

Fatec Faculdade de Tecnologia de São
São Paulo Paulo

Departamento de Transportes e Obras de Terra

DENNYS MONTEAGUDO GRACEFFI

**ANÁLISE DO RUÍDO PROVOCADO PELA INTERAÇÃO
PNEU/PAVIMENTO**

São Paulo

2016

DENNYS MONTEAGUDO GRACEFFI

**ANÁLISE DO RUÍDO PROVOCADO PELA INTERAÇÃO
PNEU/PAVIMENTO**

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como parte dos requisitos para a Obtenção do grau de Tecnólogo em Construção Civil na modalidade de Movimento de Terra e Pavimentação.

Orientador: Prof. Me. Décio Moreira
Coorientador: Prof. Dr. Edson de Moura

São Paulo

2016

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha mãe, Célia Monteagudo Penas, que tem influência marcante em minha vida, e a todos os integrantes da Fatec São Paulo que, direta ou indiretamente, compartilharam da minha passagem pela instituição e com os quais aprendi muito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, sinceramente e sem a obrigatoriedade do senso comum (com a qual eu me tornaria desumanamente vazio), às seguintes pessoas:

- Aos integrantes da minha família, Célia, Edwin e Husky;
- Aos professores Décio Moreira (uma pessoa que me acolheu na incumbência da entrega deste trabalho sem a menor recusa e que me serviu de inspiração técnica e pessoal e de motivo para escolhê-lo como orientador), Edson, que é um tecnólogo e doutor especial em sua profissão, que contagia e felicita a todos que por perto dele estão e estiveram a sempre aprender mais, Arisol, um símbolo de professora atenciosa, amigável e conhecedora, que possui uma inteligência comunicativa exemplar, Arthur, Rogério Sant’Anna e Robson;
- Aos colegas fatecanos (que me dão o privilégio de chamá-los de amigos, uma vez que fazem jus ao sentido pleno da palavra) Jonas Levi, Carla Beatriz, Bruna Aranha, Lorena Galvão, Clóvis, Guilherme Lombardo, Juliana Valero, Vitor (Vitão) e Marcos Lucena;
- À minha professora Nilma Manfrinato, que certamente me transfere o senso humano dos estudos acústicos e me traz forças para prosseguir nos estudos de música e engenharia;
- Aos colegas de trabalho da JBA, em especial ao engenheiros Leônidas, Almeida e Evelyn e aos arquitetos Giovanni e Roberto;
- Aos amigos Fernando Lopez Vidal, Fernando Castelao e Garcia.

EPÍGRAFE

Uma vida não questionada não merece
ser vivida.

(Platão)

RESUMO

O som nos pavimentos é definido segundo a sua forma de propagação e geração das ondas no meio. As mesmas são responsáveis pela pressão sonora que é percebida nos ouvidos, que, no caso da interação pneu/pavimento, é de natureza ruidosa (do tipo flutuante), ou seja, de desconforto aos ouvidos e danosa à saúde humana. É por isso que mitigá-los é necessário, contando que a parcela pneu/pavimento é a que mais contribui na condução total nos ruídos causados pelo tráfego veicular. Para isso, pode-se trabalhar muito bem através do emprego de revestimentos silenciosos em contraposição às soluções com barreiras acústicas, que tornam as obras mais caras e complexas serem feitas. O revestimento mais bem-sucedido para mitigação da poluição sonora em pavimentos, segundo pesquisas de Callai *et al.* (2009) e Fehrl (2006), é a camada porosa de atrito (CPA), que mostrou ser capaz de reduzir em até 6dB em relação aos revestimentos convencionais de concreto asfáltico, seguido pelo concreto de cimento Portland poroso e *cepillado*, que também se mostram eficientes em pavimentos rígidos se comparados ao revestimento de concreto convencional. O que estes materiais conferem para garantirem silenciosidade encontra-se nas micro, macro e megatexturas, que são níveis de análise mais ou menos aprofundados das superfícies. Em texturas com maiores vazios, os ruídos são atenuados pela canalização interna de poros (apresentando bons resultados aos 20%, como ocorre na CPA), isolando a transmissão do ruído do impacto dos pneus. Além da poluição sonora, revestimentos silenciosos podem garantir maior aderência e estabilidade no tráfego, bem como favorecer a drenagem de águas pluviais pelos poros, mostrando-se multifuncionais; deve-se, no entanto, atenção na execução e utilização de enchimentos dos vazios com fibras e *filler* para evitar desagregações (condições de projeto de misturas). Pode-se, portanto, corrigir o problema na fase inicial das obras, evitando soluções tardias que chegam ao ponto de prejudicar a população do entorno e ao mesmo tempo atender às normas de proteção e valorização ambiental e dos seres humanos desde o início.

Palavras-chave: Revestimentos. Ruídos. Pneu/pavimento. Texturas. Mitigação sonora

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Comparação entre som puro e complexo.....	17
Gráfico 2.1 – Comportamento da função senoidal pela amplitude versus o tempo.....	18
Quadro 2.1 – Limites de emissão de ruído e suas causas.....	19
Gráfico 2.2 – Espectro sonoro dos ruídos contínuos.....	20
Gráfico 2.3 – Espectro sonoro dos ruídos flutuantes	20
Gráfico 2.4 – Espectro sonoro dos ruídos impulsivos.....	21
Quadro 3.1 – Relação das normas IEC e ANSI para sonômetros	27
Quadro 3.2 – Notas atribuídas aos sonômetros nos padrões IEC e ANSI	27
Gráfico 3.1 – Curvas de ponderação sonora A, B e C	28
Gráfico 3.2 – Curvas de isofônicas	29
Figura 5.1 – As camadas dos pavimentos rígidos e flexíveis.....	39
Figura 5.2 – Comparação do comportamento da distribuição das cargas aplicadas em pavimentos rígidos e flexíveis.....	40
Figura 5.3 – Tipos de revestimentos separados por categorias	41
Figura 5.4 – Níveis de análise em superfícies de pavimentos.....	42
Figura 5.5 – Tipos de texturas relacionadas às micro e macrotexturas.....	43
Gráfico 5.1 – As diferentes parcelas de ruído oriundos do tráfego por velocidade	44
Figura 5.6 – Vibração das carcaças de pneus	47
Figura 5.7 – Desempenhos dos revestimentos em funções dos comprimentos de onda de suas superfícies.....	48
Figura 5.8 – Efeitos da textura nas propriedades dos revestimentos de pavimentos	50
Figura 5.9 – Modelo esquemático das medições padronizadas pela ISO 11819	56
Figura 5.10 – Exemplo de veículo utilizando o método CPX em uma via da Holanda ..	57
Figura 5.11 – Esquema de bloqueio acústico em barreiras	60
Figura 5.12 – Exemplo de barreira acústica circular combinada com vertical, empregada no Rodoanel.....	61
Quadro 5.1 – Comparação da emissão de ruído pneu/pavimento entre CA, CPA, SMA e BBTM.....	63
Quadro 5.2 – Comparação da emissão de ruído pneu/pavimento entre concreto de cimento Portland, concreto cepillado e concreto poroso.....	64

Quadro 5.3 – Comparação da emissão de ruído pneu/pavimento entre concreto de cimento Portland, concreto com agregado exposto, concreto poroso e concreto tratado com resina epóxi.....	65
Quadro 5.4 – Comparação da emissão de ruído pneu/pavimento entre concreto asfáltico e SMA com textura otimizada faixas 0/5 e 0/8	66
Gráfico 5.1 – Medição do SPBI em diferentes tipos de revestimentos.....	66
Gráfico 5.2 – Pressão sonora causada pela interação pneu/pavimento a diferentes distâncias medido em revestimentos	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparação entre as os ganhos e perdas das curvas ponderadas A, B, C e D.....	30
Tabela 3.2 – Exemplos de coeficientes de absorção sonora em materiais	33
Tabela 4.1 – Limites de Tolerância para ruídos contínuos ou intermitentes.....	36
Tabela 5.1 – Faixas de comprimentos de onda em superfícies de pavimentos	42
Tabela 5.2 – Constantes empregadas pela ISO 11819 para cálculo do SPBI	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.2	METODOLOGIA.....	15
2	DEFINIÇÃO DE SOM E RUÍDO.....	16
2.1	TIPOS DE RUÍDOS	20
2.2	PRESSÃO SONORA.....	21
2.3	BELS E DECIBELS	23
3	MEDIÇÃO DO SOM.....	25
3.1	O SOM QUE PODE SER MEDIDO NOS PAVIMENTOS	25
3.2	A TECNOLOGIA NAS MEDIÇÕES ACÚSTICAS	26
3.3	CURVAS DE PONDERAÇÃO: FILTROS ACÚSTICOS.....	27
3.4	EMIÇÃO E IMIÇÃO SONORA	31
3.5	FATORES EXTERNOS QUE INFLUENCIAM NA SONORIDADE	32
3.5.1	AMPLIFICAÇÃO PELA REVERBERAÇÃO URBANA.....	32
3.5.1.1	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO E NRC.....	32
4	LIMITAÇÕES ORGANIZACIONAIS.....	34
4.1	PMSP – LEI DE ZONEAMENTO (HABITAÇÕES).....	34
4.2	NBR 10151(2000)	34
4.3	NORMA REGULAMENTADORA 15	35
4.3.1	NR 15 – ANEXO I – LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA RUÍDO CONTÍNUO OU INTERMITENTE	35
4.3.2	NR 15 – ANEXO II – LIMITES TOLERÁVEIS PARA RUÍDO DE IMPACTO 37	
4.3.3	ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA).....	37
5	PAVIMENTOS	39
5.1	DEFINIÇÃO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS	39
5.2	TIPOS DE REVESTIMENTOS	40
5.2.1	CARACTERÍSTICAS DAS SUPERFÍCIES DOS PAVIMENTOS	41
5.3	SONORIDADE VIÁRIA	43

5.3.1	MECANISMOS DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DO RUÍDO	44
5.3.1.1	MECANISMOS GERADORES DE ENERGIA	45
5.3.1.1.1	VIBRAÇÃO	45
5.3.1.1.2	BOMBEAMENTO DE AR	45
5.3.1.1.3	DERRAPAGEM	46
5.3.1.1.4	ADESÃO.....	46
5.3.1.2	MECANISMOS CONVERSORES DE ENERGIA EM RUÍDO.....	46
5.3.1.2.1	RESSONÂNCIA HELMHOLTZ.....	46
5.3.1.2.2	VIBRAÇÃO DE CARÇAÇA.....	47
5.3.1.2.3	RESSONÂNCIA INTERNA.....	47
5.3.2	RELAÇÕES ENTRE TEXTURA E RUÍDO	47
5.3.3	ANÁLISE DOS RUÍDOS EM DIFERENTES REVESTIMENTOS.....	50
5.3.3.1	Stone Matrix/Mastic Asphalt (SMA).....	50
5.3.3.1.1	SMA COM TEXTURA OTIMIZADA.....	51
5.3.3.2	CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)	51
5.3.3.3	BÉTON BETUMINEUX TRÈS MINCE (BBTM).....	52
5.3.3.4	REVESTIMENTO POROSO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	52
5.3.3.5	CONCRETO TRATADO COM RESINA EPÓXI	53
5.3.3.6	CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND COM AGREGADO EXPOSTO	53
5.3.3.7	CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND CEPILLADO.....	54
5.3.4	MÉTODOS ESPECÍFICOS PARA MEDIÇÕES DO RUÍDO EM PAVIMENTOS.....	54
5.3.4.1	MÉTODO STATISTICAL PASS-BY (SPB).....	54
5.3.4.2	CLOSE-PROXIMITY (CPX).....	57
5.3.4.3	MÉTODO COAST-BY (CB)	57
5.3.5	MÉTODOS EXTERNOS PARA MITIGAÇÃO DO RUÍDO VIÁRIO.....	58
5.3.5.1	DISTÂNCIA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR	58
5.3.5.2	BARREIRAS VEGETAIS.....	59
5.3.5.3	BARREIRAS ACÚSTICAS PLANAS E CURVAS.....	59
5.3.5.4	TÚNEIS FALSOS.....	61
5.3.6	PESQUISAS NO QUESITO RUÍDO GERADO PELA INTERAÇÃO PNEU/PAVIMENTO	62

6. CONCLUSÃO.....	68
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna, enfrentamos o apogeu da civilização em seu crescimento tecnológico e estrutural, que vem se organizando de maneira a reestruturar totalmente a organização e o modo de vida dos seres humanos. É necessário que, dessa forma, para um desenvolvimento positivo, encare-se estas mudanças de maneira hábil, analisando os pontos que devem ser mudados e/ou manipulados a fim de que os problemas sejam suplantados, uma vez que o futuro esconde e reserva posições de vida que serão reflexo das atitudes tomadas hoje em dia; assim, cuidados com o meio ambiente e o bem-estar populacional são pontos cruciais para o progresso humanitário.

Dentro destas preocupações, a convivência em meio aos problemas relacionados à sanidade sonora no meio urbano provam que um dos grandes contribuintes à má qualidade do conforto e sanidades acústicas (com total destaque na realidade brasileira), são as poluições sonoras geradas pelos tráfegos veiculares provenientes da malha viária, o qual é de grande familiaridade aos cidadãos das cidades grandes, o que fomenta e instrui a necessidade de estudos mais profundos das técnicas para atenuação destes males sonoros: os ruídos viários (CALLAI *et al.*, 2009).

Enfrentamos, no Brasil, a supremacia do modal rodoviário em relação às outras formas de transporte (que em muitos contextos seriam muito viáveis às vistas da lógica, mas que não são estimuladas pelos encarregados dos poderes públicos) é marcante, uma vez que este se encarrega do sustento da logística das mercadorias, que as une com os consumidores, de uma forma que sustenta a economia nacional de transportes de cargas em 63% do total, enquanto o deslocamento de pessoas se dá em 97% dos casos, como afirma Callai *et al.* (2009).

Paralelamente, a motorização dos habitantes tem crescido muito nas últimas décadas, indicando a existência de 765 veículos para cada 1000 cidadãos americanos no ano de 1996 (NATIONMASTER, 2016), o que é um índice que mostra a importância nacional transferida à gerência de tráfegos do país e mostra o encargo decisivo à realidade nos transportes dos países em geral.

Em meio a muitos levantamentos teóricos e práticos acerca dos ruídos viários, que vêm moldando o conhecimento no assunto ao longo da história, os mesmos mostram que o tipo de ruído emitido pelo tráfego, por onde se confere a maior parcela do ruído urbano (BISTAFA, 2006), dentre os 4 existentes, é o causado pela interação dos pneus com as superfícies do pavimento, como afirma Callai *et al.* (2009, p. 2) e,

assim, “[...] o ruído pneu/pavimento é claramente responsável pela maior parcela do ruído total, assim evidenciando-se a necessidade de um estudo mais aprofundado”.

É inspirando-se nestas realidades que encontra-se motivações para escrever tecnicamente sobre o assunto, de maneira a viabilizar a propagação e popularização do conhecimento acerca dos impactos gerados pelas vias habitadas; impactos, estes, que são largamente constituídos pela poluição sonora, que é diretamente relacionada a partir do emprego do tipo do revestimento (que é a superfície em si, que passará a interagir com os pneus na área de contato), sendo este emprego limitado totalmente à escolha determinada nos projetos, que tem sido, sem dúvida, de natureza viciosa no universo da engenharia, uma vez que os revestimentos comumente utilizados atendem quase que unilateralmente às necessidade das solicitações do tráfego, como o estrutural, apenas, sendo as outras como da poluição sonora, custo benefício, vida útil etc., importantíssimas à qualidade do pavimento, tidas como **irrelevantes**, mas que deveriam ser somadas às ambições dos engenheiros de maneira global, o que tornaria os pavimentos multifuncionais em termos de atributos oferecidos aos usuários.

1.1 OBJETIVOS

Os objetos de estudo aqui introduzidos foram as ferramentas que tornaram visível a intenção desta pesquisa: a definição dos ruídos como eles são por existência, ao passo que os mesmos são encarados como os autores do problema mundial da poluição sonora no meio urbano, sendo que estes poluidores serão estudados pela sua produção na interação pneu/pavimento ao ponto de se poder mitigá-los ao máximo.

Objetivou-se, assim, alcançar um nível de entendimento no assunto pela exposição e abordagem dos estudos já feitos por vários autores que seja compatível com o nível de conhecimento almejado ao final deste trabalho e que o mesmo funcione de forma que os resultados práticos abordados por autores como Fehrl (2006) e Callai *et al.* (2009) não sejam derrubados por simples questionamentos corriqueiros acerca do assunto: suas pesquisas terão fundamentação teórica ao ponto de serem sustentadas e definidas claramente, ao mesmo tempo em que se espera encontrar resultados valorais compatíveis com a realidade encontrada no meio urbano e que tornem a mais visível o problema do ruído como ele sempre existiu, mas que não tem sido mensurado ao ponto de ser uma medida determinística na escolha dos materiais empregados em projetos para as vias trafegáveis em com populações em ao seu redor.

1.2 METODOLOGIA

Ao início da pesquisa, apresenta-se o embasamento teórico acústico, definindo som e ruídos e as muitas variáveis embutidas tanto nas medições quanto nas análises acústicas das ondas. Esses conceitos são importantes para entender e dar prosseguimento à abordagem das práticas de medições, que terão como consequência melhores compreensões nos estudos teóricos dos pavimentos e suas relações com os ruídos, sendo que as texturas e a percentagem de vazios (dentre outras definições) são determinantes das características estruturais e consequentemente das propriedades acústicas. Assim, finaliza-se apresentando dados de pesquisas técnicas e formas de atenuação da poluição sonora recorrentes na engenharia, à medida em que os conceitos são abordados sempre de maneira inter-relacionada.

