SÉRGIO COPETTI CALLAI

ESTUDO DO RUÍDO CAUSADO PELO TRÁFEGO DE VEÍCULOS EM
RODOVIAS COM DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMENTOS DE
PAVIMENTOS

São Paulo

2011

SÉRGIO COPETTI CALLAI

ESTUDO DO RUÍDO CAUSADO PELO TRÁFEGO DE VEÍCULOS EM RODOVIAS
COM DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orietador: Prof^a Titular
Liedi Légi Bariani Bernucci

São Paulo

2011

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de junho de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Callai, Sergio Copetti

**Estudo do ruído causado pelo tráfego de veículos em rodovias com diferentes tipos de revestimentos de pavimentos / S.C. Callai. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011.
92 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Poluição sonora 2.Rodovias 3.Pavimentação 4.Revestimento de superfície I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Dedico este trabalho a minha família e namorada.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação de mestrado só foi possível de ser feita graças ao auxílio de diversas pessoas e instituições. Expresso o meu profundo obrigado a algumas delas:

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de mestrado;

Ao programa de pós-graduação em Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP;

A Pirelli Brasil que disponibilizou seu suporte técnico para as medidas de ruído interno ao veículo, em especial ao Dr. Argemiro Costa, e aos engenheiros Marcelo Moreno, João Bruza, que me auxiliaram na execução dos ensaios de ruído interno;

Ao grupo CCR, em particular ao Diretor de Obras Engenheiro Décio de Rezende Souza e ao Gestor de Projetos Engenheiro Wilson França, pelo apoio ao desenvolvimento desta dissertação, viabilizando o experimento em campo em uma Rodovia do grupo CCR e em especial ao amigo Engenheiro Assis Villela, que fora extremamente prestativo e companheiro;

Ao Engenheiro Eduardo Murguel que realizou ensaios de ruído externo, prestou conselhos e tirou dúvidas em diversas ocasiões;

Ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação –LTP;

Aos colegas do LTP, fossem eles doutorandos, mestrandos ou alunos de Iniciação Científica, todos de uma forma ou de outra apoiaram e ajudaram;

Em especial aos funcionários do LTP:

À Diomária, secretária do Laboratório e amiga;

Ao Erasmo e ao Kendi, os quais sempre me ajudaram em inúmeros ensaios;

Ao Edson, que desde o início esteve disposto a tirar diversas dúvidas.

Aos colegas e Amigos:

Claudio, Ana Luisa, Amanda, Kamilla, Rosely, Mary, Rosângela. Um agradecimento muito especial a duas pessoas que tive o prazer de conhecer e auxiliaram incansavelmente neste trabalho, Renato Peixoto e Tiago Vieira, alunos de Iniciação Científica, Colegas Pesquisadores e AMIGOS;

Devo prestar meu agradecimento mais profundo à Professora Dra Liedi Légi Bariani Bernucci, que me acolheu para o mestrado dois anos atrás, aconselhou-me, foi uma amiga e orientadora, não só para a dissertação. Muito obrigado Professora,

talvez nunca consiga expressar o quanto sou contente e feliz por ter sido acolhido por você;

À minha família, meus pais e irmãos que além do apoio incondicional, sempre me serviram e me servirão de exemplo;

À minha namorada, com quem partilhei os anseios e nervosismos de morar sozinho e de fazer o mestrado.

“A paisagem sonora do mundo está mudando. O homem moderno começa a habitar um mundo que tem um ambiente acústico radicalmente diverso de qualquer outro que tenha conhecido até aqui. Esses novos sons, que diferem em qualidade e intensidade daqueles do passado, têm alertado muitos pesquisadores quanto aos perigos de uma difusão indiscriminada e imperialista de sons, em maior quantidade e volume, em cada reduto da vida humana. A poluição sonora é hoje um problema mundial. Pode-se dizer que em todo o mundo a paisagem sonora atingiu o ápice da vulgaridade em nosso tempo, e muitos especialistas têm predito a surdez universal como a última consequência desse fenômeno, a menos que o problema venha a ser rapidamente controlado.”

R. Murray Shafer – em *A Afinação do Mundo*

RESUMO

O ruído é uma forma de poluição que causa muitos problemas à saúde humana e à economia, sendo que o ruído gerado pelo tráfego de veículos é uma das principais fontes da poluição sonora. Assim, diversos países vêm esforçando-se para melhor compreender e, conseqüentemente, encontrar possíveis soluções à redução da poluição sonora. Contudo, tais esforços no Brasil ainda são poucos. De modo a contribuir para a compreensão e a busca de soluções à poluição sonora, este trabalho propõe-se a estudar o ruído gerado por veículos trafegando em diferentes revestimentos de pavimentos rodoviários, realizando-se medições e avaliando-se o ruído interno, que interfere no conforto do condutor e passageiros, bem como no ruído externo aos veículos, que pode incomodar os lindeiros à via - dependendo da pressão sonora. Apresenta-se um estudo de caso com medição e avaliação do ruído externo e interno em duas fases diferentes de estado de superfície de um trecho da Rodovia dos Bandeirantes (SP-348): antes e após a execução de um revestimento asfáltico denominado gap-graded com asfalto borracha, construído em substituição ao revestimento antigo de microrrevestimento asfáltico a frio. A análise dos resultados mostrou que a substituição do tipo de revestimento levou à redução de aproximadamente 2 dB(A) no ruído externo e que este diminuiu em escala logarítmica com a distância do receptor à fonte, corroborando a teoria do som propagado de uma fonte pontual, em forma esférica. A análise do ruído interno mostra que esta substituição do revestimento asfáltico do pavimento gera igualmente uma melhoria no conforto, reduzindo em aproximadamente 3 dB(A) o ruído, principalmente nas bandas de frequência de 200 Hz a 1000 Hz. Para comparação dos resultados com o Concreto Asfáltico, revestimento usado de maior uso no Brasil, fez-se medições de ruído interno na pista de testes da Pirelli em Sumaré, avaliando-se, também, a intensidade e espectro do ruído com a variação da velocidade do veículo. De posse destes dados, pôde-se comparar o ruído interno do Concreto Asfáltico (CBUQ), com as demais soluções da Rodovia dos Bandeirantes. Constatou-se que o CBUQ tem o nível de ruído superior ao do gap-graded, e muito próximo ao do micro, nas condições de superfície em que estes três revestimentos

se encontravam nos estudos em campo. Verificou-se, também, que o revestimento do pavimento pode auxiliar na redução do ruído, seja interno como externo. Por fim, constatou-se que os métodos atuais empregados na avaliação da macrotextura do pavimento não são suficientes para compreender a intensidade do ruído.

ABSTRACT

The noise is a form of pollution that causes diverse problems to the human health and the economy. One of the major sound pollutions forms is the noise generated by the traffic of vehicles. Several countries have been making efforts to better understand and, therefore, find possible solutions to mitigate the sound pollution. However, such efforts in Brazil are still incipient. This work proposes itself to measure and evaluate the noise, the internal noise, which disturbs the comfort of the driver and passenger, and the external vehicle noise, that can disturb the dwellings near by the highway depending on the sound pressure, generated by vehicles in different types of highway pavement surfaces. A case study at Bandeirantes Highway (SP – 348) was run to evaluate the external and internal noise before and after the placement of a gap-graded prepared with rubber asphalt, above the of the old microsurfacing. The evaluation of the result shown that the substitution of the pavement surface led to the reduction of approximately 2dB(A) for external noise and that diminished in a logarithmic fashion, such as the theory of a sound propagating from a punctual source in a spherical manner. The analyses of the internal noise demonstrates that the substitution of the pavement surface generates an improvement in the comfort, reducing in approximately 3dB(A) the noise, especially in the frequency range of 200Hz to 1000Hz. The comparison with the Asphalt Concrete, pavement surface most used in Brazil, internal noise measurements were made at the Pirelli test track in Sumaré/SP, evaluating, also, sound intensity and the noise frequencies with the variation of the vehicle speed. With this data, was possible to compare the asphalt concrete with the solutions made on Bandeirantes Highway. The research evidenced that the noise level of asphalt concrete is similar to the microsurfacing, and both are higher than the gap-graded prepared with asphalt rubber. The surface of the pavement can also contribute to the mitigation of the internal and the external noise. The present thesis also concluded that the current methods to evaluate the macrotexture of the pavement surface are incapable of fully understanding of the internal and external noise.

Lista de Figuras

Figura 1: Variação da pressão ambiente em função do tempo.	18
Figura 2: Relação entre unidades de medida do som	20
Figura 3: Soma logarítmica de diferentes fontes sonoras. (Fonte: Hanson, 2004)....	21
Figura 4: Curvas de audibilidade A, B e C em decibel.	22
Figura 5: Onda esférica de fonte pontual	23
Figura 6: Múltiplas fontes sonoras em linha	23
Figura 7: Propagação de energia sonora em uma fonte pontual de acordo com a distância	24
Figura 8: Influência de diferentes fontes geradoras do ruído	27
Figura 9: Mecanismos estruturais de geração de ruído	33
Figura 10: Mecanismos aerodinâmicos de geração de ruído	34
Figura 11: Equipamento utilizado nas medições do ruído interno	40
Figura 12: Diferentes tipos de textura existentes no pavimento	43
Figura 13: Influência da textura da superfície do pavimento (Fonte: FEHRL, 2006) ..	44
Figura 14: Veículo do CEDEX com perfilômetro acoplado	45
Figura 15: Espalhamento da fração areia sobre a superfície do pavimento.....	46
Figura 16: Medição do diâmetro da mancha de areia	47
Figura 17: Processo de cálculo do <i>Mean Profile Depth</i> (ISO 13473-1/2004)	48
Figura 18: Superposição longitudinal e transversal de sobrevoo	50
Figura 19: Pêndulo britânico.....	51
Figura 20: Sapata de borracha após o atrito com o revestimento do pavimento.....	52
Figura 21: Sapata do pendulo britânico em contato com os agregados diferentes podem produzir BPN semelhante apesar de microtextura diferente	52
Figura 22: Equipamento de roda travada (Fonte: Dynatest)	53
Figura 23: Equipamento de roda oblíqua (Fonte: SKM)	53
Figura 24: Textura positiva	54
Figura 25: Textura Negativa	55
Figura 26: Princípio de funcionamento de uma barreira acústica (Fonte: FHWA, 2001)	57
Figura 27: Diversas composições de soluções ao ruído incluindo barreiras sonoras Fonte: (KOTZEN e ENGLISH, 2009).....	58
Figura 28: Detalhe do microfone B&K colocado no interior do veículo, próximo ao cinto de segurança e ouvido do motorista.....	61
Figura 29: Detalhe do posicionamento do microfone	62
Figura 30: Campo de Provas de Sumaré, pertencente à Pirelli Tyre Brasil	62
Figura 31: Espalhamento da areia para realização do ensaio de mancha de areia ..	63
Figura 32: Medição do diâmetro da mancha de areia	63
Figura 33: Altura da mancha de areia na pista de referência	64
Figura 34: Veículo utilizado nos ensaios	65
Figura 35: Pneu do veículo utilizado nos ensaios	66
Figura 36: Resultado do ruído interno	67
Figura 37: Níveis totais de ruído interno para cada velocidade do veículo teste.....	68
Figura 38: Rodovia dos Bandeirantes (SP – 348)	69
Figura 39: Ponto de medição A.....	70
Figura 40: Pontos B, C, D, E e F de medição.....	71
Figura 41: Resultados de MTD (médio) de acordo com os tipos de revestimento	72
Figura 42: Localização dos pontos A, B e C de ensaio	73
Figura 43: Localização dos pontos D, E e F de ensaio	74

Figura 44: Esquema de disposição dos decibelímetros (sem escala).....	75
Figura 45: Nível de ruído pela distância	78
Figura 46: Nível de ruído <i>versus</i> MTD.....	79
Figura 47: Nível de ruído interno por espectro de frequência para diferentes revestimento.....	81
Figura 48:Nível de ruído interno <i>versus</i> MTD.....	82

Lista de Tabelas

Tabela 1: Condição mais limitante de nível de ruído para casos externos não rural.	28
Tabela 2: Mecanismos de geração de ruído pneu/pavimento	35
Tabela 3: Frequências sonoras emitidas pela interação pneu/pavimento e suas consequências ao motorista e passageiros dos veículos.....	36
Tabela 4: Resumo dos métodos de medição do ruído externo em rodovias.....	38
Tabela 5: Classes de macrotextura	64
Tabela 6: Pontos de ensaios com revestimento antigo e revestimento novo	71
Tabela 7: Correção pela velocidade média	76
Tabela 8: Correção pelo percentual de veículos pesados.....	76
Tabela 9: Correção pela inclinação da pista.....	76
Tabela 10: Resultado dos ensaios de ruído externo e contagem de veículos	77

Lista de siglas

AAUQ – Areia Asfalto Usinado a Quente
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
BBTM – Bèton Bitumineux Très Mince
CA – Concreto Asfáltico
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ- Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCR – Companhia de Concessões Rodoviárias
CEDEX – Centro de Estudios y Experimentación de obras Publicas - Espanha
CPB – Controlled Pass By
CPX - Close Proximity Method
DEFRA – Department for Environment, Food and Rural Affairs – Reino Unido
EPA – Environmental Protection Agency
ETD – Estimated Texture Depth
EUA – Estados Unidos da América
FEHRL – Forum of European National Highway Research Laboratories
FHWA – Federal Highway Association
HPA- Health Protection Agency
IPG – Innovatie Programma Geluid - Holanda
ISO – International Organization for Standardization
LAeq –Nível de ruído equivalente para curva de ponderação A
Lden – Nível de ruído equivalente ponderado por Diurno, Vespertino, Noturno
Leq – Nível de ruído equivalente
LTP – Laboratório de Tecnologia de Pavimentação
MPD – Mean Profile Depth
MR – Módulo de Resiliência
MTD – Mean Texture Depth
NBR – Norma Brasileira
OBSI – On Board Sound Intensity
OMS – Organização Mundial de Saúde

