

Monografia

"MODELAGEM E ESTUDO DE SOLUÇÃO PARA MITIGAÇÃO DOS NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA PARA GARANTIR O DESEMPENHO ACÚSTICO DA EDIFICAÇÃO"

Autor: Ricardo Silva Caetano
Orientador: Prof. White José dos Santos

Julho/2016

RICARDO SILVA CAETANO

**"MODELAGEM E ESTUDO DE SOLUÇÃO PARA MITIGAÇÃO DOS NÍVEIS DE
PRESSÃO SONORA PARA GARANTIR O DESEMPENHO ACÚSTICO DA
EDIFICAÇÃO"**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil
da Escola de Engenharia UFMG

Ênfase: Gestão e Avaliação nas Construções
Orientador: Prof. White José dos Santos

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2016

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa.....	10
1.2 Objetivos	12
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	12
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	12
1.3 Limitações do Estudo.....	12
1.4 Hipótese	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 Introdução histórica do ruído.....	13
2.2 Efeitos do ruído no homem	14
2.2.1 <i>Nível equivalente de pressão sonora, L_{eq}</i>	18
2.2.2 <i>Nível estatístico de ruído, L_n</i>	19
2.2.3 <i>Frequência, f</i>	20
2.2.4 <i>Somatório de ruído</i>	24
2.3 Propagação do som no ar livre e ruído ambiental.....	24
2.3.1 <i>Propagação do ruído de veículos</i>	26
2.3.2 <i>Atenuação do ruído com a distância</i>	28
2.3.3 <i>Principais mecanismos de atenuação sonora ao ar livre</i>	31
2.4 Incômodo do ruído	33
2.5 Efeitos fisiológicos do ruído.....	36
2.5.1 <i>Perda auditiva</i>	36
2.6 Fisiologia do ouvido humano.....	36
2.6.1 <i>Orelha externa</i>	37
2.6.2 <i>Orelha média</i>	38
2.6.3 <i>Orelha interna</i>	38
2.7 Fontes sonoras	39
2.7.1 <i>Principais tipos de fontes sonoras</i>	39
2.7.2 <i>Ruído de tráfego</i>	40
2.8 Normatização e legislação	43
2.9 Isolamento acústico	46
2.10 Método para análise do ruído.....	50
3 METODOLOGIA	54
3.1 Abordagem.....	54
3.2 Estudo de caso	54
3.3 Procedimentos	55
3.3.1 <i>Plano de coleta de dados</i>	55

3.3.2 Modelagem geométrica da área.....	57
3.3.3 Análise de dados.....	58
4 ESTUDO DE CASO	59
4.1 Localização do empreendimento	59
4.2 Simulação	60
5 CONCLUSÃO	66
6 PROPOSIÇÕES FUTURAS.....	67
REFERÊNCIAS.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coliseu de Roma - Vista Externa.....	13
Figura 2 - Circuito de Compensação A, B, C e D.....	16
Figura 1 - Circuito de compensação.....	16
Figura 4 - Variação de pressão sonora (RMS e valor médio)	21
Figura 5 - Sensibilidade do ouvido humano	21
Figura 6 - Comprimento da Onda – Parâmetros Físicos	21
Figura 7 - Comprimento de onda V.S Frequência	21
Figura 8 - Espectros de frequência em bandas de oitava e 1/3 de oitava.....	23
Figura 9 - Curvatura dos raios sonoros devido ao gradiente de temperatura	25
Figura 10 - Curvatura dos raios sonoros pelos gradientes	26
Figura 11 - Efeito da distância sobre uma fonte de ruído localizada	27
Figura 12 - Efeito da distância sobre uma linha de fontes de ruído	27
Figura 13 - Tipos de fonte de ruído, relativamente à forma como propagam o ruído.....	29
Figura 14 - Mecanismos mais significativos de atenuação sonora ao ar livre.....	32
Figura 15 - Principais mecanismos de atenuação sonora ao ar livre	32
Figura 16 - Ruído intrusivo	35
Figura 17 - Morfologia do ouvido humano.....	37
Figura 18 - Orelha externa	37
Figura 19 - Orelha média	38
Figura 20 - Orelha Interna	39
Figura 21 - Fontes do ruído rodoviário: interação pneu/pavimento (à esquerda) e funcionamento do veículo (à direita).....	41
Figura 22 - Fonte de ruído rodoviário e sua influência	42
Figura 23 - Sonômetro	56
Figura 24 - Método de medição de ruído de tráfego	56
Figura 25 - Modelo 3D da área em estudo com vias de tráfego.....	57
Figura 26 - Mapa do logradouro.....	59
Figura 27 - Modelagem – vista superior da edificação.....	60
Figura 28 - Modelagem – fachada do primeiro bloco	61
Figura 29 - Modelagem – fachada do segundo bloco	61
Figura 30 - Modelagem – lateral direita do primeiro bloco	62
Figura 31 - Modelagem – lateral esquerda do primeiro bloco	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percepção auditiva nas curvas de ponderação A, B, C	17
Tabela 2 - Coeficiente de absorção atmosférica (em dB/km).....	31
Tabela 3 - Níveis de incômodo de uma fonte de ruído.....	33
Tabela 4 - Padrões máximos de ruído externo conforme NBR 10151/2000	44
Tabela 5 - Medições de Sound Transmission Loss (TL)	46
Tabela 1 - Medições de Sound Transmission Loss (TL).....	47
Tabela 2 - Valores de STC para componentes construtivos.....	48
Tabela 8 - Parâmetros acústicos de verificação conforme NBR 15575/2013	48
Tabela 3 - Valores mínimos da diferença padronizada de nível ponderada, $D_{2m,nT,w}$, da vedação externa de dormitório conforme ABNT NBR 15575:2013.....	49
Tabela 4 - limites de ruído para motocicletas e similares.....	50
Tabela 5 - Simulação n° 1 do nível de ruído por banda de oitava.....	63
Tabela 6 - Simulação n° 2 do nível de ruído por banda de oitava.....	64
Tabela 7 - Simulação n° 3 do nível de ruído por banda de oitava.....	64

LISTA DE SIGLAS

NPS – Nível de Pressão Sonora.

LAeq – Nível de pressão sonora equivalente ponderada na curva “A”

ABNT – Associação Brasileira de Normatização Técnica

dB(A) – Decibéis em escala A

Hz – Hertz

Leq – Nível equivalente médio de ruído

TL – Sound Transmission Loss

STC – Sound Transmission Class

TNI – Traffic Noise Índice

Rw – weighted sound reduction index

DnT,w – weighted standardized level difference

D2m,nT,w – weighted standardized level difference at 2 m

RW – Índice ponderado de redução acústica - Índice de redução do som transportado pelo ar medido em laboratório

RESUMO

Este trabalho propôs-se a pesquisar, levantar dados e realizar simulações através de estudo de caso, que apoiassem o desenvolvimento dos projetos e a especificação de soluções, materiais e sistemas construtivos com melhor desempenho acústico. A modelagem acústica é uma ferramenta fundamental para estudo, diagnóstico e gestão do ambiente sonoro. O resultado é um conjunto de pontos que apresenta a disposição dos diferentes níveis sonoros em uma determinada área geográfica. O mapeamento sonoro pode ser realizado em diferentes escalas: pode-se mapear desde pequenos bairros até cidades inteiras. Na escala das cidades, ainda não há, no Brasil, mapeamento executado de maneira sistemática. Os mapeamentos localizados, executados para uma implantação específica, já são bem difundidos no meio técnico.

Palavras-chave: Modelagem, metodologia, mapeamento sonoro.

ABSTRACT

This paper proposed to raise data search and perform simulations through case study that support the development of projects and specifying solutions, materials and construction systems with better acoustic performance. Acoustic modeling is a fundamental tool for study, diagnosis and management of the soundstage. The result is a set of points that presents the arrangement of different sound levels in a given geographical area. The sound mapping can be done at different scales: one can map from small blocks up to entire cities. On the scale of cities in Brazil, yet there is no mapping performed in a systematic way. The localized mappings, executed for a specific deployment, already are well spread in the middle.

Key words: acoustic map, methodologies, model.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento das cidades, a poluição sonora tornou-se um dos mais sérios problemas urbanos, sendo hoje um dos principais desafios da gestão ambiental, uma vez que constitui uma questão de saúde pública. A exposição contínua a altos níveis de ruído pode causar sérios danos à saúde, desde a perda auditiva até efeitos neuropsíquicos (MURGEL, 2007, p.7).

Essa expansão tem sido acompanhada do adensamento populacional, do crescimento do fluxo de veículos e indústrias. O resultado é o aumento dos ruídos gerados em ruas, avenidas e, conseqüente, perturbação à comunidade. Além disso, está ocorrendo com frequência a invasão de residências nas áreas industriais, pois as fábricas que antes eram localizadas afastadas dos grandes centros, agora são cercadas por domicílios, escolas, comércio e até hospitais. Estas fábricas, geralmente, são antigas e com processos de fabricação ruidosos, ou seja, não possuem nenhum tipo de tratamento acústico.

Por isso, as comunidades afetadas fazem notificação aos órgãos como prefeituras pedindo que avaliem o ruído nas das edificações em função da perturbação provocada, pois se encontram em algumas cidades que permitem um nível máximo de ruído na comunidade.

Nesse trabalho, procura-se direcionar para ruído com propagação externa que impacta na comunidade lindeira. Nesse ínterim, o objetivo é levantar dados e realizar simulações que apoiem o desenvolvimento de projetos e a especificação de soluções, materiais e sistemas construtivos com melhor desempenho acústico visando o conforto dos ocupantes da edificação em zona urbana.

1.1 Justificativa

Segundo Murgel (2007):

Das palavras gregas *akouo* (ouço) e *akoustós* (que se pode ouvir) vem a acústica, o fenômeno de audição influenciado pelos condicionamentos do ambiente em que som e ruído se produzem e propagam. Há um ponto em que o som torna-se ruído; nessa altura, entram em jogo os efeitos danosos à vida (MURGEL, 2007, p.9).

O barulho nas grandes cidades brasileiras está colocando em lados opostos quem usa as noites para descansar e quem aproveita o período para trabalhar ou se divertir. Morar em uma cidade grande significa ter que conviver com barulho. Isso é inerente. Seja porque o progresso trouxe mais ruídos para dentro de casa ou porque no crescimento da metrópole, na busca por mais espaço, as pessoas acabaram indo morar mais perto do barulho (MURGEL,2007).

E ele, o barulho, é apontado pelo Instituto do Sono como uma das causas do aumento nos problemas para dormir. A estimativa é que 40% da população sofra com noites mal dormidas. Segundo Murgel (2007), quem emite sons e produz ruídos tem que arcar com a responsabilidade ambiental e social na sua propagação.

Nas últimas duas décadas, os estudos sobre os efeitos do ruído na audição e consequente melhoria da qualidade de vida do ser humano ganharam grande impulso, uma vez que o ruído pode causar distúrbios no sono e na saúde em geral do ser humano. Estes estudos buscam analisar a influência do ruído industrial na qualidade do ambiente exterior onde as pessoas circulam ou permanecem, sendo este tipo de ruído uma das maiores causas de reclamações das comunidades no órgão competente das cidades (OLIVEIRA FILHO, 2011).

Desta forma, o estudo apresentado nesse trabalho é relevante por se tratar de uma ferramenta fundamental para o estudo, diagnóstico e gestão do ambiente sonoro no tocante ao desenvolvimento de projetos de edificações com o fim de garantir o desempenho acústico das construções.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo analisar e concluir os resultados da previsão de ruído realizado em simulação computacional, dando subsídios para o atendimento das exigências de conforto acústico da Norma de Desempenho para edifícios habitacionais – ABNT NBR 15575:2013.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar os fundamentos da acústica ambiental, com ênfase na previsão de ruído através de simulação;
- Revisão bibliográfica;
- Explanar sobre as fontes de poluição sonora o impacto sobre edificação e as técnicas de controle acústico;
- Analisar e concluir o impacto do ruído nas edificações e as soluções para melhor desempenho acústico das edificações.

1.3 Limitações do Estudo

O presente estudo não visa apresentar todas as soluções existentes no controle do ruído, nem tão pouco mostrar a diversidade de fontes sonoras poluidoras, mas atem-se à soluções simples e viáveis que podem balizar decisões para um bom projeto que atenda à Norma de Desempenho para edifícios habitacionais.

1.4 Hipótese

A partir deste estudo, pretende-se que a indústria da construção tenha uma ferramenta preditiva que auxilie no projeto fornecendo informações sobre especificação de soluções, materiais e sistemas construtivos com melhor desempenho acústico. Dessa forma, os novos empreendimentos proporcionarão mais conforto e proteção dos usuários da edificação, pois terão tratamento adequado no que tange ao isolamento acústico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 *Introdução histórica do ruído*

É notório que em grande parte dos projetos é frequente a falta de preocupação com o conforto acústico, sendo assunto postergado e somente recebe relevância em face de impacto à construção do empreendimento ou quando se trata de obras especiais, cuja característica requer obrigatoriamente o tratamento do ruído, como por exemplo teatros, estúdios, casa de shows, cinemas e afins. A alegação para a desconsideração ao assunto é que se trata de grandes investimentos que somente se justificam em última estância (SOUZA, 2003)

Contrário a esse pensamento, os povos antigos, dentre os quais pode-se citar os gregos e romanos que já tinham a percepção da acústica em suas construções. Como exemplo podemos citar o Coliseu que sem seu formato circular proporcionava propagação do som no seu interior sem necessidade de aparelhos sonoros, sem, contudo, incomodar os presentes nesse recinto (SOUZA, 2003).

Figura 3 - Coliseu de Roma – Vista Externa



Fonte: ROMA, 2016

Com o advento do crescimento populacional nas cidades, tanto de veículos como de pequenos empreendimentos em zonas residenciais, tem se tornado cada vez maior a poluição sonora, e assim a poluição sonora torna-se um problema cada vez mais recorrente, apesar de fiscalização das autoridades e da regulamentação vigente, impor restrições explícitas quanto à perturbação sonora. Segundo Murgel (2007), esse incômodo é tratado somente como conforto. Contudo, é questão de saúde pública, pois pode provocar efeitos crônicos e irreversíveis à saúde da população em razão da localização, da intensidade e periodicidade do ruído produzido. Esse cenário reafirma a importância da antecipação dessa problemática ante o projeto arquitetônico o qual se destina a prever o impacto do ruído na edificação decorrente dessas fontes sonoras dando subsídios para o tratamento acústico adequado, evitando e prevenindo retrabalho em correção de falhas após a implantação do empreendimento.

2.2 Efeitos do ruído no homem

Segundo Gerges (2000), nosso ouvido humano é um sistema altamente sofisticado, mas requer cuidados, pois a prolongada exposição a diferentes frequências de ruído podem afetar e comprometer a audição. Para Murgel (2007), a definição de som diverge de ruído, pois esse último, segundo ele, é um desvirtuamento do som, cujo tem uma natureza repousante, não fadigam nem é estressante, tão pouco quebram o silêncio. Como exemplo, temos os sons da natureza que provocam sensações agradáveis diversas assim como o ouvir de uma música clássica, que pode “ofender” os ouvidos já desgastados de um amante de *heavy metal*. Para Mello (1999) o “som” é um termo tratado com sensação prazerosa, como música ou fala; mas, para ser percebido, é necessário que esteja dentro de uma faixa de frequência captável pelo mecanismo de audição. Esta faixa de audição compreende a área de frequências de 20 a 20000 Hz. Ele é definido como variação de pressão atmosférica dentro dos limites de amplitude e banda de frequências as quais a orelha humana responde.

Para Murgel (2007):

[...] outro fator a ser considerado é a oscilação da intensidade sonora. Ruídos contínuos às vezes são menos perturbadores do que aqueles com grandes variações. Por exemplo, o ruído – frequentemente em nível bastante elevado – de uma cachoeira é agradável e relaxante, enquanto o ladrar de um cão, repentino, pode levar ao estresse. (MURGEL, 2007, p. 36).