Dessa forma e em resumo, o método aqui utilizado é com base no estudo e revisão de bibliografias específicas que sustentam a teoria explicitada pelos autores, pelas quais apresenta-se de maneira justificada soluções extremamente compatíveis à redução ruidosa em pavimentos (que promoveriam maiores qualidades de saúde, aliadas ao desenvolvimento populacional, além de possíveis influências nos custos de obras viárias em curto e longo prazos), bem como exemplos de aplicações de êxito em nações pioneiras no assunto, tudo isso para servir taticamente como estímulo à mudança da realidade brasileira insatisfatória.

2 DEFINIÇÃO DE SOME RUÍDO

Som é uma sensação de estímulo às ondas sonoras no sistema auditivo; e o estímulo, fisicamente, é a “variação da pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo” (BISTAFA, 2006).

Dessa forma, estudiosos padronizaram o **limiar de audibilidade**, que é a menor variação de pressão num ambiente percebida pelo sistema auditivo, que é da ordem de 2×10^{-5} Pa. Assim, como todo ambiente possui uma pressão atmosférica constante vigente, nossos ouvidos detectam uma onda sonora a partir do momento em que esta variar em 0,00002 Pa, o que é algo muito sensível (BISTAFA, 2006).

Assim, as ondas sonoras são, por sua vez, as vibrações que oscilam em uma frequência e se propagam no meio condutor, as moléculas. A oscilação, portanto, varia de meio para meio e, logo, a natureza do som também; esta é definida como o período (T) (aquele intervalo de tempo necessário para completar um ciclo completo de oscilação (de uma crista à crista seguinte da onda)); na prática, para a onda ser audível, T deve compreender-se de 50 μ s a 50ms. Entretanto, não há som em toda vibração, mas todo som é proveniente de uma (BISTAFA, 2006).

O som nasce das perturbações do meio com os materiais instalados e induzidos de maneira adequada, como a corda de um violão: ela precisa ser presa por suas duas extremidades, para que, ao tocá-la, o material tenha movimentos pendulares, realizando uma oscilação propriamente dita, que estimula as moléculas do entorno, capazes de atingir os receptores (os ouvidos), que interpretam estes sinais como sons (BISTAFA, 2006). Dessa forma, um som recebido é portador de três características que o distinguem de todos os outros, como declara Bistafa (2006), segundo o qual são as seguintes:

- 1) Timbre
- 2) Altura
- 3) Intensidade

A primeira é a **cara** do som, que faz diferenciar os sons de uma britadeira da voz do seu chefe, por exemplo, mesmo que ambos estejam em uma mesma frequência. Aprofundando-se na definição física, essa distinção estaria no comportamento do comprimento das ondas (λ) de cada uma no gráfico senoidal. Um bom exemplo está na figura 2.1, em que se compara fisicamente os timbres de três fontes sonoras: diapasão, guitarra e piano. Ambas têm a mesma amplitude e frequências, mas os desenhos das

ondas plotadas nos eixos revelam diferenças de concepção: os padrões das imagens na figura 2.1 das ondas é que imprimem definições únicas a cada uma (MACHADO, [200--])

Figura 2.1 – Comparação entre som puro e complexo



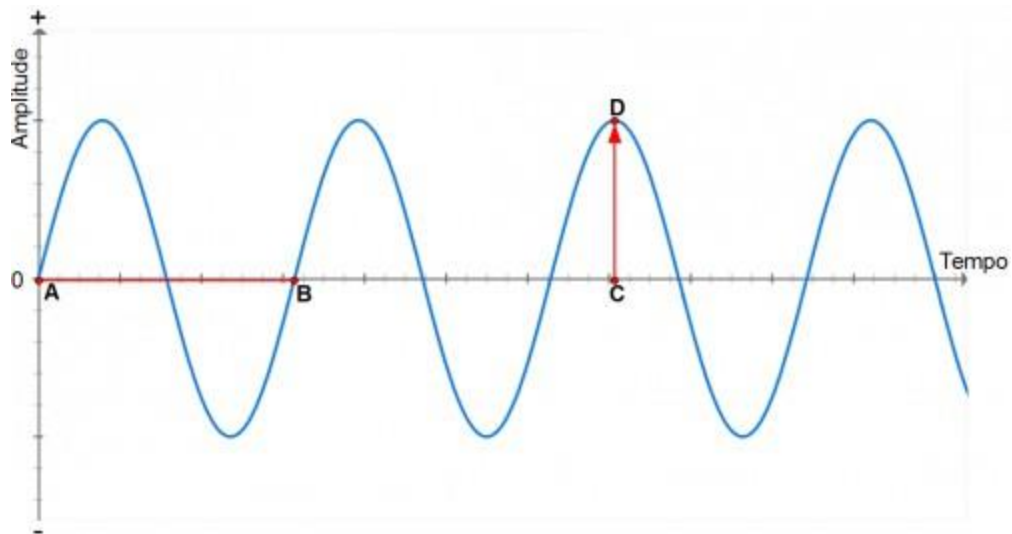
Fonte: MACHADO [200--]

A segunda, a altura, é uma característica já citada aqui, que é definida pela frequência. De um modo geral, sons com maior frequência definem sons mais agudos e os de menor frequência são os mais graves. Isso, fisicamente, está implícito no tempo necessário para que cada oscilação aconteça uma vez; a unidade um Hz, está nos dizendo que o tempo de 1s é necessário para produzir uma onda completa (1λ), que pode ser descrita pela eq. (1) (BISTAFÁ, 2006).

$$f = n/\lambda [\text{Hz}] \quad (1)$$

E, por fim, intensidade é o volume do som. Podemos compará-lo ao volume sonoro dos aparelhos televisivos, que atende à mesma definição: quanto maior as magnitudes, mais fortes e capazes de atingir maiores raios de distâncias, o que, graficamente, é a amplitude (A) do som, que desde a distância de $\sin(t)=0$ até o ponto de máximo seguinte, $\sin(t)=A$ (gráfico 2.1), de acordo com Bistafá (2006).

Gráfico 2.1 – Comportamento da função senoidal pela amplitude versus o tempo



Fonte: DELAI (2012)

Os seres humanos têm uma audição limitada dentro de uma faixa de frequência, que são capazes de perceber sons entre as frequências de 20 a 20.000 Hz. Aqueles abaixo desta faixa são os **infrassons** e os que estão acima são os **ultrassons** (BISTAFA, 2006).

Agora, definido o som em sua natureza física e matemática, o ruído (o centro de estudo nos pavimentos viários deste trabalho) não deixa de ser um som também. A diferença, no entanto, que o destaca, está não apenas na concepção abstrata humana, na qual sons harmônicos são bonitos e agradáveis e ruídos, em contrapartida, são desarmônicos e desorganizados, que chegam ao ponto de serem grosseiros, ferindo a audição, mas está também na sua definição física, como assim será justificado na seção 2.1.

Um fato grandioso é de que se trata de um produto urbano danoso à saúde (WHO, 1999). Sons harmônicos tendem a causar estímulos benéficos à saúde humana, já os desarmônicos são prejudiciais, causam alterações na bioquímica humana, gerando e facilitando muitos problemas na sociedade civil nas mais diversas esferas, como podemos acompanhar através de noticiários e até mesmo presencialmente. O problema já não é contemporâneo, e é por isso que o tempo de estudos e pesquisas passadas foram movimentando empresas e organizações a entrarem em consonância para o estabelecimento de leis que aliem o trabalho na sociedade com desenvolvimento humano consciente, regendo limites no controle de decibéis, como defende a World Health Organization (WHO), quanto aos estabelecidos limítrofes de emissão de ruídos,

medidos em dB (A) (quadro 2.1), e defende da seguinte maneira a influência ruidosa na saúde humana:

A contínua exposição a níveis de ruído superiores a 50 decibéis causam lesões irreparáveis em seus ouvidos. Sem notar, vai estar perdendo a sensibilidade e precisará do som cada vez mais alto. Segundo pesquisas:

- 1- Até 50 dB: Som confortável e nenhum efeito negativo.
- 2- De 50 a 65 dB: normalmente o organismo começa a sofrer impactos do ruído. A pessoa não consegue relaxar, diminui o poder de concentração e prejudica a produtividade no trabalho intelectual.
- 3- De 65 a 70 dB: segundo pesquisas, aumenta o nível de cortisona no sangue, diminuindo a resistência imunológica. Induz a liberação de endorfina e aumenta a concentração de colesterol no sangue.
- 4- Mais de 70 dB: Podemos dizer que mais de 70 dB; causa estresse degenerativo, além de abalar a saúde mental. Aumenta riscos de enfarto, infecções, entre outras doenças sérias. (OLIVEIRA, 2009)

Quadro 2.1 – Limites de emissão de ruído e suas causas

Locais	Nível de ruído Limite - dB(A)
Interferência na comunicação – torna difícil a conversa entre duas pessoas, ou dificulta falar no telefone, ou ouvir rádio ou televisão.	50
Risco de perda auditiva – a pessoa exposta pode contrair perda de audição induzida por ruído para exposições de 8 horas diárias.	75
Perturbação do sono – a pessoa não relaxa totalmente durante o sono, não atingindo os estágios mais profundos do sono e reduzindo o tempo.	30
Estresse leve com excitação do sistema nervoso e produção de desconforto acústico.	55
Perda da concentração e do rendimento em tarefas que exijam capacidade de cálculo.	60
Escolas – no interior das salas de aulas.	30
Hospitais – em quartos e apartamentos.	35

Fonte: adaptado de WHO (1999)

A exposição a ruídos causa efeitos fisiológicos catastróficos, como aumento da pressão intracraniana (que acarreta em dores de cabeça), alteração do metabolismo com o aceleração da respiração, os batimentos cardíacos tornam-se mais rápidos, há produção em excesso de suco gástrico (que pode gerar gastrite e úlcera), os órgãos genitais passam a receber menos sangue etc. (MOÇO, 2008). Embasados em fatos e

dados como estes, bem como por pressões populares, as nações criaram leis para controle adequado do ruído em locais privados, como é o caso do decreto nº 55.197, de 11 de junho de 2014 (SÃO PAULO, 2014), aplicável na cidade de São Paulo, que fiscaliza ambientes quanto à produção de sons em faixas de horários e estabelece punições aos eventuais infratores dos limites.

2.1 TIPOS DE RUÍDOS

Na concepção física sonora do ruído, de acordo com Bistafa (2006), três tipos gerais os classificam segundo parâmetros de intensidade, representado pela grandeza de decibels (dB). São eles:

- 1) **Ruídos contínuos**: pouca variação da intensidade ao longo do tempo;

Gráfico 2.2 – Espectro sonoro dos ruídos contínuos



Fonte: FERNANDES (2005)

- 2) **Ruídos flutuantes**: grande variação da intensidade ao longo do tempo;

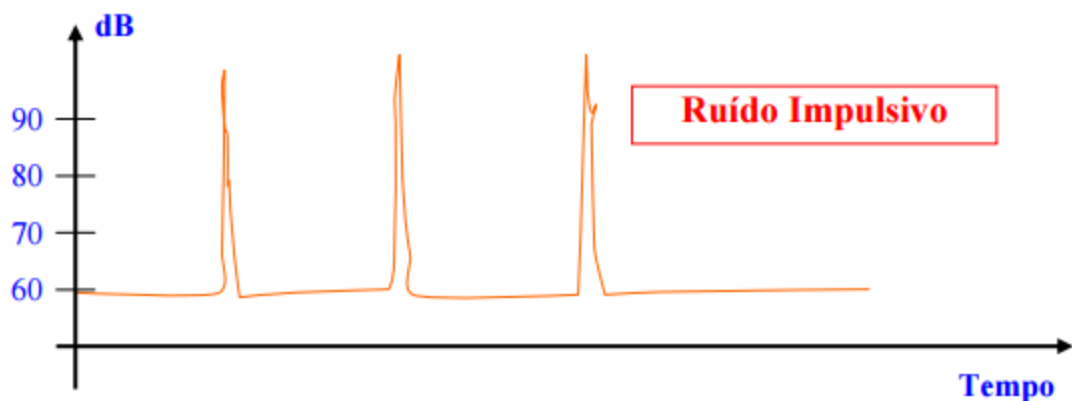
Gráfico 2.3 – Espectro sonoro dos ruídos flutuantes



Fonte: FERNANDES (2005)

- 3) **Ruídos impulsivos ou de impacto:** quando apresenta picos de intensidade em curtos espaços de tempo, como quando ocorre uma explosão.

Gráfico 2.4 – Espectro sonoro dos ruídos impulsivos



Fonte: FERNANDES (2005)

O mais importante no caso desta pesquisa é o ruído flutuante, uma vez que é a característica do barulho resultante do contato pneu-pavimento, já que ocorre de maneira intermitente e com sinuosidades de intensidade; definir-se-á melhor o fenômeno após o desenrolar teórico acústico nas seções seguintes.

2.2 PRESSÃO SONORA

Conceito físico para todo fenômeno de som audível (de amplitude maior ou igual a 2×10^{-5} Pa e com período entre $50 \mu\text{s}$ e 50ms), ou seja, que está compreendido na faixa de frequência de 20 a 20.000Hz (em relação à audição dos seres humanos)

(BISTAFA, 2006). É uma medida diretamente ligada ao impacto sonoro no receptor, semelhantemente à pressão (de mesma dimensão, inclusive) que se conhece nos pneus dos veículos, como exemplo, que é diretamente proporcional ao módulo da unidade Pa (ou N/m²). Esta, assim, é capaz de provocar sensação de dor auricular a partir de valores próximos de 60 Pa (valor bem generalizado, é claro, pois é uma faixa limite bem distinta para cada pessoa), batizado como **limiar da dor** (BISTAFA, 2006). O comportamento da pressão sonora em função do tempo pode ser descrito pela função:

$$p(t)=A \cos(\omega t) \quad (2)$$

onde,

t – tempo [s]

A – amplitude [Pa]

$\omega=2\pi f$ – pulsação/frequência angular [rad/s]

Sabe-se, porém, que as ondas se propagam no espaço, e dessa forma não deve faltar a variável distância. Por isso, temos outra maneira de funcionalizar a pressão:

$$p(x)=A \cos(k x) \quad (3)$$

onde,

x - distância linear [m]

k – número de ondas ($2\pi/\lambda$) no ponto x [m⁻¹]

Agora, combinando as equações (2) e (3), obtemos uma representação espacial da onda ao longo do tempo, em que a pressão não varia a partir dos eixos y e z:

$$p(x,t)=A \cos(\omega t \pm kx + \phi) \quad (4)$$

onde,

ϕ – fase angular da onda (o valor que determina o deslocamento do gráfico da onda, ou o ponto inicial) [rad]

2.3 BELS E DECIBELS

Na categoria de medição sonora, a mais popularizada unidade vem a ser o decibel (dB); e não é à toa, já que é o índice que faz comparação à quantidade de energia medida em relação a outra de referência (no entanto, não se aplica apenas ao campo das energias sonoras, como é de *praxe*). Entretanto, muitos não conhecem a natureza numérica por traz deste conceito, pois se trata de uma relação logarítmica, em que se mede o quociente da relação entre uma potência medida em campo com uma de referência (em acústica, esta costuma ser referenciada à do limiar da audibilidade). O bel, unidade-mãe, é o logaritmo deste; já o decibel, trata-se de um submúltiplo do bel, necessário para subdivisão dos inteiros do bel, tornando possível o trabalho com décimos da unidade, aproximando mais medidas com valores quebrados para representar variações menores de energia (BISTAFA, 2006). Percebe-se, assim, que é um parâmetro sensível de medição. Seu cálculo, segundo Bistafa (2006), para potências sonoras, é:

$$L_w = 10 \log(W/W_0) \text{ [dB]} \quad (5)$$

Como já foi esclarecido, a pressão sonora melhor caracteriza o estímulo físico do som, mas não pode ser embutida nesta relação livremente; precisa-se demonstrar outro método para conversão equivalente na unidade dB. Para isso, efetua-se a equivalência, com álgebra, à potência em termos de pressão sonora, através da eq. (5), representando o nível de pressão sonora (L_p), como descreve Bistafa (2006):

$$L_p = 20 \log(p_{\text{eficaz}}/p_0) \quad (6)$$

onde,

$$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$$

A equação (6) foi brilhantemente demonstrada por Fechner e Weber, ao comprovar, por experimentos, que a variação de sensação de peso suspenso descrita por um indivíduo era proporcional a um referencial, que era o peso constante anterior à variação; o conceito nos dBs é o mesmo, só se fazendo a equivalência de unidades (YOST, 2000).

De maneira análoga podemos descrever o nível de intensidade sonora (L_I) em unidades de decibéis:

$$L_I = 10 \log(I/I_0) \text{ [dB]} \quad (7)$$

3 MEDIÇÃO DO SOM

3.1 O SOM QUE PODE SER MEDIDO NOS PAVIMENTOS

Em pavimentos, a sua interação com os pneus faz notar que a sensação sonora não costuma transparecer determinado padrão ou regularidade; dessa forma, o ruído assim dizendo é distinto de um som puro (que tem frequência constante) ao longo do tempo. O ruído vai sendo definido com o passar do tempo; dessa forma, se o tomarmos numa análise minuciosa de medidas, fracionando-as infinitesimalmente a partir de múltiplas pressões sonoras advindas de diversos sons puros (que são definidos por um período fixo apenas), verifica-se a origem de várias ondas, todas desiguais e, por isso, de estética empobrecida (ainda que de maneira abstrata). A partir desta introdução, é natural o seguinte questionamento para mensuração dos ruídos em campo: qual é o valor absoluto da pressão sonora na emissão de um ruído na interação pneu-pavimento ao medi-lo em um período considerável em uma via qualquer? A resposta numericamente correta seria dizer que são infinitas, pois as próprias pressões variam ao longo de cada instante diminuto de maneira infinitesimal; no entanto, levar isso à frente nas pesquisas causaria impossibilidades nas considerações de valores de campo, para estudos de viabilidade na engenharia, resultando na impossibilidade de prosseguir nas pesquisas. É por isso que são levadas em conta, nesses casos, para mensuração de campo, as eqs. (8), (9) e (10), que levam em conta as infinitas (N) pressões de pico (p_i) do ruído (BISTAFA, 2006):

- Valor médio da pressão sonora:

$$p_{\text{médio}} = \Sigma p_i / N \quad (8)$$

- Valor absoluto médio da pressão sonora:

$$p_{|\text{médio}|} = \Sigma |p_i| / N \quad (9)$$

- Valor eficaz da pressão sonora:

$$p_{\text{eficaz}} = (\Sigma p_i^2 / N)^{1/2} \quad (10)$$

O valor eficaz da pressão sonora é aquele que é mais importante nesta área de estudo, já que é o maior representativo da energia transportada pela onda. Assim, a precisão de p_{eficaz} depende intimamente da quantidade de N; quanto maior este, mais próximos estaremos da realidade impactante nos ouvidos; a grande verdade é que nunca será alcançado ao valor absoluto real. Há, portanto, que se majorar o intuito da pesquisa e, então, definir um nível de erro adequado para aplicação dos dados das pesquisas de maneira a sustentar teoricamente os estudos gerados.