PIARC – Permanent International Association of Road Congresses

PIB- Produto Interno Bruto

REM – Rapid Eye Movement

RMS – Root Mean Square

RT – Resistência a Tração

SILVIA – Silenda Via

SMA – Stone Mastic Asphalt

SPB – Statistical Pass By

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	15
1.2 OBJETIVOS	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2. SOM E RUÍDO	18
2.1 PERCEPÇÃO DO SOM	19
2.2 CURVAS DE AUDIBILIDADE.....	21
2.3 FONTES SONORAS.....	23
2.4 RUÍDO	24
2.4.1 Ruído e a Saúde	25
2.4.2 Ruído e Economia.....	26
2.4.3 Fonte de ruído rodoviário.....	27
2.4.4 Legislação internacional e nacional.....	27
3. MECANISMOS DE GERAÇÃO E AMPLIFICAÇÃO DO RUÍDO NO CONTATO PNEU/PAVIMENTO	31
3.1 INTRODUÇÃO	31
3.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO RUÍDO RODOVIÁRIO.....	36
3.2.1 Medição do ruído externo	37
3.2.2 Medição do ruído interno	39
3.3 CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO QUE INTERFEREM NO RUÍDO	40
3.3.1 Impedância mecânica.....	40
3.3.2 Textura do pavimento.....	42
3.3.2.1 Caracterização da Megatextura e Irregularidade	45
3.3.2.2 Caracterização da macrotextura	46
3.3.2.3 Caracterização da Macrotextura por imagem	49
3.3.2.4 Caracterização da Microtextura	50
3.3.3 Textura positiva e textura negativa	53
3.3.4 Porosidade	55
3.4 FORMAS DE ATENUAÇÃO E MITIGAÇÃO	56
3.4.1 Barreiras sonoras	56
3.4.2 Pavimentos silenciosos	58
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	60

4.1 ENSAIOS NA PISTA DE REFERÊNCIA – CAMPO DE PROVAS DE SUMARÉ - PIRELLI.....	60
4.1.1 Caracterização da macrotextura da pista de referência.....	62
4.1.2 Ensaio de ruído interno na pista de referência.....	65
4.2 ENSAIOS NA PISTA TESTE: RODOVIA DOS BANDEIRANTES	69
4.2.1 Caracterização da superfície do pavimento dos trechos	72
4.2.2 Ensaio de ruído externo nos trechos.....	72
4.2.3 Comparação entre ruído externo e macrotextura	78
4.2.4 Ensaio de ruído interno nos trechos.....	79
4.2.5 Comparação entre ruído interno e macrotextura	82
4.3 MEDIÇÃO DA MACROTEXTURA POR IMAGEM.....	83
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS.....	87

1. INTRODUÇÃO

A poluição, qualquer que seja, é nociva ao homem, ao ambiente e à economia. Grande parte das pessoas está sujeita à ela, diariamente, em especial sujeita às poluições do ar e sonora. Ao estudar esse tema, encontram-se facilmente materiais que tratam da poluição do ar, do solo e da água. No entanto, não é encontrada a mesma quantidade de estudos, normas e leis para a poluição sonora, muito embora essa tenha algumas regulamentações, especialmente no tocante à saúde do trabalhador, de acordo com a Norma Regulamentadora 15 do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil (MTE, 2010). Verifica-se, assim, a necessidade de estudos mais profundos relativos à poluição sonora, a fim de compreendê-la, especialmente daquela advinda dos meios de transporte. Além do mais, é atestado pela Organização Mundial de Saúde, em seu relatório de orientações quanto ao ruído comunitário, a falta de estudos específicos dos efeitos da poluição sonora na saúde humana, e uma relação dose-resposta, bem como a falta de estabelecimento de um critério de medição e avaliação bem definido (WHO, 1999).

Em países desenvolvidos, há muitos estudos e esforços para o controle da poluição sonora. A União Europeia tem realizado uma série de programas com este objetivo, os quais visam o desenvolvimento de novos materiais para pavimentação que tenham melhor desempenho quanto ao ruído, o mapeamento do ruído em cidades, rodovias, portos e em aeroportos, entre outras ações. Como alguns exemplos, destacam-se os programas SILENCE, IPG e SILVIA entre outros.

Nos países em desenvolvimento, este problema é agravado tanto pela falta de regulamentação pertinente, quanto ao crescimento quase que desenfreado da população e das cidades. Na União Europeia, estima-se que 40% de sua população está sujeita a níveis de ruído maiores que 55 dB(A) (WHO, 1999), nível considerado como limite aceitável para preservar a saúde e conforto.

Os problemas causados pela poluição sonora são variados e de grande magnitude. Sandberg (2001) afirma que “Tem-se o problema econômico gerado pela poluição

sonora que acarreta em altíssimas perdas, estas principalmente geradas devido à desvalorização imobiliária”. Em um estudo promovido pela Agência de Proteção Ambiental Dinamarquesa (EPA, 2003¹ *apud* FEHRL, 2006), demonstrou que para cada acréscimo de 1 dB na poluição sonora, o valor imobiliário das residências localizadas próximas às rodovias movimentadas reduzia-se em 1%.

Não bastassem os problemas de cunho econômico, tem-se também a questão da saúde. O ser humano, quando exposto a certos níveis elevados de ruído, apresenta respostas negativas e involuntárias do organismo, as quais destacam-se: hipertensão, surdez temporária e permanente, estresse e problemas cardíacos (WHO, 1999).

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Como apresentado, a poluição sonora causa diversos problemas ao ser humano. Tais problemas são de diversos cunhos e de considerável gravidade. A necessidade de buscar soluções é patente, bem como de difundir o conhecimento sobre este assunto em nosso país.

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação de mestrado tem por objetivo estudar a propagação do ruído em uma rodovia devido ao tráfego de veículos, de modo a avaliar se a alteração do tipo de revestimento asfáltico do pavimento pode acarretar em uma redução do ruído externo, de interesse dos usuários lindeiros à rodovia, e do ruído interno, importante para o conforto dos motoristas e passageiros dos veículos usuários da rodovia. Este estudo, por fim, aspira contribuir na seleção de soluções para revestimentos de

¹Danish Environmental Protection Agency (2003). Forslag til strategi for begrænsning af vejtrafikstøj (Proposal for a strategy for the reduction of road traffic noise (in Danish)). The Road Noise Group: Ministry of the environment, Ministry of Finance, Ministry of Transport, Ministry of the Interior and Health, Ministry of Justice and Ministry of Economy and Enterprise. www.mst.dk.

pavimentos pelos órgãos gestores, levando-se em consideração os indicadores de conforto quanto ao ruído.

Neste estudo foram avaliados os ruídos externos aos veículos, que dependem principalmente do volume de tráfego, do tipo de revestimento asfáltico e da distância destes veículos ao receptor, e os ruídos internos em um veículo padrão com pneus conhecidos, que dependem, dentre outros fatores, também do tipo de revestimento asfáltico dos pavimentos.

Foram avaliadas as características superficiais dos revestimentos dos pavimentos, objetivando avaliar e verificar se havia alguma correlação com os níveis de ruído externo e interno.

Para a aplicação da metodologia de estudo de ruído foram escolhidos três tipos de revestimentos asfálticos de pavimentos: um concreto asfáltico convencional (CBUQ), solução comumente encontrada em rodovias brasileiras, microrrevestimento asfáltico a frio, e um gap-graded com asfalto borracha, alternativa para revestimentos de pavimentos de rodovias de tráfego intenso e pesado, para mostrar as diferenças que podem resultar da alteração do tipo de revestimento de pavimento no ruído interno e externo..

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O primeiro capítulo é a INTRODUÇÃO do trabalho, na qual se estabelecem os objetivos e a organização da pesquisa. O segundo capítulo trata sobre SOM E RUÍDO, no que se referem à percepção sonora, curvas de audibilidade e caracterização das fontes sonoras. Ainda no segundo capítulo apresentam-se os problemas gerados devido à exposição ao ruído no tocante à saúde e à economia. Também caracterizam-se as fontes do ruído rodoviário e apresentam-se as legislações nacionais e internacionais aplicáveis ao tema. O capítulo três, MECANISMOS DE GERAÇÃO E AMPLIFICAÇÃO DO RUÍDO NO CONTATO PNEU/PAVIMENTO, apresenta os processos de geração e amplificação do ruído devido à interação do pneu com o

revestimento, os métodos de medição do ruído rodoviário, tanto internamente quanto externamente ao veículo e as características do pavimento que interferem no ruído, como a impedância mecânica, a macrotextura e microtextura, se a textura é positiva ou negativa, e a porosidade do revestimento. Este capítulo expõe também formas de mitigação do ruído rodoviário, como por meio da instalação de barreiras sonoras e do uso de pavimentos silenciosos. O PROGRAMA EXPERIMENTAL, apresentado neste trabalho, contempla os ensaios na pista teste selecionada para esta pesquisa e os trechos de vias a serem analisados neste trabalho. No capítulo cinco são feitas AS ANÁLISES DOS RESULTADOS E SEUS RESPECTIVOS COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

2. SOM E RUÍDO

O som é a sensação produzida pelo sistema auditivo, podendo essa ser agradável ou desagradável. De outro modo: “O som pode ser definido como uma variação da pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo” (BISTAFA, 2006), por isso, é possível afirmar que uma dada variação na pressão ambiente é uma pressão acústica ou sonora. O som é uma onda mecânica, a qual pode ser definida pela eq.(1).

$$\lambda = c/f \quad (1)$$

onde:

λ = Comprimento de onda;

c = Velocidade do som no meio;

f = Inverso do Período, Frequência.

A onda sonora é uma onda mecânica definida pelas seguintes características: intensidade, amplitude e frequência. A Figura 1 mostra a possibilidade de haver duas amplitudes e intensidades iguais e diferentes frequências.

Figura 1: Variação da pressão ambiente em função do tempo.

Adaptado de Bistafa (2006)

Os períodos representados na Figura 1 correspondem às frequências limites da audição humana. A menor frequência, $f_1 = 20$ Hz, correspondente ao período de T_1 , é o limite inferior da audição humana quanto a frequência, sons emitidos próximos a esta frequência (20Hz até aproximadamente 200Hz) são percebidos como sons mais graves. A frequência maior, $f_2 = 20.000$ Hz, correspondente ao período de T_2 , é o limite superior da audição humana quanto a frequência, sons emitidos próximos a esta frequência (2000Hz à 20000Hz) são percebidos como agudos.

Essas frequências fornecem os limites inferiores e superiores da audibilidade humana; abaixo de f_1 tem-se os infrassons (inaudíveis) e, analogamente, acima de f_2 tem-se os ultrassons, também inaudíveis.

A potência sonora, dada pela energia contida em um movimento vibratório em um intervalo de tempo, apresenta como unidade o Watt (W).

O som pode ser medido através de outros dois parâmetros: um deles é a pressão sonora causada pela onda sonora que é medida em BAR (dina/cm²). O outro é a intensidade sonora, definida pela quantidade média de energia por unidade de tempo (Watt), que atravessa uma dada área perpendicular à direção de propagação da onda. A unidade da intensidade sonora é o Watt por metro quadrado (W/m²).

2.1 PERCEPÇÃO DO SOM

O ser humano responde a estímulos físicos de acordo com a lei de Fechner – Weber, nomeada em homenagem à Gustav Theodor Fechner e Ernst Heinrich Weber. Estes estudiosos buscavam compreender e descrever a sensação humana dado um estímulo conhecido, podendo este ser som, peso ou cores. Estudos realizados pelos cientistas Fechner – Weber demonstraram que a relação entre estímulo e a sensação é logarítmica. “Isso significa que, para provocar variações de sensação em progressão aritmética (*i.e.*, em incrementos constantes), o estímulo deve variar em progressão geométrica (*i.e.*, multiplicado por um fator constante)” (BISTAFA, 2006).

Figura 2: Relação entre unidades de medida do som

A unidade utilizada para medir a potência sonora de uma fonte é o Decibel (dB). O Decibel corresponde a um décimo de bel, é relacionada com a energia contida no movimento, como é apresentado na Figura 2.

Verifica-se ainda na Figura 2 que o limite da audição humana é de 140 dB, também conhecido como o limiar da dor, que está relacionado com a perda parcial ou completa, temporária ou permanente da audição. Ainda, tem-se a 0 dB, o limiar da audibilidade.

Aqui é necessário chamar a atenção ao fato de que, por tratar-se de uma unidade logarítmica, uma fonte sonora ao emitir uma dada pressão sonora, tendo somada a ela outra fonte sonora com a mesma pressão sonora, assim dobrando a energia da fonte, não resulta em uma simples soma que será a pressão sonora resultante, mas sim o acréscimo de aproximadamente 3 dB. Tal situação encontra-se ilustrada na Figura 3.

Figura 3: Soma logarítmica de diferentes fontes sonoras. (Fonte: Hanson, 2004)

2.2 CURVAS DE AUDIBILIDADE

A audição humana é representada por curvas de audibilidade. Estas curvas buscam representar o fato de que o ouvido humano não responde de maneira igual a diferentes frequências de uma onda sonora. Isso ocorre pois tem-se diferentes frequências de excitação advindas de uma fonte, e todas elas com a mesma potência sonora. Contudo, a percepção humana mudará, como dito anteriormente, em função das frequências: para baixas frequências percebe-se o som como grave, e agudo para altas.

“As curvas de audibilidade ou ponderadoras, objetivam modificar o espectro sonoro de acordo com a resposta do sistema auditivo às diferentes frequências contidas no som” (BISTAFA, 2006).

Os filtros ponderadores (A, B e C) são os mais usuais. O filtro A, aproxima a resposta auditiva para sons do cotidiano, tidos como sons moderados; o filtro B, aproxima a resposta para sons medianos, contudo raramente utilizado; O filtro C, tem como característica uma função de transferência quase plana, então ele aproxima a resposta do sistema auditivo para níveis sonoros elevados (Figura 4).