Como visto, o ouvido humano é sensível a uma larga faixa de intensidade, que vai desde o limiar de audição – a mínima intensidade sonora perceptível – até o limiar da dor, sendo a máxima intensidade suportável pelo indivíduo médio. Segundo Murgel (2007, p. 23) “o limiar da dor corresponde a 10^{14} vezes a intensidade acústica capaz de causar a sensação de audição. Para medir o som foi adotada uma divisão escala \log_{10} ”. Bistafa (2006) menciona que o bel, em homenagem a Alexander Graham Bell (1847 – 1922) é:

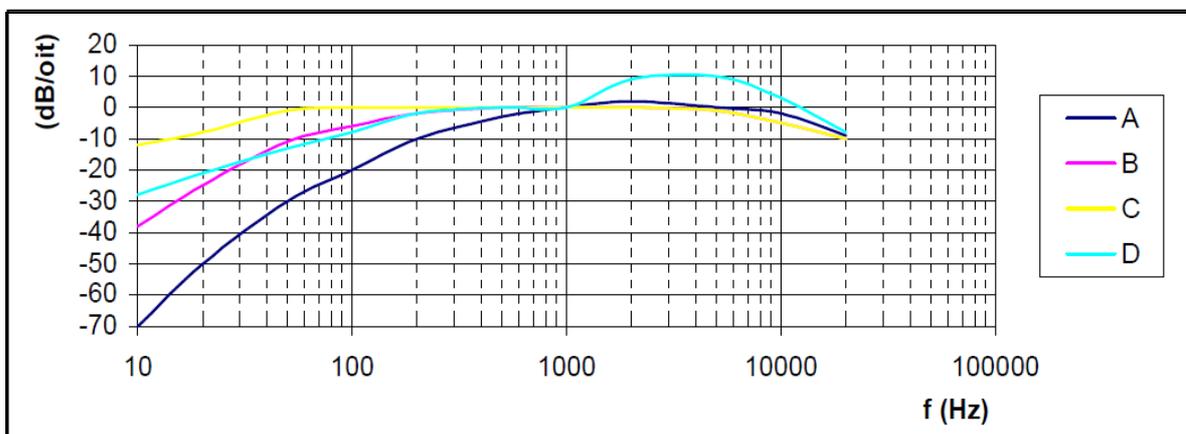
$$\text{Bel} = \log \frac{P}{P_0}$$
, sendo P a potência do sistema e P_0 uma potência arbitrária de referência.

Assim 1 bel equivale a $\log 10$; 2 bel, $\log 100$. É de grande vantagem utilizar essa escala na medição de ruído pois o ouvido não responde linearmente à excitação do som, mas sim a escala logarítmica a qual corresponde com muita aproximação à resposta do ouvido humano, por que o limiar de audição seria expresso como 0 dB (decibel) ($\log 1$). Segundo Murgel (2007) o bel é uma unidade de escala muito grande chegando ao $\log 10^{14}$ cujo representa o limiar da dor. E para este autor o um decibel é a menor variação que o ser humano pode ouvir e para tornar o som aparentemente duas vezes mais alto, é necessário um acréscimo de 10Db (MURGEL, 2007, p.24).

Contudo, vale ressaltar que o ouvido humano não é igualmente sensível a todas as frequências de ruído. Nas frequências extremamente baixas ou altas o ouvido é menos sensível, entretanto, nas frequências intermediárias (entre 1000Hz e 5000Hz) é mais sensível. A partir da evolução dos equipamentos eletrônicos para medir o nível de pressão sonora, criou-se os circuitos eletrônicos de sensibilidade variável com a frequência interna que

proporcionam uma correção dos níveis de energia a fim de modelar o comportamento do ouvido humano. Esses circuitos de compensação são mostrados na figura 2 e 3.

Figura 4 - Circuito de compensação A, B, C e D



Fonte: Santos, 2007

Figura 5 - Circuito de compensação

O circuito "A" foi originalmente concebido para aproximar-se das curvas de igual audibilidade para **baixos** NPS (Níveis de Pressão Sonora), próximo de 50 dB;

- O circuito "B" foi originalmente concebido para aproximar-se das curvas de igual audibilidade para **médios** NPS (Níveis de Pressão Sonora), próximo de 75 dB;
- O circuito "C" foi originalmente concebido para aproximar-se das curvas de igual audibilidade para **altos** NPS (Níveis de Pressão Sonora), próximo de 100 dB;
- O circuito "D" foi originalmente concebido para aproximar-se das curvas de igual audibilidade para **altíssimos** NPS (Níveis de Pressão Sonora), próximo de 120 dB.

Fonte: Santos, 2007

Gerges (2000) salienta que o circuito de ponderação A é mais utilizado atualmente por aproximar-se da curva de correção na escala (A) de sensibilidade do ouvido humano. Então, se um som de 50dB é medido na

frequência de 1kHz, não há correção, pois essa é a frequência de maior sensibilidade do ouvido humano (a título de curiosidade, essa é a frequência do ruído característico de um pernilongo, por isso esse inseto é capaz de causar tanta perturbação ao sono de uma pessoa) (MURGEL 2007, p.24).

Por outro lado, se o mesmo nível está na frequência de 250Hz o ouvido humano percebe um NPS = $50 - 8,9 = 41,1$ dB(A), conforme tabela 1.

Tabela 8 - Percepção auditiva nas curvas de ponderação A, B e C

FREQÜÊNCIA	Curva A	Curva B	Curva C
(Hz)	dB(A)	dB(B)	dB(C)
31,5	-39,4	-17,1	-3,0
63	-26,2	-9,3	-0,8
125	-16,1	-4,2	-0,2
250	-8,9	-1,3	+0,0
500	-3,2	-0,3	+0,0
1000	+0,0	+0,0	+0,0
2000	+1,2	-0,1	-0,2
4000	+1,0	-0,7	-0,8
8000	-1,1	-2,9	-4,4
16000	-6,6	-8,4	-8,5

Fonte: Santos, 2007

No que tange ao ruído ambiental, que por natureza é intermitente, faz-se necessário avaliá-lo para obter um valor representativo do ruído característico do local indicando além do ruído médio, também parâmetros que permitam caracterizar as oscilações sonoras e o impacto causado por ele. Como auxílio,

podem-se utilizar parâmetros estatísticos como facilitador na interpretação dos valores mensurados em campo. Os mais empregados são: L_{eq} (nível equivalente médio – “dose de ruído”) e os níveis estatísticos L_{10} e L_{90} .

2.2.1 Nível equivalente de pressão sonora, L_{eq}

O somatório da duração mais o nível de ruído são fatores potenciais de danos à audição do homem (GERGES, 2000). Os níveis de ruído variam com o intervalo de tempo. Para o cálculo do L_{eq} , que representa o nível sonoro médio e tem o codinome “dose de ruído”, que é a razão do tempo total que o indivíduo fica exposto a um nível de ruído pela máxima exposição diária permissível a este nível, será feita a integração especificada do tempo medida a cada segundo baseado na energia acústica – pressão sonora quadrática. O L_{eq} , é dado em dB e definido por:

$$L_{eq} = 10 \log \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right\} \quad \text{Equação[1]}$$

Em que:

T = $(t_2 - t_1)$ = tempo total de medição

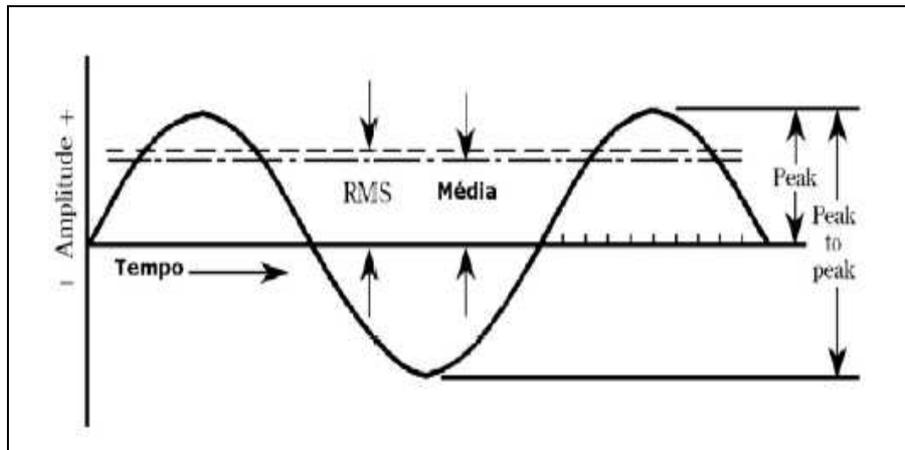
$p(t)$ = pressão sonora instantânea

p_0 = pressão de referência ($2 \cdot 10^{-5}$ N/m²)

O valor de nível de pressão sonora máximo (P_{peak}) e o valor médio ($P_{média}$) têm relação com RMS – Medida Total Global, de pressão sonora, que é expresso:

$$RMS = \frac{P_{peak}}{\sqrt{2}} = (0,707)P_{peak} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}(P_{média}) = (1,1)(P_{média}) \quad \text{Equação[2]}$$

Figura 6 - Variação da pressão sonora comparada com o valor de RMS e valor médio



Fonte: (Silva, 2009).

Essa grandeza constitui, portanto uma medida global simples que fornece apenas um nível em dB ou dB(A) sem informações sobre a distribuição deste nível nas frequências. O medidor utilizado para mensurar esse valor não necessita dispor de filtro e deve possuir dois circuitos RC, um com constante de tempo de 125 ms (milissegundos) (circuito rápido) e outro de 1s (segundo) (circuito lento) (GERGES, 2000).

Atualmente os medidores portáteis e fixos de nível de pressão sonora (medidores de dose de ruído) executam o cálculo automaticamente, sendo que os portáteis têm por finalidade a verificação da dose máxima diária permitida, os valores médios e de pico, pois são fixados no indivíduo e mensuram uma jornada dinâmica, ou seja, a exposição a níveis de ruído intermitente e contínuo simultaneamente.

2.2.2 Nível estatístico de ruído, L_n

Dois parâmetros são importantes e valiosos no estudo das causas de danos à audição. Para um estudo pormenorizado da exposição é fundamental o entendimento do histograma cumulativo emitido pelo aparelho, pois neste consta o percentual de tempo total de exposição em relação ao nível de

pressão sonora dB(A). O L_{10} é o nível sonoro que foi ultrapassado em 10% do tempo de medição, e é o mais utilizado no estudo de ruído ambiental (ruído de trânsito) e pode ser considerado como ruído máximo no período, excluídos os picos sonoros que ocorrem somente em 10% do tempo. (MURGEL, 2007). O L_{50} tem similaridade ao L_{10} por definição. Já o L_{90} representa o valor acima do qual os demais níveis permanecem 90% do tempo total de medição. (GERGES, 2000, p. 58). Este nível de ruído corresponde ao ruído de fundo. Esse nome expressa a definição de que quando cessada as principais fontes sonoras (por exemplo, ao término dos aplausos de uma plateia em espetáculo em local com sistema de refrigeração, ouvia-se um nível sonoro “de fundo” proveniente do ar-condicionado) (MURGEL, 2007).

Em resumo, observa-se que o L_{eq} é o ruído médio e é utilizado como parâmetro legal e normativo. Por outro lado, o L_{10} e o L_{90} indicam o grau de incômodo do ruído medido, pois apresentam claramente as variações de amplitudes sonoras. Por isso são utilizados em estudo de distribuição estatística do ruído. Vale ressaltar que ruídos de alta intensidade, isolados, são perturbadores e perceptíveis. Ou seja, grandes variações no nível de ruído são altamente incômodas. A perturbação sonora pode ser definida:

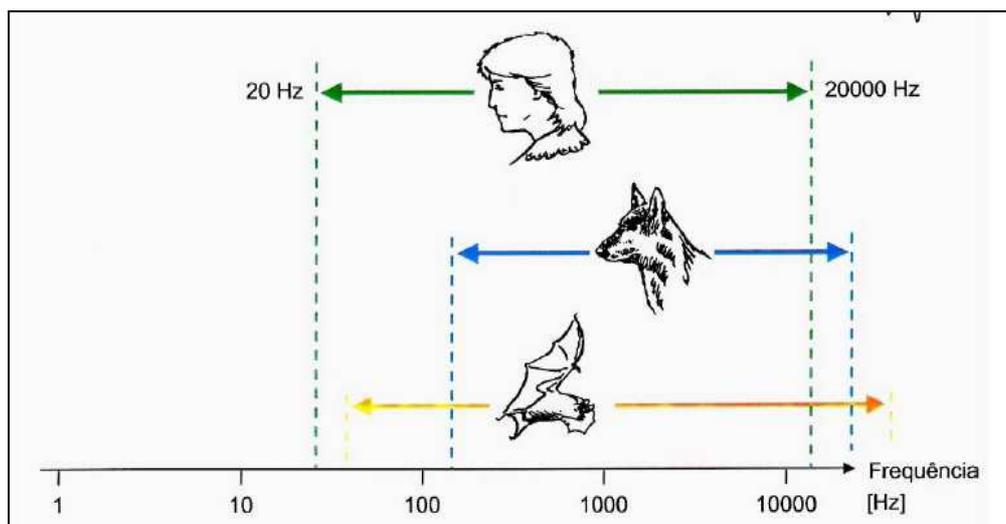
$$L_{ps} = L_{eq} + (L_{10} - L_{90}) \quad \text{Equação[3]}$$

No ruído ambiental os valores de $L_{m\acute{a}x}$ e $L_{m\acute{i}n}$ são pouco significativos haja vista ser um pico sonoro de ocorrência esporádica como o latido de cachorro, apesar de levar o $L_{m\acute{a}x}$ muito alto, não corresponde ao ruído característico do ambiente avaliado (MURGEL, 2007).

2.2.3 Frequência, f

O sistema auditivo consegue captar sons dentro a faixa de frequência que vai de 20 a 20000 Hertz (Hz), conforme figura 5:

Figura 7 – Sensibilidade do ouvido humano – Gama Auditiva



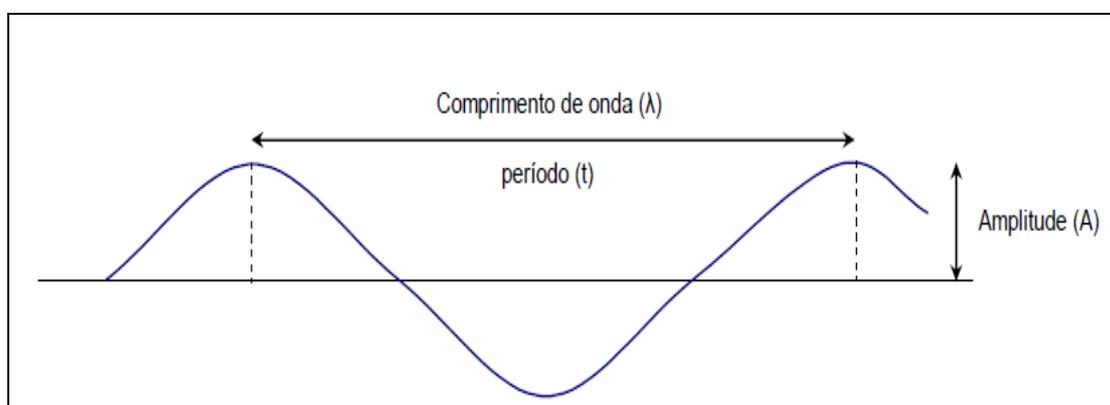
Fonte: Silva, 2009.

Hertz é a medida utilizada para expressar o número de ciclos que uma onda sonora completa por segundo, ou seja:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{Equação[4]}$$

Segundo Santos (2007), as ondas sonoras podem ser produzidas pelos corpos em vibração podem ser completamente caracterizadas considerando 3 parâmetros: a amplitude, o comprimento da onda e o período, como se pode observar na figura 6:

Figura 8 - Comprimento de onda – Parâmetros físicos



Fonte: Santos, 2007.

Para esse autor, a amplitude (A) corresponde à pressão máxima e mínima produzida pela vibração, o comprimento de onda (λ) corresponde à distância entre as cristas ou senos sucessivos e o período (t) corresponde ao tempo entre esses picos e a unidade depende do tipo de onda. (SANTOS, 2007, p. 7) Como exemplo, a amplitude de som e sinais de áudio normalmente são expressos em decibéis (dB).

