perde sua consistência com tanta facilidade quanto os ligantes clássicos, portanto, o emprego deste material diminui a suscetibilidade ao trincamento à baixas temperaturas, bem como a formação de trilha de roda à temperaturas elevadas (SPECHT e CERRATI, 2003 apud DUMKE, 2005, p. 42).

#### 3.2.4. Velocidade de Rolamento

Segundo Astrana Junior (2006), podem ocorrer ampliações de 9 a 13 decibéis por duplicação de velocidade, dependendo das características vibro-acústicas e da textura do pavimento em questão, pois aumentam as vibrações mecânicas de impacto, choque e adesão dos pneus sobre a pista, além dos efeitos aerodinâmicos. Complementa Alves Filho (1997) que há o aumento médio de 10 dB no nível de ruído por duplicação da velocidade quando em superfícies secas e de 12 dB quando em superfícies molhadas, o autor salienta que, sobre autovias, os níveis de ruído aumentam quase que linearmente com o acréscimo de velocidade, em média 1 dB para cada 10 Km/h acrescidos, ao aplicar este conceito à vias urbanas, o efeito da velocidade é muito mais complexo.

Com tráfego em baixas velocidades e inclusão de caminhões, existe uma variação na escala de ruído emitido, devido a picos intermitentes que são gerados pela passagem dos mesmos, sobretudo quando as carrocerias estão vazias, pois geram de 1 a 2% a mais de ruído nesta condição. Quando há congestionamentos, os picos de ruído se elevam, já com o fluxo fluindo suavemente em níveis médio-baixos de tráfego, os picos são relativamente baixos, conforme o fluxo de veículos aumenta os picos também crescem. O autor afirma ainda que o ruído nas condições de frenagem e aceleração durante a noite ou nas horas de pico do dia são condições significativas no ruído urbano (ALVES FILHO, 1997).

#### 3.2.5. Constituição de um Revestimento Silencioso

Um revestimento é considerado silencioso quando o ruído total gerado pela interação pneu-pavimento é reduzida em no mínimo 3 dB. Em decorrência das características do pavimento utilizado quando em comparação com os revestimentos rodoviários tradicionais (SANDBERG e EJSFONT, 2002 apud SINICESP, 2012, p. 5).

Bruitparif (2011) apresenta considerações sobre o desenvolvimento de revestimentos e como o melhor desempenho acústico está relacionado com todas as características influentes ao ruído de rolamento:

- A superfície da estrutura da pista deve ser homogênea e com o menor número possível de irregularidades para que se possa evitar a vibração dos pneus;
- O revestimento não deve ser liso, mas sim possuir asperidades em quantidade suficiente. Uma textura aberta proporciona a circulação de ar e reduz o efeito do bombeamento de ar;

- Boa porosidade para ter boa capacidade de absorção sonora gera redução do ruído advindo de fenômenos de bombeamento de ar, sendo que a absorção sonora aumenta com a espessura do pavimento;
- Propriedades elásticas satisfatórias permitem atenuar as vibrações do pneu e, portanto reduzir o ruído do rolamento, a introdução de polímero na mistura auxilia nesta característica;
- As camadas componentes da estrutura que estão abaixo da camada de revestimento devem ter boa estabilidade, pois mesmo que o ruído do rolamento provenha da interação pneu e revestimento, as camadas inferiores também possuem importância para reduzir a poluição sonora. Com as camadas inferiores instáveis, a superfície de rolamento logo apresentará fragmentações que geram ruído excessivo;
- A adição de filler na mistura do revestimento evita deformações plásticas de origem térmica e mecânica;
- Utilização de ligantes com boa coesão evita a remoção dos agregados da mistura, ajudando a manter a rugosidade do pavimento ao longo do tempo.

### 3.2.6. Degradação Acústica

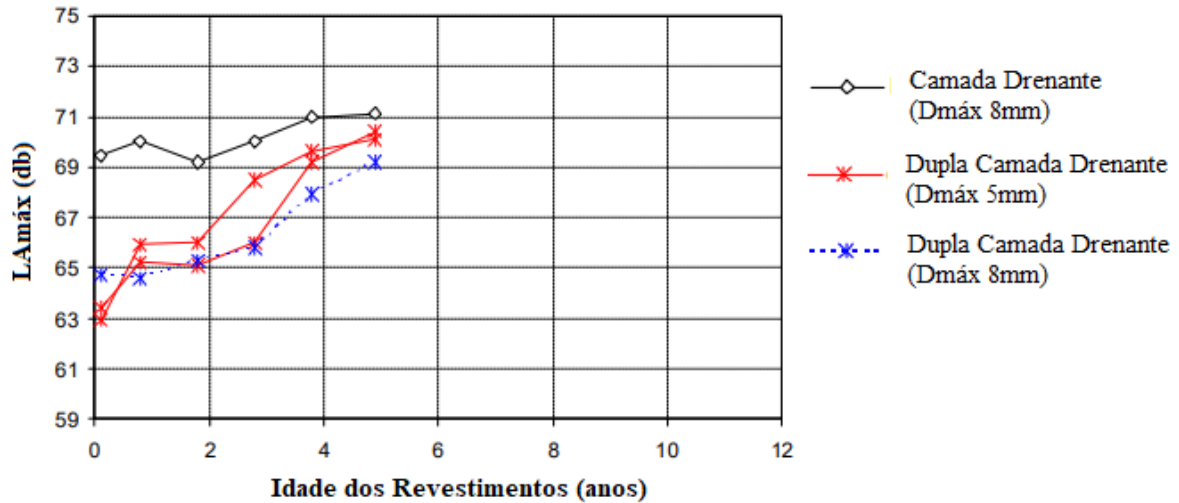
Em trechos rodoviários submetidos a alto tráfego de veículos, a perda das propriedades acústicas do pavimento se dá de forma mais acelerada se comparado a trechos classificados como de baixo tráfego. A carga do tráfego é, portanto uma variável decisiva na durabilidade acústica dos revestimentos (OFEV e OFROU, 2010).

Segundo FEHRL (2006), o desempenho acústico dos revestimentos asfálticos é degradado com o passar do tempo, este fenômeno está atrelado às cargas de tráfego sob as quais os pavimentos foram submetidos, à deterioração dos materiais componentes da mistura e à mudança da textura da superfície. Ainda, no caso de revestimentos porosos, a colmatação dos poros também interfere na degradação acústica ao longo do tempo.

Através de estudos para comparação do ruído gerado por diferentes tipos de pavimentos porosos, durante um período de ensaios com duração de oito anos, que teve como referência o pavimento asfáltico denso convencional, verificou-se que nos primeiros seis anos de estudo as superfícies porosas geravam menos ruídos se comparadas às superfícies densas. Não foram realizadas limpezas nas superfícies dos revestimentos (RAABERG *et al.*, 2001 apud KNABBEN, 2012, p. 91).

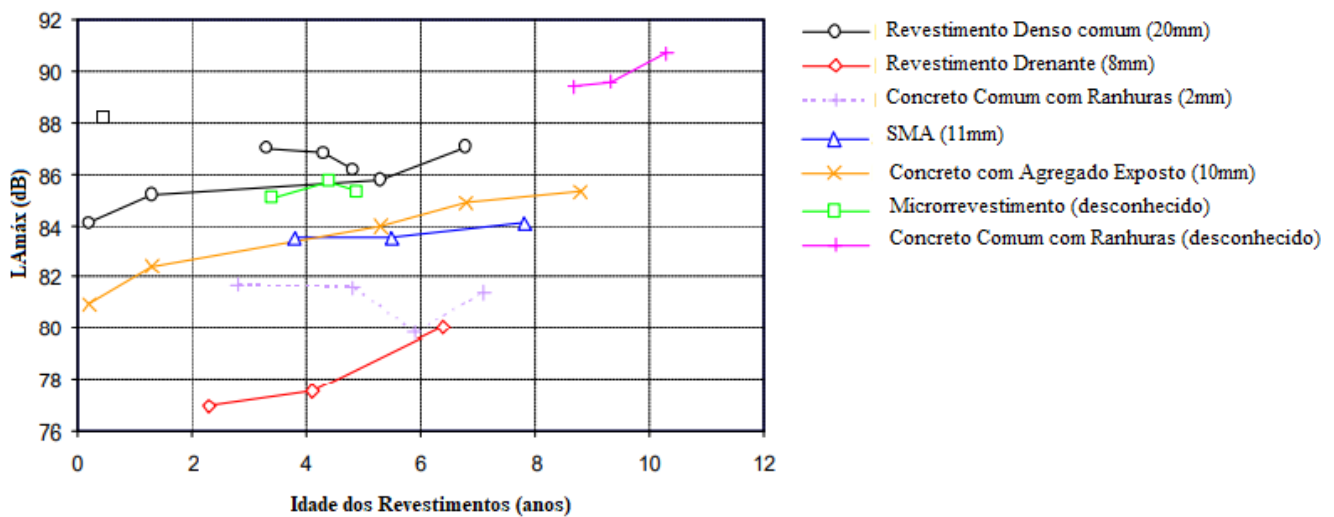
As Figuras 3.11 e 3.12 a seguir apresentam o desempenho acústico de diferentes pavimentos ao longo do tempo.