Figura 4: Curvas de audibilidade A, B e C em decibel.

Importante atentar que as frequências que mais excitam o ouvido humano, representado pela curva A, estão na faixa compreendida entre 500 Hz a 5000 Hz. O que significa que sons que tenham tais frequências, mesmo com uma potência sonora menor, acabam por excitar mais o ouvido, devido ao ganho em dB que elas apresentam.

2.3 FONTES SONORAS

O som, ao ser gerado por uma determinada fonte, pode se propagar de diferentes maneiras. Tem-se, por exemplo, a fonte pontual (i.e. um carro), que conforme a onda afasta-se do centro, a propagação do som se dá de forma esférica, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Onda esférica de fonte pontual

Contudo uma rodovia dificilmente terá um fluxo tão baixo que não propicie a soma de ondas ou de fontes sonoras. Deste modo, uma melhor representação é apresentada na Figura 6, a qual mostra uma onda sonora produzida por uma linha de fontes sonoras pontuais, as quais produzem uma propagação cilíndrica.

Figura 6: Múltiplas fontes sonoras em linha

Segundo Bistafa (2006) “uma fonte pontual ou esférica, obedece a lei do inverso do quadrado da distância.” Isto indica que, ao dobrar-se a distância, a pressão sonora cai por um quarto, o que corresponde a uma perda de 6 dB no nível de pressão sonora a cada duplicação da distância como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7: Propagação de energia sonora em uma fonte pontual de acordo com a distância

No entanto, para a fonte sonora em linha, que se propaga de forma cilíndrica, a perda corresponderá a apenas 3 dB do nível de pressão sonora ao duplicar-se a distância. Tais relações são válidas apenas em ambientes sem nenhuma reflexão, absorção ou difração.

2.4 RUÍDO

O ruído é qualquer som desagradável. No entanto, isso é subjetivo, pois o que pode ser desagradável para uma pessoa não é necessariamente para outra. Uma definição mais técnica seria: “O ruído é uma mistura de sons cujas frequências não seguem nenhuma lei precisa ou ainda todo aquele som indesejável” (ABNT-7731/83). Todavia, não é o ruído em si que causa problemas como surdez temporária, mas sim qualquer som, a depender do nível de pressão sonora emitida.

2.4.1 Ruído e a Saúde

De acordo com a Constituição da Organização Mundial de Saúde, “A saúde é um estado de completo bem estar físico, mental e social e não a simples ausência de doenças ou enfermidades” (WHO, 1948). Isso denota a grande importância que devemos dar ao tema, visto que a poluição sonora afeta o bem estar da população.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 1999), nos países europeus, por volta de 40% da população está exposta ao ruído do tráfego de veículos com uma pressão sonora equivalente excedendo 55 dB (A) no período diurno e cerca de 20 % estão expostos a índices noturnos que excedem os 65 dB(A).

Recentemente diversos estudos tem sido publicados demonstrando a verdadeira magnitude deste problema. Em um estudo realizado pelo Instituto Dinamarquês de Rodovias, apresenta que há uma relação entre o ruído gerado pelo tráfego de veículos e a incidência de doenças cardíacas (BENDTSEN, 2009).

Outro estudo, promovido pela Agência de Proteção à Saúde do Reino Unido (HPA/UK), revela que a “exposição ao ruído por longos períodos pode levar a um aumento nos hormônios como cortisol, ligados ao estresse”. O efeito do ruído em crianças é muito grave, visto que logo cedo estão submetidas a essa poluição, causando problemas de saúde prematuros (HPA, 2009).

Além de todos os problemas de saúde, o ruído ainda causa problemas de aprendizagem nas crianças. Segundo a Agência de Proteção à Saúde do Reino Unido (HPA/UK), a exposição ao ruído ambiental tem demonstrado uma ligação com o desempenho cognitivo deficiente em crianças em idade escolar (HPA, 2009).

Problemas de sociabilidade são ligados a perda parcial ou total da audição, visto que estas pessoas tendem a encontrar dificuldades em manter uma conversação, participar de reuniões e até mesmo utilizar o telefone (EPA, 1981).

Em um relatório publicado pela OMS-Europa, sobre ruído noturno, são apresentadas as seguintes evidências e conclusões:

“O sono é uma necessidade biológica e a interrupção deste é associada com um grande número de impactos adversos à saúde”;

“Existem evidências suficientes sobre os efeitos biológicos do ruído durante o sono: aumento da frequência cardíaca, mudanças nos estágios do sono (sono REM e sono leve) e despertar” (WHO, 2009).

2.4.2 Ruído e Economia

Sandberg afirma que “tem-se também o problema econômico gerado pela poluição sonora, que acarreta em grandes perdas, estas principalmente geradas pela desvalorização imobiliária” (SANDBERG, 2001). O mesmo problema é apontado em um estudo realizado pela Agência de Proteção Ambiental Dinamarquesa (EPA, 2003² *apud* FEHRL, 2006). Segundo tal estudo, para cada 1 dB aumentado na poluição sonora, o valor das residências reduzia-se em 1%, quando estas se localizavam próximas a rodovias movimentadas.

Quinet (1993) realizou um estudo sobre a poluição sonora e seu ônus financeiro. Neste estudo, são apresentadas estimativas de custo da poluição sonora variando em torno de 0,2% a 2% do Produto Interno Bruto (PIB).

Os prejuízos não se limitam à desvalorização imobiliária, visto que as formas de fazer frente à poluição sonora são onerosas e nem sempre efetivas. A Agência Federal de Rodovias dos EUA (FHWA) apresenta que os custos de barreiras sonoras giram em torno de 1 a 2 milhões de dólares por milha, sendo que sua eficácia é limitada, em média, a menos de 400 metros de distância da rodovia (GIBBS *et al*, 2005).

² Danish Environmental Protection Agency (2003). Forslag til strategi for begrænsning af vejtrafikstøj (Proposal for a strategy for the reduction of road traffic noise (in Danish)). The Road Noise Group: Ministry of the environment, Ministry of Finance, Ministry of Transport, Ministry of the Interior and Health, Ministry of Justice and Ministry of Economy and Enterprise. www.mst.dk.

2.4.3 Fonte de ruído rodoviário

Como apresentado no item 2.3, a propagação do ruído em uma rodovia apresenta uma forma cilíndrica. Obviamente, este ruído é a soma do ruído gerado por cada veículo individualmente. O veículo produz ruído de diferentes formas, dentre as quais destacam-se: ruído oriundo do motor; aerodinâmico; escapamento e transmissão; e contato pneu/pavimento (HANSON, JAMES e NESMITH, 2004).

A Figura 8 mostra a contribuição de cada um destes para o ruído total emitido pelo veículo. Se for considerada uma velocidade média em torno de 70-80 km/h, verifica-se o quanto é importante estudar-se o ruído pneu/pavimento.

Figura 8: Influência de diferentes fontes geradoras do ruído

(Adaptado de Hanson, James, NeSmith, 2004)

2.4.4 Legislação internacional e nacional

As leis que regulamentam o ruído rodoviário em áreas urbanas utilizam métodos de medição variados e, dependendo do país, estabelecem diferentes níveis de ruído

para diferentes situações. Na Tabela 1 são apresentados diversos critérios de medição adotados em diferentes países com seus respectivos níveis máximos de ruído aceitável para períodos diurno e noturno, quando estes são diferenciados.

O Parlamento da União Europeia promulgou em 2002 a diretiva 49 (EUROPEAN PARLIAMENT, 2002), que serve como orientação e tem índices mínimos a serem obedecidos e alcançados. Contudo, nessa diretiva é dito que os países signatários tem a liberdade de estabelecer limites próprios, desde que estes limites sejam inferiores e as legislações não contradigam àquelas impostas pela União Europeia.

Tabela 1: Condição mais limitante de nível de ruído para casos externos não rural

Local	Critério		Fonte
EUA	L_{eq} (h)	52 dB(A)	FHWA 2010
União Europeia	L_{eq} Diurno	58–62 dB(A)	DIRECTIVE 2002/49/EC
	L_{eq} Noturno	48–55 dB(A)	
Portugal	L_{eq} Diurno	55 dB(A)	Decreto-Lei n.º 292/2000
	L_{eq} Noturno	45 dB(A)	
Espanha	L_{diurno}	60 dB(A)	Real Decreto 1367/2007
	L_e	60 dB(A)	
	$L_{noturno}$	50 dB(A)	
França	L_{eq} Diurno	60 dB(A)	Décret n°95
	L_{eq} Noturno	55 dB(A)	
Inglaterra	Compensação Financeira		Land Compensation Act/1973
Dinamarca	L_{DEN}	53 dB(A)	Departamento de trânsito dinamarquês 2009
Austrália	L_{eq} Diurno	55 dB(A)	EPA/NSW 1999
Brasil	L_{eq} Diurno	55 dB(A)	NBR10151/2000
	L_{eq} Noturno	45 dB(A)	
São Paulo (1)	L_{eq} Diurno	55 dB(A)	Minuta de regulamentação de níveis de ruído em Sistemas Lineares de Transporte 2010
	L_{eq} Noturno	50 dB(A)	

De acordo com Bistafa (2006), quando se busca calcular um nível médio de ruído para um determinado período, pode-se calcular o nível equivalente (L_{eq}) utilizando-se a eq.2.

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_p(t)/10} dt \right] (dB) \quad (2)$$

Onde:

L_{eq} = Nível equivalente em decibel;

$L_p(t)$ = Nível sonoro no instante t ;

T = Valor do tempo de registro.

A Dinamarca apresenta em um guia elaborado pelo Departamento de Trânsito (BENDTSEN, 2009), o estabelecimento de níveis aceitáveis de ruído de acordo com o local. No entanto, o próprio Departamento de Trânsito Dinamarquês faz a ressalva de que isso não é uma lei e sim uma orientação a ser seguida em projetos rodoviários.

Importante ressaltar que o L_{DEN} (Day-Evening-Night) é o padrão utilizado nos países nórdicos, enquanto o L_{Aeq} para cada período do dia (L_{Aeq} dia, noite) é utilizado em diversos países, ainda que a União Europeia esteja buscando uma padronização, que utilizaria o L_{DEN} . A relação entre o padrão nórdico e o mais usual não é muito clara; há uma divergência na relação entre os países europeus. A eq.3 demonstra como é calculado o L_{DEN} .

$$L_{DEN} = 10 \lg \left\{ 12 \times 10^{L_{Manhã}/10} + 3 \times 10^{(L_{Vespertino}+5)/10} + 9 \times 10^{(L_{Noite}+10)/10} \right\} \quad (3)$$

Onde:

L_{DEN} : Nível de ruído total do período de um dia;

$L_{Day(Manhã)}$: Nível de ruído equivalente para o período das 7:00 as 19:00;

$L_{Evening(Vespertino)}$: Nível de ruído equivalente para o período das 19:00 as 22:00;

$L_{Night(Noite)}$: Nível de ruído equivalente para o período das 22:00 as 7:00;

Importante ressaltar que, como os período diurno, vespertino e noturno não são padronizados, cada país utiliza-os com limites diferentes. Muitos, inclusive o Brasil, não consideram o período vespertino como independente, sendo ele incluído no período noturno.

De acordo com a DEFRA (2009), o governo Britânico estabelece o Ato de Compensação do Solo/1973, juntamente com as recomendações quanto ao isolamento acústico do ano de 1975, onde o governo é obrigado a compensar financeiramente os cidadãos e ainda fornecer o isolamento acústico correto sem limitar a ventilação das residências. Esta compensação é feita de acordo com o nível de exposição ao ruído.

Quanto a limites de níveis de ruído para rodovias, o departamento de meio ambiente, alimentos e rural declara que não existem limites formais em vigor na Inglaterra (DEFRA, 2009), então sugere-se obedecer os limites impostos pela União Europeia.

3. MECANISMOS DE GERAÇÃO E AMPLIFICAÇÃO DO RUÍDO NO CONTATO PNEU/PAVIMENTO

3.1 INTRODUÇÃO

O ruído produzido pelo contato dos pneus dos veículos com o pavimento é resultado de complexas interações entre o pneu em movimento e a superfície do pavimento (FEHRL, 2006; SANDBERG, 1997). Este contato varia de acordo com os seguintes parâmetros: textura do revestimento (padrão, profundidade, distribuição horizontal e vertical), porosidade interna das camadas do revestimento, impedância mecânica do revestimento e, no tocante ao pneu, *design* do padrão dos blocos da banda de rodagem e pressão de enchimento. Os mecanismos de geração e amplificação do ruído dependem da interação entre as variáveis supracitadas. Segundo um estudo europeu com o objetivo de divulgar o conhecimento sobre o ruído pneu/pavimento chamado de SILVIA (*Silenda Via- Sustainable road surfaces for traffic noise control*), os mecanismos de geração podem ser classificados em três grandes classes (FEHRL, 2006):

- Impactos e choques: causados pela variação das forças de interação entre a banda de rodagem do pneu e o pavimento, incluída a resposta vibratória da carcaça do pneu. Estes mecanismos de geração de ruído ocorrem de modo mais concentrado na porção mais baixa do espectro de frequência, abaixo de 1000 Hz;
- Processos aerodinâmicos: ocorrem no interior dos sulcos da banda de rodagem, bem como entre ela e o revestimento. Para pneus de veículos de passeio, este fenômeno atua em frequências acima de 1700 Hz. Em geral, o ruído associado aos mecanismos aerodinâmicos tende a ser mais relevante em frequências entre 1000 e 2000 Hz. Nesta faixa de frequência, é conhecido que o perfil de textura superficial da camada de rolamento do pavimento

(macrotextura) apresenta um alto grau de influência no controle da geração do ruído pneu/pavimento.