O inverso da frequência de um som é o comprimento de onda e é representado por:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Equação[6]}$$

Em que:

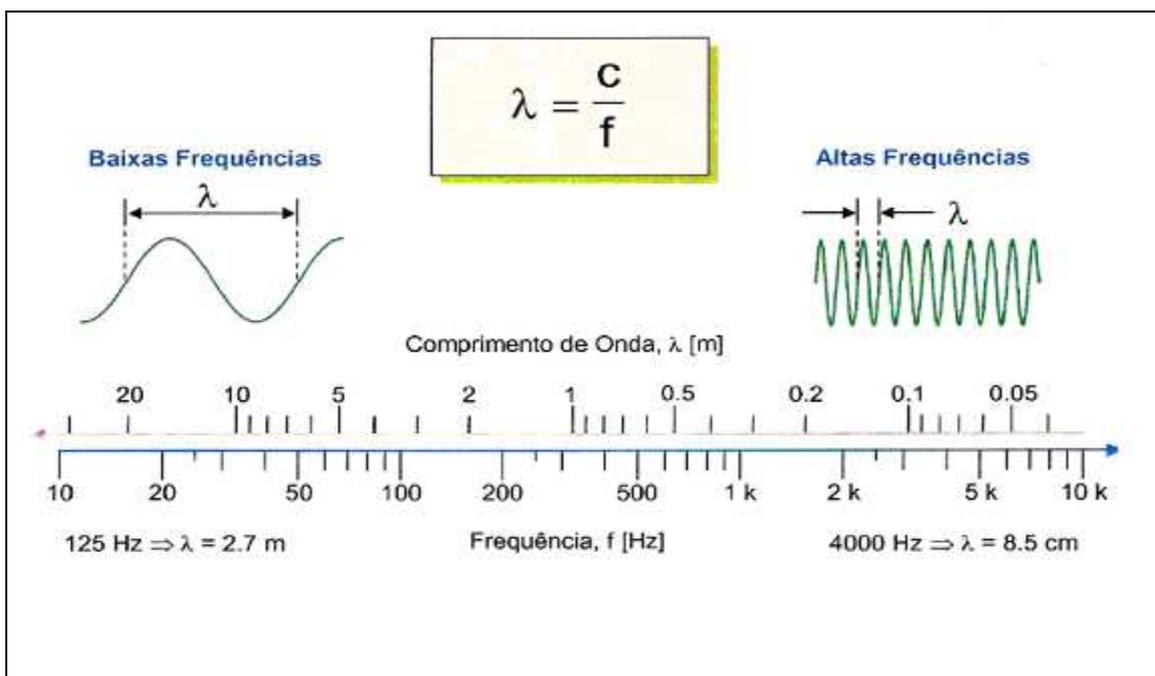
λ é o comprimento de onda (m/ciclos)

c é a velocidade do som (344 m/s)

f é a frequência (Hz ou ciclos/s)

As altas frequências correspondem ao pequeno comprimento de onda e vice-versa.

Figura 9 - Comprimento de onda VS. Frequência



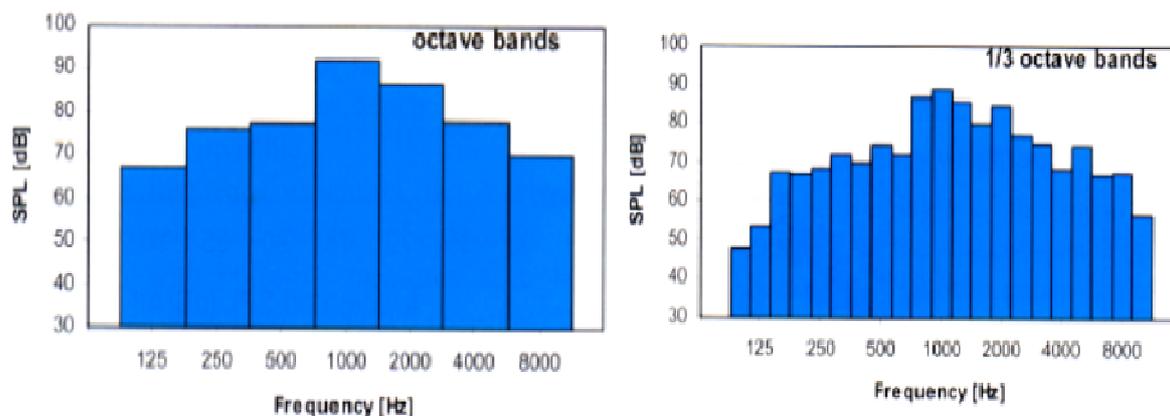
Fonte: Santos, 2007.

Para sons com frequências mais altas são denominados de ultrassons e são perceptíveis por animais como morcegos, baleias, cães e outros. Segundo Silva (2009):

A escala de frequências é dividida em intervalos normalizados designados de bandas, com largura de 1/1 oitava, 1/3 de oitava ou outra subdivisão, conforme o interesse de estudo. Cada oitava representa um intervalo utilizado em música para designar que entre duas notas a frequência duplica ou diminui para metade. Desse modo, um som de 100 Hz tem uma frequência de 200 Hz quando emitido numa oitava acima e 400 Hz quando emitido duas oitavas acima e assim sucessivamente (SILVA, 2009, p. 08).

Em se tratando de ruído produzido pelo tráfego, é necessário o uso de bandas de 1/3 de oitava, cujo é mais detalhado que o 1/8, como se pode observar na figura 8 e por vezes superiores, pois por meio desta conseguimos perceber a influência dos diferentes mecanismos que interferem com a produção do ruído (SANTOS, 2007).

Figura 10 - Espectros de frequência em bandas de oitava e 1/3 de oitava



Fonte: Santos, 2007.

O aparelho largamente utilizado para medição utilizando as bandas de 1/8 e 1/3 de oitava e que incorpora a malha de ponderação eletrônica que se aproxima da forma como o ouvido humano capta o som é sonômetro, popularmente chamado de decibelímetro. São internacionalmente reconhecidas quatro malhas de ponderação A, B, C e D conforme

apresentadas na figura 2. A malha de ponderação mais utilizada para quantificar o ruído de tráfego rodoviário, ruído industrial, ruído de tráfego aéreo, etc. é a A sendo expressa em dB(A) (SANTOS, 2007).

2.2.4 Somatório de ruído

O tratamento dado a várias fontes de ruído, no tocante ao somatório, tem um fator especial que deve ser levado em consideração. O somatório do nível de pressão sonora de duas ou mais fontes não pode ser obtido pela média aritmética dos níveis sonoras destas haja vista tratar de uma escala logarítmica segundo a expressão:

$$L_R = 10 \log (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}) \quad \text{Equação[7]}$$

Assim, na soma de duas fontes sonoras de mesma intensidade, obtêm-se 3dB(A) acima do valor de cada fonte individualmente. Dessa maneira, para se saber qual dessas fontes é a predominante, exclui-se uma delas e se reduzir o nível resultante em mais de 3 dB(A) ter-se-á encontrado a que emite maior nível de pressão sonora.

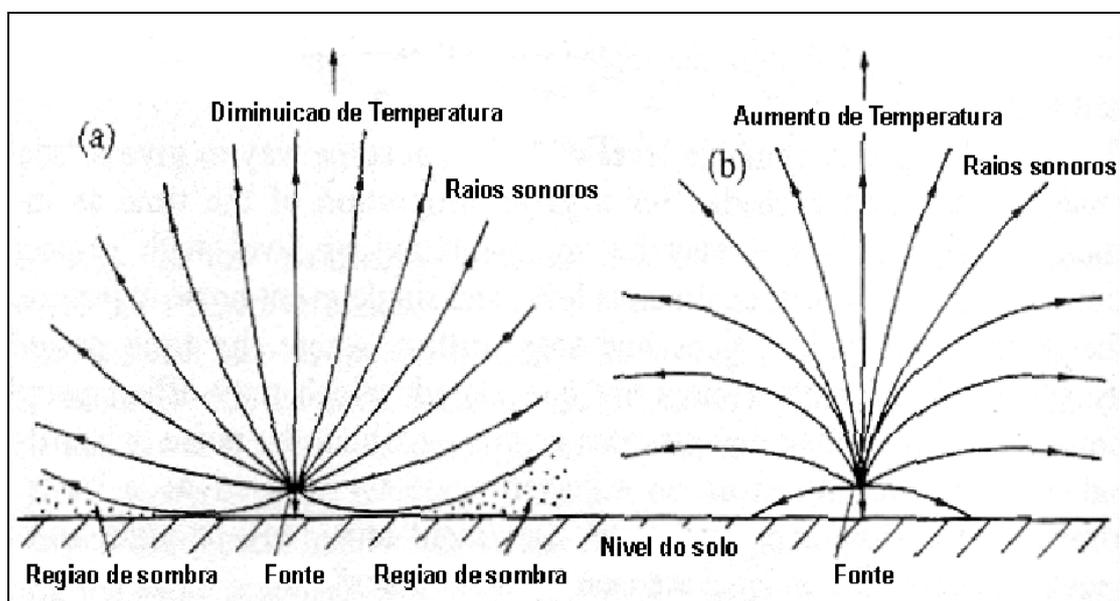
2.3 Propagação do som no ar livre e ruído ambiental

A propagação do ruído pelo ar tem algumas particularidades. A priori, é sabido que o ar não é um meio perfeitamente inelástico, cuja condição é ideal de propagação sonora. Assim, quando o ruído se propaga nesse meio há uma perda na transmissão aérea, sendo essa difícil de estimar, pois a variação é conforme a frequência e tem influência também de condições meteorológicas (temperatura, vento e umidade relativa do ar) (MURGEL, 2007).

As baixas frequências (sons mais graves) são audíveis à grandes distâncias da fonte de ruído, em contrapartida, os sons de alta frequência são atenuados (terá um decaimento) no ar tanto quanto maior a distância da fonte emissora.

A atenuação é muito influenciada pela condição climática. Por exemplo, tem-se maior atenuação com a diminuição da umidade relativa do ar, à mesma temperatura. No tocante à temperatura, pode-se dizer que é um assunto mais complexo, pois a variação da temperatura do ar ao longo do percurso da onda sonora, o modo como esta é atenuada e desviada é alterado ponto a ponto, o que leva a um comportamento da propagação do ruído muito difícil de previsão. Contudo, há uma maior atenuação do ruído em temperaturas intermediárias (dependendo da umidade relativa) e menor em temperaturas mais altas ou mais baixas (MURGEL, 2007).

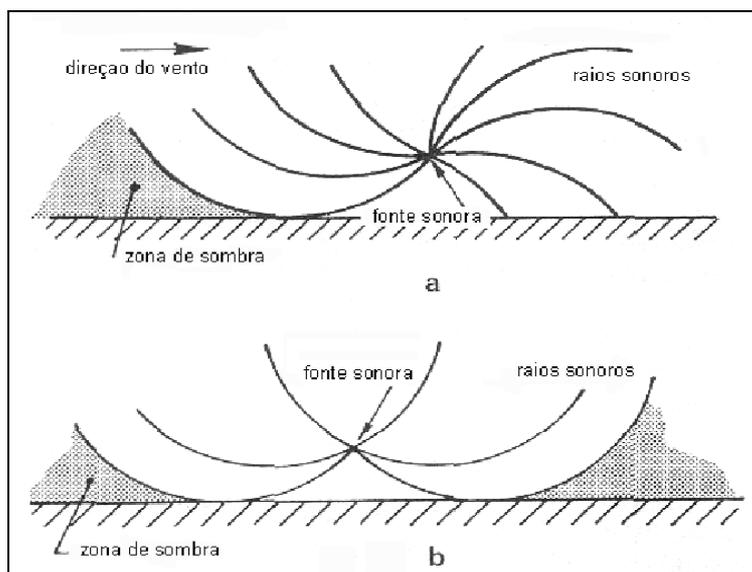
Figura 11 - Curvatura dos raios sonoros devido ao gradiente de temperatura



Fonte: Maia, 2003.

O vento também atua de forma significativa na propagação das ondas sonoras. Direta ou indiretamente. Indiretamente ele influencia no gradiente de temperatura e sofre as alterações supracitadas. De forma direta, as ondas sonoras se propagam na mesma proporção do movimento da massa de ar. Se as ondas estiverem na direção do receptor, então provocará neste o aumento do nível de ruído resultante, uma vez que o ar é o meio de propagação do som (MAIA, 2003).

Figura 12 - Curvatura dos raios sonoros pelos gradientes de vento (a) e temperatura (b)



Fonte: Maia, 2003.

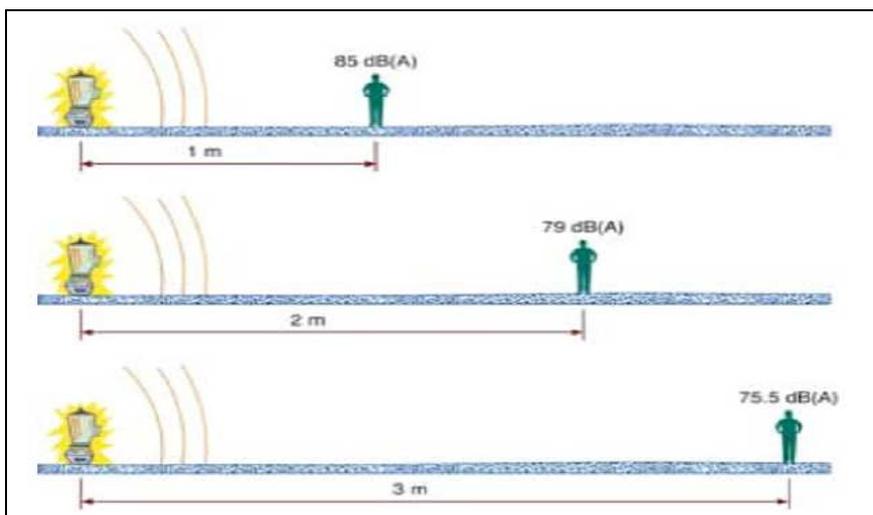
2.3.1 Propagação do ruído de veículos

Quando trata-se da propagação do ruído, um fator primordial a considerar é a fonte e o receptor. O que conta é a distância entre ambos, pois os níveis de pressão sonora diminuem pela lei do inverso do quadrado da distância, ou seja, quanto maior a distância, menor será o nível de ruído. Esta é a lei fundamental da acústica.

A título de exemplo, a figura 11 ilustra como há uma redução considerável no nível de ruído com o quadrado da distância. Um fonte a 1m do receptor emite um nível de pressão sonora de 85dB (A), mas com o quadrado da distância observa-se que o nível reduziu 6dB(A), porém com a triplicação da distância houve redução de 9,5dB(A) (SANTOS, 2007).

Assim, consegue-se entender bem esta relação da atenuação supramencionada pela relação entre o nível de pressão sonora a distâncias diferentes de uma fonte pontual pela equação 9.

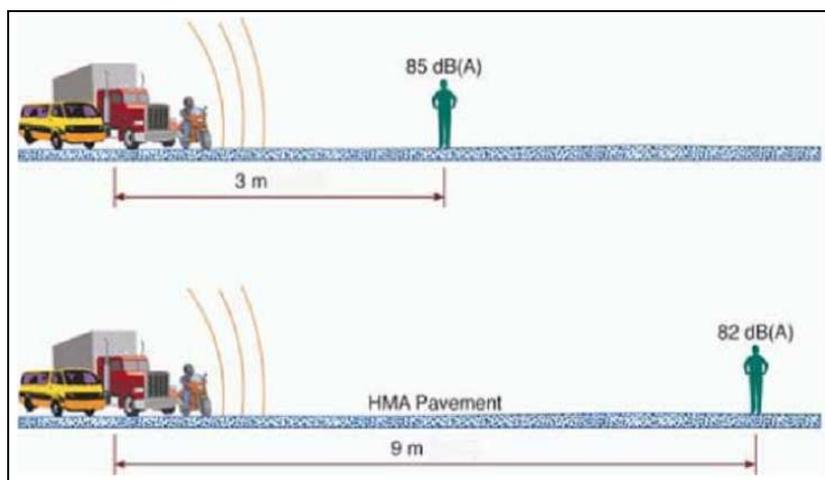
Figura 13 - Efeito da distância sobre uma fonte de ruído localizada



Fonte: Santos, 2007

No tocante ao fluxo de veículos o ruído se comporta de maneira distinta da anterior, pois neste caso o ruído é devido a um grande número de fontes espalhadas ao longo da pista. Assim, não comporta como ruído pontual, mas de linha. Então, para uma duplicação da distância em relação à fonte de linha a redução é de 3dB(A), em vez de 6dB(A) como se observa na figura 12.

Figura 14 - Efeito da distância sobre uma linha de fontes de ruído situada ao longo de uma superfície pavimentada



Fonte: Santos, 2007.

2.3.2 Atenuação do ruído com a distância

A propagação do ruído é esférica em todas as direções. Três componentes são essenciais para se estudar esse processo: a fonte sonora, as trajetórias de transmissão e o receptor. Dessa forma, a atenuação do ruído é feita à medida que há a propagação do som, e como essa energia é constante na frente da onda, então esse aumento de área implica uma diminuição da intensidade sonora, ou seja, o nível sonoro se reduz com a distância à proporção que o som diverge da fonte, a qual poderá ser direcional. Assim, quanto maior a distância da fonte, menor é a intensidade e impacto do ruído emitido por ela. Ainda mais, à medida que o som se propaga a partir da fonte, a atenuação dependerá da frequência (BISTAFA, 2006).

Segundo Bistafa (2006):

A absorção sonora do ar atmosférico atenua o som ao longo de sua trajetória. Reflexões no solo interferem com o som direto, causando atenuação ou, menos frequentemente, amplificação. Áreas densamente arborizadas, barreiras naturais e artificiais conferem atenuação adicional ao som. O espalhamento do som na copa de árvores pode reduzir a eficácia das barreiras. Gradientes verticais de vento e de temperatura refratam (“curvam”) as trajetórias sonoras para cima e para baixo, gerando regiões de “sombra” acústica, alterando a interferência como o solo e modificando a efetividade das barreiras (BISTAFA, 2006, p. 187).