Figura 3.11 – Desempenho Acústico dos Pavimentos ao Longo do Tempo para Veículos a 50 Km/h.



Fonte: Adaptado de FEHRL (2006).

Figura 3.12 – Desempenho Acústico dos Pavimentos ao Longo do Tempo para Veículos a 110 Km/h.



Fonte: Adaptado de FEHRL (2006).

A partir das figuras acima, pode-se notar que para a maioria dos revestimentos o desempenho acústico decai com o passar dos anos. Há um aumento gradual de ruído emitido pelos revestimentos conforme o avanço do tempo.

## 4. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

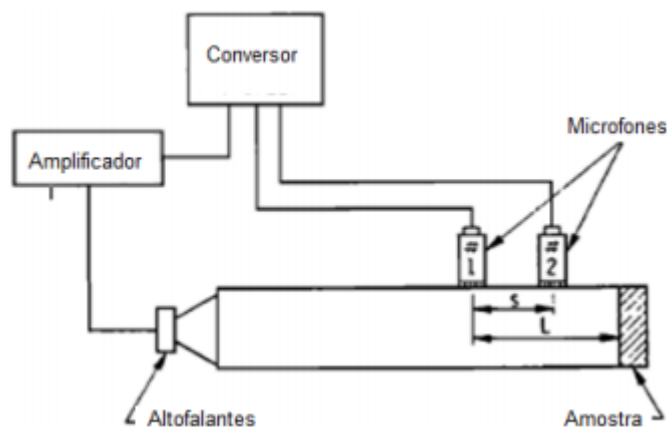
O objetivo da apresentação deste capítulo consiste em expor conceitos acerca dos métodos de medição da absorção sonora em misturas asfálticas. Serão explanadas quatro metodologias de medição distintas que buscam quantificar a intensidade dos ruídos gerados pela movimentação do tráfego sobre a superfície dos pavimentos.

### 4.1. TUBO DE IMPEDÂNCIA OU DE KUNT

Neste método, em uma das extremidades de um tubo com seção transversal uniforme, é alocado um alto-falante com o intuito de produzir ondas acústicas. Na outra extremidade do tubo é inserida a amostra da qual se deseja extrair as propriedades acústicas. As ondas estacionárias incidem na amostra e refletem, a pressão máxima e mínima no tubo podem ser captadas por microfones (OLIVEIRA e TEODORO, 2005).

Segundo Busulo (2017), tubo de impedância é um equipamento simples em comparação com outros instrumentos utilizados para medir algumas grandezas acústicas, como impedância acústica e coeficiente de absorção sonora. O tubo de impedância é constituído basicamente por um tubo, que pode se apresentar em formato quadrado ou circular pelo qual as ondas sonoras se propagarão, microfones para captar o som incidente, alto-falantes para produzir a onda sonora e alguns outros itens como amplificadores e conversores de sinal. A Figura 4.1 a seguir ilustra esquematicamente um tubo de impedância.

Figura 4.1 – Tubo de Impedância.



Fonte: CHU, 1986 apud BUSULO, 2017.



Os alto-falantes emitem as ondas acústicas, essas ondas passam pela amostra de pavimento inserida no interior do tubo, após incidirem sobre a amostra, são captadas por microfones onde são feitas as captações dos sinais acústicos. Estes sinais são transmitidos para um receptor de sinais que fará a leitura destas informações, a partir delas, chega-se aos valores de impedância acústica e coeficiente de absorção sonora de uma amostra (BUSULO, 2017).

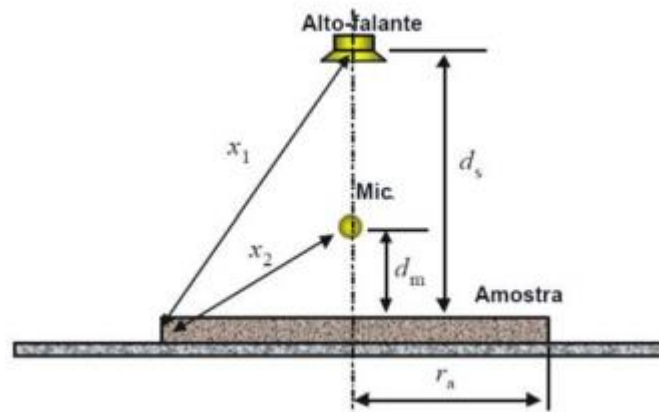
O autor afirma ainda que a construção de um tubo de impedância é regida por algumas normas e fórmulas matemáticas e que as características do tubo que devem ser definidas são: diâmetro do tubo, comprimento do tubo, faixa de frequência de funcionamento, posição dos microfones, distância entre os microfones e local de fixação da amostra o tubo.

Este ensaio é utilizado no geral para realizar ensaios em materiais absorventes e limita-se a aplicação de ondas planas incidindo na direção normal a superfície da amostra a ser ensaiada. A medição do coeficiente de absorção sonora com o tubo de impedância apresenta boa repetibilidade e resultados precisos. Este método é recomendado para qualificar níveis de emissão de ruído de superfícies de pavimentos submetidos ao tráfego de veículos em aceleração (ASTRANA JÚNIOR, 2006).

#### 4.2. ONDAS SONORAS COM INCIDÊNCIA NORMAL *IN SITU*

Segundo Oliveira e Teodoro (2005), o método *in situ* consiste em uma fonte sonora transiente direcionada diretamente para a superfície a ser analisada e com o ângulo de incidência desejado. Um microfone é colocado entre o alto-falante e a amostra para o registro da onda sonora, o microfone é posicionado entre a fonte e a superfície para captar tanto a onda incidente quanto a onda refletida pela superfície da amostra, sendo que as ondas incidentes e refletidas são separadas e utilizadas para o cálculo dos coeficientes de reflexão e posteriormente para os cálculos dos coeficientes de absorção. A Figura 4.2 apresenta um esquema do método *in situ*, onde  $d_s$  representa a distância entre o alto-falante e a amostra e  $d_m$  representa a distância entre o microfone e a amostra.

Figura 4.2 – Esquema de Medição da Absorção Sonora *In Situ*.



Fonte: OLIVEIRA e TEODORO (2005).

Segundo Astrana Júnior (2006), neste ensaio, a fonte sonora é direcionada integralmente e de maneira direta para a superfície a ser avaliada. As ondas que são refletidas pela superfície e o campo incidente são separados para cálculo da absorção. Diferentemente do método do tubo de impedância, ao utilizar a incidência *in situ*, pode-se variar o ângulo de incidência da onda sobre a amostra, além de realizar o ensaio com ângulo de incidência normal, podendo assim, realizar comparações das medições. No ensaio *in situ* a área de análise é maior do que a necessária para o ensaio pelo tubo de impedância.

#### 4.3. CÂMARA REVERBERANTE

Segundo Oliveira e Teodoro (2005), quando um alto-falante ou outra fonte sonora emite ondas em um ambiente fechado, o nível de pressão sonora em regime permanente e o decaimento do som reverberante quando a fonte sonora é interrompida, são regidos pelas características de absorção sonora das superfícies limítrofes ou dos objetos dentro desse espaço.

A quantidade de potencia incidente que é absorvida pelo objeto depende do ângulo de incidência, para a análise de um material como absorvedor é importante o conhecimento das características de absorção sonora da superfície em vários ângulos de incidência para trabalhar com a média dos valores, podendo-se estimar o tempo de reverberação de um ambiente, como uma fábrica ou um auditório por exemplo (OLIVEIRA e TEODORO, 2005). A Figura 4.3 a seguir ilustra a estrutura de uma câmara reverberante.