- Efeitos de adesão e micromovimentações da borracha do pneu em contato com a superfície do pavimento: a vibração do pneu e, portanto, o ruído gerado por este mecanismo está relacionado com a velocidade de escorregamento dos elementos da banda de rodagem; além disso, sua característica é ser um ruído predominantemente de alta frequência.

O mecanismo de amplificação do ruído pneu/pavimento (efeito corneta ou “*horn effect*”), ocorre devido à forma da região existente entre o pneu/pavimento, imediatamente atrás ou à frente da região de contato pneu/pavimento. A forma de “corneta” propicia múltiplas reflexões das ondas sonoras, provocando um consequente direcionamento das mesmas.

De acordo com Sandberg (1997), os mecanismos de geração e propagação de ruído pneu/pavimento podem ser simplificados em dois tipos: os estruturais (*Structure Born*) apresentados na Figura 9 e os aerodinâmicos (*Air Born*), apresentados na Figura 10.

Figura 9: Mecanismos estruturais de geração de ruído

Adaptado de: Sandberg, 1997

Figura 10: Mecanismos aerodinâmicos de geração de ruído

Adaptado de: Sandberg, 1997

Sandberg ainda apresenta uma tabela com um resumo explicando cada uma das formas de geração e amplificação ou redução do ruído, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2: Mecanismos de geração de ruído pneu/pavimento

Mecanismos de Geração	Vibracionais (pela estrutura)	
	1	2
Mecanismos de Amplificação e redução relacionados	Mecanismos de impacto (principalmente vibrações radiais)	1A Impacto da banda de rodagem: Impacto dos blocos ou outros elementos na superfície de rodagem do pneu, que seguem um certo padrão, contra a superfície do pavimento, causando vibrações tangenciais e principalmente vibrações radiais na banda de rodagem e na cinta do pneu.
		1B Texture Impact: Impacto da textura na superfície do pavimento contra a banda de rodagem, causando vibrações tangenciais e principalmente radiais na banda de rodagem e na cinta do pneu, propagando-se para as superfícies laterais do pneu.
		1C Running Deflection: deformações da banda de rodagem nos bordos de ataque e fuga, causando vibrações na cinta e na carcaça do pneu
	Mecanismos de adesão (principalmente vibrações tangenciais)	2A Stick/slip: Movimento relativo entre elementos da banda de rodagem e a superfície do pavimento causando vibrações tangenciais, também conhecidas como " <i>scrubbing</i> ".
		2B Stick/snap: Efeito de adesão entre o pavimento e a banda de rodagem, gerando vibrações tangenciais ou radiais.
	Mecanismos de movimentação de ar	3A Turbulência de ar: Efeito da turbulência próxima ao pneu devido ao deslocamento de ar com rolamento do pneu no pavimento e devido ao arraste de ar pelo conjunto roda/pneu..
		3B Air Pumping: Bombeamento de ar. Trata-se da movimentação de ar pelas cavidades da banda de rodagem, ou entre a banda de rodagem e o pavimento, sem necessariamente ocorrer ressonância.
		3C Pipe Resonances: Ressonância de "tubos", deslocamento de ar pelos sulcos da banda de rodagem, amplificadas pelo efeito de ressonância, também conhecido como ressonadores $\lambda/2$. (Pode ser considerado como um caso especial do efeito 3B)
		3D Ressonância de Helmholtz: Movimentação de ar entre cavidades interconectadas da banda de rodagem e a superfície do pavimento amplificado por ressonâncias. (Também pode ser considerado como um caso especial do mecanismo 3B)
Mecanismos de Amplificação e redução relacionados	4 Efeito Corneta	4 Também conhecido como " <i>horn effect</i> ", mecanismo de amplificação do som devido a forma da região situada entre a superfície do pavimento e o bordo de ataque ou de fuga, semelhante à de uma corneta, utilizada para amplificar sons.
	5 Impedância Acústica	5A Vazios interconectados em superfícies de pavimentos porosos atuam como um material sonoro-absorvente, reduzindo a força da fonte de geração
		5B Mesmo mecanismo descrito no item 5A, porém considerando a propagação do som até receptores distantes da fonte.
	6 Impedância Mecânica	6A A capacidade da superfície do pavimento em fornecer uma reação maior ou menor aos impactos da banda de rodagem, a qual depende da relação de rigidez pneu/pavimento.
		6B Parte das vibrações do pneu podem ser transmitidas para o pavimento, provavelmente por mecanismos de irradiação sonora (especulação)
	7 Ressonância do Pneu	7A Ressonância mecânica na cinta do pneu.
		7B Ressonância da cavidade de toróide: ressonância do ar contido dentro do pneu.

Fonte : Sandberg, 1997

O contato pneu/pavimento, de acordo com o mecanismo de geração e posterior propagação e amplificação gera um som em determinada frequência, a qual é característica de cada mecanismo em particular; tais faixas de frequências distintas causam maiores ou menores distúrbios ao ser humano (Tabela 3).

Tabela 3: Vibrações oriundas da interação pneu/pavimento e suas consequências ao motorista e passageiros dos veículos

Frequência de vibração	Faixa de influência do pavimento (perfil da pista) na interação pneu/pavimento como fonte de vibração
0-150 Hz	Conforto ao rolamento (<i>ride, harshness</i>); Aderência (manutenção do contato pneu-pavimento); Muito sensível ao ser humano na faixa de 4-20hz;
150-300 Hz	Vibrações secundárias do conjunto pneu-suspensão (pode causar desgaste irregular em veículos comerciais)(COSTA, 2007); Não é muito sensível ao ser humano;
300-5000 Hz	Conforto acústico, geração de ruído (<i>noise</i>); Bastante sensível ao ser humano na faixa de 500-5000 Hz como ruído (BERNHARD, 2005);
5000-10000 Hz	Influência no coeficiente de atrito, na parcela de perda por histerese dos compostos da borracha; Importante para frenagens com sistema ABS (ALBOHR et al., 2001);
Obstáculos na Pista	Excita todo espectro de frequências; Afetam a aderência e o conforto acústico; Vibrações de alta intensidade, 25-100 Hz ;

Fonte: (COSTA, 2007)

3.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO RUÍDO RODOVIÁRIO

Quando se busca medir o ruído, deve-se levar em conta qual objetivo final desta medição. Por exemplo, se o objetivo está em analisar o conforto do motorista e dos ocupantes do veículo, a medida pertinente será, obviamente, o ruído interno do veículo. Caso seja uma questão de saúde pública ou ambiental, voltada ao ruído aos lindeiros de uma via, a medição deve ser feita externamente aos veículos, em distância normatizada em relação ao eixo da via ou das faixas de rolamento, ou diretamente no local possivelmente afetado. Faz-se necessário também que, ao realizar-se uma medição, o resultado do ruído esteja numa escala e notação

convencionadas, pois existem muitas formas de exprimi-lo, como visto anteriormente.

Serão apresentadas as escalas e formas de medição existentes de forma sucinta e crítica. Para isso, deve-se separar a medição em três classes: ruído interno ao veículo; ruído externo; e ruído externo junto à roda para captar diretamente este ruído, muito próximo à fonte. Pode-se também realizar medições em laboratório, simulando situações de campo, para prever o ruído no contato dos pneus com o revestimento do pavimento.

3.2.1 Medição do ruído externo

A medição do ruído externo pode ser realizada junto ao pneu do veículo (ou trailer apropriado) ou no bordo da rodovia enquanto este veículo passa com o motor ligado (*pass-by*) ou com o motor desligado (*coast-by*). A Tabela 4 apresenta uma breve descrição de cada um dos métodos.

Tabela 4: Resumo dos métodos de medição do ruído externo em rodovias

Ruído Externo				
Nome do método	Sigla	Princípio da técnica	Área de aplicação	Norma
Coast-by	CB	Veículo com pneus de teste cruza em uma pista com o motor desligado. Velocidade variável	Teste e estudo detalhado dos pneus. Estudo detalhado da superfície da rodovia	ISO/CD 13325(2003)
Controlled Pass-by	CPB	Dois veículos selecionados (um de grande e outro de pequeno porte). Com pneus selecionados (quatro jogos de pneus, dois por veículo). Trafega pela rodovia com o motor ligado e é medido o ruído	Estudo detalhado da superfície da rodovia	Norma Francesa S/31 119(2000)
Statistical Pass-by	SPB	Ruído medido no bordo de uma rodovia sem a escolha dos veículos. O tipo de veículo, velocidade e pressão sonora são anotados. Normalizadas as velocidades para a referência. Mínimo de 100 veículos leves (carros) e de 80 pesados (caminhões)	Estudos gerais da superfície da rodovia	ISO/CD 11819-1(2001)
Close Proximity	CPX	Trailer com microfones acoplados próximos aos pneus de teste ou veículo com o mesmo sistema (pneu + microfones) percorre uma área de testes	Estudo detalhado da superfície da rodovia. Estudo detalhado dos pneus	ISO/CD 11819-2(2000)
On Board Sound Intensity	OBSI	Microfone acoplado junto ao pneu, um a frente e outro atrás do pneu. Método semelhante ao CPX	Estudo detalhado da superfície da rodovia. Estudo detalhado dos pneus	ASTM WK26025 (2009)
Nível de ruído equivalente	L_{eq}	Ruído medido ao lado de uma rodovia sem obstáculos que possam interferir na medição	Avaliação do nível máximo equivalente de ruído em uma rodovia	ABNT/NBR 10151 (2000) ISO 1996-2(2007)

Os métodos de medição externa têm como característica estarem sujeitos às mudanças climáticas. Isso os torna de complicada execução em certas épocas do ano e acarreta em resultados os quais nem sempre são extensíveis de um país para outro.

O método de nível de ruído equivalente (NBR 10151/2000) foi escolhido para as medidas que foram efetuadas neste trabalho, pois é um método com normativa nacional, consagrado, de relativa facilidade de execução e baixo custo. Como ele fornece um valor equivalente, torna-se mais simples a criação de um índice de pressão sonora para um determinado tipo de revestimento de pavimento. Além disso, esta técnica é utilizada no Brasil para avaliar os níveis de ruído aos quais hospitais, escolas e residências estão expostos.

3.2.2 Medição do ruído interno

Na maioria das vezes, a medição do ruído interno do veículo é executada pela indústria automobilística, com normativas próprias e adequadas a cada objetivo dos fabricantes. Contudo, existe uma norma brasileira específica para tal medição (NBR 9079/85), que delineia o método de ensaio para determinação do ruído interno.

De acordo com esta norma, sua função é prescrever o método de obtenção de medidas reprodutíveis e comparáveis do ruído no interior de veículos rodoviários automotores de todos os tipos. Seus principais objetivos, são: verificar se o ruído interno está de acordo com as especificações contratuais; avaliar o risco de dano à audição dos ocupantes do veículo; e definir o grau de interferência à inteligibilidade.

Bernucci, *et al.* (2007) realizaram ensaios para avaliar a qualidade sonora interna de um veículo, baseando-se em medidas realizadas segundo o procedimento da NBR 9079/85. Para medição do ruído interno utilizou-se de um “torso”, o qual simula o espaço ocupado por um ser humano (Figura 11). A grande vantagem deste método, além de possibilitar uma análise objetiva através do espectro de frequências

registradas, é a possibilidade de posterior reprodução dos ruídos para um júri de forma que este possa emitir um parecer subjetivo sobre o ruído.

Figura 11: Equipamento utilizado nas medições do ruído interno
(Fonte:BERNUCCI, 2007)

3.3 CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO QUE INTERFEREM NO RUÍDO

O ruído não depende apenas da textura do pavimento, mas também do volume de vazios interconectados e da impedância mecânica (FEHRL, 2006). A redução do ruído será tanto maior quanto maior o volume de vazios interconectados e desobstruídos e menor a impedância mecânica do revestimento. A textura do pavimento tem um papel importante, mas é mais importante o padrão desta textura (textura positiva ou negativa) somada às características anteriores.

3.3.1 Impedância mecânica

A impedância mecânica é a relação entre o módulo de elasticidade do pavimento e o módulo de elasticidade do pneu, que de acordo com o relatório da FEHRL (2006) “Geralmente a impedância mecânica do revestimento da rodovia é em muitas ordens de grandeza maior que a da borracha do pneu. Reduzir a impedância mecânica do

revestimento ocasionará uma redução nas forças transmitidas pelo impacto do pneu, as quais irão reduzir os níveis de vibrações e, portanto, reduzir a geração do ruído”. A impedância mecânica ou rigidez é associada ao ruído devido aos mecanismos de impacto.

Bernucci *et al* (2007) apresentam valores característicos de módulo elástico, chamado de módulo resiliente em pavimentação para diferentes misturas asfálticas, na Tabela 4

Tabela 4: Módulos de Resiliência(MR)³ e Resistência à Tração (RT) de misturas asfálticas no país

Características	Faixa (Publicação)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Concreto asfáltico – CAP 30/45	Faixa C (Soares <i>et al.</i> , 2000)	3.628	1,09	3.346
Concreto asfáltico – CAP 50/60		3.033	0,89	3.425
Concreto asfáltico – CAP 85/100		1.488	0,44	3.376
Concreto asfáltico – CAP 30/45	Faixa B (Soares <i>et al.</i> , 2000)	5.105	0,82	6.201
Concreto asfáltico – CAP 50/60		4.425	0,73	6.062
Concreto asfáltico – CAP 85/100		1.654	0,21	7.755
Misturas densas (moldadas em usina)	Faixa C (Rede Asfalto, 2005)			
Concreto asfáltico 1		2.651	0,85	3.119
Concreto asfáltico 2		2.297	0,67	3.428
AAUQ 1		1.825	0,52	3.510
AAUQ 2		1.683	0,72	2.338
Misturas densas (moldadas em laboratório)	Faixa C (Rede Asfalto, 2005)			
Concreto asfáltico 1		3.609	1,26	2.864
Concreto asfáltico 2		3.026	1,23	2.460
AAUQ 1		1.786	1,02	1.751
AAUQ 2		1.682	0,81	2.077
SMA – 12,5 mm	(Vasconcelos, 2004)	4.747	0,98	4.844
SMA – 9,5 mm		3.367	0,82	4.106
Concreto asfáltico de referência	Faixa C (Lima, 2003)			
Com 0 % fresado		3.200	1,2	2.667
Com 10 % fresado		4.776	1,3	3.674
Com 30 % fresado		7.524	1,3	5.787
Com 50 % fresado		8.901	1,6	5.663
Concreto asfáltico de referência	Faixa C (Pinheiro, 2004)	3.647	0,97	3.760
Asfalto-borracha (úmido)		2.393	0,5	4.786
Agregado-borracha (seco)		2.452	0,8	3.065

Fonte: Bernucci *et al*, 2007

³ Denominados neste texto como impedância mecânica ou rigidez dos revestimentos asfálticos.