A equação básica que traduz a propagação sonora ao ar livre é:

$$L_p(r, \theta) = L_w - 20 \log r + DI\theta - 10 \log \frac{\Omega}{4\pi} - A_{combinada} - 11 \text{dB} \quad \text{Eq. [8]}$$

Em que:

Ω é o ângulo sólido disponibilizado para a fonte para a livre propagação, e $A_{combinada}$ é a combinação de todos os mecanismos significativos de atenuação sonora entre a fonte e o receptor. No tocante à divergência da onda, a equação anterior indica que à medida que há a duplicação da distância fonte-receptor (r), para uma fonte pontual, o nível sonoro reduz 6 dB(A). Se

essa distância é aumentada por um fator de 10, então haverá uma queda de 20dB (BISTAFA, 2006).

O decaimento para uma fonte pontual pode também ser calculada da seguinte maneira:

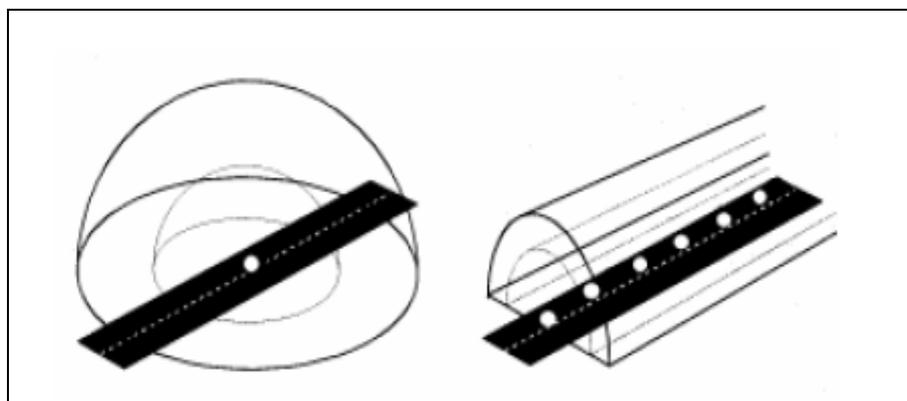
$$L_2 = L_1 - 20 \log \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \quad \text{Equação[9]}$$

Numa fonte linear o decaimento do nível sonoro é menos intenso, havendo uma perda de 3dB(A) a cada vez que dobra-se a distância da fonte. Isso se dá porque para uma fonte linear, a propagação do som não se dá de forma esférica, mas cilíndrica. Utiliza-se a seguinte fórmula para calcular:

$$L_2 = L_1 - 10 \log \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \quad \text{Equação[10]}$$

Um exemplo de fonte linear é a rodovia, com ressalvas. Nela, o ruído é gerado por pontos emissores (os veículos) que se movem numa mesma linha, por isso não são contínuos nem constantes em toda a sua extensão, como mostra a figura 13. Sendo esse um dos principais problemas no impacto ambiental nas cidades. E o mais agravante é que a cada ano o número de veículos é crescente.

Figura 15 - Tipos de fonte de ruído, relativamente à forma como propagam o ruído. Um veículo representa uma fonte pontual (esq.). Vários representam uma fonte linear (dir.)



Fonte: Silva, 2009.

Segundo Murgel (2007):

O ruído máximo de um tráfego de uma rodovia, causado por um veículo isolado que passou em determinado momento, tem o comportamento de fonte pontual, devendo, portanto, ser aplicada a fórmula específica para esse caso. Já o ruído residual de tráfego, que se apresenta constante ao longo da via, tem o comportamento puro de uma fonte linear. Assim, conforme nos distanciamos de uma rodovia, o ruído proveniente dela se torna cada vez mais contínuo, pois o decaimento do L_{10} é mais intenso que o L_{90} , o que, a maiores distâncias, equipara as intensidades dos diferentes níveis estatísticos (L_{10} , L_{90} , L_{eq}), caracterizando uma fonte sonora contínua (MURGEL, 2007, p. 28).

Dessa feita, observa-se que no tratamento estatístico os 03 (três) parâmetros supramencionados são de suma importância para a distinção do comportamento do ruído no tocante ao ruído de tráfego. O L_{10} quase se aproxima de uma fonte pontual, já o L_{90} se assemelha mais a uma fonte linear, contudo o L_{eq} tem um comportamento intermediário.

A atenuação (A_{atm}) na distância d , devido à propagação do som no ar é dada pela seguinte equação:

$$A_{atm} = \frac{\alpha \cdot d}{1000} \quad \text{Equação[11]}$$

Em que:

α é um coeficiente de atenuação atmosférico, em decibel por quilômetro, determinado para cada banda de oitava para uma temperatura de 15°C e umidade relativa de 70%. Estas se encontram em conformidade com os valores fornecidos pela norma ISO 9613-1:1993 e são consideradas como representativas das condições climáticas metropolitanas (SANTOS, 2007).

No caso de ruído no exterior existem fatores que influenciam significativamente na redução dos níveis de pressão sonora. Segundo Silva (2009) a atenuação é dada por:

$$A_{total} = A_{div} + A_{atm} + A_{solo} + A_{barreira}$$

Em que:

Adiv - atenuação geométrica (dB)

Aatm - atenuação atmosférica (dB)

Asolo - atenuação por efeito de absorção no solo (dB)

Abarreira - atenuação devido à presença de barreiras (dB)

Tabela 9 - Coeficiente de absorção atmosférica (em dB/Km) por banda de oitava [Norma XP S31-133, 2001]

Frequência central nominal (em Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α (em dB/Km)	0,38	1,13	2,36	4,08	8,75	26,4

Fonte: Santos, 2007.

Segundo Silva (2009):

[...] na determinação da atenuação junto ao solo e para distâncias inferiores a 100m são considerados três tipos de solo (rígido, macio e muito macio). Os solos rígidos ou mais densos tendem a refletir o ruído, enquanto os solos macios ou mais porosos tendem a absorver. Para pequenas distâncias e numa aproximação muito grosseira, a atenuação (*Asolo*) junto a um terreno rígido seria de -3dB ou de 1 a 5dB em terrenos macios (SILVA, 2009, p. 12).

Assim, para cálculo da atenuação total (*Atotal*), e sabendo o nível de potência sonora da fonte (*Lw*), determina-se o nível de pressão sonora do receptor (*Lp*) pela seguinte equação:

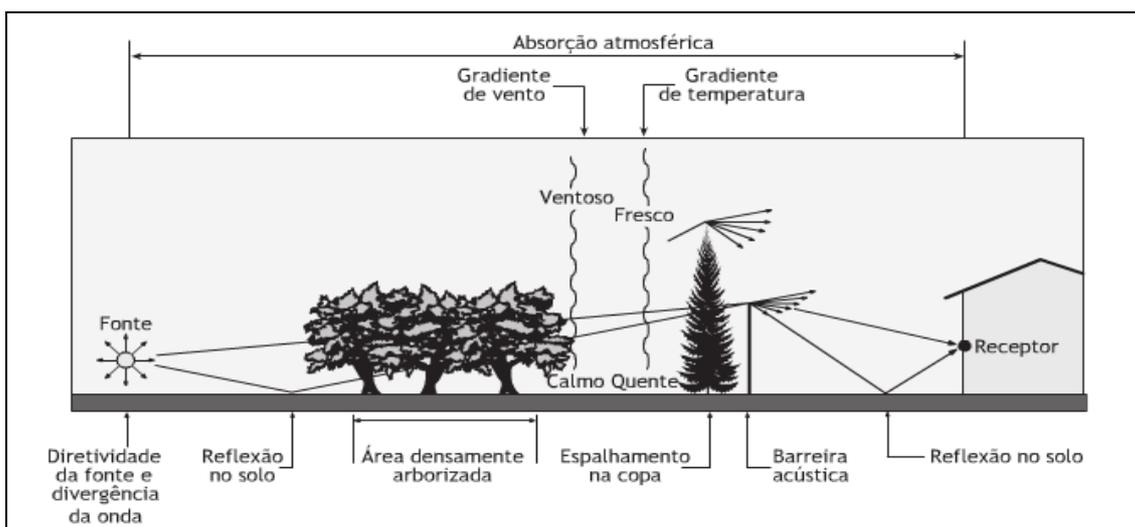
$$L_p = L_w - A_{total}$$

Equação[12]

2.3.3 Principais mecanismos de atenuação sonora ao ar livre

Podem ser citados inúmeros mecanismos de atenuação, todavia, as figuras 16 e 17 a seguir, mostram os mais significativos na atenuação sonora ao ar livre.

Figura 16 - Mecanismos mais significativos de atenuação sonora ao ar livre



Fonte: Bistafa, 2006.

Figura 17 - Principais mecanismos de atenuação sonora ao ar livre

Mecanismo	Descrição sucinta	Atenuação aproximada de 5 dB		
		Condições	À distância de	
Absorção do ar 	Absorção sonora do ar atmosférico.	A 10 °C e 70% de umidade relativa.	800 m	A
			1.500 m em 50 Hz 250 m em 4 kHz	Oitava
Solo macio 	Interferência (quase sempre destrutiva) entre o som direto e o refletido sobre o solo acusticamente "macio".	Para alturas da fonte e do receptor da ordem de 1.2 m.	85 m	A
			10 m em 250 e 500 Hz 50 m em 125 e 1.000 Hz Não há em 63 e 2.000 Hz	Oitava
Barreira 	Atenuação provocada por uma barreira acústica entre a fonte e o receptor, combinada com uma atenuação adicional de solo acusticamente "macio".	Quando o receptor encontra-se na sombra acústica gerada pela barreira, em temperaturas normais e sem vento.	Todas	-----
Edificações 	Atenuação provocada por edificações entre a fonte e o receptor.	Com uma fileira de edificações com aproximadamente 25% de abertura.	Todas	-----
Vegetação densa 	Atenuação provocada por vegetação densa entre a fonte e o receptor.	Áreas com muitas árvores e vegetação densa no solo.	30 m	A
			100 m em 500 Hz 50 m em 4.000 Hz	Oitava

Fonte: Bistafa, 2006.

Essas figuras (14 e 15) resumem os principais mecanismos de atenuação sonora ao ar livre, e indica em que condições cada um deles é mais significativo.

2.4 Incômodo do ruído

A incomodidade do ruído, independentemente dos limites legais e dos efeitos à saúde, os níveis de aceitação do ruído variam conforme o receptor e o ruído de fundo existente. Na comunidade, um nível de pressão sonora de 65dB(A) quando surge é fator de reclamações. Para um nível sonoro de 75dB(A) estas tornam-se generalizadas e a partir de 80dB(A) inaceitáveis. A tabela 3, apresenta os níveis de incômodos de uma fonte de ruído que aumentada em 10dB(A) acima do ruído de fundo pré-existente provoca alta perturbação (BISTAFA, 2006).

Tabela 10 - Níveis de incômodo de uma fonte de ruído

Alta perturbação	Ruído de fundo + 10dB(A) ←
Média perturbação	Ruído de fundo + 5dB(A) ←
Pequena perturbação	Ruído de fundo + 3dB(A) ←
Audível	Ruído de fundo – ruído de fundo ←
Não audível	

Fonte: Murgel (2007, p.37).

Para Murgel (2007) pode se propor a classificação do nível de ruído em três categorias distintas, sendo elas:

- Danos à audição;

- Prejuízos à saúde;
- Perturbação.

A exposição a níveis acima de 85dB(A) e 90dB(A), de forma contínua, são danosos ao aparelho auditivo. Em locais como fábricas com muitas máquinas ruidosas ou locais de atividades recreativas, como boates e casas de espetáculos, podem gerar níveis muito elevados de pressão sonora prejudicando a audição dos receptores. Para os ambientes externos, os prejuízos são observados quando os níveis ultrapassam a 70dB(A) no período diurno e 60dB(A) no noturno. Os danos são visíveis em exposição contínua e de longa duração. Em locais próximos às vias de tráfego intenso, subestações elétricas, atividades comerciais, escolas, cultos religiosos, atividades esportivas, indústrias e demais atividades ruidosas, sem a presença de obstáculos naturais à propagação do som, os danos à saúde são agravados em até a distância de algumas centenas de metros da fonte.

Apesar de serem relativamente baixos esses níveis, seus efeitos são de ordem psíquica, que além de provocar irritação, dificultam a conversação normal, capacidade de concentração, o sono, e comprometem a eficiência no trabalho intelectual e contribuem para o estresse – o mal do século.

Não existem estimativas mundiais a respeito do impacto e dos custos relacionados ao ruído ambiental, ou comunitário. Contudo, estima-se que na Europa 80 milhões de pessoas sejam afetadas por níveis inaceitáveis de ruído: distúrbios do sono, irritação, e outros adversos. Outros 170 milhões de Europeus vivem em áreas onde os níveis de ruído diurnos causam sérios incômodos. Em termos econômicos, estima-se que o ruído ambiental custe à sociedade Européia entre 0,2 e 2% de seu PIB – Produto Interno Bruto (MELO, 2011).

O nível de conforto ou de perturbação acústica é feito em função do ruído interno dos edifícios receptores, sendo considerados dentro dos padrões normais conforme cada finalidade dos locais (varia de 35dB(A) por exemplo,

para quartos de hospitais, até 65dB(A), para ambientes de trabalho menos sensíveis) (BISTAFA, 2006)

Para Bistafa (2006) as pessoas reagem de maneira diferente ao mesmo ruído. Podendo ser imperceptível a uma pessoa, mas incômodo para outra. Não importa o volume, contanto que seja audível alguém fará objeção a ele por uma razão ou por outra. Para o autor, a reação comunitária depende das características do ruído intrusivo ou intruso tais como aceleração exagerada de uma motocicleta ruidosa, ou de um veículo com silenciador danificado, como mostra a figura 16.

Figura 18 - Ruído intrusivo



Fonte: Melo, 2011.

Para a garantia absoluta do sono de qualidade, o nível de ruído de fundo deve ser da ordem de 35dB(A) e os picos sonoros nunca devem ultrapassar 10dB(A) desse valor, sendo considerada como limiar de conforto auditivo a marca de 55dB(A). Assim, uma atividade ruidosa pode causar perturbação sonora em uma área mais extensa, como no caso do ruído de tráfego ou de alguma fonte fixa que sobrepuje os sons naturais. Embora, nessa condição não esteja

claramente definida a poluição sonora, pode-se caracterizar a existência de “ruído”, pois há uma alteração na condição sonora que evidencia os sons mais “desagradáveis”. A opção pelo controle justifica-se pela manutenção dos níveis de conforto acústico (MURGEL, 2007, p. 53).

2.5 Efeitos fisiológicos do ruído

2.5.1 Perda auditiva

Segundo Mendes (2003, p.1261), “o dano auditivo produzido pela exposição a níveis de pressão sonora pode ser classificado em três tipos: o *trauma acústico*, a *perda auditiva temporária* e a *perda auditiva permanente*”.

O *trauma acústico* é denominado como a perda súbita, no caso de uma explosão ou uma detonação (MENDES, 2003).

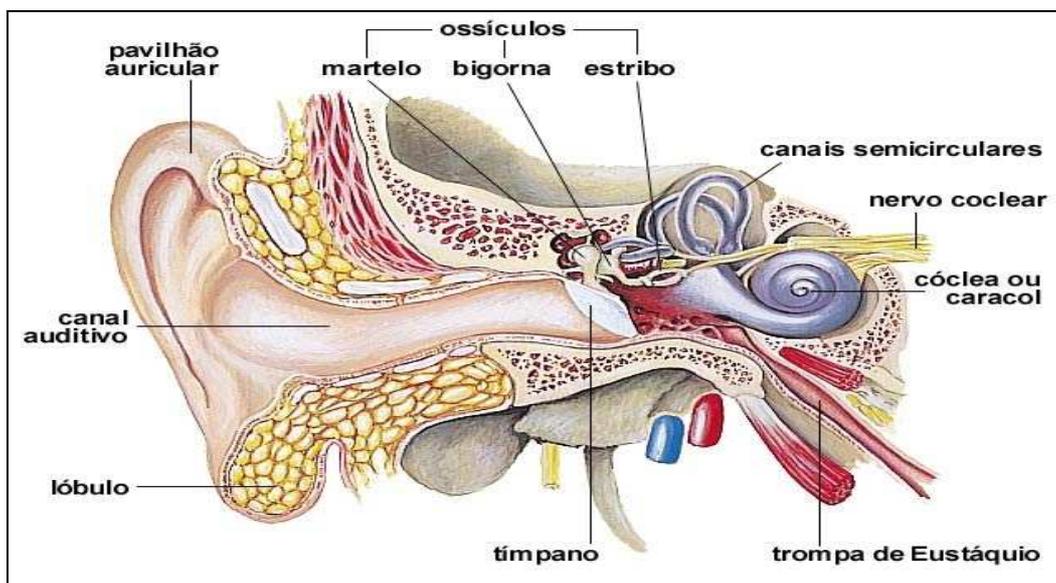
A *perda auditiva temporária* ocorre em tempo curto logo após a exposição a ruído intenso e tende a regredir progressivamente com o passar do tempo (MENDES, 2003).