Figura 4.3 – Câmara Reverberante.



Fonte: OLIVEIRA e TEODORO (2005).

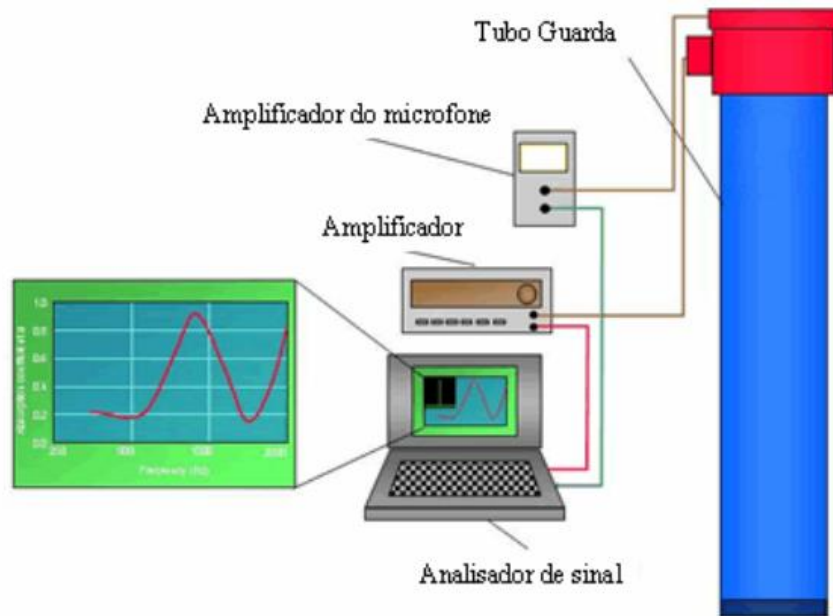
Oliveira e Teodoro (2005), afirmam ainda que esta é a única maneira de se obter valores de absorção de objetos discretos, como cadeiras, poltronas, entre outros. Neste ensaio, visto que a intensidade sonora é independente da posição do objeto dentro da câmara, o campo sonoro é caracterizado como difuso e os sons que atingem a superfície incidem de maneira aleatória.

Segundo Astrana Júnior (2006), as medições deste método ocorrem em laboratório dentro de uma câmara reverberante. A hipótese da metodologia adota campos sonoros difusos e o ensaio é embasado no comportamento do som em ambientes fechados, entretanto, o autor afirma que a utilização deste método de ensaio para medição do coeficiente de absorção sonora de pavimentos asfálticos é inviável, pois necessitaria da construção da estrutura do pavimento dentro de uma câmara reverberante.

#### 4.4. GUARD TUBE MÉTHOD OU MÉTODO DO TUBO GUARDA

Segundo Astrana Júnior (2006), este método pode ser entendido como uma adaptação do tubo de impedância para realização de medições em campo e não em laboratório. o equipamento é colocado diretamente sobre a superfície que se deseja analisar e da mesma maneira que no processo do tubo de impedância, os sinais acústicos incidentes e refletidos são distinguidos e o coeficiente de absorção sonora é calculado, as medições também são captadas através de microfones, entretanto, este equipamento é constituído por dois tubos, onde o tubo externo é unicamente funcional para isolar o tubo interno que realiza efetivamente a medição. A figura 4.4 a seguir ilustra esquematicamente o método do tubo guarda.

Figura 4.4 – Esquema de Medição do Método do Tubo Guarda.



Fonte: ASTRANA JÚNIOR (2006).

O autor afirma ainda, que este método de medição não expõe o pavimento a danos e é considerado um método prático para realização de medições em campo. Isto se deve ao fato de que é necessário apenas o desvio do tráfego para coletar as informações nos pontos previamente determinados.

Visto o tudo de impedância acústica ser um equipamento simples em comparação com outros instrumentos apresentados, ser comumente aplicado para fins de caracterização de materiais absorventes e expor resultados precisos e com boa repetibilidade nos procedimentos já concluídos e relatados, optou-se por este equipamento para realizar os ensaios desta pesquisa.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1. MATRIZ PÉTREA

O material pétreo utilizado é oriundo de britagem de maciço rochoso gnáissico e foi obtido a partir de jazida situada na região metropolitana de Joinville/SC, pertencente à empresa Rudnick Minérios Ltda. A Tabela 5.1 apresenta os dados de caracterização do material.

Tabela 5.1 - Caracterização da Matriz Granular Pétreo.

Ensaio	Norma	Limites Normativos	Resultado Laboratorial	
			Quantitativo	Qualitativo
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035 (1998) e DNER-ME 037 (1997)	Máx. 50%	17,50%	-
Índice de forma	ABNT NBR 7809 (2006)	Mín. 0,5	0,60	Boa cubicidade
Resistência ao ataque químico (Durabilidade)	DNER-ME 089 (1994) e DNER-ME 037 (1997)	Máx. 12%	5,30%	-
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 078 (1994)	-	-	Má
Equivalência de areia	DNER-ME 054 (1997)	-	78,0%	
Teor de material pulverulento	DNER-ME 266 (1997) e DNER-ME 037 (1997)	Máx. 1,0%	0,40%	
Absorção	-	-	0,50%	-

Fonte: Clara (2020).

### 5.2. LIGANTES BETUMINOSOS

No que diz respeito aos ligantes betuminosos, a amostra de penetração 30/45 (0,1mm) em sua forma pura foi fornecida pela refinaria REPLAN da Petrobrás S.A, localizada na cidade de Paulínia/SP. A matriz base de penetração 50/70 (0,1mm) modificada com 4% de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), denominada Poliflex 60/85, é proveniente de distribuidora CBB Asfaltos, situada em Curitiba/PR. As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam as principais características dos materiais.

Tabela 5.2 - Caracterização do Ligante Betuminoso 30/45 (0,1mm).

Ensaio	Norma	Resultado Laboratorial	Limite Normativo	
			Mínimo	Máximo
Ponto de amolecimento Anel e Bola	DNIT-ME 131 (2010)	53,5°C	> 52°C	-
Penetração	DNIT-ME 155 (2010)	34,0 (0,1mm)	30-45	-
Índice de Pfeiffer e Van Doormaal (IP)	Resolução nº19 (ANP, 2005)	-1,2	-1,5 a 0,7	-
Viscosidade Saybolt-Furol	ABNT NBR 14950 (2003)	Compactação entre 139°C e 145°C	-	-
		Usinagem entre 149°C e 155°C	-	-
Massa Específica	ABNT NBR 6296 (2012)	1,010g/cm <sup>3</sup>	-	-

Fonte: Siroma (2018).

Tabela 5.3 - Caracterização do Ligante Betuminoso Poliflex 60/85.

Ensaio	Unidade	Norma	Resultado Laboratorial	Limite Normativo	
				Mínimo	Máximo
Ponto de Amolecimento	°C	ABNT NBR 6560 (2016)	65,4	60	-
Penetração, 100 g, 5s, 25°C, 0,1mm	0,1mm	ABNT NBR 6576 (2007)	40	40	70
Recuperação Elástica, 20 cm, 25°C	%	ABNT NBR 15086 (2006)	90	85	-
Viscosidade Brookfield	135°C, spindle 21 20 rpm	ABNT NBR 15184 (2004)	1605	-	3000
	150°C, spindle 21 50 rpm		873	-	2000
	177°C, spindle 21 100 rpm		312	-	1000
Massa específica a 25 °C	g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 6296 (2012)	1,014	-	-

Fonte: Fagundes (2020).

### 5.3. COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

As misturas asfálticas utilizadas nesta pesquisa foram concebidas granulometricamente de acordo com os princípios normativos franceses (MANUEL LPC, 2007), recebendo a seguinte denominação: *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), *Béton Bitumineux Très Mince* (BBTM) e *Béton Bitumineux Drainante* (BBD<sub>r</sub>). No Brasil, estas

formulações recebem os nomes de mistura asfáltica densa, muito delgada e drenante, nesta ordem.

A formulação BBSG foi reproduzida da pesquisa de Barra (2009), enquanto a BBTM e a BBDr do trabalho de Fagundes (2020). A Tabela 5.4 apresenta e a Figura 5.1 ilustra, respectivamente, as distribuições granulométricas das misturas asfálticas.

Tabela 5.4 - Curvas Granulométricas Utilizadas na Composição das Misturas Asfálticas.