Misturas asfálticas de módulo elevado (não apresentadas na Tabela 4), podem apresentar Módulo de Resiliência em média na faixa de 12.000 a 20.000 MPa. Tal mistura destina-se exclusivamente à camada de base, e não à superfície de rolamento (Bernucci *et al*, 2007)

Os módulos elásticos do pneu (para a banda de rodagem com módulo elástico em torno de 10-20 MPa) e do pavimento mesmo sendo de grandezas tão distintas (o pavimento tendo módulo muito maior) tornam a relação válida, uma vez que o pavimento pode variar seu módulo em até 100 vezes.

O módulo varia de acordo com o tipo de mistura, e dentre um tipo de mistura varia de acordo com o ligante utilizado (ex: CAP 50/60, CAP 30/45), sua granulometria, a adição de modificantes como polímeros ou borracha, e o volume de vazios com ar.

3.3.2 Textura do pavimento

A textura do pavimento deve auxiliar na frenagem, resistência à derrapagem, drenagem superficial, conforto ao dirigir, dirigibilidade e consumo de combustível. A textura do pavimento pode auxiliar em todos os itens citados acima, bem como na redução do ruído. Porém, nem sempre se podem extrair todas as vantagens conjuntamente; em algumas situações deve-se priorizar ou privilegiar um aspecto sobre outro. A escolha de um dentre todos os aspectos citados terá sempre de ser favorável à segurança, visto que a preservação do bem estar e da vida dos usuários da via são mais importantes.

Muitas vezes a seleção de um revestimento de pavimento muito seguro em relação à resistência à derrapagem ou à aderência, principalmente em pistas molhadas, pode levar a uma geração de ruído mais intensa. No entanto, pode-se, em determinadas situações de pavimentos e estradas, optar por revestimentos que combinem estes dois aspectos: segurança na condução do veículo e ruído menos intenso. A superfície do pavimento é sempre responsável por parcela importante da segurança e do ruído gerado. De acordo com a literatura, a superfície do pavimento

abrange quatro grandezas (FEHRL, 2006; WAMBOLD, ANTLE e HENRY, 1995; SANDBERG, 1997), como apresentado na Figura 12.

Figura 12: Diferentes tipos de textura existentes no pavimento

(Fonte: Sandberg, 1997)

As diferentes classificações de texturas podem ser descritas na forma de uma senóide, apresentando assim variação na altura e no espaçamento entre vales ou picos. O relatório da FERHL (2006) afirma que “Qualquer forma de um perfil pode ser descrito como a soma de um número de variações senoidais, que se alteram tanto em amplitude, como comprimento de onda”. O PIARC (*Permanent International Association of Road Congresses*, agora chamada de *World Road Association*) classifica a textura do pavimento de acordo com a variação no comprimento de onda (λ), (WAMBOLD, ANTLE e HENRY, 1995), em:

Irregularidade: $\lambda > 500$ mm;

Megatextura: $50 \text{ mm} < \lambda < 500$ mm;

Macrotextura: $0,5 \text{ mm} < \lambda < 50$ mm;

Microtextura: $\lambda < 0,5$ mm.

Um estudo realizado por Sandberg (1997) apresenta os comprimentos de onda que têm influência no ruído, resistência ao rolamento e resistência à derrapagem, como é apresentado esquematicamente na

Figura 13.

Figura 13: Influência da textura da superfície do pavimento (Fonte: FEHRL,2006)

A partir da

Figura 13, pode-se verificar que a principal responsável pelo ruído é a macrotextura, juntamente com a megatextura. Verifica-se também que uma parcela da macrotextura, e toda a megatextura até a irregularidade, causam ou interferem na resistência ao rolamento. Tal resistência pode acabar por ocasionar maior consumo de combustível e ainda desconforto aos ocupantes do veículo, e um desgaste maior do pneu. Ainda com base na

Figura 13, percebe-se que a resistência à derrapagem, um fator importante da segurança, está presente na macrotextura e na microtextura.

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

contribuição expressiva ao ruído, colabora parcialmente com a resistência à derrapagem especialmente em pistas molhadas.

A caracterização da superfície do pavimento é realizada com ensaios apropriados para cada grandeza de textura como será apresentado nos capítulos seguintes.

3.3.2.1 Caracterização da Megatextura e Irregularidade

O perfilógrafo a laser é o mais utilizado (ASTM E1845-09; ISO 13473-1), e consiste em um veículo com um equipamento de laser acoplado, como mostra a Figura 14, que, ao percorrer a rodovia em uma velocidade limite (dependente da frequência de aquisição do laser), fornece um perfil da textura do pavimento de acordo com o filtro aplicado. Estes filtros separam a megatextura da macrotextura (que pode usar o mesmo equipamento).

Figura 14: Veículo do CEDEX com perfilômetro acoplado

Fonte: CEDEX/2010

3.3.2.2 Caracterização da macrotextura

A mancha de areia é o método volumétrico mais difundido para a avaliação da macrotextura do revestimento (ASTM E965-96). O ensaio de mancha de areia é utilizado para medir a profundidade média da macrotextura (MTD - *Mean Texture Depth*). O método consiste em espalhar, na superfície do revestimento que se quer avaliar, um volume conhecido (2500 mm^3) de micro esferas de vidro (fração areia), de dimensões padronizadas, em movimentos circulares com auxílio de um disco de borracha, como é mostrado na Figura 15.

Figura 15: Espalhamento da fração areia sobre a superfície do pavimento

Após o espalhamento, que resulta em um círculo de areia sobre a superfície, medem-se quatro diâmetros, posicionados a 0° , 45° , 90° , e 135° , como apresentado na Figura 16.

Figura 16: Medição do diâmetro da mancha de areia

Do círculo formado de areia calcula-se o seu diâmetro médio. A altura da mancha de areia é obtida pela eq. 4.

$$H_m = \frac{V \times 4}{D_m^2 \times \pi} \quad (4)$$

Onde:

$V = 2500 \text{ mm}^3$;

D_m = Diâmetro médio da mancha de areia em milímetros;

H_m = Altura média da mancha de areia em milímetros.

O método da mancha de areia é de simples execução, barato e emprega equipamentos simples. Além disso, há disponível um rico banco de dados em diversos países. Contudo, trata-se de um método lento, que exige fechamento ou interdição da rodovia ou pista, e que depende em parte do operador.

Atualmente é empregado um método que busca não mais a profundidade média da macrotextura (podendo realizar medidas de megatextura) e sim um perfil médio desta. Este método chama-se de *Mean Profile Depth* (MPD), e é medido com um equipamento a laser podendo ser estacionário (CTmeter) ou dinâmico (perfilógrafos).

Acoplado ao equipamento, há um sistema de aquisição de dados e tratamento dos mesmos, o qual calcula o MPD, sendo que primeiramente calcula a profundidade média de cada um dos segmentos (*Mean Segment Depth*), e então é calculada uma média das profundidades destes segmentos, obtendo-se assim o MPD.

Cada segmento é calculado dividindo o comprimento total do perfil de aproximadamente 100 mm (ISO 13473-1/2004), em duas partes de igual extensão. Após encontrar o pico de altura do primeiro segmento e do segundo, calcula-se suas profundidades e a média, como apresentado na

Figura 17. O MPD é calculado individualmente para cada perfil, a partir da média entre o primeiro e segundo pico menos a média do perfil (nível médio).

Figura 17: Processo de cálculo do *Mean Profile Depth* (ISO 13473-1/2004)

O MPD apresenta uma correlação empírica com o ETD (*Estimated Texture Depth*), termo usado quando se tem o MPD (*Mean Profile Depth*) e busca-se o MTD (*Mean Texture Depth*), como apresentado na Eq.4 (ISO 13473-1/2004), sendo empregada nos casos onde realiza-se a medição com um equipamento disponível, mas faz-se necessário o outro valor para verificação de limites, especificações, valores de editais, etc.

$$\text{ETD} = 0,2 + 0,8\text{MPD} \quad (4)$$

Onde:

ETD = *Estimated Texture Depth*, estimativa da média da altura da textura (MTD) em milímetros;

MPD = *Mean Profile Depth*, dado medido por laser e expresso em milímetros

3.3.2.3 Caracterização da Macrotextura por imagem

De acordo com Tommaselli (2009) “O conceito de estereoscopia foi usado pela primeira vez em um levantamento prático, para construção de cartas topográficas, pelo suíço F. Kapeller, em 1726. Em 1759, J. H. Lambert escreveu um tratado clássico sobre a perspectiva, sugerindo a sua utilização na construção de mapas; nestes trabalhos Lambert já tratava os problemas da perspectiva central inversa e da ressecção espacial, que são os fundamentos da fotogrametria praticada até os dias atuais.” Esta técnica teve um grande avanço uma vez que a fotografia fora inventada em 1826 pelo francês Joseph Nicéphore Niépce.

Esta técnica busca, com o auxílio de fotografias, recriar uma superfície em três dimensões. Durante anos, esta técnica foi muito usada pela agrimensura e geografia, com fotografias tiradas a partir de sobrevoo de uma aeronave repetidas vezes em um local de interesse, retirando fotografias sequenciais, como ilustrado na Figura 18. No entanto, restrições de escala e qualidade acabaram por impedir, até recentemente, seu uso na pavimentação.

Figura 18: Superposição longitudinal e transversal de sobrevoo

As bases teórica e prática têm como princípio a visão estereoscópica (humana), o mesmo aplicado na estéreo-aero fotometria, podendo recriar superfícies menores e com grande qualidade, visto o grande avanço das câmeras digitais. Estas permitem trabalhar diretamente com as imagens no computador, assim permitindo a utilização de uma maior gama de ferramentas computacionais para análise e reconstrução em três dimensões (GULLÓN, 2003; HORN, 1986; EL GENDY e SHALABY, 2007; WÖHLER e D'ANGELO, 2009).

Com base nestes estudos, encontra-se em desenvolvimento no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo um protótipo de um dispositivo para registro de imagens de detalhes da superfície do pavimento com câmera digital, e um algoritmo para a aquisição destas imagens e sua interpretação, de modo a obter-se uma avaliação da macrotextura de pavimentos e tornar possível o cálculo do *Mean Profile Depth* (MPD).

3.3.2.4 Caracterização da Microtextura

De acordo com a literatura “A microtextura é uma característica muito importante para rompimento da película de água e a promoção do contato pneu-pavimento para baixas velocidades de deslocamento, de até cerca de 40 km/h.” (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A microtextura é responsável pela adesão do componente da borracha ao pavimento, em velocidades inferiores a 40 km/h. Quando ocorre esta adesão, a borracha do pneu “gruda” ao pavimento devido a um processo químico e, para o posterior rompimento desta ligação, ocorre o atrito que auxilia na frenagem em baixas velocidades. Ao mesmo tempo, ocorre o fenômeno de geração de ruído conhecido como *Stick and Snap* (“gruda e desgruda”).

O Pêndulo Britânico (ASTM 303-93) é um equipamento de ensaio estático e tem sido empregado para as avaliações indiretas do atrito de revestimentos de pavimentos. Seu uso pode ser laboratorial e em campo. O equipamento tem como princípio de funcionamento o movimento de um pêndulo, como pode ser visto na Figura 19, o qual perde energia por atritar-se contra a superfície do pavimento. Na extremidade deste pêndulo, existe uma sapata de borracha, que a partir da posição inicial com sua haste na horizontal, movimenta-se em queda livre em direção ao pavimento molhado. Devido ao atrito com a superfície do pavimento ao deslizar (Figura 20), a sapata de borracha perde energia, levando a haste com a sapata para uma nova posição, a qual pode ser marcada por uma haste auxiliar, parando ao perder totalmente sua energia de movimento. A partir deste ponto, a haste com a sapata volta à queda, em sentido oposto ao inicial, retornando em queda livre, onde ela é parada pelo operador para evitar o novo atrito contra a superfície do pavimento. A unidade de medida é dada por um número BPN (*British Pendulum Number*), que quanto maior, maior é a energia de movimento perdida por atrito. Por meio deste número, estabelecem-se faixas de atrito, pelas quais se avalia a microtextura do pavimento.

Figura 19: Pêndulo britânico

Figura 20: Sapata de borracha após o atrito com o revestimento do pavimento

O pêndulo Britânico é um equipamento de fácil uso; no entanto, não é representativo para altas velocidades e ainda conta com o problema de ser necessário o fechamento da rodovia ou da pista para realização do ensaio.

Atualmente existe uma série de equipamentos desenvolvidos para a avaliação da microtextura, determinada em movimento, sendo que todos são baseados em medidas indiretas. Isso ocorre, pois, como é apresentado na Figura 21 a microtextura real é não é medida.

Figura 21: Sapata do pendulo britânico em contato com os agregados diferentes podem produzir BPN semelhante apesar de microtextura diferente

Todos estes equipamentos medem, na realidade, a resistência à derrapagem. Estes equipamentos podem ser acoplados ao veículo e assim realizar os ensaios sem a necessidade de fechamento da pista ou rodovia.