Já a *perda auditiva permanente* ou irreversível dá-se com a exposição frequente a elevados níveis de ruído, pois destrói os setores do Corti em grau maior ou menor. Um detalhe importante é que cessada a exposição ao ruído, a perda deixa de progredir (MENDES, 2003).

2.6 Fisiologia do ouvido humano

O sistema auditivo humano, conforme figura 17, apresenta a morfologia e fisiologia do ouvido humano que é dividido em três partes: orelha externa, orelha média e orelha interna.

Figura 19 - Morfologia do ouvido humano

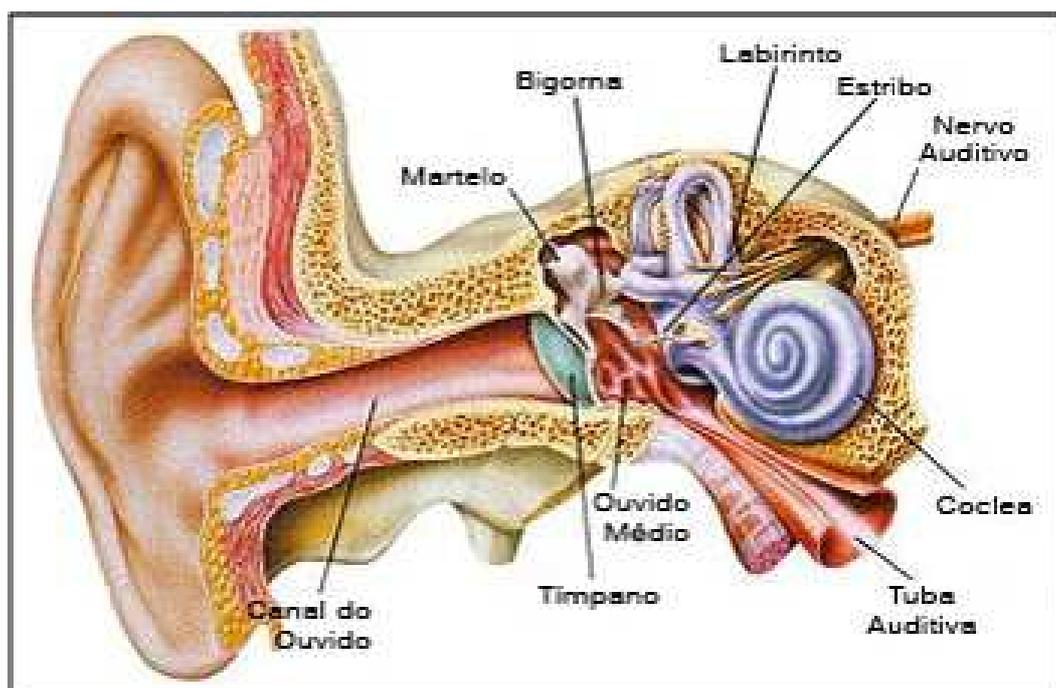


Fonte: Gerges, 2000.

2.6.1 Orelha externa

A orelha externa, conforme figura 18, compreende o pavilhão auricular (ou orelha), o meato acústico externo e a membrana do tímpano.

Figura 20 - Orelha externa

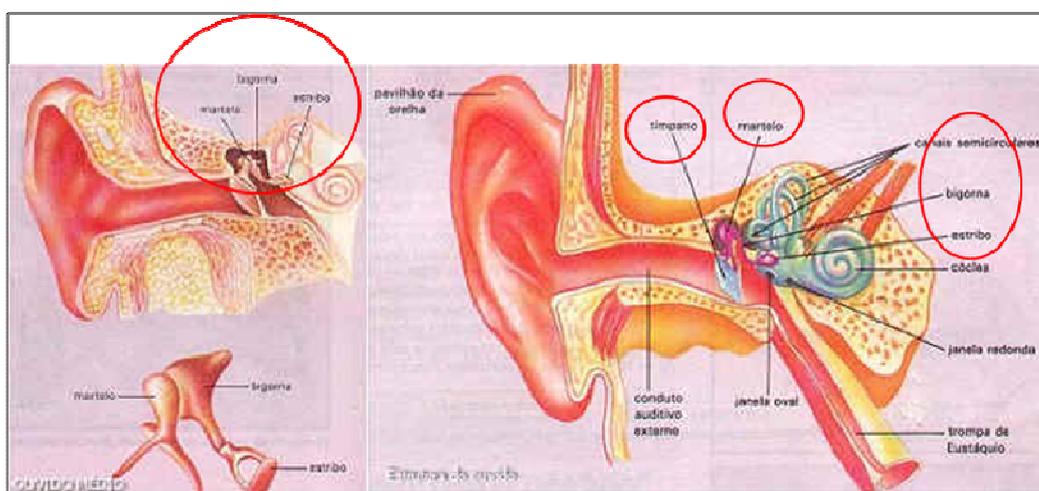


Fonte: Gerges, 2000.

2.6.2 Orelha média

A **orelha média** começa na membrana timpânica e consiste, em sua totalidade, de um espaço aéreo – a cavidade timpânica – no osso temporal. Dentro dela estão três ossículos articulados entre si, cujos nomes descrevem sua forma: **martelo**, **bigorna** e **estribo**. Esses ossículos encontram-se suspensos na orelha média, através de ligamentos. A figura 19 apresenta a fisiologia da orelha média.

Figura 21 - Orelha média

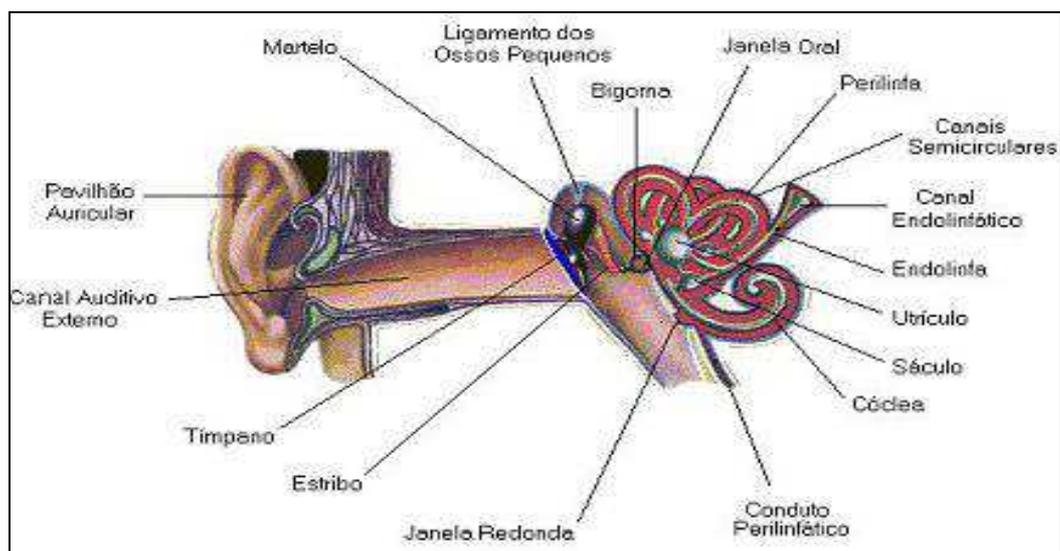


Fonte: Gerges, 2000.

2.6.3 Orelha interna

A **orelha interna**, chamada **labirinto**, é formada por escavações no osso temporal, revestidas por membrana e preenchidas por líquido. Limita-se com a orelha média pelas janelas oval e a redonda. O labirinto apresenta uma **parte anterior**, a **cóclea** ou **caracol** - relacionada com a **audição**, e uma **parte posterior** - relacionada com o **equilíbrio** e constituída pelo **vestíbulo** e pelos **canais semicirculares**. A figura 20 apresenta a fisiologia da orelha interna.

Figura 22 - Orelha interna



Fonte: Gerges, 2000.

2.7 Fontes sonoras

2.7.1 Principais tipos de fontes sonoras

O ouvido capta as ondas sonoras, que podem ser Planas ou Esféricas, através do ouvido externo e passa para o ouvido interno através do conduto auditivo e chega até a cóclea que possui mais de 60000 células ciliares. Para Gerges (2000, p.2) a geração do ruído é causada pela variação da pressão ou da velocidade das moléculas do meio sendo transmitida em forma de energia pela colisão entre elas. Pode-se ilustrar o fenômeno pelo diapasão, o qual ao vibrar produz movimento nas moléculas de ar ao seu redor e adquirem movimento vibratório na frequência de vibração dele. Essas vão sendo transmitidas através de choque entre elas. A perturbação provocada pelo diapasão gera o que vai ser transmitido de molécula em molécula na forma de uma onda, chamada de *onda sonora*.

Segundo Bistafa (2006) as ondas sonoras Planas têm particularidades em sua ocorrência. Essas ocorrem, por exemplo, no interior de um duto com diâmetro bem menor que o comprimento de onda. Contudo, no dia a dia, as ondas

Esféricas são mais representativas. Essas últimas são as chamadas fontes *pontuais*. Para o quadrado da distância, em relação à fonte, o nível de pressão sonora cai pela metade e dobra seu valor com o dobro da mesma distância correspondendo a uma queda de 6dB no Nível de Pressão Sonora (NPS).

A título de exemplo pode-se dizer que uma rodovia é considerada uma fonte *linear* com exceções. Conforme Murgel (2007, p. 28) os veículos são pontos emissores, contudo o ruído emitido por esses não são contínuo tampouco constante durante a extensão da via. Contudo, essa mesma fonte pode ser também *pontual*, se considerar que esse veículo isolado na pista passa por um determinado momento na extensão da via. Desta forma, o ruído será o máximo de tráfego naquele trecho. Ainda mais, pode-se considerar o ruído residual de tráfego como *linear*, pois apresenta-se constante ao longo da via (MURGEL, 2007).

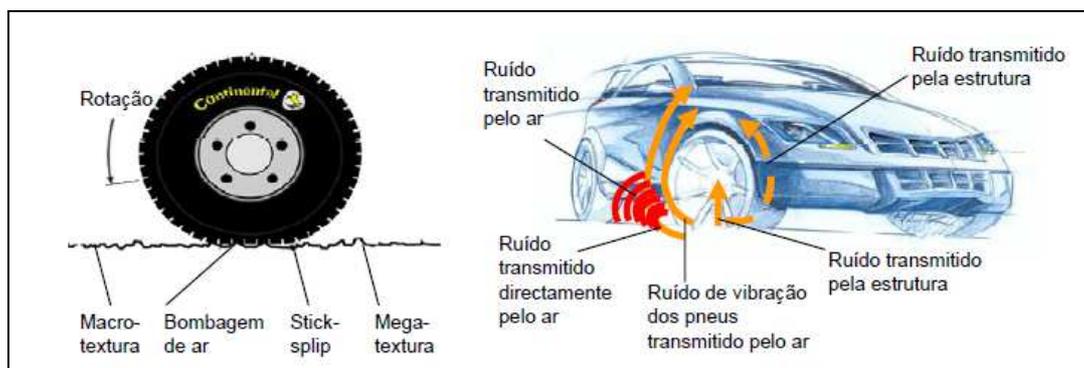
2.7.2 Ruído de tráfego

É processo complexo estimar o ruído de tráfego, haja vista haver diferentes tipos como, por exemplo, o tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo, somente para citar. Contudo, vale ressaltar que as fontes supramencionadas são contribuintes em grande escala para a poluição sonora e ambiental no que se refere ao tráfego. O modal rodoviário dentre esses merece destaque, pois no Brasil a malha viária é extensa e por isso 63% das cargas e 97% dos passageiros são transportados em rodovias (CALLAI, 2008).

O ruído de veículos é proveniente de pelo menos três tipos fontes, conforme figura 21:

- Motor;
- Pneu/pavimento;
- Aerodinâmico.

Figura 23 - Fontes do ruído rodoviário: interação pneu/pavimento (à esquerda) e funcionamento do veículo (à direita)



Fonte: Santos, 2007.

A contribuição do pneu/pavimento é bem expressiva como pode-se observar na figura 21. Nessa figura, nota-se a contribuição de cada tipo de fonte e também percebe-se a parcela total. Segundo Callai, (2008, p.23) considerando-se a velocidade do veículo a 110km, a participação do ruído pneu/pavimento chega a 78% contra 12% do motor, escapamento e sistema de transmissão e 10% do ruído aerodinâmico. Vale ressaltar que o ruído pneu/pavimento depende de vários fatores: idade do veículo e modelo, peso por eixo, tipo e tamanho, textura e material de composição dos pneus, ou seja, é um mecanismo muito complexo visto acontecerem de maneira simultânea e somarem para compor o ruído total.

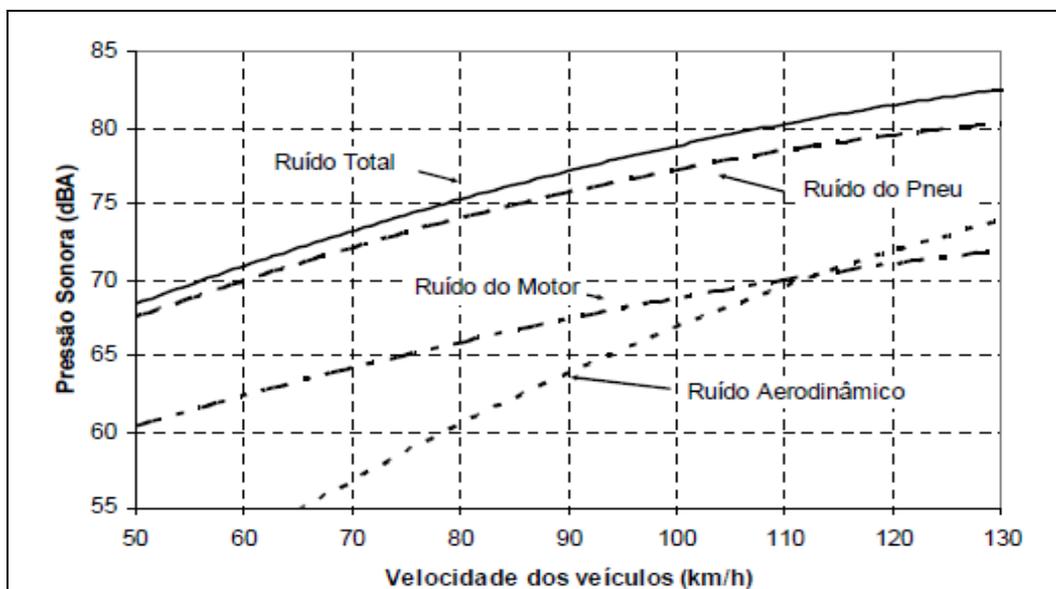
Segundo Santos (2007):

Para caminhões e autocarros, o cruzamento entre o ruído do motor e o ruído pneu/pavimento ocorre a velocidades mais elevadas (60 – 70 Km/h). No entanto, num estudo apresentado por Sanz (2006), é referido que no caso de veículos leves circulando até 50 ou 60 Km/h, a influência na geração de ruído é predominantemente do motor sendo que a velocidades mais elevadas predomina o ruído pneu/pavimento. Este limite é de 70 ou 80 Km/h para os veículos pesados (SANTOS, 2007, p. 17).

Outro fator contribuinte para o ruído nas zonas urbanas é o mau uso da buzina, traçado da via e o pavimento. O Código de Trânsito Brasileiro determina que esse equipamento deve ser acionado com um toque breve, não sendo permitido o acionamento contínuo por se tratar de um dispositivo de segurança

apenas para chamar a atenção de transeuntes, veículos ou outros que possam estar em situação potencialmente perigosa.

Figura 24 - Fontes do ruído rodoviário e sua influência



Fonte: Callai, 2008.

No tocante ao traçado da via pode-se dizer que tem por objetivo permitir o fluxo de veículos e constitui o meio de acesso às residências ou outros pontos receptores de ruído proveniente do tráfego do modal rodoviário. Para evitar maior impacto nas áreas urbanas por estes, é importante as autoridades responsáveis pelo tráfego projetar, quando possível, o traçado da via de modo a distanciar esta fonte dos locais onde há receptores residenciais, além de escolas, hospitais e outros tipos de ocupação sensíveis ao ruído. Não sendo possível, recomenda-se o aproveitamento das características da via para evitar as acelerações, cujo apresentará uma redução significativa no ruído nessa região. Esse aproveitamento pode ser feito evitando cruzamentos e travessias de pedestres em nível, pois causa constantes paradas dos veículos, que ao retornar seu movimento tem a aceleração que gera um alto nível de ruído.

Quanto ao pavimento, sua contribuição é significativa na composição do ruído de tráfego. Nesse fator, o ruído é gerado pelo atrito entre pneus e pavimento,

ocorre, predominantemente, por golpes do pneumático nas rugosidades do piso. Esses golpes são proporcionais à rugosidade do pavimento, ou seja, quanto menor for a rugosidade, menor serão os golpes, e menor é a vibração, então, menor será o nível de ruído e sua frequência.