Outra variável resultante da emissão espacial dos sons é a intensidade sonora (I), determinada pela energia descarregada de som em unidade de tempo que atinge perpendicularmente uma área A, que, por sua vez, tem unidade convencional de W/m^2 , relacionando-se ao nível de volume da onda e calcula-se da seguinte maneira, que Bistafa (2006) indica:

$$I_r = (A/r)^2 / (2\rho c) \quad [\text{W/m}^2], \quad (11)$$

onde,

ρc - impedância acústica característica, de valor rayls (unidade equivalente a $\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$, em homenagem ao cientista inglês John W. Strutt, Lord Rayleigh)

r - raio da esfera pulsante [m]

3.2 A TECNOLOGIA NAS MEDIÇÕES ACÚSTICAS

Sabe-se que todo o processo de coleta e avaliação de dados sonoros (neste caso, dos pavimentos em contato com pneus emborrachados, método este que será sucintamente descrito no decorrer deste trabalho), não é arbitrariamente medido, existe toda uma instrumentação específica. Dessa forma, o foco neste tipo de serviço é a coleta da pressão sonora através de sensores acústicos; nesse caso, um microfone que as percebe (sempre com determinada precisão, fornecida pelo fabricante do produto) e as interpreta em sinais elétricos, seguindo processos tais que o torna capaz de graduar as ondas ambientes em indicadores, podendo exportá-los para computadores e fazer todas as análises em função do material constituinte das superfícies de rolamento do pavimento. Tais componentes são os sonômetros, também chamados erradamente de decibelímetros, pela popularização dos mesmos (uma vez que não extraem os decibéis

do campo, mas sim a pressão sonora em intervalos de tempo, fazendo dos decibéis um cálculo a partir dos resultados de outras medições) (PÉREZ, 2009).

Dessa forma, a aparelhagem da sonometria conta com uma vasta opção de modelos, bem como regulamentações internacionais que os situam por grau de precisão, funcionalidades e para qual atividade cada um se destina. Conta-se, para isso, com a *International Electrotechnical Commission* (IEC) e com o *American Standards Institute* (ANSI), organizações, estas, que se encarregam do estabelecimento de padrões de finalidades de aparelhos eletrônicos, dentre os quais os sonômetros, dos quais são nivelados como de alta qualidade, atendem às normas por eles estabelecidas. Assim, o quadro 3.1 mostra uma relação das normas, enquanto o quadro 3.2 mostra outras padronizações dadas pelos ANSI e IEC, ou seja, notas classificatórias que vão de 0 a 2 para ANSI e de 0 a 3 para o IEC, sendo que quanto maior a nota, mais diminuta é a confiança na precisão e maior é a tolerância de erro (PÉREZ, 2009).

Quadro 3.1 – Relação das normas IEC e ANSI para sonômetros

Órgão	Norma(nome original)	Tradução
IEC	651 (1979) - Sound Level Meters	Medidas de Nível de Som
IEC	804 (1985) - Integrating-Averaging Sound Level Meters	Medidas de Nível de Som Integrado-Médio
ANSI	S1.4 (1983) - Specification for Sound Level Meters	Especificação para Medidas de Nível de Som
ANSI	S1.25 (1991) - Specification for Personal Noise Dosimeters	Especificação para Dosímetros Pessoais de Ruído
ANSI	S1.11 (1986) - Specification for Octave Filters	Especificação para Filtros de Oitavas

Fonte: FERNANDES (2005)

Quadro 3.2 – Notas atribuídas aos sonômetros nos padrões IEC e ANSI

	Padrão		Destinação
	ANSI S1.4	IEC 651	
Notas	0	0	Referência para laboratório
	1	1	Uso em laboratório ou campo em condições controladas
	2	2	Uso geral em campo
	-	3	Inspeções rotineiras

Fonte: FERNANDES (2005)

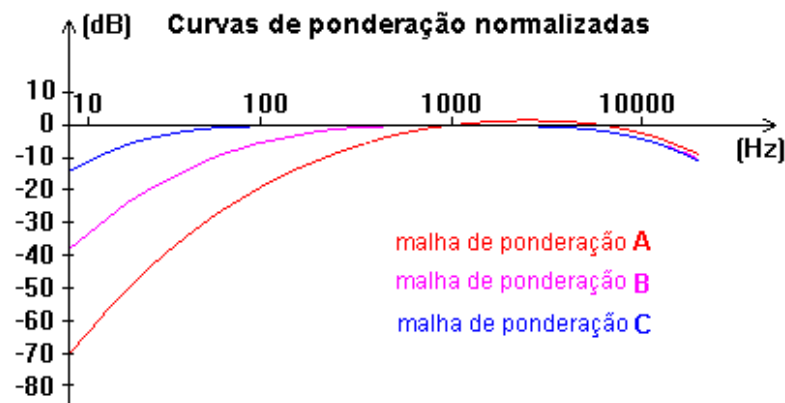
3.3 CURVAS DE PONDERAÇÃO: FILTROS ACÚSTICOS

A verdadeira essência das curvas de ponderação é a tentativa da representação abstrata nos ruídos, que ocorre na percepção humana; dessa forma consegue-se aproximar de maneira mais prática à simulação em ambientes ruidosos. À medida em que se abaixa a frequência, estes sons mais graves vêm a ter uma imagem menos poluidora (menor pressão sonora aparente), ao passo que os agudos agredem

mais o silêncio e preenchem o ambiente de maneira mais marcante (maior pressão sonora aparente). Isso ocorre devido à dificuldade do ouvido humano perceber e sentir menores frequências sonoras.

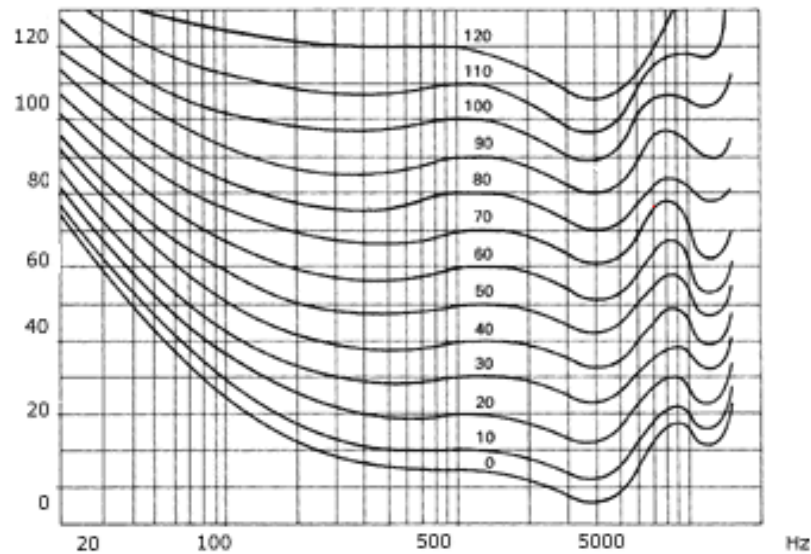
É assim que existem as curvas de referência que, das mais úteis e populares, se sobressaem as **A, B e C**, e por isso também chamadas curvas de compensação, uma vez que efetua subtrações ou somas na intensidade sonora em função da frequência, de acordo com o gráfico 3.1; os valores negativos e positivos dos decibels na ordenada são os devidos à correção para atenuação ou acentuação sonora, respectivamente. As curvas isofônicas do gráfico 3.2 mostram a razão pela qual a subjetividade dos sons estão psicoacusticamente atreladas: elas mostram faixas de frequências na abscissa e intensidades sonoras variáveis na ordenada em curvas que, apesar de possuírem frequências diferentes, têm percepção ruidosa de igual incômodo; portanto, “as curva isofônicas [...] revelam que a grandeza psicoacústica e o nível de audibilidade se correlacionam melhor com a sensação subjetiva de intensidade dos sons do que o nível de pressão sonora” (BISTAFA, 2006, p. 51).

Gráfico 3.1 – Curvas de ponderação sonora A, B e C



Fonte: dBwave.i (2015)

Gráfico 3.2 – Curvas de isofônicas



Fonte: BISTAFA (2006, p. 68)

Essas curvas estão embutidas nos **filtros ponderadores** dos sonômetros, e vêm sempre como especificação técnica do produto. Assim, quando há exibição de resultados de medição sonora, o valor vem indicado como dB (A), dB (B) etc., com a curva do filtro empregada no campo de medição entre parêntesis. No caso de indicação em dB ou dB (linear), subentende-se que não houve filtro na coleta, mostrando a intensidade natural sem correções de maneira pura (BISTAFA, 2006).

No meio profissional, cada uma das curvas tem sua finalidade, por onde se encaixa melhor de acordo com a concepção da poluição gerada; a curva específica costuma vir definida em norma e procedimentos para a medição específica, de onde se selecionou a curva mais párea para o resultado final, pelas quais as empresas devem seguir pelo emprego do sonômetro. As características de cada uma são as seguintes, de acordo com Bistafa (2006):

- Curva A: desenfatura a percepção em baixas frequências (sensação próxima a 40 fones);
- Curva B: sensação próxima a 70 fones;
- Curva C: sensação próxima a 100 fones;
- Curva D: desenfatura a percepção em altas frequências, muito utilizada para medição em ruídos aéreos.

Experimentalmente, a curva mais comum e que mais se adequa à percepção humana de ruído no dia-a-dia é a curva A, e é por isso que nos pavimentos não é diferente: a grande maioria dos materiais consultados que relatam sobre ruidosidade viária plana (desconsiderando a aeroviária, que usa muito a curva D, apesar de alguns órgãos estarem habitualmente aderindo à curva A, como afirma Bistafa (2006) mostram o emprego da curva como filtro de ponderação). E não é à toa, se levarmos em conta que esta curva mede as intensidades de forma paralela à audibilidade humana em ambientes abertos e geralmente triviais, como se confere na malha viária.

A tabela 3.1 compara as quatro curvas pelos ganhos de decibéis por frequência e possibilita a compreensão da distorção que causaria se nos pavimentos se empregasse medições com sonômetros em curvas como a C. É muito comum a utilização de termos como **A-ponderado**, **B-ponderada**, e assim por diante, para designar a ponderação de níveis sonoros pelas respectivas curvas em bibliografias e estudos do ramo.

Tabela 3.1 – Comparação entre as os ganhos e perdas das curvas ponderadas A, B, C e D

Ganho em função da frequência dos filtros ponderadores A, B, C e D				
Frequência central da banda (Hz)	Ganho do filtro A (dB)	Ganho do filtro B (dB)	Ganho do filtro C (dB)	Ganho do filtro D (dB)
10	-70,4	-38,2	-14,3	-
12,5	-63,4	-33,2	-11,2	-
16	-56,7	-28,5	-8,5	-
20	-50,5	-24,2	-6,2	-
25	-44,7	-20,4	-4,4	-
31,5	-39,4	-17,1	-3,0	-
40	-34,6	-14,2	-2,0	-
50	30,2	-11,6	-1,3	-12,8
63	-26,2	-9,3	-0,8	-10,9
80	-22,5	-7,4	-0,5	-9,0
100	-19,1	-5,6	-0,3	-7,2
125	-16,1	-4,2	-0,2	-5,5
160	-13,4	-3,0	-0,1	-4,0
200	-10,9	-2,0	0	-2,6
250	-8,6	-1,3	0	-1,6
315	-6,6	-0,8	0	-0,8
400	-4,8	-0,5	0	-0,4
500	-3,2	-0,3	0	-0,3

Ganho em função da frequência dos filtros ponderadores A, B, C e D

Frequência central da banda (Hz)	Ganho do filtro A (dB)	Ganho do filtro B (dB)	Ganho do filtro C (dB)	Ganho do filtro D (dB)
630	-1,9	-0,1	0	-0,5
800	-0,8	0	0	-0,6
1.000	0	0	0	0
1.250	0,6	0	0	2,0
1.600	1,0	0	-0,1	4,9
2.000	1,2	-0,1	-0,2	7,9
2.500	1,3	-0,2	-0,3	10,6
3.150	1,2	-0,4	-0,5	11,5
4.000	1,0	-0,7	-0,8	11,1
5.000	0,5	-1,2	-1,3	9,6
6.300	-0,1	-1,9	-2,0	7,6
8.000	-1,1	-2,9	-3,0	5,5
10.000	-2,5	-4,3	-4,4	3,4
12, 5	-4,3	-6,1	-6,2	-1,4
16.000	-6,6	-8,4	-8,5	-
20.000	-9,3	-11,1	-11,2	-

Fonte: adaptado de BISTAFA (2006, p. 79)

3.4 EMISSÃO E IMISSÃO SONORA

É importante ressaltar aqui a diferença terminológica dos dois substantivos. Emissão sonora, segundo Zannin (2002), é a “[...] pressão sonora que efetivamente é emitida pela fonte geradora do som”, o que se diferencia da imissão sonora, que é, de acordo com Calixto (2002) e Zannin (2002), a parcela de pressão sonora que efetivamente chega ao sistema auditivo receptor, parcela esta que resistiu a todas as interferência do ambiente; pode-se perceber isto ao ecoar um grito em um campo aberto nu, que se ouve muito melhor do que em uma floresta densa, na qual as folhas das árvores fazem papel de barreira acústica de retenção (que também serão abordadas em mais detalhes na seção 5).

3.5 FATORES EXTERNOS QUE INFLUENCIAM NA SONORIDADE

3.5.1 AMPLIFICAÇÃO PELA REVERBERAÇÃO URBANA

No caso das coletas sonoras em vias, com destaque nas urbanas, as superfícies do entorno têm a capacidade física de barreira refletora e funcionam como segundos emissores de uma fonte, podendo causar aumento ou diminuição da intensidade das ondas de origem, sendo o item determinístico a característica do material constituinte do refletor, de onde vem a especificação do coeficiente de absorção sonora, que deve ser indicado pelo fabricante do material, que é de determinação empírica. As tabelas da Norma Brasileira (NBR) 10151 (ABNT, 2000), avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade, mostram as disposições dos diferentes coeficientes de absorções (que é um índice adimensional, pois representa o fator de redução, calculado pela relação entre a intensidade sonora absorvida e intensidade incidente no ponto do material medido) e o *Noise Reduction Coefficient* (NRC) dos materiais fibrosos e porosos (de comum emprego em isolamentos acústicos, como acontece principalmente em estabelecimentos comerciais) e aqueles facilmente encontrados em recintos e no meio urbano público em geral, que fazem papel de revestimentos de paredes, madeiras, alvenarias, bem como objetos corriqueiros que influenciam demasiadamente na captação dos ruídos pneu-pavimento e são de importantíssimo grau de influência no nosso estudo.