Tais equipamentos baseiam-se no princípio da medição da resistência à derrapagem de uma roda. Os ensaios são realizados por um veículo que reboca um trailer. Neste

trailer podem ser adaptados dois diferentes dispositivos para medição da microtextura. Um deles é o equipamento de roda travada (ASTM E 274) como mostra a Figura 22, onde o veículo reboca o trailer, podendo alcançar a velocidade de 64 km/h. O equipamento ainda libera um volume de água necessário para promover uma película de 0,5mm, produzindo assim um fenômeno de certo modo análogo ao pêndulo britânico. A outra variação de equipamento é chamada de ensaio de roda oblíqua, como mostrado na Figura 23. Este equipamento trabalha com rodas levemente rotacionadas ($7,5^\circ$ ou 20°), impedindo-a assim de girar (ASTM E 670).

Figura 22: Equipamento de roda travada (Fonte: Dynatest)

Figura 23: Equipamento de roda oblíqua (Fonte: SKM)

3.3.3 Textura positiva e textura negativa

A macrotextura do pavimento, em especial, apresenta a capacidade de reduzir ou ampliar o ruído, como dito anteriormente. Sua capacidade de amplificação e redução se dá de acordo com a distribuição espacial dos agregados na superfície, decorrente da distribuição granulométrica da mistura. A forma que a textura (disposição dos agregados, forma dos agregados) encontra-se distribuída na superfície influencia a geração e a propagação do ruído.

A caracterização por métodos volumétricos ou a laser (*Mean Texture Depth*, *Mean Profile Depth*, respectivamente) tem a limitação de não demonstrar a forma que a textura está distribuída no plano vertical.

A distribuição da textura em seu plano vertical determina se ela é “positiva” ou “negativa”, e, se positiva, apresenta partículas e acículas (cumes) e protuberâncias acima de um plano que pode ser definido do contato da superfície, como mostrado na Figura 24. Tal forma de distribuição é comumente encontrada em revestimentos como tratamentos superficiais asfálticos de penetração invertida, microrevestimento asfáltico a frio, entre outros. Nesta configuração, o material granular é introduzido na superfície. Este tipo de textura também é encontrada nos revestimentos de concreto escovado transversalmente (FEHRL, 2006).

Figura 24: Textura positiva

A textura negativa, Figura 25, é encontrada quando o revestimento é composto por agregados que tenham uma relação de vazios superficiais interconectados, e a superfície superior de acabamento seja plana (FEHRL, 2006).

Figura 25: Textura Negativa

Segundo FEHRL (2006), “dependendo do tamanho dos agregados, a textura positiva leva a níveis mais altos de vibrações no rolamento do pneu, enquanto texturas negativas contribuem para níveis de ruído menores”.

3.3.4 Porosidade

Os vazios contidos internamente a um revestimento possibilitam que a propagação da onda sonora seja atenuada, pois o som “perde-se” dentro do pavimento. Estes vazios têm de ser interconectados, formando canais irregulares para entrada do som a partir da superfície. Como exemplos de revestimentos asfálticos de alta porosidade, podem ser citados: a Camada Porosa de Atrito (CPA), que é porosa e drenante, permitindo entrada de água ou ar; os BBTM – *Béton Bituminieux Très Mince* do tipo 2 porosos, entre outros. Os revestimentos chamados de densos, como o concreto asfáltico ou concreto betuminoso usinado a quente (CA ou CBUQ, que são denominações diferentes para o mesmo material) apresentam volume de vazios (com ar) entre 4-6%, não permitindo a entrada de água ou de ar. Estes revestimentos asfálticos são na prática impermeáveis. Misturas ditas abertas possuem um volume mais alto de vazios (com ar): o CPA tem volume de vazios acima de 18%.

3.4 FORMAS DE ATENUAÇÃO E MITIGAÇÃO

A mitigação da poluição sonora é necessária quando os níveis de ruído ultrapassam limites aceitáveis ou prejudicam o ser humano. Dentre as alternativas existentes, podem ser citadas: barreiras sonoras, redução da velocidade na via, limitação da circulação de veículos em determinadas horários e em determinados locais e o uso de revestimentos de pavimentos silenciosos.

Importante salientar que a indústria de pneus emprega grandes esforços no desenvolvimento de pneus mais silenciosos. Deve-se salientar a necessidade de haver um trabalho de cooperação entre a indústria de pneus e a de pavimentação.

Tanto os pavimentos silenciosos como as barreiras sonoras tem um custo direto alto, e a limitação da velocidade e circulação impõem restrições as quais aumentariam o valor do frete, causariam maiores congestionamentos e maiores tempos de viagem.

3.4.1 Barreiras sonoras

A barreira sonora é uma solução amplamente usada em diversos países como EUA e Japão. No entanto, sua eficácia é dependente de sua altura, o que implica maiores custos para maiores alturas. Sua utilização implica em maiores custos de implantação da obra e em problemas de segurança viária, sem falar na poluição visual que a mesma pode causar. O custo estimado pela FHWA, no ano de 2005, para a construção de barreiras sonoras ficou entre 1 a 2 milhões por milha (GIBBS et al., 2005). A Figura 26 mostra o princípio de funcionamento de uma barreira sonora, que não passa de um obstáculo da onda sonora e para maior eficiência acústica deve ter maior altura.

Figura 26: Princípio de funcionamento de uma barreira acústica (Fonte: FHWA, 2001)

As barreiras sonoras podem ser feitas de diversos materiais, com maior ou menor qualidade de absorção sonora, diferentes efeitos visuais e diferentes custos. Ainda é possível a utilização de soluções combinadas, como barreiras mistas, com árvores e muros. A Figura 27, mostra as diferentes possibilidades de composição de uma barreira sonora.

Figura 27: Diversas composições de soluções ao ruído incluindo barreiras sonoras
Fonte: (KOTZEN e ENGLISH, 2009)

3.4.2 Pavimentos silenciosos

Os pavimentos silenciosos têm sido cada vez mais empregados como medida de redução de ruído, associados ou não a outros dispositivos redutores. A principal fonte de estado da arte dos pavimentos silenciosos encontra-se nos países da União Europeia, especialmente nos países nórdicos. Tal técnica consiste em desenvolver um revestimento que tenha as características e qualidades necessárias para serem atenuadores do ruído. Recentemente no Brasil, o CPA foi empregado como medida de redução do ruído externo em um segmento do Rodoanel – Mario Covas trecho oeste da cidade de São Paulo (STRUFALDI *et al.*, 2010).

Tais pavimentos apresentam como característica altos volumes de vazios. Estes pavimentos podem ter adição de borracha ou normalmente algum outro aditivo. Por terem altos volumes de vazios, sua eficiência como camada estrutural pode ser comprometida. O uso de aditivos, como fibras para dar maior espessamento no filme asfáltico que envolve os agregados, auxilia na minimização deste problema, tornando as camadas mais coesas, com menor potencial de desagregação.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental deste trabalho constituiu-se em três fases. A primeira delas foi a caracterização quanto à textura (macrotextura) do pavimento da pista de referência (pista de testes da Pirelli-Sumaré) e a realização de ensaios de ruído interno, de acordo com a norma NBR 9079/1985.

A segunda fase residiu na realização de ensaios de caracterização da textura (macrotextura) em trecho do pavimento da Rodovia dos Bandeirantes (SP-348), de ensaios de ruído externo de acordo com a norma NBR 10151/2000, e de ruído interno de acordo com a norma NBR 9079/1985. Estes ensaios foram realizados em duas etapas distintas, as quais foram: primeiramente, ensaios (textura, ruído externo e interno) nos revestimentos de Microrrevestimento asfáltico; então, na segunda etapa foram realizados ensaios (textura e, ruído externo e interno) nos mesmos locais após um recapeamento feito com Gap-graded com borracha a quente e Gap-graded com borracha morno, e ensaios de textura e ruído interno na pista de referência. O gap-graded é uma mistura asfáltica que pode ser feita a quente ou a temperatura morna, com graduação descontínua, e com volume de vazios com ar superior ao CBUQ. Além disso, nesta etapa procedeu-se à medição de ruído interno em trecho com microrrevestimento que ainda não havia sido recapeado para comparação entre este revestimento e o gap-graded com asfalto borracha.

Já na terceira etapa desenvolveu-se e construiu-se um protótipo e um algoritmo de processamento de imagens, para reconstrução em três dimensões da superfície do pavimento.

4.1 ENSAIOS NA PISTA DE REFERÊNCIA – CAMPO DE PROVAS DE SUMARÉ - PIRELLI

A pista da Pirelli, em Sumaré/SP, foi escolhida por ser uma pista que mantém suas características superficiais ao longo do tempo, devido ao tráfego leve e poucas repetições que está sujeita. Os ensaios realizados na pista de referência de

caracterização da macrotextura seguiram a norma ASTM E965-96 a qual foi apresentada no capítulo 3.3.2.2. Foram realizados ensaios de mancha de areia, para uma boa caracterização da macrotextura do pavimento.

Os ensaios de ruído interno na pista ficaram sob responsabilidade da equipe de engenheiros e técnicos da pista de provas da Pirelli Tyre Brasil. Os ensaios foram realizados com equipamento e pessoal da Pirelli Tyre Brasil, obedecendo a procedimentos padronizados pela Pirelli. Tais procedimentos são executados em todos os ensaios de ruído realizados por esta empresa. Estes ensaios foram feitos utilizando o equipamento e sistema chamado B&K Pulse (Brüel & Kjær). Este equipamento consiste em um microfone de precisão, como pode ser visto na Figura 28. Este é conectado a um computador com programas fornecidos pela Brüel & Kjær para análise do ruído produzido internamente ao veículo.

Figura 28: Detalhe do microfone B&K colocado no interior do veículo, próximo ao cinto de segurança e ouvido do motorista.

O procedimento executado pela Pirelli tem como padrão posicionar o microfone na altura do ouvido esquerdo do motorista, como pode ser visto na Figura 29. Todo o ensaio foi realizado com georreferenciamento.

Figura 29: Detalhe do posicionamento do microfone

4.1.1 Caracterização da macrotextura da pista de referência

A pista de referência localiza-se em Sumaré no estado de São Paulo, Brasil, como pode ser visto na Figura 30, realçado em vermelho. A pista de referência é o campo de provas Pirelli Tyre Brasil, gentilmente cedida para ser utilizada como referência.

Figura 30: Campo de Provas de Sumaré, pertencente à Pirelli Tyre Brasil

O ensaio de mancha de areia para caracterização da macrotextura foi realizado na pista de testes principal, bem como na anexa. A Figura 31 apresenta o espalhamento da areia para realização do ensaio e a Figura 32 apresenta a medição dos quatro diâmetros.

Figura 31: Espalhamento da areia para realização do ensaio de mancha de areia

Figura 32: Medição do diâmetro da mancha de areia

Os resultados da macrotextura são apresentados na Figura 33 juntamente com o desvio padrão. O ensaio realizado foi a mancha de areia (MTD) e posteriormente calculado o MPD, com a utilização da Eq. 4, apresentada no capítulo 3, item de caracterização da macrotextura.

Figura 33: Altura da mancha de areia na pista de referência

A classificação da macrotextura é dada pela altura média de mancha de areia (MTD-HS) como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Classes de macrotextura

Classe	Altura média de mancha de areia (mm)
Muito Fina ou muito fechada	$HS \leq 0,20$
Fina ou fechada	$0,20 < HS \leq 0,40$
Média	$0,40 < HS \leq 0,80$
Grosseira ou aberta	$0,80 < HS \leq 1,20$
Muito Grosseira ou muito aberta	$HS > 1,20$

Fonte: ABPV, 1999

Ao classificar a pista de, observa-se que ela se enquadra na classe de altura média de mancha de areia na classe “média”. Segundo Bernucci *et al.*(2007), “Abaixo de 0,6mm, a macrotextura passa a ter uma tendência de ser fechada e aumenta o risco

de hidroplanagem. Acima de 1,2mm, a textura é muito aberta, causando desgaste excessivo nos pneus, maior consumo de combustível e tendência a maior ruído ao rolamento.”

4.1.2 Ensaios de ruído interno na pista de referência

Os ensaios de ruído interno foram realizados de acordo com os procedimentos e utilizando o equipamento conforme apresentado neste capítulo. Para realização deste ensaio bem como para o ensaio de ruído interno na rodovia dos Bandeirantes foi utilizado o mesmo veículo padrão. O veículo escolhido foi um Fiat Palio EXL 1.8, gentilmente cedido para realização dos ensaios pela CCR-AutoBan, como pode ser visto na Figura 34.

Figura 34: Veículo utilizado nos ensaios

A escolha deste veículo se deu por ser um característico da frota nacional, com baixa quilometragem total ao início dos ensaios com cerca de 20.000 Km, com pneus Pirelli, como é mostrado em detalhe na Figura 35 (Pneu Pirelli modelo P6 com largura de 185 milímetros, altura de seção de 60% em relação à largura, raio de 14 polegadas, pneu com estrutura radial).

Figura 35: Pneu do veículo utilizado nos ensaios

Os ensaios realizados na pista foram feitos em diferentes velocidades. Sendo a partir de 20 km/h até 100 km/h, variando de 20 km/h em 20 km/h. A velocidade de 100 km/h foi escolhida para ser possível a comparação com os ensaios realizados na rodovia. As diferentes velocidades tinham como objetivo gerar uma curva de ruído por velocidade, assim podendo analisá-lo para diferentes velocidades.

A Figura 36 apresenta o nível de espectro médio (dentre 4 medições para cada velocidade) realizadas a 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h e 100 km/h, sendo que o eixo das ordenadas apresenta o nível de ruído em dB(A) e o eixo das abcissas apresenta a frequência em bandas de oitava.

Figura 36: Resultado do ruído interno

A Figura 36, mostra que o nível máximo de ruído se localiza nas frequências de 250 Hz à 1 kHz. Esta faixa de frequência compreende o início do trecho de maior sensibilidade do ouvido humano (500 Hz), chegando próximo ao fim desta faixa de sensibilidade (2 kHz).