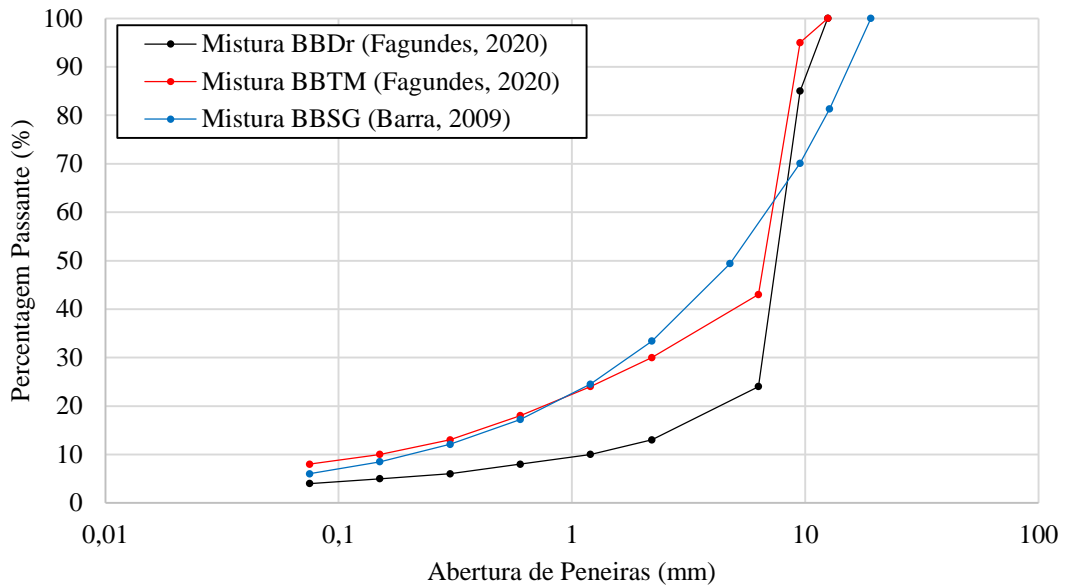
Mistura BBDr (Fagundes, 2020)			Mistura BBTM (Fagundes, 2020)		
Peneira (mm)	Percentagem Passante (%)	Percentagem Retida (%)	Peneira (mm)	Percentagem Passante (%)	Percentagem Retida (%)
12,7	100,00	-	12,7	100,00	-
9,5	85,00	15,00	9,5	95,00	5,00
6,3	24,00	61,00	6,3	43,00	52,00
2,2	13,00	11,00	2,2	30,00	13,00
1,2	10,00	3,00	1,2	24,00	6,00
0,6	8,00	2,00	0,6	18,00	6,00
0,3	6,00	2,00	0,3	13,00	5,00
0,15	5,00	1,00	0,15	10,00	3,00
0,075	4,00	1,00	0,075	8,00	2,00
Fundo	-	4,00	Fundo	-	8,00

Mistura BBSG (Barra, 2009)		
Peneira (mm)	Percentagem Passante (%)	Percentagem Retida (%)
19,1	100,00	-
12,7	81,3	18,7
9,5	70,1	11,1
4,76	49,4	20,8
2,2	33,4	16,6
1,2	24,5	8,8
0,6	17,2	7,3
0,3	12,1	5,1
0,15	8,5	3,6
0,075	6,0	2,5
Fundo	-	6,0

Fonte: Adaptado dos autores citados.

Figura 5.1 - Curvas Granulométricas das Misturas Asfálticas BBSG, BBDr e BBTM.



Fonte: Autor (2020).

É importante destacar que a mistura BBSG foi composta integralmente por frações granulares gnáissicas, enquanto as misturas BBTM e BBDr tiveram cada uma o aporte de 2,0% de cal hidratada CH-1 no percentual passante na peneira de abertura 0,075mm, pois como se tratam de formulações que possuem descontinuidades na composição granulométrica no intervalo 2/6mm (Figura 5.1), possuem maior volume de vazios em suas estruturas internas. Logo, necessitam do aporte de material com característica pozolânica para formação de um mástique resistente, capaz de auxiliar na melhor ancoragem do ligante betuminoso às frações granulares, inibindo a desagregação do material quando submetido ao carregamento solicitante no campo (Clara *et al.*, 2020).

Ainda, com base na Equação 5.1 de Fuller-Talbot, tem-se que as curvas granulométricas apresentadas na Figura 5.1 possuem os seguintes expoentes 'n' de graduação: 0,51 (BBSG); 0,49 (BBTM) e 0,63 (BBDr). De acordo com DNIT (2006), os dois primeiros expoentes se enquadram na graduação densa, enquanto o último na graduação aberta. Porém, deve ser feita a ressalva de que como a mistura BBTM possui descontinuidade fracionária no intervalo 2/6mm, cabe de forma mais adequada enquadrá-la na graduação semi-densa.

$$n = \frac{\log(\%p_{0,075\text{mm}}) - \log(100)}{\log\left(\frac{0,075}{D}\right)} \quad (5.1)$$



onde:

D: diâmetro máximo, correspondente à abertura da peneira em que passa 100% das frações (mm);

n: expoente indicador de graduação da curva (se mais aberta ou mais densa, por exemplo);

$\%p_{0,075\text{mm}}$ : é o percentual passante na menor abertura de peneira da série (0,075mm).

#### 5.4. COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS DE TESTE

Os teores de ligante betuminoso, em peso, adotados para a dosagem das misturas asfálticas foram os mesmos considerados como ótimos pelas pesquisas já mencionadas de Barra (2009) e Fagundes (2020), a saber: 4,86% (BBSG) e 4,22% (BBTM e BBDr). As diferentes origens dos granulares utilizados nestas pesquisas poderiam influenciar as determinações dos teores ótimos das misturas asfálticas, porém, por efeitos comparativos e de similaridade, os mesmos foram adotados. As amostras foram produzidas a partir do compactador Marshall (Figura 5.2), totalizando 30 corpos de prova (20 BBSG, 5 BBTM e 5 BBDr), devido ser a metodologia oficialmente adotada no Brasil pelo DNIT (DNER-ME 043, 1995).

Figura 5.2 - Soquete Marshall.



Fonte: Autor (2020).

A partir das medições geométricas dos corpos de prova e da realização de procedimento a vácuo, com pressão de 0,05MPa (ABNT NBR 15619, 2012), foram

determinadas as massas volumétricas aparente (MVA) e real (MVR) das misturas asfálticas, bem como o teor de vazios (%V). A Tabela 5.5 apresenta os valores médios obtidos.

Tabela 5.5 - Propriedades Volumétricas das Misturas Asfálticas.

Mistura Asfáltica	MVA (g/cm <sup>3</sup> )	MVR (g/cm <sup>3</sup> )	V (%)
BBSG	2,587	2,743	5,7
BBTM	2,314	2,594	10,8
BBDr	2,136	2,562	16,6

Fonte: Autor (2020).

Entretanto, nesta pesquisa, a ideia foi constituir amostras que representassem as condições de superposição das camadas asfálticas no campo, a fim de que fossem simuladas as propagações das ondas sonoras em um ambiente mais próximo possível da situação prática. Para tanto, foram montados 15 conjuntos de amostras com as configurações apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Composição dos Conjuntos de Amostras.

Conjunto N°	Posição	Composição
1-5	1ª Camada	BBSG
	2ª Camada	BBSG
6-10	1ª Camada	BBTM
	2ª Camada	BBSG
11-15	1ª Camada	BBDr
	2ª Camada	BBSG

Fonte: Autor (2020).

Cabe esclarecer que as composições apresentadas na Tabela 5.6 representam na 1ª camada as superfícies de rolamento, ou seja, aquelas que estarão diretamente em contato com os pneumáticos quando da aplicação das cargas solicitantes no campo. Já a 2ª camada desempenha a função de ligação (*binder*) entre as camadas de rolamento e estruturais do pavimento (Figura 5.3).

Figura 5.3 - Representação da Estrutura do Pavimento com as Camadas de Rolamento e de Ligação.



Fonte: Autor (2020).

A adesão entre as superfícies dos corpos de prova para compor a superposição das amostras foi viabilizada com a aplicação de emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL-1C) (Figura 5.4), usualmente utilizada em obras de pavimentação para a execução dos serviços de pintura de ligação, em que as seguintes dosagens foram adotadas a partir da curva granulométrica:  $0,8 \text{ l/m}^2$  (BBSG),  $0,9 \text{ l/m}^2$  (BBTM) e  $1,0 \text{ l/m}^2$  (BBDr). Cabe ressaltar que as dosagens adotadas estão conformidade com as especificações brasileiras (DNIT-ES 145, 2012) para aplicações de emulsões diluídas em pinturas de ligação.