3.5.1.1 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO E NRC

O coeficiente de absorção (α) é uma medida intrínseca ao material, o qual representa o fator de redução de intensidade sonora comparando o valor antes de interagir com o material com a que retorna depois de refletir na superfície, já modificado; α é, portanto, um adimensional, uma vez que é o quociente entre duas medidas de mesma dimensão, também chamado de **Sabine**, pois foi definido por Wallace Clement Sabine (1868-1919), professor de física da Universidade de Harvard, nos Estados Unidos, considerado o pai da acústica moderna arquitetônica (BISTAFA, 2006). Dessa forma, α calcula-se da seguinte maneira:

$$\alpha = I_a / I_i, \quad (12)$$

onde:

I_a – Intensidade sonora absorvida [W/m^2] ou [dB]

I_i – Intensidade sonora incidente [W/m^2] ou [dB]

Em laboratórios de acústica, o α é definido estatisticamente a partir de várias coletas de dados por frequências de bandas de oitavas (tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Exemplos de coeficientes de absorção sonora em materiais

Material				Frequência central da banda de oitava (Hz)							NRC	
				125	250	500	1000	2000	4000			
Fibroso	Isover - Santa Marina Placa de lã de vidro aglomerado	Densidade (kg/m³)	30	Espessura (mm)	25	0,08	0,27	0,50	0,87	0,98	1,04	0,66
					50	0,17	0,62	0,90	1,08	1,07	0,97	0,92
		60			25	0,05	0,27	0,68	0,94	1,03	1,05	0,73
					50	0,13	0,75	0,96	1,03	0,88	0,96	0,91
	Thermax - RockFibras Manta de lã de rocha basáltica	Densidade (kg/m³)	32	Espessura (mm)	50	0,35	0,48	0,74	0,88	0,91	0,96	0,75
					100	0,85	0,98	1,10	1,11	1,09	1,18	1,07
		64			50	0,50	0,59	0,91	1,05	1,06	1,06	0,90
					100	0,87	1,23	1,19	1,15	1,12	1,10	1,17
Poroso	Espumex - Acústica São Luiz Espuma flexível de poliuretano poliéster incombustível			Espessura (mm)	40	0,06	0,19	0,38	0,52	0,48	0,65	0,39
					60	0,10	0,28	0,49	0,53	0,47	0,82	0,44
					70	0,15	0,42	0,75	0,74	0,66	0,95	0,64
					75	0,15	0,50	0,90	0,99	1,00	1,00	0,85
	Sonex - Illbruck Espuma flexível de poliuretano poliéster (com retardadores de chama) Densidade: 32 kg/m³			Espessura (mm)	20	0,04	0,12	0,28	0,44	0,60	0,73	0,36
					35	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89	0,58
					50	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01	0,72
					75	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00	0,89

Fonte: adaptado de BISTAFA (2006, p. 235)

O NRC, eq. (13), por sua vez, é o coeficiente de redução sonora e, segundo Bistafa (2006), é derivado do coeficiente de absorção, mas que simplifica em apenas um valor o que cada descreve cada α para as frequências, sendo que é uma média aritmética envolvendo as bandas de oitava e os coeficientes de absorção; dessa forma:

$$\text{NRC} = 1/4[\alpha(250\text{Hz}) + \alpha(500\text{Hz}) + \alpha(1000\text{Hz}) + \alpha(2000\text{Hz})] \quad (13)$$

4 LIMITAÇÕES ORGANIZACIONAIS

4.1 PMSP – LEI DE ZONEAMENTO (HABITAÇÕES)

Em habitações, a Lei de Zoneamento publica o seguinte sobre as zonas por eles especificadas em relação à emissão de ruídos:

- a) nas ZER, ZCLz - I e ZCLz - II, os níveis de ruído emitidos, durante o período diurno, não prejudiquem a comunicação falada, não perturbem as atividades domésticas normais e, durante o período noturno, não provoquem o despertar ou dificultem o adormecer, de acordo com os parâmetros estabelecidos nos Quadros 02/a e 02/b anexos;
- b) na ZM, os níveis de ruído emitidos, durante o período diurno, não perturbem as atividades domésticas normais e, durante o período noturno, não provoquem o despertar ou dificultem o adormecer, de acordo com os parâmetros estabelecidos nos Quadros 02/d e 02/g anexos, para cada tipo de via;
- c) na ZPI e nas ZCP e ZCL, os níveis de desconforto acústico sejam toleráveis em ambos os períodos, diurno e noturno, de acordo com os parâmetros estabelecidos nos Quadros 02/c e 02/h anexos. (SÃO PAULO, 2004)

Sendo que a metodologia básica empregada para a avaliação do ruído emitido é fornecida pela NBR 10151, de junho de 2000 (ABNT, 2000).

4.2 NBR 10151(2000)

Esta norma preconiza os parâmetros para análise da medição e fixação dos limites dos ruídos em comunidades em função de duração, do espectro sonoro (no caso de correções por perturbações externas) e do pico horário.

Os níveis de ruído, sob esta NBR, são medidos em escala de compensação A (dB(A)), em medidor especificado pela IEC 651 – Sonômetros, com resposta rápida de leitura, bem como outros eventuais aparelhos que se provem capazes de colaborar na qualidade de medição que se encaixem nestes quesitos.

A norma alerta para que fatores externos de sons indesejáveis não alterem os resultados finais, como ventos e outras fontes não relacionadas ao objeto poluidor em foco; da mesma forma, a distância da fonte deve ser razoável, uma vez que distância e temperatura são variáveis determinísticas no resultado final; deve-se, assim, evitar casos extremos de variação; em proteção a estes acasos, é preferível que se registre as

diferentes temperaturas nas quais as medições foram feitas, de modo a registrar as discrepâncias.

Correções são previstas pela norma. Para isso, chama de L_A ruído estacionário (aqueles contínuos, que não transitam significativamente de energia ao longo do tempo). Já na presença de sons impulsivos, como no caso de ruídos repentinos que soam mais fortemente, que dependem do fator de pico, característica espectral, duração e flutuação, leva-se em conta o L_C , que é o L_A acrescido de correções pela norma determinada em tabelas que indicam decibéis corretivos se aplicáveis de acordo com local, período, queixas locais, características sonoras etc.

No relatório final da medição normatizada deverá constar:

- a) nível sonoro medido L_A em dB(A);
- b) duração do ruído ou, para níveis variáveis, sua distribuição estatística;
- c) condições de operação da fonte de ruído e características climáticas;
- d) hora de ocorrência do ruído e das medições;
- e) correções aplicadas a L_A ;
- f) nível sonoro corrigido L_C ;
- g) nível de ruído de fundo medido;
- h) valor do critério de ruído com as correções para período e zona (quando aplicável).

4.3 NORMA REGULAMENTADORA 15

Os anexos I (Limites de Tolerância para Ruído Contínuo ou Intermitente) e II da norma (Limites de Tolerância para Ruído de Impacto) regem as condições de níveis ruidosos exigíveis para condições salubres em ambientes de trabalhos e os métodos para medição, nas quais os ambientes laborais devem ater-se para estarem corretamente regimentados (BRASIL, 2009).

4.3.1 NR 15 – ANEXO I – LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA RUÍDO CONTÍNUO OU INTERMITENTE

É especificado que, para fins de normatização, os ruídos contínuos ou intermitentes não estão dentro do conjunto dos ruídos impactantes e que devem ser

medidos próximos ao ouvido do trabalhador em decibéis com sonômetro de resposta lenta e em curva de ponderação A (dB(A)) e não devem exceder aos valores da tabela 4.1, em função do tempo de exposição.

Tabela 4.1 – Limites de Tolerância para ruídos contínuos ou intermitentes

LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA RUÍDO CONTÍNUO OU INTERMITENTE	
NÍVEL DE RUÍDO	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA
DB (A)	PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Fonte: adaptado de BRASIL (2009)

A Norma considera inaceitável a exposição a nível acima de 115dB (A). Em casos de diferentes exposições a diferentes períodos, calcula-se uma medição pela seguinte relação:

$$C1/T1 + C2/T2 + \dots + Cn/Tn \quad (14)$$

onde,

C – tempo pelo qual o trabalhador ficou exposto ao ruído;

T – ruído máximo tolerável relacionado ao tempo exposto.

A soma da eq. (14) não deve exceder a unidade tolerável.

4.3.2 NR 15 – ANEXO II – LIMITES TOLERÁVEIS PARA RUÍDO DE IMPACTO

Para efeito de norma, ruídos de impacto são aqueles que têm picos de energia em torno de 1 segundo. Os mesmos deverão ser medidos com sonômetro de circuito linear e resposta para impacto ou, na falta deste tipo, substitui-se por um de resposta rápido em curva de ponderação C (dB(C)), sendo os limites toleráveis de exposição de 130dB (linear) e 120dB(C) (BRASIL, 2009).

4.3.3 ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA)

A *Environmetal Protection Agency* (EPA), dos Estados Unidos, é uma agência federal que se destina à proteção da saúde humana e do meio ambiente; para isso, conta com uma série de laboratórios e centros de pesquisas que estão sempre produzindo dados, estudos e conhecimento de um modo a viabilizar mecanismos de desenvolvimento do bem mundano. Dessa forma, a agência conta com diversos centros das mais diversas áreas de estudo: toxicologia, clima, qualidade do ar, riscos à saúde humana, radioatividade etc. e conta com uma gama de programas que estudam problemas ambiente-sociedade e estão sempre estabelecendo limites e elaborando soluções, atendendo a sociedade por todos os Estados Unidos da América através de regiões distribuídas por áreas que atendem estados.

Dentre estes estudos, a EPA alia-se aos governos para o controle de emissão de ruídos, por onde destaca-se o programa de controle de ruídos, de 6 de novembro de 1972, bem como estudos das naturezas danosas dos ruídos à saúde humana.

A definição de ruído pela EPA é a de um som indesejável ou perturbador, oriundos de fontes que interferem nas atividades normais como sono, conversa ou interrompe ou ameniza a qualidade de vida (EPA, 1974).

Um dos desenvolvimentos da EPA foi o **nível dia e noite** (L_{dn}), que é uma grandeza que avalia os ruídos provenientes de todas as fontes em comunidades. O processo consiste na análise dos ruídos em um período de 24 horas, sendo os produzidos

no período noturno considerados com um acréscimo de 10dB (na intenção de tomá-los como mais perturbadores), enquanto que maior parte da população tem a noite como hora de repouso. Para isso, em um ponto de interesse, registra-se as várias medições por hora do dia. As medidas em cada hora são, assim, a média de todas na mesma hora, com as da hora noturna acrescidas em 10dB. Pode-se, assim, obter a grandeza L_{dn} pela equação 15, onde L_d e L_n são as médias equivalentes nos períodos diurno e noturno, respectivamente (BISTAFA, 2006).

$$L_{dn}=10.\log\{(1/24).[15 \times 10^{L_d/10} + 9 \times 10^{(L_n + 10)/10}]\} \quad (15)$$

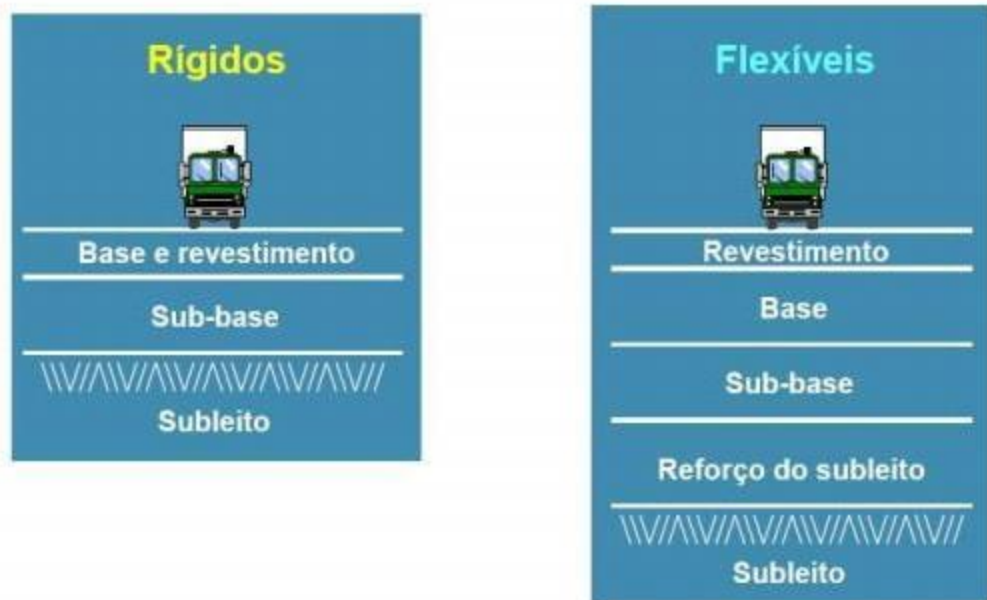
A EPA, assim, adota o L_{dn} como padrão para avaliação sonora em ambientes urbanos, sendo fixado um valor máximo de 45dB (A) de ruído que adentra as habitações, sendo a diferença média máxima admitida entre as emissões percebidas internamente e externamente às habitações de 15dB (A). O nível máximo médio permitido é fixado como 55dB (A) nas partes externas urbanas (o que compreende as vias pavimentadas), uma vez que considera os 15dB (A) de diferença mais 5dB (A) como medida de segurança, sendo esta a medida de comum emprego na legislação americana para poluição sonora, a qual é muito influenciada pela EPA (EPA, 1974)

5 PAVIMENTOS

5.1 DEFINIÇÃO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS

Pavimento, de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), define-se da seguinte maneira: “Pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito”. A figura 5.1 representa esquematicamente a estruturalização típica dos pavimentos rígidos e flexíveis

Figura 5.1 – As camadas dos pavimentos rígidos e flexíveis



Fonte: ANDRADE (2007)

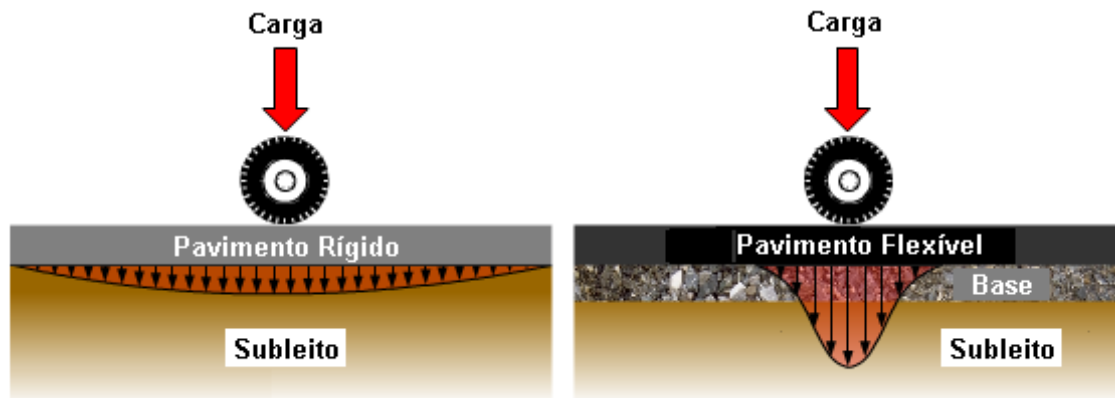
A divisão categórica para os pavimentos empregados nos tráfegos viários é a de rígido, semirrígido e flexível:

- **Rígido:** pavimento com revestimento mais rígido em relação às outras camadas constituintes da estrutura, que são de concreto, fazendo com que as tensões sejam absorvidas em primeira instância, refletindo menos para o subleito (levando em conta que também são pavimento dispostos em placas e estão distribuem as tensões em sua área) (DNIT, 2006);

- Flexível: pavimento constituído por camadas que sofrem deformações elásticas significativa, onde a reação às tensões provenientes do tráfego acontece de maneira equivalente em todas elas, como em pavimentos com revestimento asfáltico e base granular (DNIT, 2006);
- Semirrígido: pavimento teoricamente com as características estruturais de flexível e rígido simultaneamente, que são os casos em que a base é cimentada quimicamente, como em revestimentos asfálticos com base granular aglutinado por cimento (solo cimento/solo tratado com cimento); podem ocorrer pavimentos com a sub-base cimentada: nesses casos, o pavimento nomeia-se semirrígido invertido (DNIT, 2006). Segundo Moura (2011), “alguns autores não fazem uso do termo semi-rígido para classificar pavimentos com presença de base cimentada, apresentam unicamente duas classes: rígidos e flexíveis”.

O comportamento das carga oriundas do tráfego atuantes em cada tipo de pavimento são esquematizadas na figura 5.2.

Figura 5.2 – Comparação do comportamento da distribuição das cargas aplicadas em pavimentos rígidos e flexíveis



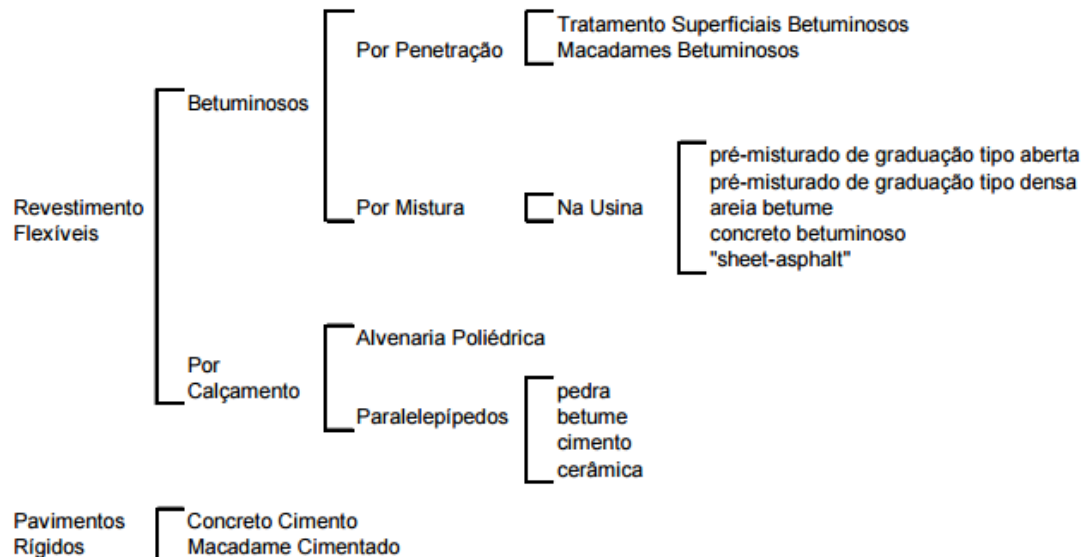
Fonte: ANDRADE (2007)

5.2 TIPOS DE REVESTIMENTOS

Neste título de estudo, o fator preponderantemente determinístico nos resultados práticos é a natureza do revestimento do pavimento em estudo. É por isso que tomaremos a incumbência de apresentar os tipos mais típicos e que tomarão parte nas análises de ruído.