2.8 Normatização e legislação

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), um dos órgãos responsáveis pelo controle e redução da poluição sonora no Brasil, possui resoluções que permeiam resoluções relacionadas à questão do ruído. Em 1980 foi publicada a Resolução nº 92, do Ministério do Interior que determinava que qualquer fonte de emissão sonora não deveria ultrapassar, no ambiente externo, o nível máximo de 10dB(A) acima do ruído de fundo preexistente no local, que é um parâmetro bem relevante para avaliar o grau de incômodo de um ruído. Além disso, a presente estabelecia que, independentemente do ruído de fundo, deveriam ser respeitados os limites máximos de 70dB(A) no período diurno e 60dB(A) no noturno, que são os níveis a partir dos quais já se evidenciam danos à saúde. Contudo, após muitas críticas, essa resolução foi revogada dez anos após sua publicação. Assim, em 8 de março de 1990 foi publicada a Resolução nº 1, do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, que refere-se à emissão de ruídos de quaisquer atividades e sua relação com a saúde e sossego do público e, em linhas gerais, manteve os principais pontos da Resolução nº 92/1980 quanto ao ruído de veículos, ambientes internos e locais de trabalho.

A resolução 001 do CONAMA remeteu aos critérios e diretrizes das normas (NBR 10151/2000 e NBR 10152/1987) da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. A ABNT NBR 10151:2000 tem por finalidade fixar as “condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades”, ou melhor, os padrões conforme o tipo de ocupação do local, conforme apresentado na tabela 4.

A norma acima citada determina ainda critérios distintos para avaliação de fontes de ruído monotonais, intermitentes ou de impacto, com aplicação de fatores de correção. Também delinea o procedimento de medição do ruído no exterior de edificações, ao descrever que o microfone do medidor de nível sonoro deve ser posicionado a 1,2 m do solo ou piso e pelo menos 2 m do limite de propriedades e de quaisquer outras superfícies refletoras, como muros, paredes, etc. Quando da impossibilidade de atender alguma das recomendações mencionadas, deve-se tomar nota e descrever no relatório. Cuidados com intempéries e fenômenos diversos como ventos ou chuvas, pois podem interferir nas medições. Já a ABNT NBR 10152:1987 fixa os níveis de ruído compatíveis com o conforto acústico em ambientes diversos.

Tabela 11 - Padrões máximos de ruído externo conforme ABNT NBR 10151:2000

Tipo de Zona	Nível máximo de ruído- Leq em dB(A)	
	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: NBR 10151.

Assim, na construção de novas vias ou rodovias próximas de áreas ocupadas, o projeto deve em sua concepção a garantia do atendimento dos padrões explicitados na ABNT NBR 10.151:2000, de acordo com cada classificação de zona de ocupação, por se tratar de uma nova fonte de ruído que trará impacto às edificações circunvizinhas, muitas vezes, com baixo nível de ruído de fundo.

Para as vias já existentes, é ainda válida a ABNT NBR 10.151:2000, porém a classificação muda de exclusivamente residencial ou de hospitais, etc., para zona mista, com vocação comercial, sendo válidos os limites correspondentes a esta.

Concomitante à construção de edificações/habitação próximas às novas vias ou às já existentes vale observar os ditames da ABNT NBR 15575, de 19 de julho de 2013, que trata do desempenho de edificações habitacionais e estabelece critérios relativos ao desempenho acústico ao apresentar os requisitos para a verificação do isolamento acústico, por exemplo, janela fechada entre os meios externos e internos à edificação.

Em se tratando de janelas, pode-se dizer que estas além de permitir a entrada de luz e calor irradiado, também são um ponto fraco na transmissão de níveis de ruídos indesejados no interior da edificação. Com respeito ao conforto acústico, é fundamental considerar os requisitos de redução de ruídos e as propriedades de isolamento acústico do envidraçamento como parte integrante do projeto total do espaço construído ou a construir. Como exemplo de material eficaz na redução do ruído indesejável é o vidro laminado, pois possui uma performance acústica através de uma película de Saflex®.

Como os sons são uma combinação de energia acústica em diferentes frequências, um controle acústico adequado e eficaz requer que o nível do som seja reduzido em uma das gamas de frequências. Por exemplo, tem-se o ruído de tráfego de caminhões que produz a típica fonte de ruído de baixa frequência e que se propaga a longas distâncias. O vidro laminado para a arquitetura reduz efetivamente a depressão no efeito de coincidência (comprimento de onda no ar é igual ao comprimento de onda do painel) na faixa de 1000 a 2000 Hertz, que é comum a outros vidros.

Uma característica importante dos materiais que contribuem para o conforto acústico é o "Sound Transmission Loss (TL)" - perda de transmissão sonora - do painel é a diferença, em "decibéis (dB)", entre a energia acústica incidente no painel e a transmitida através dele. Quanto mais eficaz é o isolamento acústico oferecido pelo material, maior é o TL. A tabela 5 apresenta a perda de

transmissão de alguns materiais utilizados em edificações em especial os vidros laminados com seu respectivo índice de redução de ruído RW.

2.9 Isolamento acústico

O cálculo do isolamento acústico da envoltória e/ou fachada de uma edificação pode ser definido a partir da diferença entre o nível sonoro desejado no interior do ambiente e o nível sonoro produzido pela fonte externa (por exemplo, ruído do tráfego viário). Essa diferença expressa o isolamento acústico (STC) com o qual deve ser projetada a fachada e/ou envoltória. Esse cálculo deve considerar:

Tabela 12 - Medições de Sound Transmission Loss (TL)

Rendimento acústico de configurações de vidro e paredes						
Material	Espessura Total	Interior	Espaçamento de Configuração	Exterior	Valor de CTA	ISO RW (3)
Vidro laminado simples (1)	1/4" (7.24 mm)	1/8"	0.030" Saflex	1/8"	35	35
	3/8" (9.53 mm)	1/4"	0.030 Saflex	1/8"	36	36
	3/8" (10.5 mm)	1/4"	0.060" Saflex	1/8"	37	37
	1/2" (12.1mm)	1/4"	0.030" Saflex	1/4"	38	38
	1/2" (12.1mm)	1/4"	0.060" Saflex	1/4"	39	39
	5/8" (16.2 mm)	3/8"	0.030" Saflex	1/4"	40	40
	3/4" (19.9 mm)	1/2"	0.060" Saflex	1/4"	41	41
Duplo envidraçamento (Insulated Glass - IG) (2)	1" (26.6 mm)	Laminado de 1/4"	1/2", ar	1/4"	39	39
	1/2"	Laminado de 1/4"	1/2", ar	3/16"	39	39
	1/2"	Laminado de 3/8"	1/2", ar	1/4"	40	40
	1/2"	Laminado de 1/4"	1", ar	3/16"	42	42
	1/2"	Laminado de 1/4"	2", ar	3/16"	45	45
	1/2"	Laminado de 1/4"	4", ar	3/16"	48	48
	1/2"	Laminado de 1/2"	4", ar	3/16"	49	49
	1/2"	Laminado de 1/4"	1/2", ar	Laminado de 1/4"	42	42
1/2"	Laminado de 1/2"	4", ar	Laminado de 1/4"	51	51	

Tabela 13 - Medições de Sound Transmission Loss (TL)

Rendimento acústico de configurações de vidro e paredes						
Vidro com espaçamento de ar (1)	1/2" (14.5 mm)	1/8"	1/4", ar	1/8"	28	30 (4)
	1" (27.9 mm)	1/4"	1/2", ar	1/4"	35	35
	1-1/2" (12.4 mm)	1/4"	1", ar	1/4"	37	37
Vidro Monolítico (1)	1/4" 5.59 mm)	1/4"	-	-	31	32 (5)
	1/2" (12.4 mm)	1/2"	-	-	36	37 (6)
Paredes (1)	Painel de gesso de 1/2" (ambos lados) atarraxado com parafusos metálicos de 3 - 5/8"				36	36
	Cerâmica de revestimento de 4", assentado com concreto				45	45
	Lajes de concreto leve de 6", duas mãos de pintura de cada lado				46	46
	Lajes de alvenaria leve e oco de 4", engessado por ambos lados				48	48
	Muro de lajes de concreto denso de 8", duas mãos de pintura por cada lado.				52	52
	Paredes com duas lâminas de gesso, ambos lados, parafusos metálicos de 3 5/8, matéria de amortecimento acústica de 3"				54	54
<p>(1) Segundo os testes ASTM E90, painéis calafateados em seu lugar com retens de madeira e massa para vidreiro (para vedação).</p> <p>(2) Segundo os testes ASTM E90, o painel laminado exterior consistia em 1/8" - 0.030 - 1/8" (espessura total 1/4"), 1/4" - 0.030 Saflex de 1/8" (espessura total 3/8") 1/4" - 0.030 Saflex - 1/4" (espessura total 1/2") ou em 1/4" - 0.030 Saflex de 1/2" (espessura total 3/4") painéis em seu lugar um só caixilho com retens de madeira e massa de vidreiro. Unidades com menos de 1" de espessura aéreo estavam selados de fábrica. Todas as demais unidades foram construídas no lugar.</p> <p>(3) Índice de redução de ruído de acordo a (R_w) ISO 717/3</p> <p>(4) Desvio por abaixo do limite de RW30 por 10 dB a 400 Hz.</p> <p>(5) Desvio por abaixo do limite de RW32 por 9dB a 2,500 Hz</p> <p>(6) Desvio por abaixo do limite de RW37 por 9dB a 1,250 Hz</p>						

- as áreas de cada componente que define a fachada e/ou envoltória;
- o isolamento (STC) de cada componente por bandas de oitavas;
- o isolamento global por bandas de oitavas.

Observar que o nível sonoro reverberante (resultante) no interior da edificação será função não só do isolamento produzido pela fachada como também das características de absorção sonora dos revestimentos dos componentes internos (móveis, carpetes, etc).

A título de ilustração, observar no quadro *Valores de STC para componentes construtivos*, informa valores de STC (isolamento acústico) para alguns componentes construtivos:

Tabela 14 - Valores de STC para componentes construtivos

Componente	Frequência(Hz)					
	125	250	500	1K	2K	4K
alvenaria ou concreto 1600<d<2000 Kg/15cm	35	36	40	46	52	58
bloco concreto vazado 15cm	33	34	35	39	45	51
gesso 12mm	21	26	27	28	29	30
madeira 6mm	5	11	15	17	19	20
chapa de aço 1.5mm	25	31	37	42	46	49
vidro monolítico 3mm	12	17	22	26	27	28
vidro monolítico 6mm	17	23	25	26	27	28
janela vidro duplo câmara de ar 150mm (vidros de 4mm)	38	35	40	52	48	38
Indicação de valores de STC (dB)						

Fonte: Windows Performance, Design and Installation (ref 5).

A ABNT NBR 15575:2013 estabelece os parâmetros de verificação acústica, conforme tabela 8:

Tabela 15 - Parâmetros acústicos de verificação conforme ABNT NBR 15575:2013

Símbolo	Descrição	Norma	Aplicação
Rw	Índice de redução sonora ponderado	ISO 10140-2 ISO 717-1	Componentes, em laboratório
DnT,w	Diferença padronizada de nível ponderada	ISO 140-4 ISO 717-1	Vedações verticais e horizontais internas, em edificações (paredes etc.)
D2m,nT,w	Diferença padronizada de nível ponderada a 2 m de distância da fachada	ISO 140-5 ISO 717-1	Fachadas, em edificações Fachadas e coberturas em casas térreas e sobrados
<p>NOTA Como as normas ISO referenciadas não possuem versão em português, foram mantidos os símbolos nelas consignados com os seguintes significados: Rw – índice de redução sonora ponderado (<i>weighted sound reduction index</i>). DnT,w – diferença padronizada de nível ponderada (<i>weighted standardized level difference</i>). D2m,nT,w – diferença padronizada de nível ponderada a 2 m (<i>weighted standardized level difference at 2 m</i>).</p>			

Fonte: ABNT NBR 15575:2013

Segundo os requisitos de níveis de ruído permitido pela Norma de Desempenho das edificações os parâmetros mínimos para atenuação estão expressos na tabela 9:

Tabela 16 - Valores mínimos da diferença padronizada de nível ponderada, $D_{2m,nT,w}$, da vedação externa de dormitório conforme ABNT NBR 15575:2013

Classe de ruído	Localização da habitação	$D_{2m,nT,w}$ dB
I	Habitação localizada distante de fontes de ruído intenso de quaisquer naturezas	≥ 20
II	Habitação localizada em áreas sujeitas a situações de ruído não enquadráveis nas classes I e III	≥ 25
III	Habitação sujeita a ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas, desde que esteja de acordo com a legislação	≥ 30
<p>NOTA 1 Para vedação externa de salas, cozinhas, lavanderias e banheiros, não há requisitos específicos.</p> <p>NOTA 2 Em regiões de aeroportos, estádios, locais de eventos esportivos, rodovias e ferrovias, há necessidade de estudos específicos.</p>		

Fonte: ABNT NBR 15575:2013.

Assim, é imprescindível a antecipação, no projeto de concepção de novas edificações, do estudo de conforto acústico, das construções próximas a corredores de circulação de veículos, em especial em vias urbanas, pois o impacto no nível de pressão sonora de veículos sobre a edificação poderá provocar grande incômodo aos moradores do recinto.

A CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - realizou um estudo sobre a emissão de ruído por veículos-automóveis, motocicletas, caminhões e ônibus que acabou estabelecendo as bases do Programa Nacional de Controle de Ruído Veicular. Tal programa, lançado a partir das Resoluções CONAMA 01 e 02 de 1993, e atualizado pelas Resoluções CONAMA 08 de 1993, 17 de 1995, 20 de 1996, 242 de 1998, 268 e 272 de 2000, estabelece limites máximos de ruído para veículos novos comercializados no Brasil, conforme tabela 8 e 9. A partir desse estudo é possível identificar o NPS e prever através de modelagem acústico o quanto

chega ou chegará (para as edificações já construídas) e desta feita propor medidas mitigadoras para atendimento da Norma de Desempenho das Edificações.

Tabela 17 - limites de ruído para motocicletas e similares

Categoria	Nível de ruído - dB(A)
Até 80 cm ³	75
81 cm ³ a 125 cm ³	77
126 cm ³ a 175 cm ³	77
176 cm ³ a 350 cm ³	80
Acima de 350 cm ³	80

Fonte: CETESB SP.

2.10 Método para análise do ruído

A ABNT (2000), recomenda equipamentos com recursos de LAeq – nível de pressão sonora equivalente ponderada na curva “A” para medições experimentais. Esse nível representa o valor médio quadrático da pressão sonora (com ponderação na curva A) referente ao intervalo de medição. E pode ser calculado pela equação:

$$LA_{eq} = 10 \times \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right] \quad \text{Equação [13]}$$

Em que:

n: número de leituras realizadas

L_i: nível de pressão sonora referente a cada leitura [dB(A)]

A partir dos percentis 10, 50 e 90 fornecidos pelo sonômetro (equipamento de medição de ruído portado pelo avaliador), então é possível avaliar pelo espectro de frequência acumulada a intensidade do ruído por banda de frequência em função do tempo medido, os níveis máximo, médio e de fundo (MELO, 2010).

Para melhor entendimento do nível de ruído e o incômodo nas pessoas que estão expostas ao ruído de tráfego diariamente é utilizado os valores de L_{10} e L_{50} que possuem uma boa correlação como esse grau de irritação das pessoas. Segundo Melo (2010), a interação desses parâmetros permite definir o *Traffic Noise Index* (TNI), pela expressão:

$$TNI = 4.(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30 \quad \text{Equação [14]}$$

Em que:

L_{10} Percentil 10 dos valores obtidos em medição diária de ruído (dB(A));

L_{50} Percentil 50 dos valores obtidos em medição diária de ruído (dB(A)).

Em resumo, o grau de irritação das pessoas em função da variação do ruído de tráfego, que depende do fluxo e da composição dos veículos pode ser correlacionado com o TNI. Assim, esse parâmetro é um subsídio ao planejamento de medidas mitigadoras para o controle do ruído, pois permite definir a distância entre a via e as suas edificações lindeiras, além de análises sobre isolamento acústico em fachadas de edificações e implantação de barreiras acústicas (MELO, 2010, p. 5).