Figura 5.4 - Aplicação da Emulsão na Interface dos Conjuntos de Amostras.



Fonte: Autor (2020).

Outro aspecto importante a ser destacado é que a emulsão RL-1C foi utilizada em substituição à de ruptura rápida RR-1C, pois como duas das três curvas granulométricas

possuem descontinuidades (BBTM e BBDr; Figura 5.1), ou seja, com maior quantidade de vazios (Tabela 5.5), conseqüentemente mais rugosa, verificou-se que seria prudente aplicar uma emulsão que permitisse maior tempo de ruptura, a fim de propiciar uma adesão mais efetiva das superfícies. Assim, para que não houvesse distinção entre as emulsões utilizadas entre os conjuntos de amostras, foi adotada a mesma para todos. O tempo médio de ruptura foi de 72h.

Para compor as camadas de ligação, a mistura BBSG foi escolhida em razão de suas características serem destinadas também a este tipo de funcionalidade no projeto de pavimentos reais (MANUEL LPC, 2007). Para manter a 2ª camada como uma variável constante no processo de tomada das medições de absorção sonora, tendo-se como única variante nos experimentos a camada superficial.

A Figura 5.5 ilustra os conjuntos dos corpos de prova constituídos após os procedimentos de aplicação da emulsão RL-1C em suas interfaces.

Figura 5.5 - Conjuntos de Amostras Após a Aplicação da Emulsão em suas Interfaces: Esquerda (BBDr/BBSG), Centro (BBTM/BBSG) e Direita (BBSG/BBSG).



Fonte: Autor (2020).

## 5.5. MEDIÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA

Para a realização das medições absorção sonora dos conjuntos de amostras descritos na seção 5.4, foi utilizado um tubo de impedância, também denominado de tubo de Kundt,

cujo princípio de operação foi descrito na seção 4.1. O equipamento utilizado pertence ao Centro de Pesquisas (CENPES) da Petrobrás, similar ao ilustrado na Figura 5.6.

Figura 5.6 - Tubo de Impedância Utilizado na Campanha Experimental.



Fonte: Gerges (1992).

O tubo é feito em aço inoxidável, com diâmetro interno de  $101,6\text{mm} \pm 1,0\text{mm}$ ,  $1000,0\text{mm}$  de altura, dispendo ainda de uma chapa de aço perfurada em sua base, com dimensões de  $30,0\text{cm} \times 30,0\text{cm} \times 0,03\text{cm}$ , a fim de evitar perda da propagação sonora na área de contato com os corpos de prova. O posicionamento entre os pontos de captação dos microfones é de  $68,0\text{mm}$ .

Os conjuntos de corpos de prova foram colocados no interior da base do tubo, a fim de que recebessem diretamente as ondas sonoras propagadas pela caixa amplificadora acoplada a um flange na parte superior (Figura 5.6), sem qualquer interferência entre a fonte emissora e o material receptor.

A parede do tubo possui  $3,0\text{mm}$  de espessura, a fim de que seja resistente aos impactos sonoros, sem que ocorram deformações de sua estrutura no transcurso dos testes e interfiram na trajetória da propagação das ondas, o que influenciaria diretamente na acurácia e credibilidade dos resultados.

De posse das informações do equipamento, foi possível definir as faixas frequenciais de trabalho, bem como a frequência de corte (Equações 5.2 a 5.5; GERGES, 1992).

$$f_{\text{mín}} > \frac{0,1c}{2S} \quad (5.2)$$

$$f_{\text{central}} = \frac{c}{4S} \quad (5.3)$$

$$f_{m\acute{a}x} < \frac{0,8c}{2S} \quad (5.4)$$

$$f_{corte} = \frac{1,84c}{\pi d} \quad (5.5)$$

onde:

c: velocidade do som no ar a 20°C (343m/s);

S: distância entre os microfones (m);

d: diâmetro do tubo (m).

Desta forma, as seguintes faixas frequenciais foram definidas: 250Hz (mínima), 1260Hz (central), 2000Hz (máxima) e 1980Hz (corte).

O alto-falante gera ondas sonoras estacionárias aleatórias que se propagaram no tubo de impedância como ondas planas excitadas por tons puros abaixo da frequência de corte ( $f_c$ ). Logo, abaixo da ' $f_c$ ' somente ondas planas se propagam no meio cilíndrico, e acima desta as ondas sonoras não se propagam como ondas planas, mas sim como ondas laterais ou cilíndricas (ASTRANA JUNIOR, 2006).

Tem-se, portanto, que as faixas de frequência definidas estão de acordo com o limite de corte, sem que haja problemas na adequada propagação das ondas sonoras, compreendendo inclusive a frequência de 1000Hz, considerada como a mais nociva e recorrente gerada pelo contato pneu-pavimento, conforme já discorrido ao longo do Capítulo 3. As determinações do coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) foram realizadas em cada conjunto amostral, obtendo-se o resultado médio em cada caso.

Considerando que a energia sonora transmitida para fora do tubo é aproximadamente nula, o ' $\alpha$ ' pode ser determinado conforme a Equação 5.6 (GERGES, 1992).

$$\alpha = 1 - \left| \frac{H_{AP} - e^{iks}}{e^{iks} - H_{AP}} \right|^2 \quad (5.6)$$

onde:

$\alpha$ : coeficiente de absorção sonora;

i: complexo conjugado;  $i = -1$ ;

k: número de ondas propagadas;

s: distância entre os microfones;

$H_{AP}$ : função de transferência necessária para a quantificação de  $\alpha$  (Equação 5.7).

(5.7)

$$H_{AP} = H_{AS} \cdot H_{SP}$$

onde:

$H_{AS}$ : função de transferência entre o sinal do microfone na posição inferior e o sinal do gerador;

$H_{SP}$ : função de transferência entre o sinal do gerador e o sinal do microfone na posição superior.

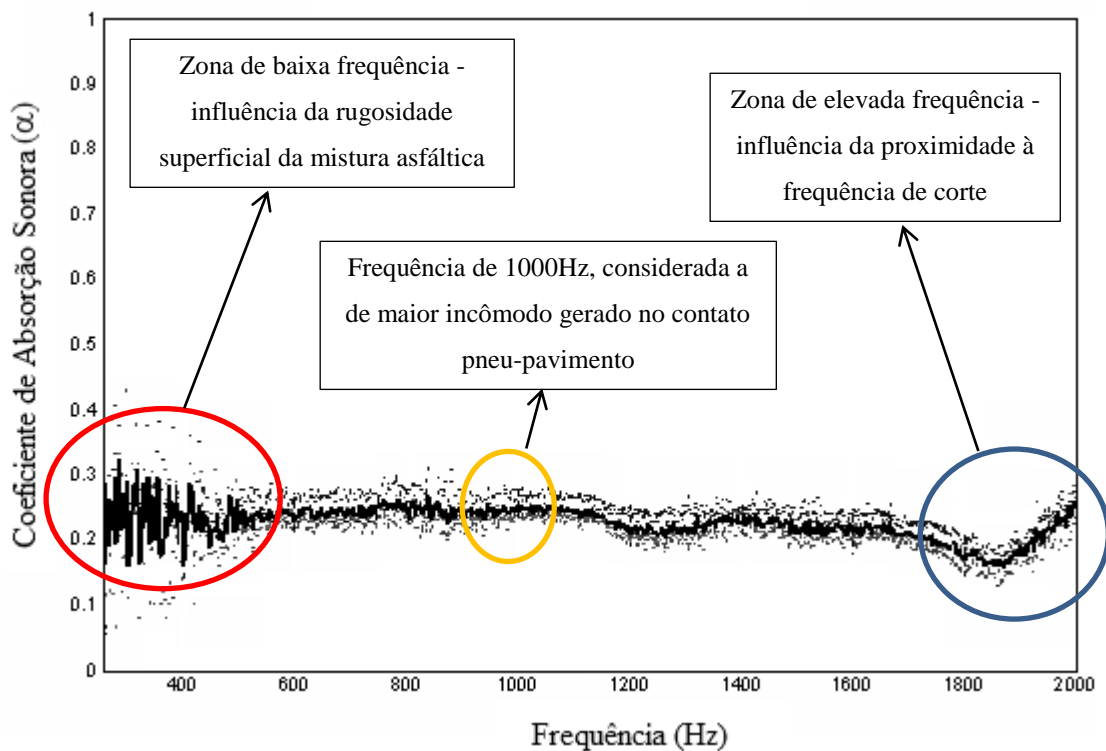
Estas funções de transferência  $H_{AS}$  e  $H_{SP}$  determinam o espectro cruzado de potência gerado nas posições inferior e superior do microfone definidas no tubo de impedância, as quais são processadas por aquisitor de dados digital.