O revestimento é a camada tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente as solicitações oriundas do tráfego dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste (DNIT, 2006) e podem ser agrupados conforme a figura 5.3

Figura 5.3 – Tipos de revestimentos separados por categorias



Fonte: DNIT (2006)

5.2.1 CARACTERÍSTICAS DAS SUPERFÍCIES DOS PAVIMENTOS

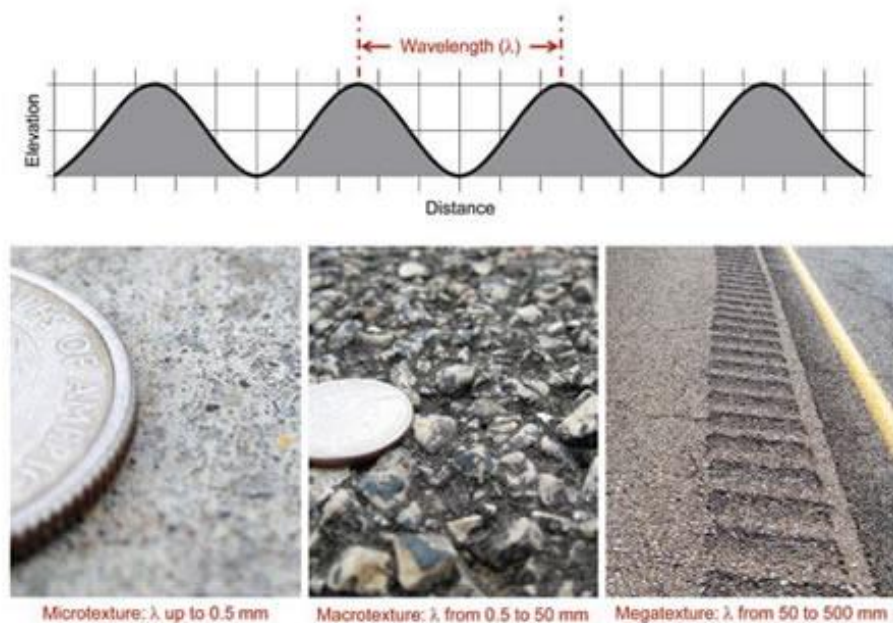
Os revestimentos de pavimentos, sejam asfálticos ou de concreto, possuem características de textura uma vez definidas pela constituição granulométrica que as compõe. A atual denominada *World Road Association*, realizou um congresso em 1987, na época chamada *Permanent Internet Association of Road Congress (PIARC)*, em Bruxelas, no qual foram definidas três classes de texturas, sendo elas as microtexturas, macrotexturas e megatexturas. Para tornar lógica tal tarefa, limitaram a classificação por faixas de irregularidade horizontal e vertical, medidas em comprimentos de ondas, sendo um limite de a partir 0,5 m na horizontal e a partir de 1 mm na vertical para que a desigualdade seja definida como irregular, de acordo com a tabela 5.1 e a figura 5.4, pela qual as medidas limítrofes de irregularidades nos pavimentos indicam a ordem de análise da textura: -micro, -macro ou -mega (ASTM, 1997).

Tabela 5.1 – Faixas de comprimentos de onda em superfícies de pavimentos

Domínio	Intervalo de dimensões	
	Horizontal	Vertical
Microtextura	0 - 0,5mm	0 - 0,2mm
Macrotextura	0,5mm - 50mm	0,2mm - 10mm
Megatextura	50mm - 500mm	1mm - 50mm
Irregularidade	0,5m - 50m	1mm - 200mm

Fonte: adaptado de ASTM (1997)


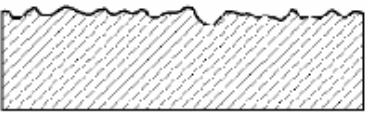
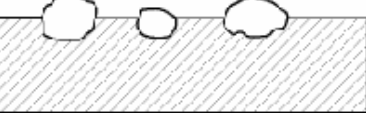
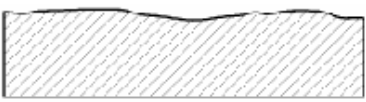
Figura 5.4 – Níveis de análise em superfícies de pavimentos



Fonte: RASMUSSEN (2013)

Na análise completa dos revestimentos de pavimentos, assim, temos duas determinações feitas em primeira instância: o que se vê de perto (microtextura) e o que se vê de longe (macrotextura e irregularidade). Na microanálise, a superfície pode ser classificada como rugosa ou polida/lisa, que determinam a sua aspereza; já na macroanálise, segrega-se por aberta/grosseira e fechada/fina, que são os indicadores da graduação dos agregados empregada na dosagem da mistura (STRUFALDI, 2010), como é assim indicado na figura 5.5.

Figura 5.5 – Tipos de texturas relacionadas às micro e macrotexturas

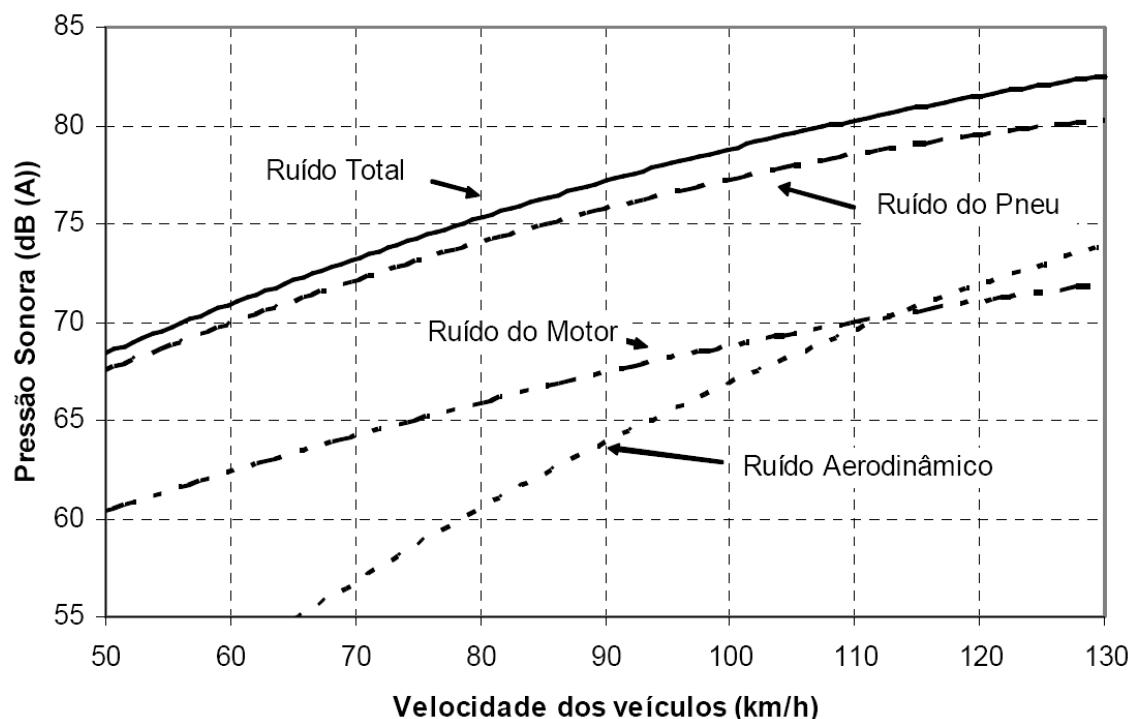
Microtextura	Macrotextura	Superfície	Tipo de Textura
Rugosa	Aberta		Rugosa e Aberta
	Fechada		Rugosa e Fechada
Polda ou Lisa	Aberta		Polda e Aberta
	Fechada		Polda e Fechada

Fonte: APS (2006)

5.3 SONORIDADE VIÁRIA

Analisando os ruídos ligados ao transporte viário, os sistemas emissores podem ser classificados em três tipos com diferentes origens: ruído causado pelo sistema de motor, escapamento e sistema de transmissão (que são oriundos propriamente do mecanismo veicular de fábrica), contato pneu/pavimento e efeito aerodinâmico. Estes, separados, somam-se em uma única parcela, resultando no ruído total que o receptor sente como ruído viário. Mas, se analisarmos estudos feitos nessas fontes que levam em conta a pressão sonora de cada um, é notável a maioria do ruído pneu/pavimento em relação aos outros dois. O gráfico 5.1 mostra, dessa forma, a pressão sonora produzida por cada fonte ruidosa em função das velocidades de tráfego, e revela a superioridade de contribuição da pressão do pneu no ruído total (se tomarmos a velocidade de 100km/h, o pneu/pavimento conta com 78% do total) (CALLAI, 2011).

Gráfico 5.1 – As diferentes parcelas de ruído oriundas do tráfego por velocidade



Fonte: CALLAI (2011, p. 17)

Os ruídos aerodinâmicos são, por sua vez, resultantes do contato da carroceria com as partículas do ar. É lógico, assim, que o efeito ruidoso é proporcional à velocidade, e que está intimamente atrelado às características geométricas e de constituição dos materiais da parte externa dos veículos, assim como ocorre da mesma forma nas constituições internas para o ruído do motor (STRUTIFALDI, 2010); são ruídos, estes, que não são, entretanto, determinados unilateralmente: deve-se, para completa compreensão dos mesmos, considerar as múltiplas variáveis que tomam presença na constituição final do ruído de cada parcela. É em respeito a essas minúcias que focar-se-á nos estudos do ruído pela interação pneu/pavimento, que tem múltiplas nuances pela variação dos revestimentos e etc.

5.3.1 MECANISMOS DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DO RUÍDO

A complexidade no ruído pneu/pavimento encontra-se nos multifacetados fatores que são íntimos em sua geração, descritas, segundo Callai *et al.* (2009), como as vibrações mecânicas do pneumático (impacto, choque e adesão) e a mecanismos aerodinâmicos. As grandes diferenças de ruídos que se acompanham nas vias advêm do tipo da via (temperatura, textura superficial e propriedades dos agregados), do pneu e do

veículo (maneira de conduzir, velocidade e tipo) (CALLAI *et al.*, 2009). Segundo Strutifaldi (2010), existem mecanismos geradores e conversores de energia; os primeiros compreendem a vibração, bombeamento de ar, derrapagem e adesão, ao passo que os segundos são os processos pelos quais as energias provenientes da geração convertem-se em som audível, que são através quatro maneiras: efeito corneta, ressonância Helmholtz, vibração da carcaça e ressonância interna.

5.3.1.1 MECANISMOS GERADORES DE ENERGIA

5.3.1.1.1 VIBRAÇÃO

A vibração do pneu de borracha no tráfego ocorre quando as ranhuras deste tocam a superfície do pavimento (ou, melhor dizendo, a superfície irregular do pavimento adentra nas superfícies sulcadas do pneu (nas chamadas bandas de rodagem), tocando-a, desenvolvendo um impacto oblíquo, que faz o pavimento reagir com força contrária à carcaça do pneu, provocando vibrações irregulares em todo o pneu, que são convertidas em ruído. Nesta dinâmica, um fator explicitamente determinístico na intensidade sonora gerada é a resiliência, tanto do pavimento como do pneu, que ocorre de maneira inversamente proporcional: quanto maior a resiliência, menor a intensidade sonora gerada (STRUTIFALDI, 2010). Pode-se, assim, reduzir a intensidade trabalhando diretamente com a resiliência dos materiais e, ainda, com a modelagem do pneu e a textura do pavimento (pneus mais regularizados em superfície e texturas mais contínuas (de granulometria mais fechada), que, somados, têm grande potencial de redução de energia por vibração.

5.3.1.1.2 BOMBEAMENTO DE AR

Na dinâmica do movimento circular dos pneus durante o tráfego, os sulcos e protuberâncias existentes nos pneus são constantemente comprimidos e distorcidos, gerando um ciclo de expulsão e sucção de ar: quando o sulco realiza movimento de entrada no pavimento, o ar ali dentro adentra e é comprimido e, logo na sequência, quando o mesmo sulco gira ao ponto de perder contato com a superfície, o mesmo ar comprimido ganha mais espaço e é bombeado para fora; este ciclo, ocorrendo de maneira rápida e frequente, gera energia que converte-se em ruído aerodinâmico. O som assemelha-se ao de bater as palmas e se, durante a deformação, a força de atrito na

interface pneu/pavimento for vencida pela força horizontal do contato, ocorre uma derrapagem até o momento em que o atrito vença novamente o contato e a adesão retorne o equilíbrio dinâmico (STRUTIFALDI, 2010).

5.3.1.1.3 DERRAPAGEM

Os sulcos, no movimento, causam tração nos momentos de acelerações positivas e negativas (frenagem); neste processo, o pavimento, que possui um coeficiente de atrito, sendo a superfície em contato, reage em força de mesmo módulo, em sentido contrário e em outro corpo (o pneu), chamada de força de atrito (F_{at}), obedecendo à 3ª Lei de Newton (ação e reação); dessa forma, há equilíbrio dinâmico até o instante em que $T = F_{at}$; mas, a partir do momento em que a intensidade da tração sobrepuja a força de atrito ($T > F_{at}$), ocorre a chamada derrapagem, que é de intensidade proporcional à diferença entre tensão (T) e força de atrito, que gera ruído pelo contato do pneu no pavimento sem que haja movimento circular (o pneu permanece parado), que é um escorregamento em movimentos tangenciais, que só cessará quando o equilíbrio dinâmico retornar ($T = F_{at}$ ou $T < F_{at}$) e haverá adesão (STRUTIFALDI, 2010).

5.3.1.1.4 ADESÃO

Durante o movimento, o ar é constantemente sugado ao adentrar a área de contato e liberado ao sair dela dentro dos sulcos do pneu; nesta saída, há uma força adesiva, que é um fenômeno causado pela saída do ar enclausurado em contato com o ar externo, que faz gerar energia que se converte em ruído (STRUTIFALDI, 2010).

5.3.1.2 MECANISMOS CONVERSORES DE ENERGIA EM RUÍDO

5.3.1.2.1 RESSONÂNCIA HELMHOLTZ

É um tipo de ressonância (de aumento de amplitude sonora), que causa reverberação ao longo do material em que a energia é refletida, variando e amplificando o som, como quando assopramos pelo gargalo de uma garrafa plástica: o som a adentra e é amplificado no seu interior, tornando-se mais notável; de processo igual é a produção de sons melódicos em ocarinas (objeto de cerâmica ocos por dentro e que são

assoprados por furos na superfície, produzindo sons afinados e amplificados pela energia do sopro). No tráfego, isso ocorre quando os sulcos se deformam plasticamente (que são comprimidos e retornam à forma original inicial) na área de contato pneu/pavimento; o ar ali presente ressoa-se pela cavidade acusticamente estimulada pelo movimento de expulsão do ar pelo retorno ao estado original do pneu (PÉREZ, 2009).

5.3.1.2.2 *VIBRAÇÃO DE CARÇAÇA*

A vibração descrita anteriormente no pneu reage a partir das bandas e se propaga ao longo de toda a carcaça por reação, causando movimentos vibratórios nas próprias bandas de rodagem e nas laterais do pneu, como descreve a figura 5.6, que se caracterizam por oscilações irregulares que definem o ruído produzido (STRUTIFALDI, 2011).



Fonte: STRUTIFALDI (2010)

5.3.1.2.3 *RESSONÂNCIA INTERNA*

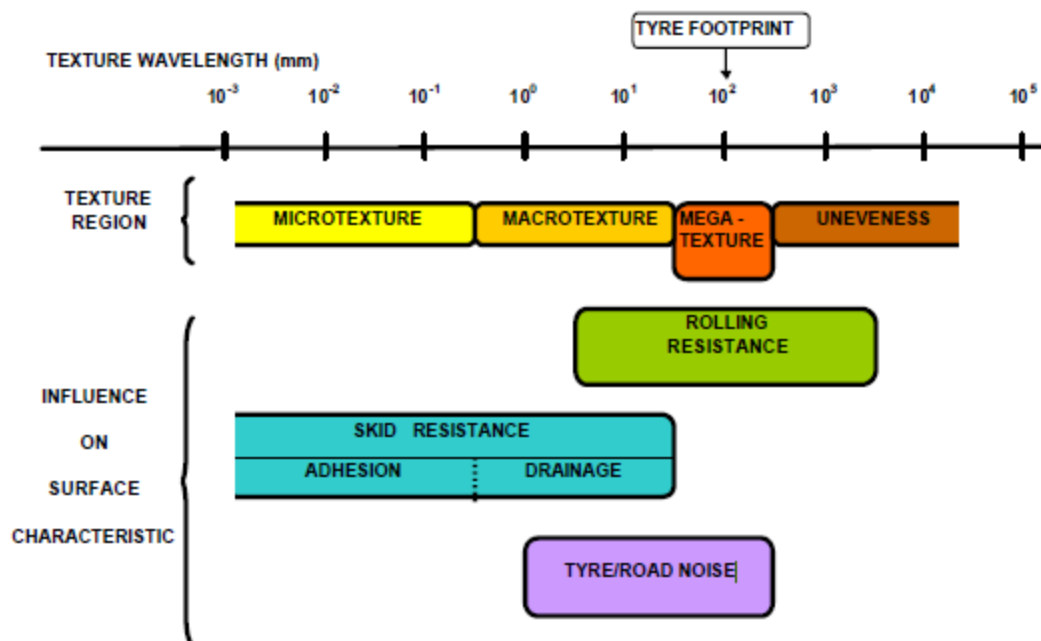
O pneu consiste no enclausuramento de ar pressurizado dentro de uma câmara; o movimento de vai e vem do tráfego é capaz de deformar o volume interno do pneu, provocando uma ressonância trabalhada por oscilações oriundas do movimento circular na área de contato com o pavimento, convertendo a energia do ar em som audível pela acústica ressoada (STRUTIFALDI, 2010).

5.3.2 **RELAÇÕES ENTRE TEXTURA E RUÍDO**

A análise da textura dos revestimentos, como já dito anteriormente, é de essencial importância para se medir e classificar a ordem do potencial ruído gerado na fonte. Mas existe, ainda, uma variável que se soma à importância no desenvolvimento da análise acústica nos revestimentos (tanto em asfálticos como em de cimento

Portland): o volume de vazios presente entre os agregados (CALLAI, 2011). O ganho negativo de energia sonora produzida pode ser muito bem trabalhada, dosagem maiores quantidades de vazios e, ao mesmo tempo, trabalhando com granulometrias mais fechadas, o que está, entre outras coisas, ligado aos volumes de vazios e a relação betume/vazios, como será visto em seções seguinte, nos resultados de estudos de ensaios. De maneira análoga, a figura 5.7 relaciona as definições de textura com os desempenhos ruidosos dos revestimentos.