Para uma análise do ruído de tráfego, há um modelo proposto por Kirnler *et al.* (1982), os quais consideram rodovia como pista simples, trecho em tangente, plano, comprimento finito e porcentagem reduzida de caminhões na composição de tráfego. O LA_{eq} ponderado em "A" é calculado pela equação [15]. Em seguida, corrige-se o valor pela equação [16] em função da

declividade do terreno e da distância entre a fonte e o receptor (valor de referência: 15m).

$$LA_{eq} = 39 + 10.\log Q + 22.\log\left[\frac{v}{88}\right] \quad \text{Equação[15]}$$

$$\Delta L = -a.\log\left[\frac{d}{15} + \left(\frac{d-15}{75}\right)^2\right] \quad \text{Equação[16]}$$

Em que:

Q: fluxo de veículos (veíc/h);

V: velocidade média dos veículos (km/h);

ΔL : fator de correção do nível de pressão sonora [dB(A)];

d: distância do ponto de medição ao eixo da via (m)

a: parâmetro que correlaciona a propagação sonora com a declividade do terreno (a=13,3 para terreno plano).

Dentre vários outros modelos de estudo do impacto de ruído de tráfego no Brasil, decidiu-se selecionar o modelo desenvolvido por Calixto *et al* (2008), cujas expressões para o cálculo do L_{eq} , L_{10} e L_{90} são:

$$L_{eq} = 7,7.\log[VF.(1 + 0,095.HV)] + 43 \quad \text{Equação[17]}$$

$$L_{10} = 6,2.\log[VF.(1 + 0,095.HV)] + 52,2 \quad \text{Equação[18]}$$

$$L_{90} = 10,2.\log[VF.(1 + 0,05.HV)] + 27,1 \quad \text{Equação[19]}$$

Em que:

VF: fluxo de veículos (veíc/h);

HV: porcentagem de veículos pesados (massa do veículo maior que 2800kg).

Através de análise de regressão esses modelos foram desenvolvidos tendo como base medições de nível sonoro e fluxo de veículos. Os locais onde foram realizadas as medições apresentaram as seguintes características:

Velocidade média dos veículos da ordem de 55km/h;

Trecho em tangente e plano (como declividade inferior a 5%);

Faixa de domínio sem superfícies refletoras de som;

Rodovias com revestimento asfáltico e em bom estado de conservação.

Distância de referência entre a fonte sonora e o medidor de nível de pressão sonora foi da ordem de 25m.

3 METODOLOGIA

3.1 Abordagem

Este trabalho tem como metodologia a pesquisa bibliográfica, que segundo Gil (2010, p. 44), *“é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos”*.

3.2 Estudo de caso

Segundo André e Ludke (1986), o caso estudado se destaca por constituir uma unidade dentro de um sistema amplo. Sendo assim, ao realizar o estudo de caso como modalidade de pesquisa em projetos científicos, para que o estudo forneça um resultado preciso é importante que o caso seja bem delimitado e com objetivos bem definidos.

O estudo de caso foi realizado com o objetivo de apresentar os benefícios proporcionados pela modelagem e estudo de solução para mitigação dos níveis de pressão sonora ainda no projeto de concepção de novas edificações para atendimento da Norma de Desempenho de Edificações.

O estudo foi realizado a partir da idealização de um projeto de construção de moradias em área caracterizada como zona urbana onde haverá o tráfego de veículos em três vias distintas circunvizinhas a essa edificação.

O foco principal deste foi o estudo do impacto do ruído sobre a edificação em razão do ruído de tráfego nas vias urbanas e algumas soluções para mitigação para garantia do conforto acústico dos ocupantes.

3.3 Procedimentos

Para atingir os objetivos do trabalho, foram utilizados os seguintes procedimentos para coleta de dados do campo de pesquisa:

- Levantamento e análise de bibliografia técnica sobre o tema da acústica;
- Levantamento de dados sobre os limites do nível de ruído produzido pelos veículos;
- Levantamento de dados teóricos dos níveis de pressão sonora de tráfego;
- Levantamento de informações básicas sobre os elementos estruturais da edificação;
- Análise dos dados da simulação computacional;
- Proposição de solução para mitigação do incômodo do ruído.

3.3.1 Plano de coleta de dados

O procedimento para coleta de dados em campo seguiu o estabelecido pelo método consagrado para medição de ruído de tráfego normal - Statistical Pass – By que é o método estatístico de passagem sendo regulamentado pela Norma ISO 11819-1, conforme figura 24, que estabelece que o microfone deve ficar posicionado acima do solo a uma altura de 1,20m e a 7,5m da distância da via em relação ao eixo estando livre de barreiras sonoras, sejam naturais ou fabricadas, devendo haver, no mínimo, 25 metros de espaço livre ao redor do microfone, o suficiente para evitar absorções ou reverberações, bem como o os ditames da ABNT NBR 10151:2000 e também o estudo dos elementos que compõem a estrutura da edificação em estudo.

As edificações que estarão sujeitas ao impacto dos níveis de pressão têm os seguintes elementos em sua concepção de projeto:

- Alvenaria estrutural – blocos de concreto vazado 15 cm;
- Vidros comuns montados em caixilho.

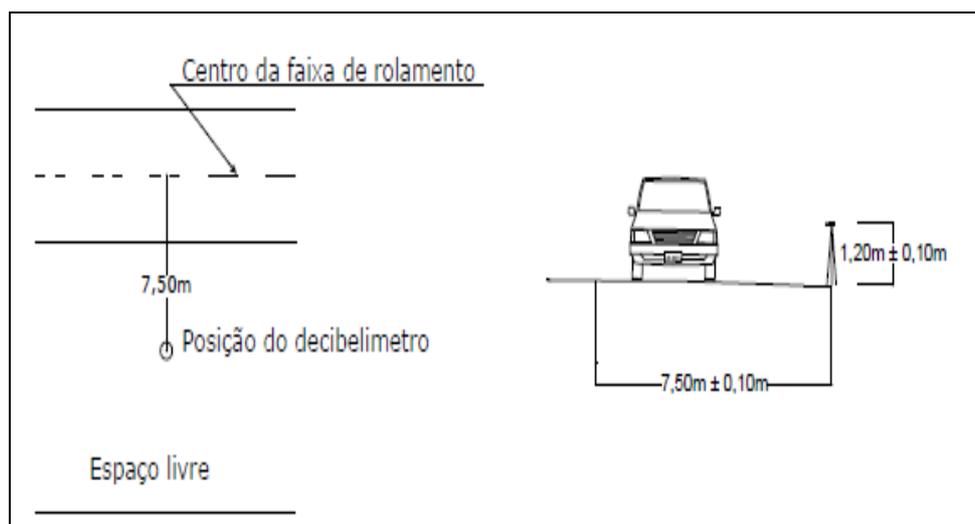
A edificação terá muro de 1,80 m de altura em toda a extensão do terreno estando isento de arbustos/árvores e haverá uma portão para acesso de veículos para a rua Adamastor Pereira Leite.

O equipamento a ser utilizado é o sonômetro como mostra a figura 23. Esse é chamado popularmente de “decibelímetro” com filtro de banda de oitava. Sendo a marca Larson Davis, modelo Lxt.

Figura 25 - Sonômetro Marca Larson Davis modelo Lxt



Figura 26 - Método de medição de ruído de tráfego



Fonte: Callai, 2008.

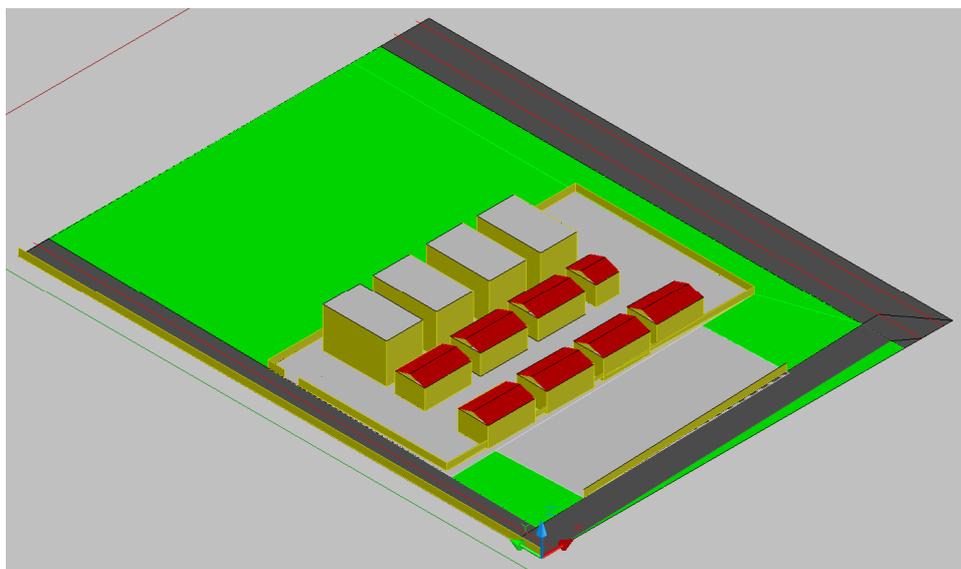
3.3.2 Modelagem geométrica da área

Após coleta dos dados estes são preparados para as simulações acústicas através da construção do modelo geométrico da área em estudo. Para modelar foi utilizado o AutoCAD®, versão 2007, para apresentação da planta-baixa da região.

Os elementos construtivos da edificação, que interferem na propagação sonora do ar, são representados através de polígonos. Ao passo que as vias de tráfego de veículos, sendo as principais fontes de ruído da região, são constituídas por meio de polilinhas de eixo. Para as avenidas também foi estabelecido layer tomando em conta o perfil transversal da via, velocidade média de circulação e a composição de tráfego.

Concluído esse processo, os arquivos em dwg são transformados em dxf criados no AutoCAD 2007 e são importados no *software* SafetyNoise®, onde se atribui propriedades específicas para cada tipo de objeto, como por exemplo, número de pavimentos e alturas das edificações, fluxo de veículos e porcentagem de veículos pesados para as fontes de tráfego (avenidas), para gerar um modelo 3D como se observa na figura 25.

Figura 27 - Modelo 3D da área em estudo com vias de tráfego, atenuações e edificações



Nas simulações foram estabelecidas as partes da edificação que receberiam o nível de pressão sonora para melhor interpretar o impacto sobre a construção. Desta feita, foi definida a fachada, a lateral direita e esquerda. Para uma visão geral do incômodo na área habitada estabeleceu-se a vista superior que dá uma visão panorâmica da propagação do ruído.

3.3.3 Análise de dados

Após o levantamento de dados da edificação e estabelecimento do modelo 3D proceder-se-á à modelagem no *software* e análise dos dados para o entendimento do impacto que o ruído de tráfego provocará na edificação e a proposição de algumas soluções para garantia do conforto acústico dos ocupantes do recinto.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Localização do empreendimento

O local para estudo e simulação consta no mapa da figura 26. Há duas ruas e uma avenida que margeiam os lotes onde será construído um conjunto habitacional popular com quatro blocos de apartamentos, sendo quatro apartamentos por andar e oito conjuntos de casas geminadas. Os logradouros estão localizados na cidade de Betim MG e são:

- Rua Doutor Adamastor Pereira Leite;
- Avenida José Inácio Filho
- Rua Dr. José E da Silva

Figura 28 - Mapa do logradouro



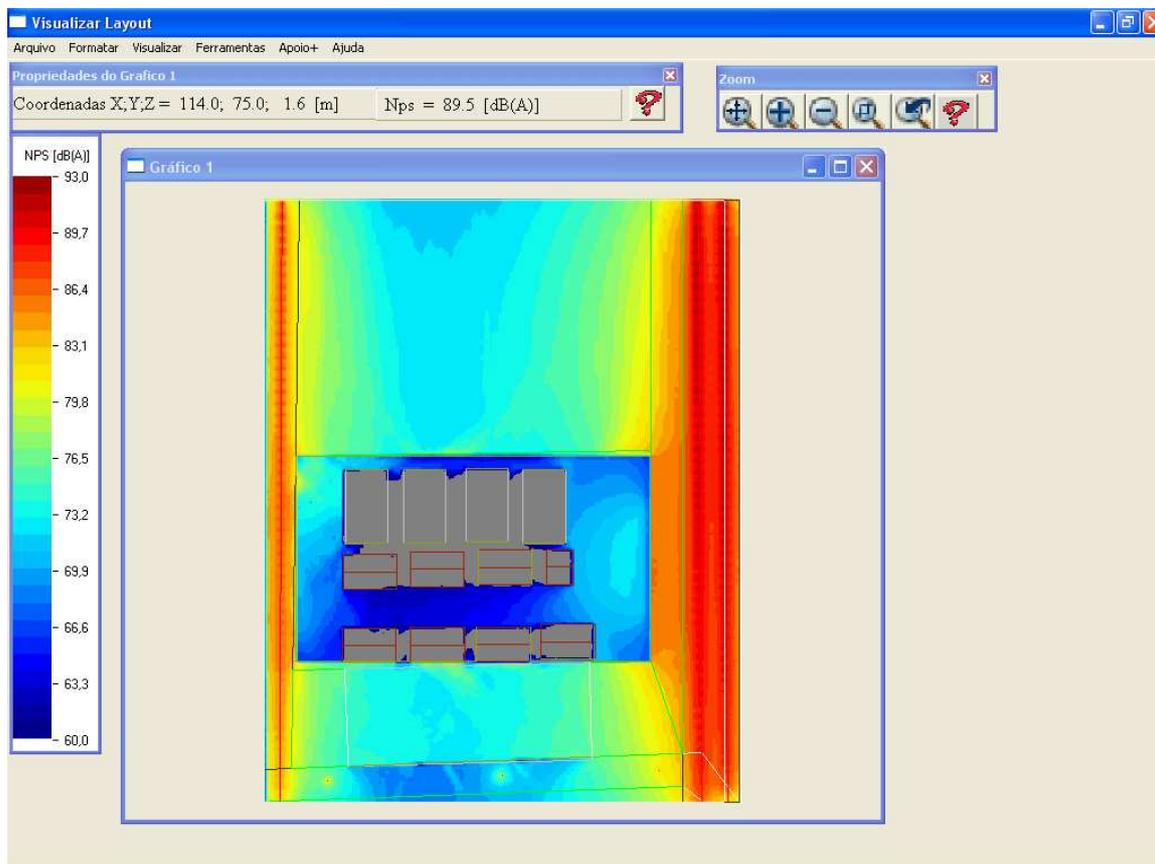
Fonte: Google Maps. Disponível em: < <https://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR> >, acessado em 28/06/2013 às 13:00.

Os dados foram coletados conforme o plano de coleta de dados e daí procedeu a inserção dos dados no SafetyNoise para devida simulação e apuração dos dados.

4.2 Simulação

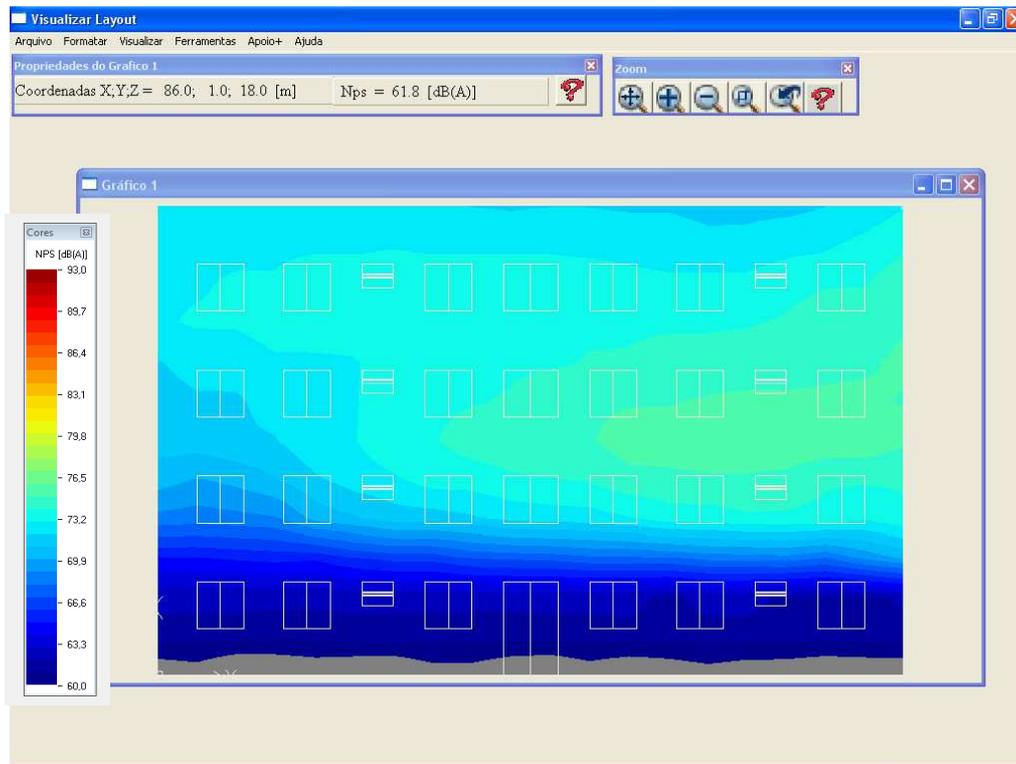
O software SafetyNoise[®], após ser devidamente alimentado com as informações necessárias, automaticamente realiza todos os cálculos para se obter como resultado final os mapas abaixo, através de interpolação dos níveis sonoros. Os mapas abaixo mostram, através da barra de cores, o grau de intensidade do nível de ruído que emitido em função do tráfego de veículos nas ruas e avenidas que circundam o local de construção dos imóveis. Observa-se, através da escala gradual de cores, a variação dos níveis sonoros de 60 a 93 dB (A). Os níveis mais elevados de pressão sonora tendem para a cor vermelha e os mais baixos se aproximam da cor azul. Nas figuras 27 a 31 a seguir, nota-se que os pontos de maior impacto são os blocos e casas 1 e 4 da direita para a esquerda.