Supondo que o sinal seja estacionário,  $H_{AS}$  e  $H_{SP}$  não necessitam ser determinados simultaneamente. Dessa forma, um único microfone pode ser usado para medir em sequência, a pressão sonora nas posições inferior e superior determinadas no distanciamento 's' no tubo de impedância. O processamento dos dados obtidos nos testes para as representações gráficas foi desenvolvido com o uso da ferramenta computacional MatLab.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a metodologia apresentada no Capítulo 5, tem-se que o conjunto amostral BBSG/BBSG apresentou valor médio de 0,25 para o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ), comportando oscilação a partir de 1800Hz, em que o valor médio de ' $\alpha$ ' até 1900Hz foi 0,18. Para a frequência de 1000 Hz, considerada crítica quanto ao incômodo gerado pelo ruído pneu-pavimento, o valor obtido foi de 0,26 (Figura 5.7).

Figura 5.7 - Curva de absorção sonora em relação à frequência do conjunto BBSG/BBSG.



Fonte: Autor (2020).

Destaca-se também a forte variação de ' $\alpha$ ' para frequências abaixo de 600Hz, o que pode ser atribuído à rugosidade superficial das misturas asfálticas associada à menor velocidade de propagação das ondas a baixas frequências, mais sensíveis à modificação de trajetória que em condições mais rápidas de incidência.

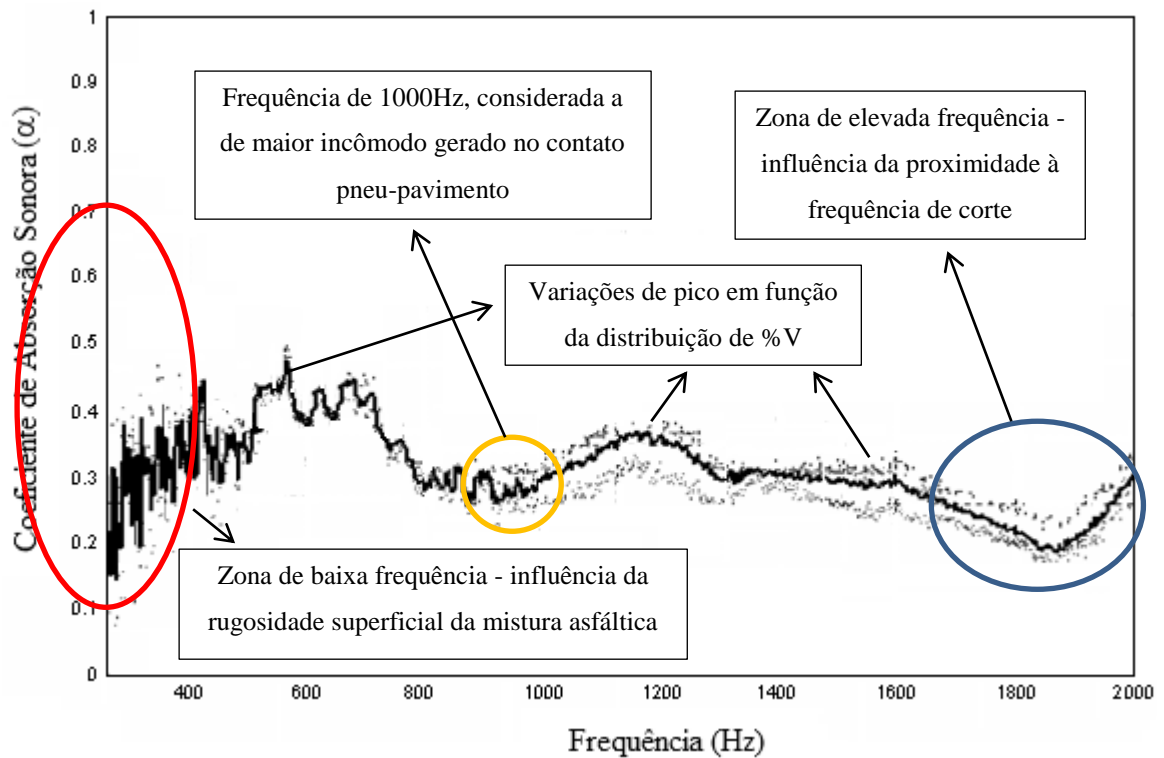
A partir de 1800Hz, percebe-se a influência da proximidade à frequência de corte ' $f_c$ ' de 2000Hz, em que conforme discutido na seção 5.5, as ondas sonoras não se propagam de forma plana, mas em trajetórias laterais ou cilíndricas, gerando perturbações no ponto de captação.



Verificar-se que estas tendências abaixo de 600Hz e acima de 1800Hz se repetem para todos os conjuntos amostrais testados, ratificando o raciocínio apresentado.

No caso dos conjuntos BBTM/BBSG, é perceptível que as oscilações de ' $\alpha$ ' que ocorreram abaixo de 600Hz são de maior escala que no conjunto BBSG/BBSG (Figura 5.8). Isto se explica pela descontinuidade granulométrica da mistura asfáltica BBTM no intervalo fracionário 2/6mm (Figura 5.1), formando uma superfície com maior rugosidade que a BBSG, de característica densa. Como resultado, tem-se maior difusão das ondas reflexivas propagadas a baixa frequência.

Figura 5.8 - Curva de absorção sonora em relação à frequência da mistura asfáltica BBTM.



Fonte: Autor (2020).

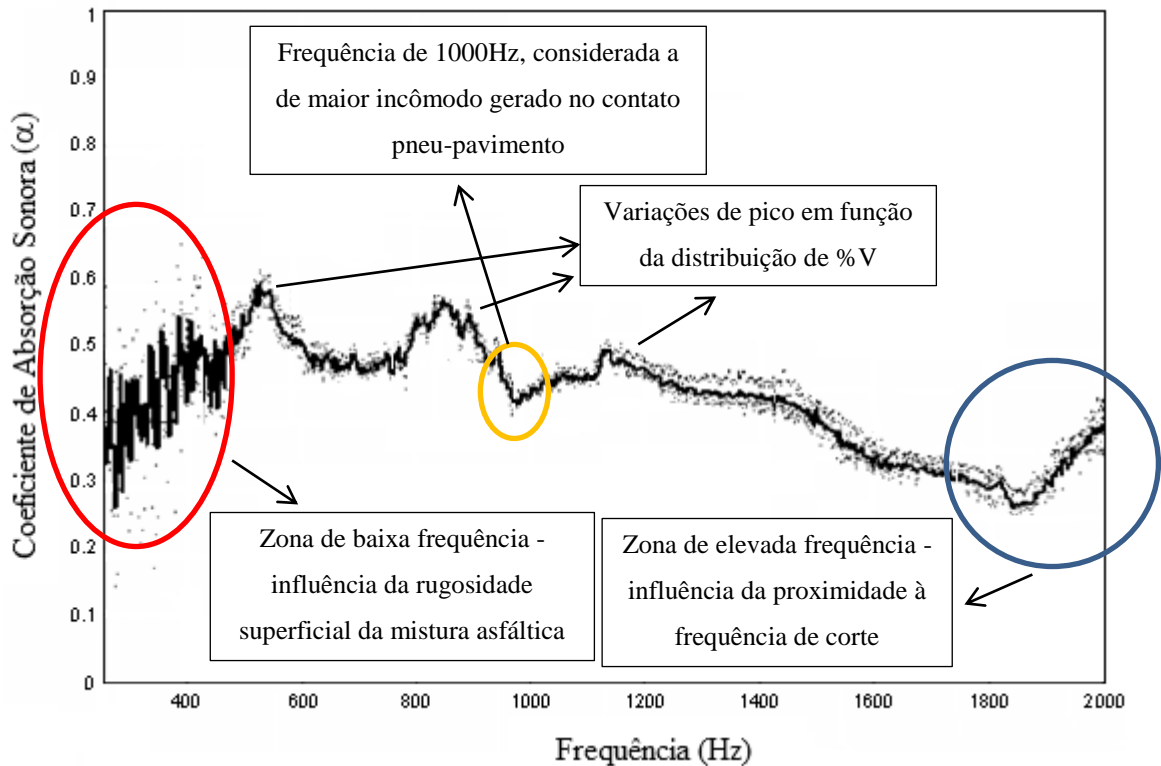
Em contrapartida, também é notória a maior absorção sonora da mistura BBTM em comparação à BBSG, em razão da maior presença do volume de vazios (%V) (Tabela 5.5) na estrutura interna do material, o que possibilita a formação de maior quantidade de pontos de passagem das ondas sonoras, mesmo a curva granulométrica tendo menor diâmetro máximo (Tabela 5.4). Para efeito de escala, foram atingidos picos ' $\alpha$ ' de 0,49 para frequências abaixo de 600Hz, e entre 1800Hz a 1900Hz o valor médio de 0,22. Na frequência referencial de 1000Hz o valor médio foi de 0,30.