Figura 5.7 – Desempenhos dos revestimentos em funções dos comprimentos de onda de suas superfícies



Fonte: FEHRL (2006)

Da figura 5.7, extrai-se as influências da textura na caracterização das superfícies de revestimentos: na análise da área de contato (na megatextura), da ordem de 0,1mm de comprimento de onda, ocorre a resistência ao rolamento, que se estende desde a macrotextura até a considerada irregularidade, segundo os desníveis em mm, sendo que, como já descrito, as microtexturas garantem a força de contato de adesão (adesividade) pela sua forma(lisa/rugosa) e as macrotexturas se responsabilizam pela drenabilidade do revestimento (abertura dos agregados), que são de suma importância para a segurança (CALLAI, 2011).

Dessa forma, a textura e a porosidade são fatores que estão diretamente ligados à geração dos ruídos nos pavimentos, bem como a presença de água na

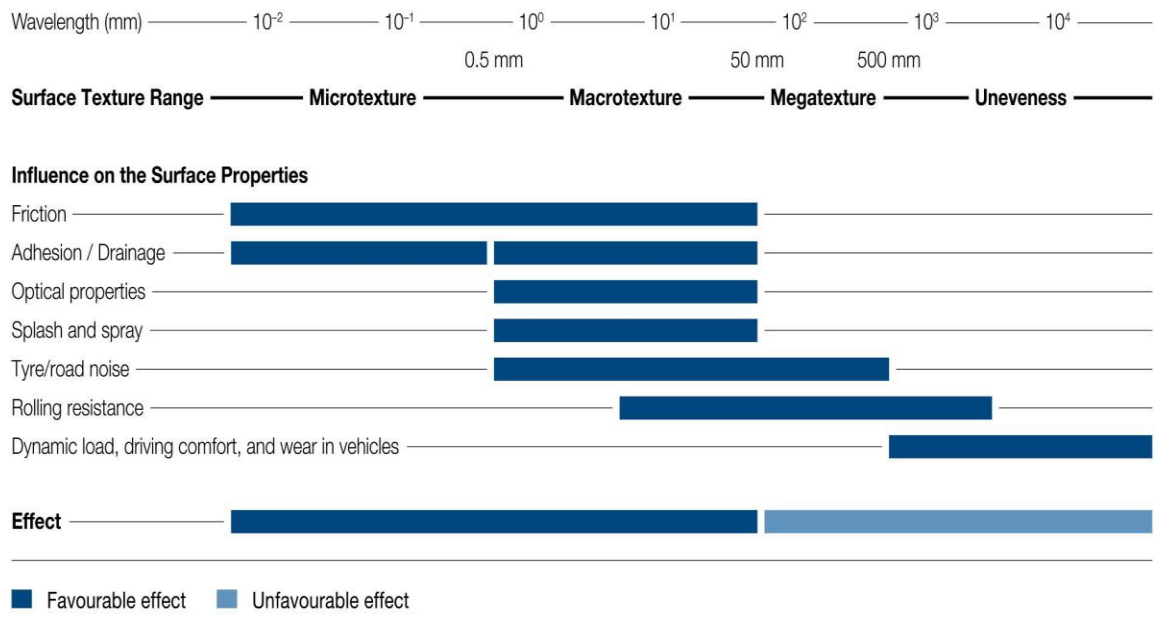
superfície, que é capaz de incrementar em até 15dB (A) no ruído total, que preenche as irregularidades das misturas abertas, tornando as vibrações e o bombeamento de ar (mecanismos de geração de energia na interação pneu/pavimento) mais intensas (FREITAS, 2008).

Duas medidas são de grande consideração na determinação da textura pela combinação de granulometria com porosidade: Profundidade Média de Textura (PMT) e Profundidade Média do Perfil. Segundo Freitas (2008, p. 17): “a PMT avalia-se através da realização do ensaio mancha de areia, sendo por isso uma medida pontual, enquanto que a PMP é medida a velocidade elevada ao longo de uma dada extensão do pavimento através de um perfilômetro a laser”, medidas, estas, que contribuem em um estudo mais aprofundado da acústica nos revestimentos, mas que sozinhos não são suficientes para total compreensão dos fenômenos.

A porosidade, analisada solitariamente, é um fator que é diretamente proporcional à redução do efeito corneta nos pavimentos (responsáveis pelo incremento de 10 a 20dB), que confere maior absorção sonora, que se traduz pela maneira como o ruído é gerado: é menor o impacto entre a área de superfície do pavimento e a área de contato do pneu que não toca a mesma, ao passo que há maior reflexão acústica e maior absorção sonora no volume de vazios que, para efeitos eficazes, deve ser superior a 20% (FERHL, 2006, *apud* FREITAS, 2008).

A figura 5.8 é uma boa ilustratividade de alguns dos tópicos abordados nesta seção, indicando o ganho de perda sonora favorável às macro e megatexturas, mostrando as relações das medidas das texturas com os desempenhos funcionais dos pavimentos.

Figura 5.8 – Efeitos da textura nas propriedades dos revestimentos de pavimentos



Fonte: MILJKOVIC'; RADENBERG; GOTTAUT, 2014

5.3.3 ANÁLISE DOS RUÍDOS EM DIFERENTES REVESTIMENTOS

5.3.3.1 *Stone Matrix/Mastic Asphalt (SMA)*

O *Stone Matrix/Mastic Asphalt (SMA)* é uma mistura asfáltica de elevado grau de interação grão/grão, de modo que estes são de elevada quantidade de tamanhos graúdos maiores que 4,75mm, da ordem 70 a 80% em faixa com diâmetro nominal 8mm. Este tipo de granulometria (que se ilustra graficamente como uma curva granulométrica descontínua) imprime ao pavimento elevada resistência à ação do tráfego e, simultaneamente, traz um grande volume de vazios; estes, por sua vez, são preenchidos por uma mistura de fração areia, *filler*, ligante asfáltico (podendo ser modificados por polímeros) e fibras. O ruído no SMA é reduzido em relação ao Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) devido à granulometria, que emprega maiores quantidades de grãos graúdos. No entanto, o ruído deste tipo de mistura empregada em pavimentos flexíveis não é reduzido se comparado a outras com maiores percentagens de vazios, sendo a de menor desempenho acústico, uma vez que sua macrotectura, definida pelas suas baixas percentagens de vazios e diâmetros elevados de grãos, não acompanha mecanismos de isolamentos acústicos de alta performance (STRUTIFALDI, 2010).

5.3.3.1.1 *SMA COM TEXTURA OTIMIZADA*

O *Stone Matrix/Mastic Asphalt* com Textura Otimizada (SMA-TO), também chamado de *Stone Matrix/Mastic Asphalt Noise Reduction* (SMA-NR), foi um experimento oriundo da Alemanha, que estudou uma maneira de otimizar as condições para mitigação do ruído e aderência, que a fez conferindo à constituição do SMA maior volume de vazios e granulometria descontínua e mais aberta, melhorando a sua macrotextura. Um trecho experimental de 4km construído na Alemanha após os estudos obtiveram os resultados desejados, cujo ruído foi medido pelos métodos *Statistical Pass-By* e *Close Proximity* (STRUTIFALDI, 2010).

5.3.3.2 *CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)*

Este é um tipo de revestimento de mistura asfáltica que foi inicialmente concebido para atender a boas condições de drenabilidade; o seu elevado volume de vazios (da ordem de 20%) é devido à granulometria descontínua empregada na sua dosagem, permitindo que as águas superficiais fossem rapidamente eliminadas em dias de chuva e que a aquaplanagem no contato pneu/pavimento fosse extremamente amenizada. Uma camada impermeável ao revestimento é executada a fim de tornar possível a instalação de drenos superficiais ao revestimento, tornando a drenagem mais rápida (STRUTIFALDI, 2010).

Além da elevada adesão com os pneus, os revestimentos em CPA têm propriedades ruidosas desejáveis: o elevado volume de vazios em seu interior absorve os impactos geradores de energia em seu interior, funcionando como uma **esponja** de isolamento acústico. No entanto, há que se atentar para critérios de dosagem em usina da quantidade de ligante asfáltico empregada: o excesso pode causar segregação do material e reduzindo o volume de vazios e provocar exsudação ao longo da vida útil do pavimento; recomenda-se a utilização de fibras na mistura para que as mesmas tornem suportável a adição de um acréscimo de ligante, bem como o executor deve se atentar à devida dosagem em projeto (que possui 0% de grãos passantes em algumas peneiras), uma vez que é uma camada propensa à desagregação. O CPA, tomando esses cuidados, é considerado o revestimento considerado com maior performance em quesitos de ruído e segurança (STRUTIFALDI, 2010).

Um grande revés, no entanto, dentro de muitos benefícios sonoros, é a deposição de resíduos na superfície (que é o que ocorre nas aberturas de fissuras em outros revestimentos mais fechados), que reduz a sua capacidade drenante e seu desempenho como isolante acústico. Para isso, recomenda-se a limpeza de sua superfície a cada dois anos com máquina especial (STRUTIFALDI, 2010). O Rodoanel Mário Covas é um grande exemplo prático, que foi executado em trecho com pavimento flexível com revestimento em CPA por asfalto modificado por polímero incorporado por fibras, ao passo que estas garantem maior resistência às solicitações do tráfego (evitando segregações), possuindo, por isso, múltiplos relatos de usuários que sentem e aprovam a sensação de baixa ruídosidade ao pilotar sobre ele (CALLAI, 2011).

5.3.3.3 *BÉTON BETUMINEUX TRÈS MINCE (BBTM)*

É um revestimento de espessura delgada (de 2 a 4cm), desenvolvido na França, sendo aplicado em camadas que conferem ao pavimento aderência, garantindo aos usuários conforto e segurança, principalmente em pistas molhadas de dias chuvosos. Para sua execução é necessária atenção à norma francesa publicada pelo país, a XP P 98 137 (2001), que permite a modificação do ligantes por polímeros (etilenovinil acetato ou *ethylene vinyl acetate* (EVA), acrilonitrila butadieno estireno ou *acrylonitrile butadiene estirene* (SBS) ou borracha). O princípio da baixa ruídosidade do BBTM é a presença de uma textura negativa (semelhante à do CPA), que confere propriedades de isolamento. Foi utilizado na constituição do revestimento da Rodovia Castello Branco (STRUTIFALDI, 2010).

5.3.3.4 *REVESTIMENTO POROSO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND*

Ocorre em pavimentos rígidos cujo revestimento possui maior quantidade de vazios (em relação ao concreto de cimento Portland comum) interligados e a drenagem superficial das águas é facilitada, analogamente à CPA, que possui uma vantagem se comparado a este: menor incidência de colmatação (STRUTIFALDI, 2010).

5.3.3.5 CONCRETO TRATADO COM RESINA EPÓXI

Trata-se da aplicação de um ligante em forma de resina sobre as superfícies dos agregados miúdos (pedriscos) de concreto de cimento Portland de pavimentos rígidos. Ao passo que aumenta a aderência pneu/pavimento, o ruído gerado por este contato é mais reduzido, uma vez que uniformiza a superfície da megatextura, sendo que a mesma e a macrotextura são uniformizadas. São os tipos de pavimentos empregados em locais onde a solicitação de aderência pneu/pavimento é alta, como em acessos de curvas fechadas, cruzamentos e em ponto cruciais de conversão em rodovias. De acordo com o exposto por Strutifaldi (2010), existem diversos tipos de tratamentos de superfícies em pavimentos rígidos, que são definidos trabalhando-se com as dosagens de diâmetros dos grãos e com os tipos das resinas, que estão difundidos pelos fabricantes comercialmente que, no entanto, não fornecem características técnicas detalhadas para difusão da compreensão e estudo.

5.3.3.6 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND COM AGREGADO EXPOSTO

Define-se como o revestimento de concreto de cimento Portland em pavimentos rígidos onde os agregados são expostos pelo interrompimento do processo de cura da argamassa; ou, melhor dizendo, a argamassa superficial de concreto é retirada quando a mesma ainda se encontra fresca. Para isso, a pega é retardada aspergindo um produto retardador no concreto, mantendo-o sob lona plástica para suprimir a evaporação (STRUTIFALDI, 2010).

Enquanto que o foco na concepção desta modalidade de revestimento rígido era a de ganho na aderência, o mesmo também se mostra versátil na redução considerável de ruídos quando comparado com os revestimentos de cimento Portland e asfálticos convencionais. É melhor, por recomendação de alguns autores, para ganhos mais desejáveis, a execução de um revestimento dividido em dois: a camada inferior em concreto convencional e a superior de desgaste com os agregados expostos. Dessa forma, com as curvas de dosagens descontínuas e uma proporção de 15 % de agregados miúdos dos agregados graúdos totais (limitados a um máximo de 8 mm) confere-se uma ordem 5 % nos volume médio dos vazios, o que gera condições comparáveis às das camadas delgadas em condições de conforto e aderência (FERHL, 2006, *apud* STRUTIFALDI, 2010).

5.3.3.7 **CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND CEPILLADO**

O termo *cepillado* vem do espanhol, que traduz-se em escovado, chamado de *diamond grinding* na língua inglesa devido ao seu processo de feitura; é, assim, um revestimento de pavimentos rígidos confeccionado em revestimentos já existentes (para regularização e reabilitação) ou recém acabados em que a camada de revestimento, já em fase de cessão do processo de cura do concreto, é serrada em finas camadas, longitudinais ao tráfego, com lâminas diamantadas espeçadas entre si (em uma distância de, geralmente, 3 mm), produzindo várias cavidades longitudinais que se responsabilizam por conferir maior aderência pneu/pavimento, bem como ocasionais regularizações no desnível horizontal e vertical; no entanto, ocorreram ao longo das experiências práticas, de maneira indireta, um acompanhamento positivo na redução do ruído gerado: a macrotextura é melhorada, dando maior adesão e a microtextura confere maior exposição dos agregados, dando-o um trabalho acústico de maneira análoga ao do CPA. Porém, enquanto alguns autores concordam em dizer que o ganho da redução é fixado ao longo tempo, outros refutam e alegam que a tendência do ruído é a de aumentar com o passar do tempo, enquanto outros também dizem da perda de aderência e drenabilidade, por causa dos sulcos estarem dispostos longitudinalmente e, em seção transversal, a inclinação drena as águas ortogonalmente, causando maior tempo de retenção das águas (STRUTIFALDI, 2010).

5.3.4 **MÉTODOS ESPECÍFICOS PARA MEDIÇÕES DO RUÍDO EM PAVIMENTOS**

Os meios mais comumente empregados e difundidos pelos quais os ruídos são medidos para pesquisas e estudos na interação pneu/pavimento são dois: *Statistical Pass-By* (SPB) e *Close Proximity* (CPX), sendo o primeiro mais difundido em uso (FREITAS, 2008).

5.3.4.1 **MÉTODO STATISTICAL PASS-BY (SPB)**

O método SPB, normalizado pela *International Organization for Standardization* (ISO) 11819-1997 em referência a método de ensaio e condições para extração de dados em campo, consiste na medição do ruído provocado pelo tráfego de veículos de forma que a natureza deste e o próprio tráfego sejam relevados no resultado

final dado como índice SPB; é um método que compreende a circulação em geral e é de grande valor para pesquisas técnicas e usado em campo também. A ISO, assim, fornece padrões para se colocar um sonômetro (decibelímetro) na via para captação do ruído gerado pelo movimento de um veículo passante à frente do aparelho, que se situa em distância da fonte e altura especificados; os ruídos são, dessa forma, medidos várias vezes, sempre categorizando o nível de ruído medido com a classe de veículo ensaiado, que, somados separadamente, são inseridos em uma equação que permite o cálculo do chamado *Statistical Pass-By Index* (SPBI), que representa um índice do nível médio do ruído emitido dentro da porção de medições ensaiadas. Para as categorias dos veículos (tabela abaixo), deve-se atender a um número mínimo de veículo: 100, para os de passeio, um mínimo de 30 para pesados de um eixo e outro mínimo de 30 para pesados com mais de dois eixos, sendo a soma destes pesados igual a 80. O cálculo do índice, fornecido pela ISO, é o dado pela eq. (16) (ISO, 2013).

$$SPBI = 10 \cdot \log W_1 \times 10^{L1/10} + W_{2a} (v_1/v_{2a}) \times 10^{L2a/10} + W_{2b} (v_1/v_{2b}) \times 10^{L2b/10} \quad (16)$$

Onde:

L1, L2a e L2b: valores de pressão sonora para essas categorias [dB];

W1, W2a e W2b: fatores de proporção dos veículos;

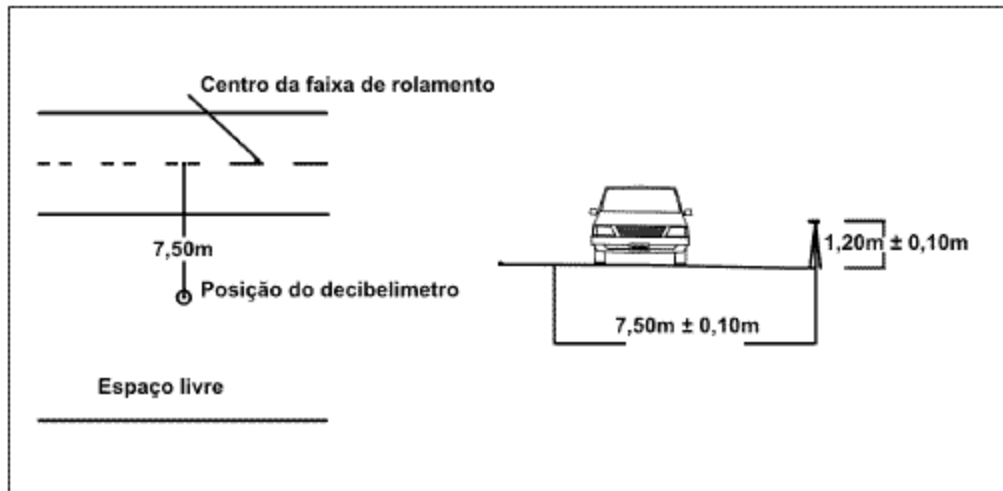
V1, V2a e V2b: velocidades de referência dos veículos [km/h].