Importante observar que para as velocidades mais baixas (20 e 40 km/h), o nível de ruído é muito expressivo em baixas frequências (por volta de 30 Hz), isso aparentemente é devido ao ruído do motor.

A Figura 37 apresenta os níveis totais de ruído para cada velocidade, nele pode-se verificar que a velocidade é muito relevante para os níveis de ruído, visto que a diferença entre o nível de ruído a 60 km/h para o de 100 km/h é de aproximadamente 10 dB(A).

Figura 37: Níveis totais de ruído interno para cada velocidade do veículo teste

Todos os ensaios foram realizados no mesmo dia, com temperatura ambiente de 25°C, temperatura do asfalto de 38°C, umidade relativa de 55% e velocidade do vento de 1,5 km/h.

4.2 ENSAIOS NA PISTA TESTE: RODOVIA DOS BANDEIRANTES

A Rodovia dos Bandeirantes é o nome dado à rodovia SP-348, localizada no estado de São Paulo, ligando o município de São Paulo com o município de Cordeirópolis/SP. A Figura 38, mostra a localização da pista experimental que fica entre os quilômetros 78 a 82, sentido sul.

Figura 38: Rodovia dos Bandeirantes (SP – 348)

A Rodovia dos Bandeirantes é atualmente uma rodovia sob concessão da AutoBan, concessionária pertencente ao grupo CCR. A concessão teve no ano de 2010 um fluxo total de veículos, em um pedágio próximo à pista teste, de aproximadamente 12.000.000, sendo 72% de veículos leves e 28% de veículos pesados.

Os pontos de ensaios para esta dissertação foram locados com auxílio de um equipamento de georreferenciamento. Os locais foram escolhidos de acordo com a

geometria da via, topografia e pavimento existente. A Figura 39 mostra o ponto A, utilizado como referência, pois não houve alteração no revestimento do pavimento constituído por microrrevestimento asfáltico a frio, durante todo o experimento.

Figura 39: Ponto de medição A

Nos pontos B, C, E e F (Figura 40) o pavimento existente era microrrevestimento asfáltico a frio com remendos em CBUQ. Nestes trechos abrangendo os pontos B, C, E e F, houve recapeamento com *Gap-graded* com asfalto borracha, usinado a quente. Um experimento paralelo para desenvolvimento de tecnologia de usinagem morna em substituição da técnica a quente, para uma tese de doutorado em andamento na Escola Politécnica da USP, foi aplicado em trecho abrangendo o ponto D, utilizando *Gap-graded* com asfalto Borracha usinado a morno (*Warm mix*).

Figura 40: Pontos B, C, D, E e F de medição

A Tabela 6 apresenta um resumo dos pontos e tipos de revestimentos antigos e os revestimentos novos.

Tabela 6: Pontos de ensaios com revestimento antigo e revestimento novo

Rodovia do Bandeirantes (SP -348) Pista Sul			
		Revestimento Antigo	Revestimento Novo
Ponto A	km 75 + 070	Microrrevestimento a frio	Microrrevestimento a frio (mantido original, sem recapeamento)
Ponto B	km 82 + 540	Microrrevestimento a frio (com remendos em CBUQ)	Gap-graded com borracha (Mistura Quente)
Ponto C	km 81 + 280	Microrrevestimento a frio (com remendos em CBUQ)	Gap-graded com borracha (Mistura Quente)
Ponto D	km 79 + 260	Microrrevestimento a frio (com remendos em CBUQ)	Gap-graded com borracha (Mistura Morna)
Ponto E	km 78 + 730	Microrrevestimento a frio (com remendos em CBUQ)	Gap-graded com borracha (Mistura Quente)
Ponto F	km 78 + 330	Microrrevestimento a frio (com remendos em CBUQ)	Gap-graded com borracha (Mistura Quente)

4.2.1 Caracterização da superfície do pavimento dos trechos

A caracterização da macrotextura da superfície do pavimento foi realizada em duas etapas, sendo a primeira etapa com a realização de ensaios de caracterização com o perfilômetro (MPD) a laser realizado pela empresa CIBERMÉTRICA, contratada gentilmente pela ENGELOG (CCR) para apoiar este experimento, também foram realizadas manchas de areia (MTD) pela equipe do LTP. A Figura 41 mostra os valores de MTD⁴ de acordo com o tipo de revestimento do pavimento.

Figura 41: Resultados de MTD (médio) de acordo com os tipos de revestimento

4.2.2 Ensaios de ruído externo nos trechos

Foram realizados ensaios de nível equivalente de ruído em duas etapas distintas. Ambas as campanhas de ensaio foram realizadas nos mesmos locais e obedeceram a norma ABNT/NBR 10151/2000. Os ensaios foram realizados pela empresa E&M Engenharia e Consultoria, gentilmente contratada pela Engelog (CCR) para este

⁴ Os valores de MTD para o Microrrevestimento asfáltico foram obtidos pela Eq.4, pois foram obtidos os MPDs com laser.

experimento. Os ensaios foram realizados durante o dia, com dois decibelímetros na primeira campanha e com três na segunda campanha. A Figura 42 apresenta, a localização dos decibelímetros junto a faixa de rolamento (3m) e afastados até o limite da faixa de domínio (realçado em vermelho), os pontos A, B e C. Os pontos D, E e F, são apresentados na Figura 43.

Figura 42: Localização dos pontos A, B e C de ensaio

Figura 43: Localização dos pontos D, E e F de ensaio

Importante ressaltar que o decibelímetro no ponto D esteve localizado atrás de um *Guard Rail*, o qual acabou alterando o resultado dos ensaios devido à absorção

parcial do som vindo do tráfego. A Figura 44, apresenta o esquema de disposição dos decibelímetros para a primeira e segunda campanhas.

Figura 44: Esquema de disposição dos decibelímetros (sem escala)

Onde:

A1 posicionado a 3 metros da borda externa da pista de rolamento;

A2 posicionado a 10 metros do limite da faixa de domínio;

A3 posicionado junto a faixa de domínio.

Foram realizadas medições de ruído em dois pontos na primeira campanha, sendo um deles (A1, B1,C1,D1,E1 e F1) a três metros da faixa de rolamento, e o outro ponto junto a faixa de domínio (variando de acordo com a localização desta). Na segunda campanha foram realizadas medidas de ruído externo em três pontos, sendo dois deles coincidentes com aqueles (A1 e A3) da primeira campanha; já o ponto complementar (A2) estava a uma distância de 10 metros do ponto junto à faixa de domínio (A3), como apresentado na Figura 44.

A Tabela 10 apresenta o resultado obtido dos ensaios (ambas as campanhas) de ruído bem como a contagem de veículos realizada durante o registro do nível de ruído. A contagem de veículos serviu para que fosse possível uma correção do ruído de tráfego em função da variabilidade do volume de tráfego. Esta correção foi feita com base em uma equação proposta por Josse(1975) e utilizada pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), como mostra a eq.5 e os coeficientes de correção como apresentados nas Tabelas 7,8 e 9.

$$L = 52 + \log\left(\frac{Q}{d}\right) + CV + C\% + C1 \text{ dB}(A) \quad (5)$$

Onde:

Q= Número de veículos hora;

d= Distância da fonte ao receptor;

CV= Correção pela velocidade média;

C% = Percentual de veículos pesados;

C1 = Inclinação da pista.

Tabela 7: Correção pela velocidade média

Velocidade média do veículo	33	47	53	60	67	73	80	87	93
Correção em dB(A)	-4	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5

Tabela 8: Correção pelo percentual de veículos pesados

Percentual de veículos pesados em %	7	20	35	47	60	73	87	100
Correção em dB(A)	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7

Tabela 9: Correção pela inclinação da pista

Inclinação longitudinal em %	0	2	4	6
Correção em dB(A)	0	+1	+2	+3

A prática tem mostrado que quando se aplicava a fórmula a estimativa de nível de ruído de tráfego que circula em rodovia cujo revestimento é asfáltico tipo denso (CBUQ) chega-se a resultados próximos ou de mesma ordem de grandeza.

Tabela 10: Resultado dos ensaios de ruído externo e contagem de veículos

P O N T O	Primeira Campanha					P O N T O	Segunda Campanha				
	Leves /10 Minutos	Pesados /10 Minutos	Fluxo (Veic/h)	% de pesados	Leq dB(A)		Leves /10 Minutos	Pesados /10 Minutos	Fluxo (Veic/h)	% de pesados	Leq dB(A)
A1	226	101	1962	31	82,7	A1	324	94	2508	22	82,5
A2					N.A	A2					72,3
A3					71,0	A3					71,5
B1	257	91	2088	26	83,2	B1	292	101	2358	26	79,8
B2					N.A	B2					72,8
B3					72,5	B3					69,2
C1	245	118	2178	33	82,6	C1	326	114	2640	26	81,0
C2					N.A	C2					73,4
C3					71,0	C3					69,3
D1	213	83	1776	28	78,6	D1	294	106	2400	27	77,9
D2					N.A	D2					68,6
D3					70,2	D3					66,3
E1	220	103	1936	32	82,5	E1	340	111	2706	25	79,7
E2					N.A	E2					72,1
E3					69,6	E3					67,0
F1	266	90	2136	25	81,3	F1	293	102	2370	26	79,6
F2					N.A	F2					63,2
F3					67,8	F3					61,3

Figura 45 apresenta os níveis de ruído de acordo com a distância de medição para ambas campanhas, a primeira campanha com pontos representados por losangos⁵ e a segunda campanha por quadrados.

Pode-se observar que houve de deslocamento vertical da curva de ruído externo da primeira campanha em relação à segunda campanha. A análise da Figura 45 torna evidente que (independente da campanha), a distância do emissor ao receptor é responsável por uma grande redução do ruído. Isso evidencia que se pode, como solução complementar, aonde possível, exigir respeito a uma distância mínima, assim salvaguardando a saúde dos lindeiros.

⁵ Os dados do ponto A sempre são considerados como primeira campanha (losango), pois neste ponto o revestimento não foi alterado.

Figura 45: Nível de ruído pela distância

Como pode ser visto na Figura 45, para os 30 metros de distância do receptor à fonte tem-se aproximadamente uma redução de 13dB(A) para uma rodovia com microrrevestimento asfáltico e de aproximadamente 12dB(A) para uma rodovia com gap-graded. Todavia, nenhum destes valores consegue atender os níveis exigidos apresentados na Tabela 1.

Para atingir 55dB(A), pela regressão observa-se que qualquer moradia ou local público, como escolas e hospitais, deveria se situar a aproximadamente a 500 metros do bordo da pista quando revestidas com microrrevestimento asfáltico e a 350 metros aproximadamente quando revestidas com gap-graded, nas condições do local onde foram efetuadas as medições.

4.2.3 Comparação entre ruído externo e macrotextura

A Figura 46 apresenta os níveis de ruído externos, a três metros, em função do MTD. Os valores representados por losangos foram os obtidos na primeira campanha de medição de ruído, isto é antes da execução do Gap-graded. Estes valores apresentam MTD altos, pois eram de revestimentos com esta característica

(microrrevestimento predominantemente). Os valores representados por quadrados são os valores da segunda campanha, onde o ponto A foi mantido com o mesmo revestimento e os demais foi executado com Gap-graded como camada de revestimento.

Figura 46: Nível de ruído *versus* MTD

4.2.4 Ensaios de ruído interno nos trechos

Também foram realizados ensaios de ruído interno, estes ensaios foram realizados no Campo de Provas de Sumaré (CPS) da Pirelli e na Rodovia dos Bandeirantes. A Figura 47 apresenta o ruído pelo espectro de frequência, cada curva para um tipo de pavimento, sendo os pavimentos o CBUQ (curva obtida no campo de provas da Pirelli), *Gap-graded* e Microrrevestimento asfáltico (obtidos na Rodovia dos Bandeirantes).

Percebe-se que de um modo geral o Gap tem uma curva com menores valores de ruído, especialmente na faixa da frequência sensível ao ouvido humano. Interessante perceber que o CBUQ e o Micro têm picos que se alternam em grande parte do tempo, no entanto o microrrevestimento tem maiores níveis de ruído para

baixas frequências e o CBUQ para altas frequências. O gap-grade com asfalto borracha é invariavelmente menor que o CBUQ e o microrrevestimento de 20Hz a 2000Hz, e a diferença no nível de ruído total equivalente é de aproximadamente de 3dB(A).

Figura 47: Nível de ruído interno por espectro de frequência para diferentes revestimento

Cada uma das curvas da Figura 47 é composta por uma série de ensaios; os dados do CBUQ foram obtidos com 4 passagens a 100km/h na pista da Pirelli. Da mesma forma foram obtidos com 4 medições a 100km/h no trecho onde foi mantido o microrrevestimento asfáltico e, por sua vez, as 4 medições no gap-graded são decorrentes da média dos 5 trechos recapeados estudados (Pontos B,C,D,E e F) os dados de microrrevestimento. Os dados de gap-graded são uma média de 4 medições em cada um dos trechos (5 trechos ao total).

4.2.5 Comparação entre ruído interno e macrotextura

Na Figura 48 encontra-se o nível de ruído interno *versus* o MTD, onde o CBUQ é representado por um símbolo de “mais”, o *gap-graded* por um quadrado e por fim, o microrrevestimento asfáltico por um losango.

Figura 48: Nível de ruído interno *versus* MTD

Observa-se que de um modo geral os maiores valores de MTD correspondem a maiores níveis de ruído, no entanto isso se torna uma falácia quando se trata do CBUQ, onde há uma clara inversão da curva. Esta inversão, provavelmente, se deu

devido ao padrão da textura (ser “positiva” ou “negativa”). Este, provavelmente, apresenta tais níveis de ruído por ser uma mistura muito densa.