Entre 600Hz e 1800Hz percebe-se um comportamento típico de materiais que possuem característica absorvedora do som, em razão das oscilações constantes dos picos. Esta situação é suportada no fato de que as misturas asfálticas sofrem um processo de acomodação dos granulares de forma aleatória durante a compactação. Portanto, há regiões do material que concentram maior quantidade de vazios em relação a outras, o que distingue as zonas de absorção sonora, em que maior será o  $\alpha$  na medida que maior for a concentração de vazios.

Esta afirmação é sustentada pela observação do espectro referente ao conjunto BBSG/BBSG (Figura 5.7), pois em razão de possuir maior densificação, face à curva granulométrica sem descontinuidades, apresenta maior linearidade de absorção no espectro frequencial, indicando menor variação na distribuição dos vazios na estrutura interna do material.

Para o conjunto BBDr/BBSG valem as mesmas considerações efetuadas para o conjunto BBTM/BBSG, porém, como o BBDr se trata de uma mistura asfáltica com curva granulométrica de graduação aberta ( $n = 0,63$ ) (Figura 5.1), com maior teor de vazios que todas as demais testadas (Tabela 5.5) e menor percentual de frações finas na composição granulométrica (Tabela 5.4), houve um aumento na escala de  $\alpha$  em relação à mistura BBTM abaixo de 600Hz, tendo sido atingidos picos de 0,60, e na frequência de 1000Hz o valor médio foi de 0,43 (Figura 5.9).

Figura 5.9 - Curva de absorção sonora em relação à frequência da mistura asfáltica BBDr.



Fonte: Autor (2020).

Entre 1800Hz e 1900Hz o ' $\alpha$ ' ficou situado em torno de 0,30, o que evidencia de forma reiterada que próximo à frequência de corte as perturbações sonoras na zona de captação geram incertezas nas medições executadas. Isto porque era de se esperar valores mais elevados para a BBDr.

Analisando os espectros frequenciais de todos os conjuntos testados, tem-se que os resultados obtidos estão coerentes com as características das misturas asfálticas testadas. Sendo assim, é possível estabelecer a seguinte ordem de classificação quanto ao nível de absorção sonora: BBDr (drenante) > BBTM (semi-densa) > BBSG (densa).

Em função de o processo de compactação pela metodologia Marshall ser muito severa em comparação com o processo de compactação por amassamento, presentes em outras metodologias, como a francesa por exemplo, o teor de vazios podem ser diminuído, afetando, por consequência a capacidade de absorção sonora das misturas devido a intensidade do impacto empregado. Sendo assim, recomenda-se a confecção das amostras com procedimentos de compactação por amassamento para verificar a real capacidade de absorção sonora das misturas asfálticas.

## 7. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que o processo de concepção das misturas asfálticas é um parâmetro fundamental no que diz respeito ao nível de absorção sonora, contribuindo para a propiciação de maior qualidade de vida dos usuários e moradores das áreas lindeiras, ou seja, próximo às rodovias, e em áreas urbanas, a partir da diminuição do ruído gerado no contato pneu-pavimento.

Neste contexto, tem-se que as composições granulométricas com característica semi-densa e aberta, como as misturas asfálticas BBTM e BBDr, sobretudo com presença de discontinuidades, geram aumento do teor de vazios na estrutura interna do material em relação às misturas densas (BBSG). O aumento do teor de vazios influencia de forma decisiva para o aumento da absorção sonora das misturas asfálticas, sobretudo na frequência crítica de 1000Hz no contato pneu-pavimento. Portanto, é mais recomendado este tipo de formulação em camadas de rolamento nas estruturas de pavimento.

Todavia, a distribuição aleatória dos vazios gerados na estrutura interna dos materiais é também fator crucial na variação dos picos de absorção sonora em um mesmo espectro de análise, devendo ser observado com cuidado em cada caso.

Em contrapartida, o ligante betuminoso parece não ser tão influente na capacidade de absorção sonora das misturas asfálticas testadas. As formulações BBTM e BBDr utilizaram a mesma matriz betuminosa (Poliflex 60/85), com o mesmo teor de dosagem (4,22%), bem como o diâmetro máximo da curva granulométrica (12,7mm), e apresentaram comportamento similar quanto aos níveis de absorção sonora.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Avaliações amostrais a partir de tomografia computadorizada ou por feixes gamadensimétricos, a fim de aferir com maior acurácia o real efeito da distribuição dos vazios na absorção sonora de misturas asfálticas;
- A determinação da função de coerência  $\gamma^2$ , para verificar possíveis erros aleatórios nas medições;
- Ampliar a escala de análise das formulações, a partir da execução de placas de misturas asfálticas executadas em mesa compactadora pneumática, conforme previsto na metodologia francesa;

- Testar a mesma curva granulométrica com diferentes tipos de ligante betuminoso, a fim de atestar com maior acurácia a sua influência na capacidade de absorção sonora das misturas asfálticas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução 19**: Especificação de produtos derivados de petróleo. Brasil, 2005. 6 p. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2005/julho&item=ranp-19--2005&export=pdf>. Acesso em: 13 de jul. 2020.

ALVES FILHO, J. M. **Influência da composição do tráfego sobre o ruído gerado por rodovias**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560**. Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método de anel e bola. 7 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6296**. Produtos betuminosos semissólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa. 5 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15619**. Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. 6 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**. Materiais asfálticos – Determinação da penetração. 7 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15086**. Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro. 4 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**. Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. 3 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**. Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. 4 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14950**. Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. 10 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIATION INTERNATIONALE PERMANENTE DES CONGRÈS DE LA ROUTE (PIARC). **Comite Technique des Caracteristiques de Surface**. XIX Congrès Mondial de la Route, Marrakech, 1991.

ASTRANA JUNIOR, C. A. L. **Estudo da absorção sonora e permeabilidade em concretos asfáltico drenantes**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

BARRA, B. S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

BRESSANE, A.; SANTARINE, G. A.; MAURÍCIO, J.C. Poluição sonora: Síntese de princípios fundamentais da teoria acústica. **HOLOS Environment**, v. 10, n. 2, p. 223. 2010.

BROSSEAUD, Y.; LEDEE, F. A. Pavements with a reduced level of superficial noise and an elevated adherence: Summary of the French experience. v.4, p. 83-92, set. 2006.

BUSULO, W. F. **Construção de um tubo de impedâncias e teste através do método de função de transferência**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

CALLAI, S. C. **Estudo do ruído causado pelo tráfego de veículos em rodovias com diferentes tipos de revestimentos e pavimentos**. 2011. Dissertação (mestrado em engenharia) – Departamento de Engenharias de Transporte, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CARDOSO, S. H.; MARCON, A. F.; APS, M.; MARCELLO, J. R. **Proposta para implantação de Centros de Análise e Controle de Acidentes (CACA) em Órgãos Rodoviários e Vias Urbanas**. In: 29ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2., 1995, Cuiabá, MT. 1995. p. 285-302.

CAVALEIRO, M. N. **FQ 8: Sustentabilidade na Terra**. São Paulo: Asa, 2007.

CHAIX, A.L.B. – Viagem ao mundo da audição – Som, 2016, disponível em <http://labs.icb.ufmg.br/lpf/2-1.html>. Acesso em: 19 mar.2020.

CLARA, E. (2020). Avaliação de misturas asfálticas densas com a incorporação de cinza de carvão mineral. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Joinville, SC, Brasil, 164 p.