Tabela 5.2 – Constantes empregadas pela ISO 11819 para cálculo do SPBI

Categoria do veículo		Velocidade da rodovia					
		Baixa		Média		Alta	
Nome	Número	Velocidade de referência	Wx	Velocidade de referência	Wx	Velocidade de referência	Wx
Carros	1	50km/h	0,9	80km/h	0,8	110km/h	0,7
Pesados de dois eixos	2 ^a	50km/h	0,08	70km/h	0,1	95km/h	0,08
Pesados de mais de dois eixos	2b	50km/h	0,03	70km/h	0,1	95km/h	0,23

Fonte: adaptado de Callai *et al.* (2009)

Figura 5.9 – Modelo esquemático das medições padronizadas pela ISO 11819



Fonte: CALLAI *et al.* (2009)

O método de cálculo do SPBI, porém, não atenta ao fato de que às temperaturas extremas as medições são prejudicadas, levando em conta os 20 °C como referência de medição padrão, podendo variar em até 1 dB (RAITANEN, 2005, *apud* CALLAI *et al.*, 2009). Assim, Callai *et al.* (2009), em pesquisa técnica, apontam uma solução para correção da discrepância, que consiste na aplicação da equação (17), onde não deve haver medição caso a temperatura em campo seja inferior a 5 ou superior a 40 °C.

$$L(\theta_{\text{ref}}) = L_m + k.(\theta_{\text{ref}} - \theta) \text{ [dB]} \quad (17)$$

Onde:

- L é o ruído corrigido;
- L_m é o ruído medido (dB);
- θ é a temperatura da rodovia (°C);
- θ_{ref} é 20 °C;
- K é o coeficiente de correção da temperatura, sendo:
 - Para pneus classe C1 (carros de passageiros);
 - K é -0.03 dB/ °C se $\theta > \theta_{\text{ref}}$;
 - K é -0.06 dB/°C se $\theta < \theta_{\text{ref}}$;
 - Para pneus classe C2 (Caminhões leves e vans);
 - K é -0.02 dB/°C;
 - Para pneus classe C3 (caminhões pesados), K é 0.

5.3.4.2 **CLOSE-PROXIMITY (CPX)**

Conhecido como método do trailer (figura 5.10), é um procedimento em que o ruído produzido em um pneu padrão que é enclausurado em um trailer (daí o nome popular) e medido diretamente da fonte, que evita interferências externas que possam alterar os dados. Junto do pneu, vai um sonômetro para captação das pressões sonoras. A partir de diferentes velocidades, o trailer é capaz de medir em até quatro sonômetros, sendo o mínimo de dois. Os dados coletados são agrupados e fornecidos por posição relacionados com as velocidades trafegadas (STRUTIFALDI, 2010).

Figura 5.10 – Exemplo de veículo utilizando o método CPX em uma via da Holanda



Fonte: M+P CONSULTING ENGINEERS (201-)

5.3.4.3 **MÉTODO COAST-BY (CB)**

O Método *Coast By* (CB) é análogo ao que a ISO 362 (*Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles*) padroniza, em que emprega-se um veículo teste com pneus normatizados que trafega por sob um trecho homogêneo de via que passa à frente de um sonômetro instalado na borda da via; no exato momento da extração da pressão sonora pelo aparelho (também normatizado), o veículo está com motor desligado e em velocidade constante, removendo o ruído de origem interna do

veículo na medição e obtendo o som segundo a velocidade de passagem (STRUTIFALDI, 2010).

5.3.5 MÉTODOS EXTERNOS PARA MITIGAÇÃO DO RUÍDO VIÁRIO

5.3.5.1 *DISTÂNCIA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR*

A distância do receptor à fonte sonora é uma variável que influencia diretamente na intensidade de som sentida; como já descrito anteriormente, e, como afirma Strutifaldi (2010, p. 29), “[...] o som varia inversamente com o quadrado da distância, ou seja, conforme a distância aumenta, o som decresce”. É, assim, seguindo esse pressuposto, que se pode usar a distância como artifício de redução da percepção ruidosa; no entanto, trata-se de um procedimento de disfarce da realidade, uma vez que não se trabalha na moldagem dos revestimentos a fim de ganhos negativos de emissão de decibéis. É uma boa alternativa para a mitigação da poluição sonora em casos em que o pavimento e a via devam permanecer intocados, em situações práticas que visam facilitar soluções: pode-se por exemplo, posicionar habitações e estabelecimentos de comunidades lindeiras ao tráfego em posições estratégicas, que estejam a distâncias consideráveis da fonte poluidora a fim de estar dentro dos limites aceitáveis de ruído.

Trata-se, portanto, de uma forma de resolver o problema de maneira indireta, sem que haja alteração na estrutura da fonte. O decréscimo de ruído percebido por um receptor de um ruído emitido pelo tráfego em concreto asfáltico chega a 6 dB (A) quando a distâncias menores (da ordem de 1 m) entre os dois dobra, ao passo que a distâncias maiores (a ordens de 5 m), as perdas chegam a apenas 3 dB (A) (WAYSON, 1998, *apud* STRUTIFALDI, 2010).

Um método para cálculo da atenuação sonora com o aumento da distância e pela equação fornecida pela *Federal Highway Administration* dos EUA (FHWA) é descrito a seguir, pela eq. (18)

$$dB(A) = 10.\log(d_1/d_2)^{1+\alpha} \quad (18)$$

Onde:

d1: distância da fonte ao receptor em primeira análise;

d2: distância, maior do que d1, da fonte ao receptor em segunda análise;

α : coeficiente de atenuação, sendo $\alpha=0$ quando o substrato é firme e/ou pavimentado e $\alpha=0,5$ quando o terreno é macio

5.3.5.2 *BARREIRAS VEGETAIS*

Trata-se do emprego de matérias vegetais como árvores e arbustos, bem como o solo e o assentamento de gramas e plantações baixas, que têm fundamental papel física de atenuação. As folhas reduzem as emissões de altas frequência, acima dos 2000Hz, absorvendo e espalhando-as ao longo de conjuntos emaranhadas de folhagens, ao passo em que os robustos troncos das árvores espalham os sons de médias frequência, de 400 a 2000Hz. Já as baixas frequências são mitigadas pelas ralas vegetações do solo. Para efeitos de aplicações em campo, quanto mais densa, larga e alta a barreira, maior será a eficiência de atenuação (BISTAFA, 2006; STRUTIFALDI, 2010).

5.3.5.3 *BARREIRAS ACÚSTICAS PLANAS E CURVAS*

Trabalham como obstáculos entre a fonte e o receptor, funcionando como objetos difratores do som indesejado (pelo princípio de Huygens). Por um lado temos as de geometrias plana e, por outro, curva, que são de escolha de acordo com as características da via a ser atenuada e do trajeto de bloqueio desejado (de forma que a barreira acompanhe a dinâmica do movimento das ondas ruidosas ao longo dos trajetos), que são verdadeiros painéis que se estendem verticalmente com função de bloqueio acústicos, construídos em diferentes materiais como concreto(as mais utilizadas pelo baixo custo e estabilidade, porém com grau de absorção limitada), metais com material absorvente, policarbonato e vidro (de aplicações de cunho paisagístico, por serem transparentes), madeira (menor desempenho de absorção) etc., dimensionados em vias a partir de diversos estudos técnicos, como a do dimensionamento da atenuação em função das dimensões da barreira (BISTAFA, 2006; STRUTIFALDI, 2010). Um deles é o de Kurze e Anderson, que definiram, em 1971, a atenuação (A_t) das barreiras pela eq. (19) (BISTAFA, 2006).

$$A_t = 5 + 20 \cdot \log[(2\pi N)^{1/2} / (\tanh((2\pi N)^{1/2}))] \text{ [dB]}, \quad \text{para } 0,2 < N < 12,5 \text{ (19)}$$

Ou

$$A_t = 24 \text{ dB}$$

para $N \geq 12,5$

Em que:

$$N = 2 \cdot (A + B - d) / \lambda$$

Sendo:

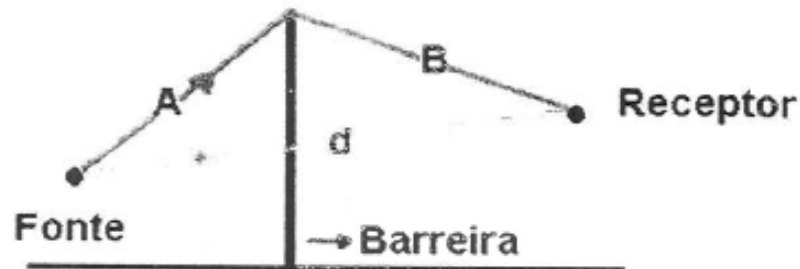
A: distância da fonte à borda superior da barreira;

B: distância do receptor à borda superior da barreira;

d: distância entre fonte e receptor;

N: número de Fresnel

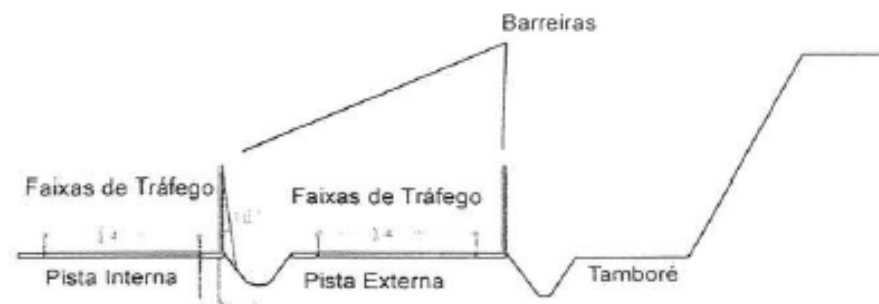
Figura 5.11 – Esquema de bloqueio acústico em barreiras



Fonte: STRUTIFALDI (2010, p. 48)

Emprega-se na prática uma combinação entre barreiras curvas e planas; para tanto, ao nível do projeto, a recomendação básica para este dimensionamento é de que as curvas estejam na incidência das ondas sonoras, acompanhando as partes planas, de modo que funcione como a barreira direta propriamente dita. Um caso real representativo é o do Rodoanel Mário Covas, que emprega trecho com semi-túneis anexados a barreiras verticais, como indica a figura 5.12, para atenuação do ruído às populações lindeiras (STRUTIFALDI, 2010).

Figura 5.12 – Exemplo de barreira acústica circular combinada com vertical, empregada no Rodoanel



Fonte: STRUTIFALDI (2010, p. 53)

As referências em países da Europa como exemplo mostram que nem sempre destina-se o material e o projeto mais dedicado à redução da poluição sonora, mas que os projetos costumam ponderar elementos também muito importantes como custo, durabilidade, impacto visual; execução etc.; além disso, as pesquisas como a de Kurze e Anderson, de 1971 da determinação da atenuação nem sempre são fiéis à realidade: fatores como distância do receptor à fonte e influências de emissões externas que não são consideradas em teoria estão sempre mudando as previsões teóricas para estes fins. Assim, desde que a redução total das barreiras seja superior a 24dB, usa-se desde materiais homogêneos como combinações deles para alcance desta medida (BISTAFA, 2006; STRUTIFALDI, 2010).

5.3.5.4 *TÚNEIS FALSOS*

Os túneis falsos são, de maneira análoga às barreiras acústicas e como o próprio nome diz, grandes objetos de bloqueio acústico em locais em que barreiras verticais comuns não são suficientes para a atenuação do ruído ao receptor; isso ocorre muito em vias em meio a prédios ou em situações em que o receptor tem ampla visão da fonte e está espacialmente indefeso das ondas de choque. Nestes casos, os túneis funcionam como materiais que envolvem quase que totalmente a via em 180 graus, de forma que os ruídos estejam aprisionados e difratem apenas no interior da pista; tais mecanismos se mostram muito mais mitigadores do que as barreiras anteriormente descritas, chegando a valores sonoros bem mais reduzidos do que os 24dB das barreiras planas e curvas, ao mesmo tempo em que este ganho reflete-se nos custos elevados e na complexidade da execução de obras como que empregam tais mecanismos. Dessa

forma, o seu emprego está sempre sujeito aos impactos nas populações do entorno e se encaixam muito bem em complexos urbanos superpovoados, podendo também ser uma alternativa ao impacto visual (que evita grandes colunas verticais das barreiras acústicas), mostrando-se muito viável em estudos de impacto urbano (BISTAFA, 2006; STRUTIFALDI, 2010).

5.3.6 PESQUISAS NO QUESITO RUÍDO GERADO PELA INTERAÇÃO PNEU/PAVIMENTO

Fehrl (2006) apresenta pesquisas de cunho técnico que compararam as emissões segundo os tipos de revestimentos referenciados por tipos de superfícies, sendo uma delas (a mais convencional da categoria estudada) usada como a referência de emissão sonora, ao passo que os níveis sonoros obtidos são registrados segundo a natureza dos tráfego e dos tipos de veículos passando (velocidades dos carros, caminhões e ônibus), que são apresentados no quadro 5.1, segregados categorias de asfálticos e rígidos.

Como se pode observar, segundo a relação entre CA, CPA, SMA e BBTM, a camada porosa de atrito é o revestimento mais notável em redução do ruído quando comparado às camadas asfálticas de CA comum, SMA e BBTM, em razão de seus altos percentuais de vazios e granulometria aberta e descontínua, ao passo que o SMA é o de menor desempenho, pois possui baixos vazios pelo preenchimento destes por pedrisco, *filler* e fibras (que tomam o lugar disponibilizado pela granulometria aberta), o que contorna as perdas de pressão sonora.

Quadro 5.1 – Comparação da emissão de ruído pneu/pavimento entre CA, CPA, SMA e BBTM

Tipo de superfície	Tipo de veículo	Diferença de nível de ruído (dB)
Concreto Asfáltico	carros(110km/h)	referência
	caminhões e ônibus de 2 eixos(85km/h)	referência
	caminhões e ônibus de 3 ou mais eixos(85km/h)	referência
CPA	carros(110km/h)	-4,7
	caminhões e ônibus de 2 eixos(85km/h)	-2,8
	caminhões e ônibus de 3 ou mais eixos(85km/h)	-4,4
SMA	carros(110km/h)	-2,8
	caminhões e ônibus de 2 eixos(85km/h)	0,0
	caminhões e ônibus de 3 ou mais eixos(85km/h)	-1,0
BBTM	carros(110km/h)	sem medição
	caminhões e ônibus de 2 eixos(85km/h)	-0,9
	caminhões e ônibus de 3 ou mais eixos(85km/h)	-3,5

Fonte: adaptado de FEHRL (2006)

Em relação aos tipos de revestimentos para pavimentos em concretos, as pesquisas também mostram o que a teoria exposta alega, e segue a opinião de alguns autores quanto ao concreto *Cepillado*, que não possuem consenso quanto à confirmação de mitigação ou não do ruído pneu/pavimento, como dito anteriormente (apesar de a fonte que produziu a pesquisa não especificar o estado e a idade de vida do pavimento para melhor análise). O pavimento em concreto poroso se mostra muito mais versátil em relação aos *Cepillado* e de cimento Portland convencional, ao passo que apresenta maior volume de vazios e uma dosagem e preparo mais direcionados para finalidades de aderência pneu/pavimento, enquanto que o *Cepillado* é apenas um tratamento superficial, como apresenta o quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Comparação da emissão de ruído pneu/pavimento entre concreto de cimento Portland, concreto cepillado e concreto poroso

Tipo de superfície	Tipo de veículo	Diferença de nível	Referência bibliográfica
		de ruído (dB)	
Concreto de cimento Portland	carros(75km/h)	referência	
	caminhões e ônibus de todos os tipos(75km/h)	referência	
	composição de tráfego (todos os tipos de veículo)	referência	
Cepillado	composição de tráfego	-3	KUEMMEL et al (2000)
	composição de tráfego	-2,3	WOLF et al (2008)
Concreto Poroso	carros(75km/h)	-6,0 a -8,0 (em relação ao concreto asfáltico)	DESCORNET et al (2000)
	caminhões e ônibus de todos os tipos(75km/h)	-4,0 a -8,0 (em relação ao concreto asfáltico)	DESCORNET et al (2000)
	composição de tráfego (19% de volume de vazios)	-5,0	WIEGAND (2006)

Fonte: adaptado de FEHRL (2006)

Ao mesmo tempo, os ganhos em agregados exposto se mostram muito eficientes na atenuação da pressão sonora ao compará-lo com o convencional; as medições indicaram, inclusive, melhor desempenho para caminhões e ônibus de 3 ou mais eixos que percorreram a 85km/h: 2,8dB de perda no exposto contra um ganho de 0,6dB no concreto poroso, como expõe o quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Comparação da emissão de ruído pneu/pavimento entre concreto de cimento Portland, concreto com agregado exposto, concreto poroso e concreto tratado com resina epóxi

Tipo de superfície	Tipo de veículo	Diferença de nível de ruído (dB)
Concreto de cimento Portland	carros(110km/h)	referência
	caminhões e ônibus de 2 eixos(85km/h)	referência
	caminhões e ônibus de 3 ou mais eixos(85km/h)	referência
Agregado exposto	carros(110km/h)	-4,3
	caminhões e ônibus de 2 eixos(85km/h)	-1,9
	caminhões e ônibus de 3 ou mais eixos(85km/h)	-2,8
Concreto poroso	carros(110km/h)	-6,1
	caminhões e ônibus de 2 eixos(85km/h)	-6,0
	caminhões e ônibus de 3 ou mais eixos(85km/h)	0,6
Sistemas com resina epóxi	carros(110km/h)	sem medição
	caminhões e ônibus de 2 eixos(85km/h)	sem medição
	caminhões e ônibus de 3 ou mais eixos(85km/h)	sem medição

Fonte: adaptado FEHRL (2006)

O SMA com as texturas otimizadas também foram muito positivos segundo os dados medidos, mostrando que a trabalhabilidade do uso das faixas específicas em norma(as 0/5 e 0/8 da NR) é uma dica para atenuação, servindo como boa atenção às preocupações de especificação em projeto de pavimentos para fins acústicos, atenuando em até 3,1dB em tráfego de velocidade alta. Segue no quadro 5.4 os dados representativos.