Figura 29 - Modelagem - vista superior das edificações



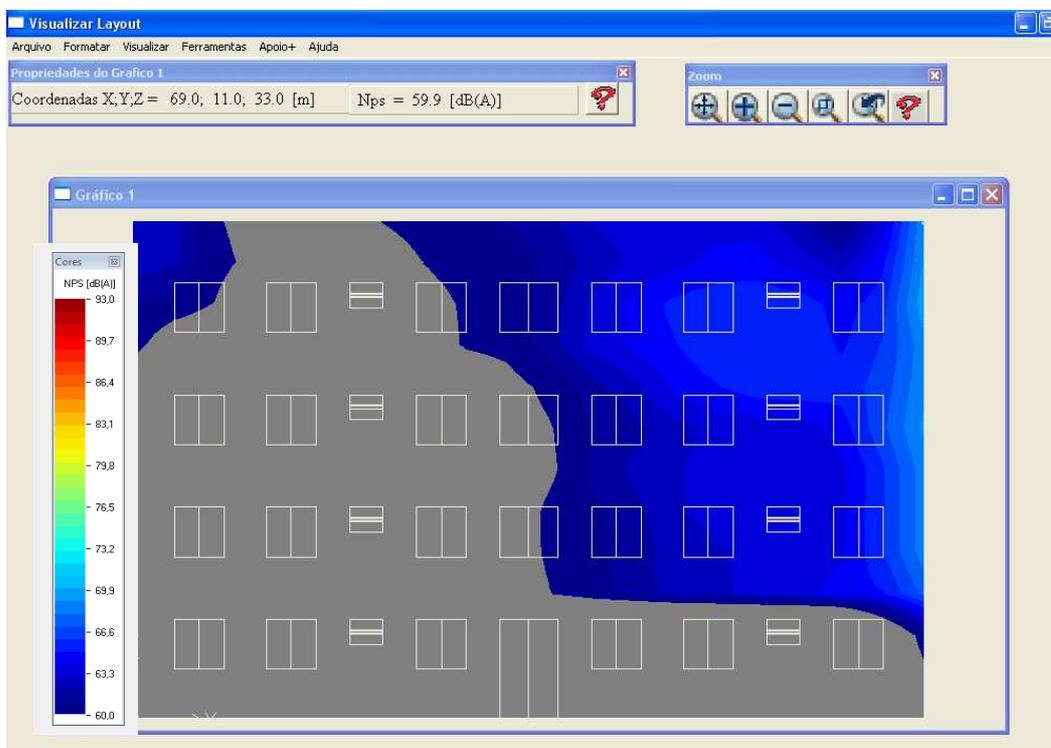
Fonte: Software SafetyNoise[®]

Figura 30 - Modelagem - Fachada do 1º bloco projetada para a rua Adamastor Pereira Leite



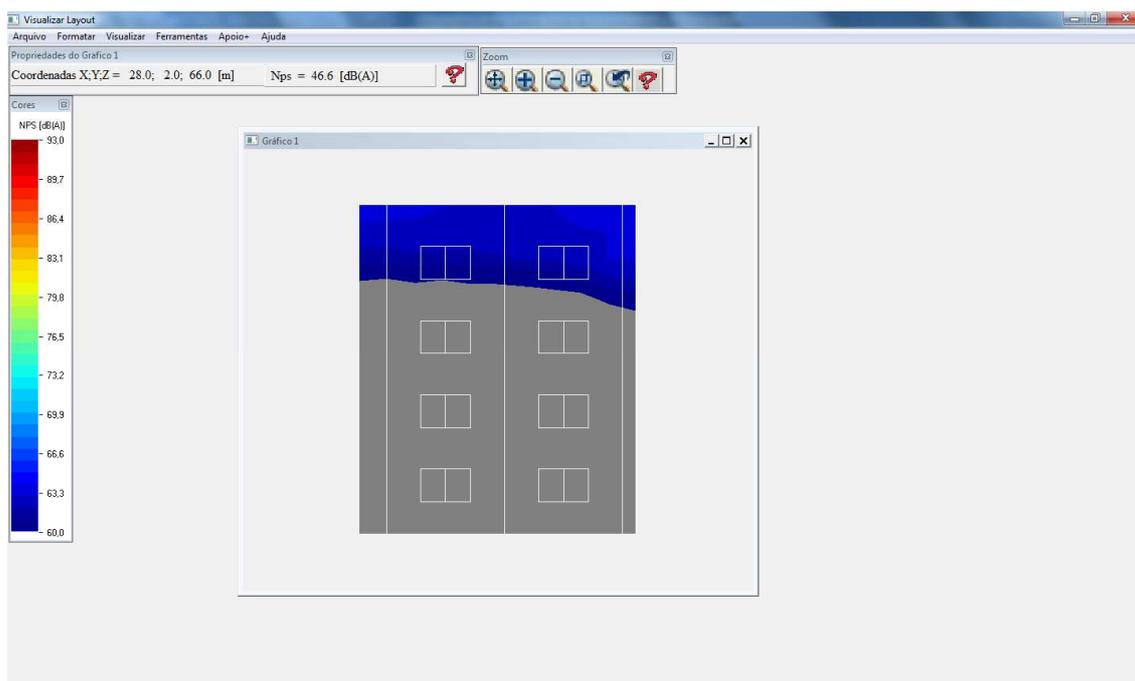
Fonte: Software SafetyNoise®

Figura 31 - Modelagem – da fachada do 2º bloco projetada para a rua Adamastor Pereira Leite



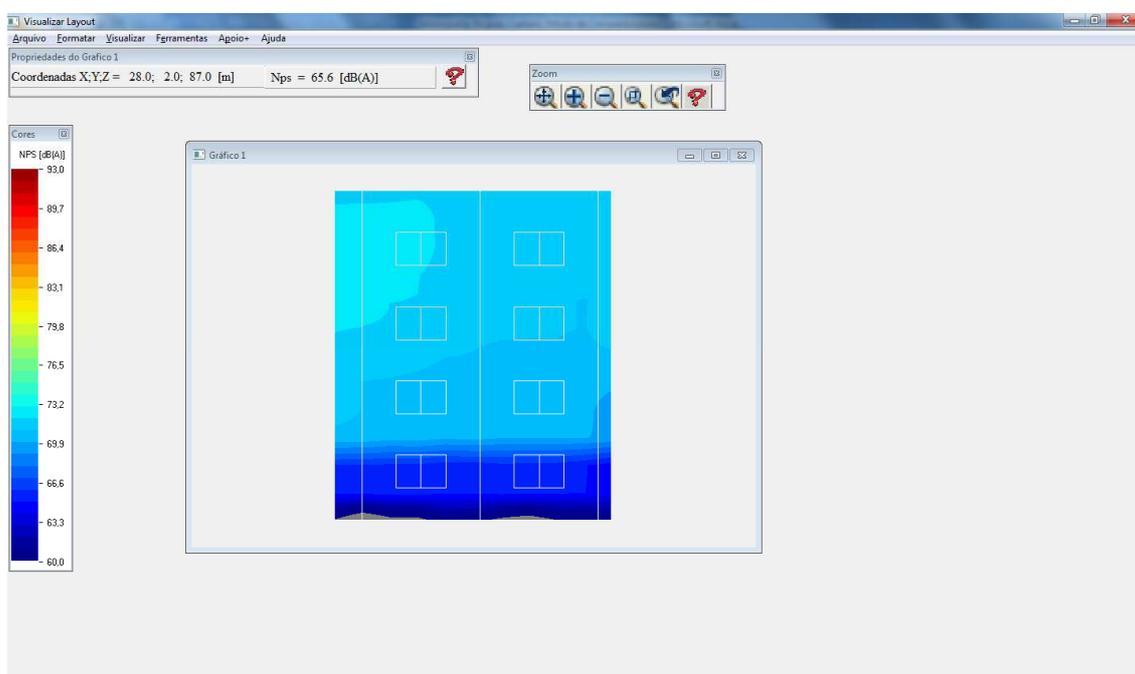
Fonte: Software SafetyNoise®

Figura 32 - Modelagem - Lateral direita do primeiro bloco



Fonte: Software SafetyNoise®

Figura 33 - Modelagem - Lateral esquerda do primeiro bloco



Fonte: Software SafetyNoise®

As simulações acima contemplaram o ruído dos três logradouros e é notório o impacto do ruído sobre a edificação. Analisando a barra de cores e os mapas, nota-se que os andares mais altos recebem uma contribuição maior do nível de

pressão sonora advindo dos veículos. Os apartamentos mais baixos têm uma proteção maior devido ao muro que fazem a cercania da construção, constituindo uma boa barreira de atenuação para os ocupantes. Com essa tecnologia é possível fazer inúmeras simulações com cenários diferentes como por exemplo retirando o muro, “fechando” o portão etc.

O Cômodo estudado possui área de 12,00m² com pé direito de 2,80m. A janela possui 1,20 x 1,20m e sua área de superfície é 4,00 x 2,80m.

Vale ressaltar que os materiais utilizados na construção tem uma influência considerável na atenuação do ruído dentro do cômodo da edificação. É de suma importância que o nível de ruído esteja dentro dos parâmetros legislativo para que essa edificação passe pelo crivo quando testada em relação ao seu desempenho acústico. Na simulação nº 1, as edificações terão as seguintes características construtivas que são relevantes para o estudo:

- Paredes em bloco de concreto vazado de 15 cm
- Vidro laminado simples na espessura de ¼ ”

Quando faz-se a simulação considerando as bandas de oitava e respectivos valores de atenuação por frequência, observamos que a escolha do material irá influenciar diretamente na atenuação dentro do cômodo. Assim, a adequada escolha e seleção é fator determinante para se alcançar o nível aceitável de atenuação acústica dentro do imóvel. Na simulação nº. 1, utilizando os dados de atenuação característicos dos materiais, podemos observar que os materiais escolhidos não proporcionarão uma atenuação adequada dentro do recinto.

Tabela 18 - Simulação nº 1 do nível de ruído por banda de oitava

Cálculo do nível de ruído por banda de oitava							
Frequência	125	250	500	1K	2K	4K	Somatório
NWS dentro	63,2	62,2	61,2	57,3	51,6	46,7	
Cálculo	2089296	1659587	1318257	537032	144544	46773,5141	5795489,064
LA (dB)	67,63	dBA					

Por outro lado, na simulação nº 2 foi utilizado paredes com bloco de concreto vazado com 15 cm, cuja massa chega a 230kg/m^2 com vidro laminado na espessura de $\frac{3}{4}$ ", e podemos constatar o atendimento dos níveis de conforto para trabalho que exijam solicitação intelectual e atenção constantes de 65 dB(A). Há que salientar uma possível inviabilidade de implementar essa opção em razão da espessura do vidro. O índice de redução deste tipo é de $R_w(\text{dBA})$: 45dBA.

Tabela 19 - Simulação nº 2 do nível de ruído por banda de oitava

Cálculo do nível de ruído por banda de oitava							
Frequência	125	250	500	1K	2K	4K	Somatório
NWS dentro	61,2	60,2	56,2	50,3	44,7	40	
Cálculo	1318257	1047129	416869	107152	29512,1	10000	2928918,693
LA (dB)	64,67	dBA					

Simulação 3

Utilizando uma parede maciça de concreto armado de 15cm cuja massa supera a 290kg/m^2 e vidro laminado simples de $\frac{1}{4}$ " constatamos o atendimento dos níveis de conforto para trabalho que exijam solicitação intelectual e atenção constantes de 65 dB(A). Um ponto diferencial a considerar e apreciar é que nas baixas frequências o valor de atenuação é maior que nas altas frequências. Além disso, é relevante salientar que a isolamento acústica das paredes maciças é regida pela Lei das Massas. Quanto mais pesada uma parede, maior será sua isolamento acústica. Ao se dobrar a massa da parede ocorre uma aumento de 6dB na isolamento. O índice de redução deste tipo é de $R_w(\text{dBA})$: 47dBA.

Tabela 20 - Simulação nº 3 do nível de ruído por banda de oitava

Cálculo do nível de ruído por banda de oitava							
Frequência	125	250	500	1K	2K	4K	Somatório
NWS dentro	61,2	60,2	56,3	50,7	46	43,1	
Cálculo	1318257	1047129	426580	117490	39810,7	20417,3794	2969682,657
LA (dB)*	64,73	dBA					

Em suma, é digno de nota que a utilização dos materiais adequados poderá proporcionar uma boa atenuação e o devido conforto dentro da edificação como se pode observar na simulação n° 2 e n° 3. Contudo, o fator custo é de grande relevância e a simulação de n° 2 serve de alerta durante a concepção do projeto, pois apesar de atenuar o ruído dentro dos níveis aceitáveis, para tal foi utilizado vidro espesso que pode elevar o custo da obra.

5 CONCLUSÃO

Com as simulações foi possível analisar como uma edificação pode ser afetada pelos níveis de pressão sonora advindo de diversas fontes como por exemplo: tráfego de veículos nas vias urbanas. Através disso, é possível buscar as soluções ainda na fase de projeto. Ficou nítido durante o estudo de caso que a escolha de materiais adequados pode proporcionar o desempenho da edificação através da atenuação do ruído abaixo de valores aceitáveis. Ainda mais, o projetista pode antever as soluções apropriadas como: esquadrias, vidros e alvenaria e com expertise viabilizar com segurança e economia a construção nos moldes da legislação sobre desempenho acústico.

Enfim, com a modelagem acústica é possível prever o incômodo do ruído no estudo de implantação de uma construção antes de sua concepção. Pela observação das simulações é nítido como estas apoiam veemente o desenvolvimento do projeto de novos empreendimentos e fornece subsídios para o estudo da melhor especificação de soluções, materiais e sistemas construtivos com melhor desempenho acústico e atendam a Norma de Desempenho das Edificações vigente.

A modelagem acústica ainda no projeto de concepção de novas edificações tem por maior objetivo eliminar passivos dos proprietários posteriores à entrega dos imóveis e também serve à gestão do ambiente sonoro.

6 PROPOSIÇÕES FUTURAS

Nos trabalhos futuros, é proposto:

- Analisar a influência de vegetações como barreiras acústicas;
- Analisar a atenuação de outros materiais como parede de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos;
- Analisar a modelagem teórica com a simulação através de medições em campo.

REFERÊNCIAS

BISTAFA, S.R. **Acústica Aplicada ao Controle de Ruído**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2006. 368p.

CALLAI, S.C. **Perfil de influência da poluição sonora em rodovias**. Ijuí, RS. Monografia. 57p. 2008.

GERGES, S.N.Y. **Ruído – Fundamentos e Controle**, Florianópolis: CBSSI, 1992.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MELO *et al.* (2008). **Análise da influência de veículos ruidosos no nível de pressão sonora em via urbana**. Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Fortaleza, CD-ROM, 8

MELO, Ricardo. **Previsão do nível de ruído gerado pelo tráfego de veículos na cidade de João Pessoa, Brasil**. Anais do XVI PANAM, 15 a 18 de julho de 2010 – Lisboa, Portugal.

MURGEL. **Fundamentos de Acústica Ambiental**. Editora SENAC, São Paulo, 2007.

NBR 10152. Níveis de ruído para conforto acústico. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, 1987.

_____ (2000).

NBR 10151 – Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

NBR 15575 – **Edificações habitacionais** – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro. ABNT (2013).

Norma ISO 11819-1. **Acoustics – measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1 : Statistical Pass-By Method**. Genève, Switzerland. September of 1997.

Resolução Conama nº 001: Estabelece padrões para a emissão de ruídos no território nacional. 8 de março de 1990. D.O.U, de 02.04.90

Resolução Conama nº 002: Institui em caráter nacional o programa Nacional. Educação e Controle de Poluição Sonora – “SILÊNCIO”. 8 de março de 1990.

SANTOS, A.P.DA SILVA. **Estudo da eficiência na redução do ruído de tráfego em pavimentos drenantes**. Portugal, Dissertação (Mestrado em Engenharia Rodoviária), Universidade do Minho. 244p. 2007.

OLIVEIRA FILHO, R.H. **Uma Metodologia para a Avaliação Virtual da Dose de Exposição ao Ruído no Ambiente de Trabalho**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2011. 166p.