CLARA, E.; BARRA, B. S.; MOMM, L.; MIKOWSKI, A.; SANTOS, A. G. dos (2020), Influência da utilização das cinzas de carvão em misturas asfálticas densas, *In: Anais do Congresso Internacional de Engenharia Ambiental (CIEA)*, CD-ROM, 12 p. Porto Alegre, RS, Brasil.

DEMOLINER, G. **Influência de poros controlados na absorção sonora em espuma de poliuretano rígida**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM (DNER). **DNER - ME 035: Agregados: Determinação da abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro, 1998. 6 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me035-98.pdf>. Acesso em: 13 de jul. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM (DNER). **DNER - ME 037**: Agregado graúdo para concreto de cimento. Rio de Janeiro, 1997. 6 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dner-em037-97.pdf>. Acesso em: 13 de jul. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM (DNER). **DNER - ME 054**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997. 10 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me054-97.pdf>. Acesso em: 13 de jul. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM (DNER). **DNER - ME 078**: Agregado graúdo: adesividade ao ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994. 3 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me078-94.pdf>. Acesso em: 13 de jul. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM (DNER). **DNER - ME 089**: Agregados: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994. 6 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me089-94.pdf>. Acesso em: 13 de jul. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM (DNER). **DNER - ME 266**: Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1997. 4 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me266-97.pdf>. Acesso em: 13 de jul. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT - ES 145**: Pavimentação: Pintura de ligação com ligante asfáltico convencional. Rio de Janeiro, 2012. 7 p. Disponível em: [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit145\\_2012\\_es.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit145_2012_es.pdf). Acesso em: 13 de jul. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT - ME 043**: Misturas betuminosas a quente: ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995. 11 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me043-95.pdf>. Acesso em: 13 de jul. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT - ME 131**: Materiais asfálticos: Determinação do ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, 2010. 6 p. Disponível em: [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit131\\_2010\\_me.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit131_2010_me.pdf). Acesso em: 13 de jul. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT - ME 155**: Material asfáltico - Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2010. 7 p. Disponível em: [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit155\\_2010\\_me.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit155_2010_me.pdf). Acesso em: 13 de jul. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006. 274 p. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentacao%20E7%20E3o\\_05.12.06.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentacao%20E7%20E3o_05.12.06.pdf). Acesso em: 13 de jul. 2020.



DO, M. **Contact Pneu/Chaussée** - Apport de la Microtexture du revêtement. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 196. França, 1995.

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

ESCOLA NACIONAL DE INSPEÇÃO DO TRABALHO (ENIT). **NR-15**. Atividades e operações insalubres. Brasil, 2019. 110p. Disponível em: [https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos\\_SST/SST\\_NR/NR-15-atualizada-2019.pdf](https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-15-atualizada-2019.pdf). Acesso em: 20 mar. 2020.

FAGUNDES, P. M. **Avaliação do comportamento funcional de misturas BBDr e BBTM**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

FEHRL, S. **Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces**. FEHRL. Bélgica, Bruxelas: 2006. 318 p.

FERREIRA, P. N. **Estudo da utilização de revestimentos asfálticos delgados a quente para pavimentos tipo BBTM no Brasil**. 2006. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

GERGES, S.N.Y. **Ruído**: Fundamentos e controle. Florianópolis: UFSC/SC, 1992.

GERGES, S. N. Y. Ruído de tráfego: revisão de acoplamento pneus/estrada . In: VIII CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ACÚSTICA. **Anais** [...] Évora, 01 a 03 de outubro de 2012. Disponível em: [http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Evora12/plenaria\\_1.pdf](http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Evora12/plenaria_1.pdf). Acesso em: 01 mar.2020.

KNABBEN, R. M. *et al.* Análise comparativa do ruído pneu-pavimento entre pavimento rígido e flexível através do Trailer-CPX . In: 32º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET. **Anais** [...] Gramado, 04 a 07 de novembro de 2018. Disponível em: [http://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Aspectos%20Economicos%20Sociais%20Politicos%20e%20Ambientais%20do%20Transporte/Transporte%20e%20Meio%20Ambiente%20II/6\\_5\\_AC.pdf](http://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Aspectos%20Economicos%20Sociais%20Politicos%20e%20Ambientais%20do%20Transporte/Transporte%20e%20Meio%20Ambiente%20II/6_5_AC.pdf). Acesso em: 12 fev.2020.

MANUEL LPC. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés**. Groupe de Travail RS. "Formulation des enrobés". 199 p. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France, 2007.

MATTOS, J. R. G. **Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MEURER FILHO, E. **Estudo de granulometria para concretos asfálticos drenantes**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MICHALSKI, R. L. X. N. **Som**. 2017. Trabalho Acadêmico (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Desempenho Acústico, Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2017.

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharias de Transporte, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

OBSERVATOIRE DU BRUIT EN LLE DE FRANCE (BRUITPARIF). **Dossier technique et pédagogique**. 114 p. França: BRUITPARIF, 2011.

OFFICE FÉDÉRAL DES ROUTES (OFROU); OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT (OFEV). **Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités**. Rapport annuel 2010. 57p. Suíça, 2010.

OLIVEIRA, C. G. M.; FARIAS, M. M. de.; CARVALHO, J. C. de; FALCÃO, P. R. F. **Análise laboratorial de concretos asfálticos drenantes com uso de agregados calcários**. In: 12ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2003, Aracajú, SE. 2003.

OLIVEIRA, E. C.; TEODORO, E. B. Métodos para medição do coeficiente de absorção sonora. In: 15º SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA. **Anais** [...] Uberlândia, 07 a 09 de dezembro de 2005. Disponível em: <http://web.posfemec.org/posmec/15/pdf/POSMEC057.pdf>. Acesso em: 22 fev.2020

OLIVEIRA, L. P. R. **Controle ativo de ruído em veículos e seu impacto na qualidade sonora**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PEREIRA, A. H. P. **Caracterização acústica de pavimentos rodoviários e influência na emissão sonora**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.

PEREIRA, C. A. *et al.* Análise da aderência pneu-pavimento em pontos de ocorrência de acidentes. **Transportes**, v. 20, n. 2, p. 65-74. 2012.

PIMENTEL-SOUZA, F. – **Efeitos da poluição sonora no sono e na saúde em geral – Ênfase Urbana**, 1999, disponível em [http://labs.icb.ufmg.br/lpf/2-1.html#:~:text=1\)%20Resumo%20\(Summary\)%3A%20Efeito,cient%C3%ADfica%20dos%20%C3%BAltimos%2020%20anos..](http://labs.icb.ufmg.br/lpf/2-1.html#:~:text=1)%20Resumo%20(Summary)%3A%20Efeito,cient%C3%ADfica%20dos%20%C3%BAltimos%2020%20anos..) Acesso em: 18 mar. 2020.

RAMALHO, F.; SOARES, P. T.; FERRARO, N. G. **Os fundamentos da física**. I. 9. ed. São Paulo: Moderna, 2007.

RODRIGUES FILHO, O. S. **Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários: Estudo de caso do aeroporto internacional de São Paulo/Congonhas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SANDBERG, U.; J. A. EJSMONT. **The Influence of Tire Age and Wear on Tire/Road Noise Emission**. 2002.

SANTOS, S. A. **Método dos elementos de contorno aplicado à viscoelasticidade quase-estática em matérias inhomogêneas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

SCHERER, M. J.; PIAGETI, G.; VANI, L. O ruído urbano e a desvalorização imobiliária. *In: XXII ENCOTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA. Anais [...]* Belo Horizonte, 26 a 29 de novembro de 2008. Disponível em: <https://docplayer.com.br/71202821-O-ruído-urbano-e-a-desvalorização-imobiliária.html>. Acesso em: 08 mar.2020.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO PESADA DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINICESP). **Avaliação do ruído causado por diferentes revestimentos asfálticos**: Boletim técnico. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://sinicesp.org.br/materias/2012/bt10a.htm>. Acesso em: 22 de fev. 2020.

SIROMA, R. S. **Avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas densas formuladas com areia descartada de fundição (ADF)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

UNISESKY, C. R. **Proposta de formulação de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) - Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

VAN DER AUWERAER, H. WYCKAERT, K. **Sound Quality: Perception, Analysis and Engineering**. 2005. International Seminar on Advanced and Numerical Acoustics - ISAAC 16, Leuven, Bélgica, 28p.