4.3 MEDIÇÃO DA MACROTEXTURA POR IMAGEM

A medição da macrotextura por imagem e reconstrução tridimensional da superfície do pavimento, mostraram-se viáveis na pesquisa em andamento no LTP. A revisão bibliográfica mostrou diversas técnicas de captura e análise das imagens, as quais serão estudadas de modo mais aprofundado em uma dissertação de mestrado que teve início este ano no LTP.

O estágio atual de desenvolvimento mostra que será possível obter não só os dados como MTD, MPD, que são utilizados na pavimentação, mas também será possível entender o padrão da textura, isso é, se ela é “positiva” ou “negativa”.

Isso é muito importante pois permitirá uma abordagem mais realista no estudo do contato pneu/pavimento, especialmente no tocante ao ruído produzido pelo par pneu/pavimento, visto que a macrotextura (MTD ou MPD) não é suficiente para explicar o fenômeno e os mecanismos contidos no contato do sistema pneu/pavimento.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo realizado propiciou a análise da influência do tipo de revestimento asfáltico dos pavimentos rodoviários no ruído interno, medido em um veículo de teste, que pode gerar desconforto ao motorista e aos passageiros, e do ruído externo devido ao tráfego de veículos, que pode incomodar os usuários externos ou os lindeiros a uma rodovia. Os estudos possibilitaram a verificação de algumas leis teóricas de propagação de som, bem como o entendimento de algumas características importantes da textura superficial dos revestimentos asfálticos dos pavimentos no aumento ou na redução do ruído.

A partir do experimento realizado na Rodovia dos Bandeirantes e na Pista da Pirelli, foi possível verificar, constatar e concluir alguns pontos relevantes para a compreensão da propagação do ruído e possibilidades de mitigação ou redução:

O distanciamento do receptor até a fonte é peça-chave para atenuação do ruído. Mostrou-se, conforme esperado pela teoria, que para qualquer tipo de revestimento de pavimento, quanto mais distante o receptor estiver da fonte, mais atenuado será o ruído que nele chegará, seguindo uma lei de redução do ruído logarítmica com a distância. Com base em equações de regressão calculadas a partir de medidas de campo na Rodovia dos Bandeirantes, realizadas a diversas distâncias da fonte geradora de ruído, tem-se que para atingir o limite máximo de 55 dB, nível exigido pela ABNT 10151/2000, no período diurno no meio rural, o receptor terá de estar afastado da rodovia de aproximadamente 500 metros da pista quando o revestimento do pavimento for microrrevestimento asfáltico a frio, e de 350 metros da pista, quando esta estiver revestida com o gap-graded. Estas distâncias dependem do volume de tráfego, da situação, condicionantes, topografia, entre outros aspectos. Utilizando-se as equações teóricas de propagação esférica do som para uma fonte emissora pontual, tem-se que seriam necessários 200 metros no caso de pavimento com microrrevestimento asfáltico a frio como camada de rolamento, e 150 metros para o gap-graded. Esta diferença com o calculado pela regressão se dá pelo fato de que o som produzido por um veículo em uma rodovia não segue exatamente as leis de propagação de som teóricas, pois estas foram

desenvolvidas para propagação do som em campo aberto, sem obstruções, sem obstáculos, fossem eles reflexivos ou absorventes.

Se não for possível alcançar o nível requerido junto ao receptor, devido à distância do receptor à fonte, pode-se lançar mão de soluções alternativas para a mitigação do ruído. O trabalho mostrou que uma das soluções cabíveis é o tipo de revestimento dos pavimentos, que mesmo não tendo originalmente esta função, pode reduzir em aproximadamente 150 metros a distância requerida. Mostrou-se, pelas análises de resultados de campo, que o pavimento tem influência tanto no ruído interno como no externo, e que pode ser utilizado como um dos elementos para sua mitigação.

Para ilustrar a possibilidade de redução de ruído pelo tipo de revestimento do pavimento, verificou-se que, ao executar uma camada de gap-graded com asfalto borracha sobre um pavimento originalmente com microrrevestimento asfáltico a frio, reduziu-se em aproximadamente 2dB , chegando em alguns pontos a 3dB, o ruído externo próximo ao acostamento da via, mantendo-se esta decalagem até cerca de 30 metros da borda da pista. Quanto ao ruído interno, verificou-se que a redução foi de 3 dB a 4 dB ao passar de microrrevestimento asfáltico a frio para o revestimento de gap-graded com asfalto borracha, a uma velocidade de 100km/h. Os resultados mostram, portanto, que o emprego de alternativas de revestimentos asfálticos pode abrandar o ruído externo e interno. Complementarmente, podem-se construir barreiras sonoras, implantar alterações no greide, ou usar barreiras sonoras verdes, que são ambientalmente mais corretas. Os cinturões de árvores com 30m de largura podem chegar a reduzir 7 dB(A) (BISTAFA, 2006).

O ruído interno ao veículo, sentido pelo condutor e passageiros, depende do tipo e mecânica do veículo, velocidade, tipos de pneus e do revestimento do pavimento. A dissertação mostrou que a redução da velocidade influencia no ruído interno, atenuando-o e, por consequência, deve também diminuir o ruído externo, até certo limite onde o ruído dos motores se sobressai ao do rolamento pneu/pavimento. Alternativas simples podem ser empregadas para redução do ruído, como o controle de velocidade dos veículos em locais onde haja esta possibilidade operacional. Para ilustrar a magnitude da redução, em um local onde a velocidade foi reduzida de

100km/h para 60km/h, mantendo-se as mesmas condições, observou-se que o ruído interno foi atenuado em aproximadamente 10 dB para um revestimento de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente). Observou-se também que para frequências mais baixas (menores que 100 Hz), a velocidade passa a ter menor importância.

Ao fixar velocidade, veículo e pneus, variando-se apenas o revestimento do pavimento, observou-se que o gap-graded tem menores níveis de ruído internos em quase todas as frequências registradas, sobretudo nas frequências sensíveis ao ouvido humano (500-2000 Hz). O ruído no CBUQ tem predominância nas frequências entre 200 Hz até 300 Hz aproximadamente; o ruído no Microrrevestimento asfáltico, por sua vez, predomina entre 400 Hz e 900 Hz, e o gap-graded na faixa de frequência de 7.000 Hz até 10.000 Hz. Portanto, na faixa que incomoda mais o motorista e passageiros, o microrrevestimento asfáltico, seguido do CBUQ são os menos adequados. Neste sentido, mais uma vez apresentaram-se as razões do revestimento com gap-graded serem mais confortáveis quanto ao ruído ao ser comparado com o microrrevestimento asfáltico a frio ou com o CBUQ.

A presente dissertação de mestrado demonstrou que os métodos empregados atualmente para avaliação da macrotextura do revestimento do pavimento (MPD – *Mean Profile Depth* e MTD – *Mean Texture Depth*) são insuficientes para determinar o comportamento acústico de pavimentos com revestimentos densos. Observou-se que é necessária a busca de meios que consigam caracterizar a macrotextura de uma forma mais realista, envolvendo a distribuição espacial dos agregados na superfície para melhor compreender o ruído. A caracterização do padrão de distribuição espacial (“positiva” ou “negativa”) aparenta ser um parâmetro-chave para compreensão e avaliação da macrotextura quanto ao ruído gerado pelo contato pneu/pavimento, sobretudo quando aliado ao MTD.

Tendo em vista o fato da macrotextura não ser um indicador suficiente para avaliar o ruído, sugere-se que sejam desenvolvidas pesquisas objetivando mensurar e avaliar o padrão da textura. Sugere-se também que se realizem pesquisas semelhantes a esta aqui apresentada, variando os tipos de revestimento de pavimento.

REFERÊNCIAS

ALBOHR, O. ; BREUER, B.; KAUELMANN, U.; MISANI, P.; STROTHJOHNN, T.; XIE, C. Determination of Dynamic Friction Characteristics During Braking and the consequence for Performance Prediction **Technical Meeting of the American Chemical Society**. Savannah, GA, EUA: 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM WK26025** - New Practice for Measurement of Tire/Pavement Noise Using the On-Board Sound Intensity (OBSI) Method. Disponível em: <<http://www.astm.org/WorkItems/WK26025.htm>> Acesso em 10 de Dez. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151**: Acústica – Avaliação de ruído em áreas habitadas. Rio de Janeiro. 2000.

_____. **NBR 9079**: Veículo automotor – Determinação do ruído interno. Rio de Janeiro. 1985.

BENDTSEN, H. **Highway noise abatement Planning tools and Danish examples** Road Directorate. Copenhagen: 2009. 60 p.

BERNHARD, R. Tire Noise Fundamentals. **Seminário sobre ruído de pneus**. UNICAMP. Campinas: Brasil:2005.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA da, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2007. 501 p.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 1 ed. São Paulo, Brasil: Ed. Blucher, 2006. 368 p.

COSTA, A. L. A. **Caracterização do comportamento vibracional do sistema pneu-suspensão e sua correlação com o desgaste irregular verificado em pneus dianteiros de veículos comerciais**. 2007. 164 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP São Carlos, São Carlos, 2007.

DEFRA. Draft Noise Action Plan Agglomeration Template - Environmental Noise regulations. DEPARTMENT OF ENVIRONMENT,. Londres 2009.

EL GENDY, A.; SHALABY, A., Mean Profile Depth of Pavement Surface Macrotexture Using Photometric Stereo Techniques. **Journal of Transportation Engineering**, 2007.

EPA. **Noise Effects Handbook: A Desk Reference to Health and Welfare Effects of Noise**. Environmental Protection Agency and National Association of Noise Control Officials Washington D.C., EUA: Julho de 1981, p.130. 1981

EUROPEAN PARLIAMENT. 2002/49/EC. Official Journal of the European Communities: Official Journal of the European Communities. 49 2002.

FEHRL. **SILVIA - Guidance Manual for the Implamentation of low-noise road surfaces**. FEHRL. Bélgica, Bruxelas: 2006. 318 p.

FHWA. Keeping the Noise Down: Highway Traffic Noise Barriers. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA), U. S. D. O. T. Washington, D.C: 2001.

GIBBS, D.; GIBBS, D.; IWASAKI, R.; BERNHARD, R.; BLEDSOE, J.; CARLSON, D.; CORBISIER, C.; FULTS, K.; HEARNE, T.; MCMULLEN, K.; NEWCOMB, D.; ROBERTS, J.; ROCHAT, J.; SCOFIELD, L.; SWANLUND, M. **Quiet Pavement Systems in Europe**. Federal Highway Administration. Washington, EUA. 2005. 48 p.

GULLÓN, C. **Height Recovery of Rough Surfaces from Intensity Images**. 2003. 214p. Tese (Doutorado) - School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edimburgo, 2003.

HANSON, I.; JAMES, S.; NESMITH, C. **Tire/Pavement Noise Study**. NCAT - National Center for Asphalt Technology. Auburn, EUA, 2004. 44 p.

HORN, B. K. P. **Robot Vision**. Londres, Inglaterra: McGraw-Hill Book Company, 1986. 509 p.

HPA. **Environmental Noise and Health in the UK**. Health Protection Agency. Reino Unido, 2009, 94 p.

IPG, **Innovatie Program Geluid**. Holanda Diponivel em: <<http://www.innovatieprogrammagemeluid.nl>> Acessado em 10 de Janeiro de 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/CD 13325**: Tyres-coast-by-method for measurement of tyre/road sound emission. Genebra, 2001. 27p.

_____. **ISO 11819**: Acoustics – measurement of the influence of road surface on traffic noise. Statistical Pass By method, Parte 1. Genebra, 2001. 31p.

_____. **ISO 11819**: Acoustics – measurement of the influence of road surface on traffic noise. Close Proximity Method. Parte 2. Genebra, 2000. 31p.

_____. **ISO 1996**: Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 2: Determination of environmental noise levels. Genebra, 2007.

JOSSE, R. **La acústica em la construccion**. Barcelona: Ed. Gustavo Gili, 1975. 291 p.

KOTZEN, B.; ENGLISH, C. Environmental Noise Barriers: A guide to their acoustic and visual design. Nova Iorque, EUA: Taylor & Francis: 2009. 282 p.

MTE. Normas Regulamentadoras. Brasília D.F. : Ministério do Trabalho e Emprego 15. 2010.

ROBERTS, J.; ROCHAT, J.; SCOFIELD, L.; SWANLUND, M. **Quiet Pavement Systems in Europe**. FHWA. Washington, DC: 2005. 48 p.

SANDBERG, U. **Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related to Environment, Economy and Safety: A State-of-the-art Study Regarding Measures and Measuring Methods**. Swedish National Road Administration. Estocolmo: 1997. 112 p.

SANDBERG, U. **Tyre/road noise - Myths and realities**. The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Holanda, Haia: 2001. 22 p.

SILVIA, **Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control**. Disponível em: <http://www.trl.co.uk/silvia/>. Acesso em Janeiro de 2011.

SILENCE, Disponível em: <http://www.silence-ip.org/site/> . Acesso em Janeiro de 2011

STRUFALDI, E. G. B. et al. Traffic noise reduction using pourous asphalt course as an overlay of portlan cement concrete pavement in São Paulo, Brazil. **InterNoise 2010**. SOCIETY, Portuguesa de Acústica. Lisboa, Portugal 2010.

WAMBOLD, J. C.; ANTLE, C. E.; HENRY, J. J. **International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements**. PIARC, 1995.

WHO. Constituição da Organização Mundial de Saúde. World Health Organization. Genebra, 1948.

_____. **Guidelines For Community Noise**. World Health Organization. Genebra, p.160. 1999

_____. **Night Noise Guidellines for Europe**. Copenhagen, Dinamarca: World Health Organization Europe, 2009.

WÖHLER, C.; D'ANGELO, P. Stereo Image Analysis of Non-Lambertian Surfaces. **International Journal of Computer Vision**, v. 81, n. 2, p. 172-190, 2009.