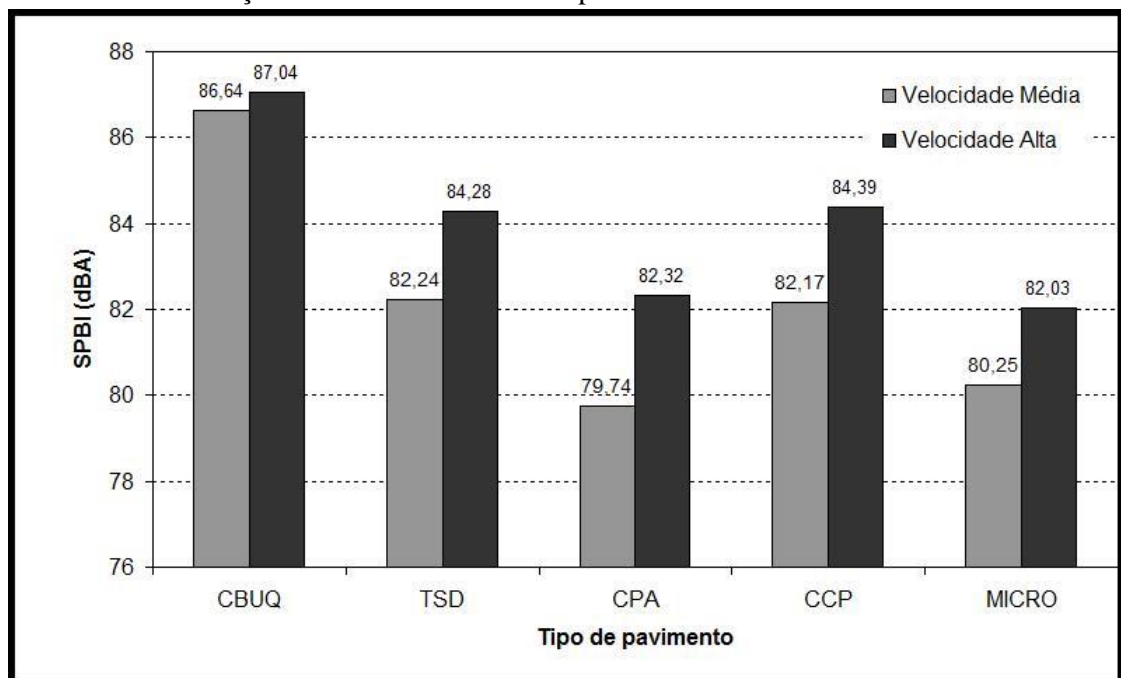
Quadro 5.4 – Comparação da emissão de ruído pneu/pavimento entre concreto asfáltico e SMA com textura otimizada faixas 0/5 e 0/8

Tipo de superfície	Tipo de veículo	Diferença de nível de ruído (dB)
Concreto asfáltico	composição de tráfego (carros+caminhões 2 eixos)	referência
SMA-TO 0/5NR	composição de tráfego (130km/h)	-2,9
SMA-TO 0/8NR	composição de tráfego (130km/h)	-3,1

Fonte: adaptado FEHRL (2006)

Callai *et al.* (2009) nos fornece uma pesquisa que revela de maneira muito significativa o que os estudos teóricos sobre os revestimentos silenciosos defendem, que é ilustrada no gráfico 5.1, no qual foram coletadas as medidas dos ruídos pelo método SPB e os *Statistical Pass-By Index* de diferentes revestimentos calculados para Concreto Betuminoso Usinado a Quente, Tratamento Superficial Duplo, Camada Porosa de Atrito, Concreto de Cimento Portland e Microrevestimento asfáltico.

Gráfico 5.1 – Medição do SPBI em diferentes tipos de revestimentos



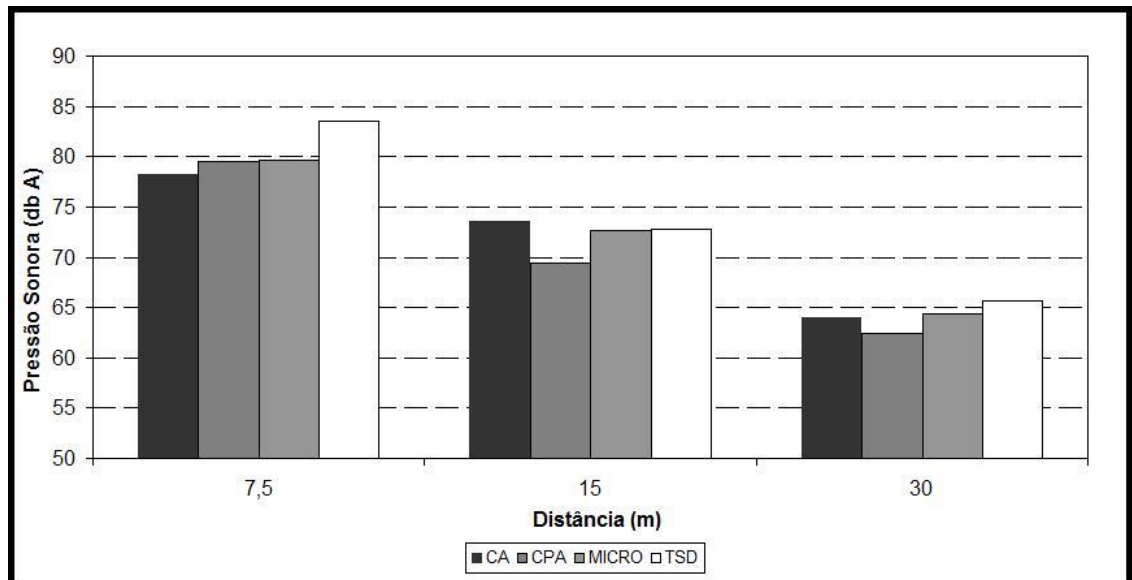
Fonte: CALLAI *et al.* (2009)

O SPBI vem novamente à confirmação da silenciosidade de pavimentos com mais vazios e granulometrias peculiares (CPA e CCP principalmente). É, também,

notável a influência da velocidade no aumento do ruído (traduzindo-se o SPBI) seja qual for o revestimento analisado

Em mesma publicação de Callai *et al.* (2009), que se trata do **Perfil de Influência Sonora de Rodovias com Diferentes Tipos de Pavimentos Asfálticos**, os autores reforçam a idéia da influência da distância entre a fonte e o receptor na caracterização do nível sonoro percebido, sendo que o incremento de 10m na distância entre os dois é capaz de provocar queda ao redor de 7dB(A), mostrando que em 30m de distância da fonte os ruídos captados se tornam muito aceitáveis para os seres humanos, como evidencia o gráfico 5.2

Gráfico 5.2 – Pressão sonora causada pela interação pneu/pavimento a diferentes distâncias medido em revestimentos



Fonte: CALLAI *et al.* (2009)

6. CONCLUSÃO

Foi visto que os ruídos, por existência, tendem a ser fenômenos indesejáveis à vida humana e que fatores fisiológicos negativos consequentes à exposição pelos mesmos estão constantemente gerando problemas no dia-a-dia das pessoas, fazendo do ruído um problema nacional, com total destaque para a urbanização desenfreada dos últimos tempos. É por isso que, sem falta de provas e razões, a mitigação da poluição sonora deve ser uma prioridade ligada à sanidade populacional, sem a qual o direito à saúde de qualquer cidadão é violado, fazendo do ruído causado pela interação pneu/pavimento (o mais notável dentre os quatro produzidos nos tráfegos viários) um entrave ao crescimento sustentável e equilibrado, tornando a sua mitigação uma obrigação que precisa ser mais bem pesquisada e difundida como inspiração aos engenheiros projetistas (em vista da carência na preocupação do ruído na escolha dos revestimentos nos pavimentos), que é também uma forma de ganho estrutural e financeiro ao longo do tempo.

Através de fundamentos físico-teóricos, abordamos as naturezas acústicas dos sons e o porquê da existência dos de natureza ruidosa, bem como das maneiras mais difundidas na medição e caracterização das ondas sonoras que têm total emprego em aplicações práticas. E, da mesma forma, os pavimentos caracterizados segundo suas texturas, em que as mesmas foram definidas em função dos impactos nos ruídos gerados. Foram, para tanto, necessárias a fim de que se criasse um berço teórico que sustentasse os estudos nos revestimentos em si, ao ponto de tornar-se aceitável a afirmação de que a camada CPA é a que mais apresenta ganhos nas perdas de decibéis gerados no contato pneu/pavimento (atenuado pelo isolamento em seus canais de vazios internos, como ocorre no Rodoanel), se seguido corretamente em sua execução, chegando à atenuação de em torno de 6 dB (A) evidenciada por Fehrl (2006) e Callai *et al.* (2009) pelo SBPI, assim como as camadas BBTM (escassa no Brasil), concreto de cimento Portland poroso e com os agregados expostos, bem como deve atentar-se aos métodos e as condições presentes no momento da execução dos ensaios, por onde deve-se prever correções por temperaturas, erros de medições e especificações de aparelhagem.

Dessa forma, pela soma de conteúdos expostas, pode-se concluir que a atenuação dos ruídos pneu/pavimento podem ser efetivadas através de maneiras diretas e indiretas, sendo as primeiras as ligadas ao projeto direcionado pela escolha de

pavimentos silenciosos em si e as segundas o emprego de barreiras vegetais, metálicas, de concreto etc. verticais, circulares ou em forma de túneis falsos, bem como pelo afastamento do receptor à fonte. No entanto, é logicamente muito mais viável efetuar a dissipação das energias sonoras diretamente na fonte, por causa de uma soma de fatores favoráveis, como maior facilidade na execução (em contraposições à colocação de barreiras, evitando ocupação de espaço extra), redução nos custos imediatos e a longo prazo, melhores performances estruturais do revestimento ligadas à aderência e à drenagem de águas superficiais etc. Há, no entanto, casos em que a utilização de pavimentos silenciosos combinada às maneiras indiretas pode ser a solução quando o tipo de revestimento selecionado (ainda que de performance silenciosa) se provam insuficientes na redução do impacto em determinado local; ainda assim, pode-se recorrer ao distanciamento do receptor à fonte ou, quando impossível pela inviabilidade espacial ou por qualquer outro conflito, à aplicação de barreiras acústicas, que poderão ter dimensões reduzidas e utilização de materiais mais ecológicos e, por consequência, soluções mais baratas.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151 – Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2000.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E867: Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems**. ASTM Standards, 1997. v. 4. 8 p.

ANDRADE, M.H. **Projetos de Pavimentos Rígidos**. Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2007. Disponível em: <<http://www.geoties.com/pavimentacao2005/projeto>>. Acesso em: 5 maio 2016. Notas de Aula.

APS, Márcia. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – International Friction Index para revestimentos asfálticos**. 2006. 179 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 1 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2006, 368 p.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-15 - Atividades e Operações Insalubres**. Brasília, 2009.

CALIXTO, A. **O Ruído Gerado Pela Tráfego de Veículos em “Rodovias Grandes Avenidas”, situadas dentro do perímetro urbano de Curitiba, analisados sobre parâmetros acústicos objetivos e seu impacto ambiental**. 2002. 125 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

CALLAI, S. C. et al. Perfil de influência sonora de rodovias com diferentes tipos de pavimentos. In: Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto, 15, 2009, Lisboa, Portugal. **Anais**. Lisboa: CILA, Portugal, 2009. v. 2. p. 1511-1520.

CALLAI, Sérgio Copetti. **Estudo do ruído causado pelo tráfego de veículos em rodovias com diferentes tipos de revestimentos de pavimentos**. 2011. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

dBwave.i – ACOUSTIC ENGINEERING. **Filtros de Ponderação em frequência para avaliação acústica**. Lisboa, 2015. Disponível em: <<http://www.dbwave.pt/filtros-de-ponderacao-em-frequencia-para-avaliacao-acustica/>>. Acesso em: 25 mar. 2016.

DELAÍ, Luiz André. **Ouvidos Eletrônicos: como computadores lidam com sons – Características básicas do som.** R7 Tecnologia, 2012. Disponível em: <<http://www.hardware.com.br/artigos/ouvidos-eletronicos-como-computadores-lidam-com-sons/caracteristicas-basicas-som.html>>. Acesso em: 15 abr. 2016.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **-Manual de Pavimentação.** Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro: 2006, 274 p.

EPA – U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **EPA Identifies Noise Levels Affecting Health and Welfare.** United States: EPA, 1974.

FEHRL, SILVIA. **Project. Guidance manual for the implementation of low-noise surfaces.** Brussels, ed. Phil Morgan, 2006, 318 p.

FERNANDES, João Candido. **Capítulo 8 – O Ruído e a sua Medição.** Bauru: UNESP, 2005. Apostila para disciplina de graduação do Departamento de Engenharia Mecânica - Acústica e Ruídos.

FREITAS, Elisabete F. Contribuição da Superfície dos Pavimentos para a Produção do Ruído. Portugal. **[Trabalho Apresentado]**, Portugal, n. 30, p. 21-32, 2008.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11819-1997 – Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical Pass-By method.** USA, 2013. 27 p.

M+P CONSULTING ENGINEERS. **Improving the Close Proximity (CPX) method and the CoMet trailer.** Holanda, [201-]. Disponível em: <<http://www.mplusp.eu/oplossingen/improving-close-proximity-cpx-method-and-comet-trailer>>. Acesso em: 11 mar. 2016

MACHADO, Nuno. **O Som e a Luz - Características de um Som.** Lisboa: Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa, [20--]. Aulas de Física e Química. Disponível em <http://www aulas-fisica-quimica.com/8f_06.html>. Acesso em: 14 abr. 2016.

MILJKOVIĆ, Miomir; RADENBERG, Martin; GOTTAUT, Christian. **Characterization of Noise-Reducing Capacity of Pavement by Means of Surface Texture Parameters.** USA: American Society of Civil Engineers, 2014.

MOÇO, Anderson. Barulho de mais, saúde de menos. **Revista Saúde**, São Paulo, fev. 2008. Disponível em: <

http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/saude/conteudo_270282.shtml>. Acesso em: 10 abr. 2016.

MOURA, Edson. **Projeto de Pavimento**. São Paulo: FATEC SP, 2016. 119 p. Notas de aula da Disciplina Projeto de Pavimento do curso do Movimento de Terra e Pavimentação Faculdade de Tecnologia de São Paulo. Disponível em: <http://professoredmoura.com.br/download/Apost_Dimens_Pav_1._2016.pdf>. Acesso em: 17 maio 2016.

NATIONMASTER. **Transport – Motor vehicles: Countries Compared**. [2016]. Disponível em: <<http://www.nationmaster.com/country-info/stats/Transport/Motor-vehicles#>>. Acesso em: 5 maio 2016.

OLIVEIRA, Marta Santos. **Tabela de Impacto de Ruídos na Saúde (OMS)**. Paraná, 2009. Disponível em <<http://umuarama.portaldacidade.com/artigo/314/25/tabela-de-impacto-de-ruídos-na-saude-oms/>>. Acesso em: 4 abr. 2016.

PÉREZ, Javier Morales. **Estudio de la influencia de determinadas variables em el ruido urbano producido por el tráfico de vehículos**. 2009. 134 p. Tese (Doutorado) – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos – Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2009.

RASMUSSEN, Robert Otto. **Pavement Texture Fundamentals**. Civil + Structural Engineer. USA, Arizona: 2013. Disponível em <http://cenews.com/article/9399/pavement_texture_fundamentals>. Acesso em: 29 abr. 2016.

SÃO PAULO (cidade). Decreto nº 55.197, de 11 de junho de 2014. Confere às Subprefeituras a atribuição para a fiscalização do cumprimento da Lei nº 12.879, de 13 de julho de 1999, sob a coordenação e supervisão da Divisão Técnica de Fiscalização do Silêncio Urbano, da Supervisão Geral de Uso e Ocupação do Solo, da Secretaria Municipal de Coordenação das Subprefeituras, bem como disciplina os procedimentos para a apresentação de defesa. **Diário Oficial da Cidade de São Paulo**, São Paulo, p. 3, 12 jun. 2014.

SÃO PAULO (cidade). LEI Nº 13.885, DE 25 de agosto de 2004. Estabelece normas complementares ao Plano Diretor Estratégico, institui os Planos Regionais Estratégicos das Subprefeituras, dispõe sobre o parcelamento, disciplina e ordena o Uso e Ocupação do Solo do Município de São Paulo. **Diário Oficial da Cidade de São Paulo**, São Paulo, 25 ago. 2004.

STRUTIFALDI, Elieni Guimarães Barbosa. **Mitigação de ruído gerado pelo tráfego de veículos em rodovias**. 2010. 72 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for Community Noise**. Genebra: WHO, 1999. Disponível em <<http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html>> Acesso em: 2 maio 2016.

YOST. William A. **Fundamentals of hearing: na introduction**. 4. ed. San Diego (E.U.A.): Academic Press, 2000.

ZANNIN, P.H.T. **Apostila de Acústica Ambiental**. Curitiba: Laboratório de Acústica Ambiental, Industrial e Conforto Acústico, 32 p., 2002.