O PAPEL DA FÍSICA NO CONTROLE DO RUÍDO EM PROJETOS ARQUITETÔNICOS

The role of physics in the control of noise in architectural projects

NETO, Maria de Fatima Ferreira
Apoio Acústico ltda.

SANTOS, Leonardo Sioufi Fagundes dos Santos
Universidade Federal de São Paulo, campus de Diadema

RESUMO: Este artigo enfatiza a importância dos conceitos da Física na acústica em projetos arquitetônicos, mostrando que o aspecto acústico de uma edificação é tão relevante quanto o estrutural, o hidráulico, o elétrico, o térmico e o luminoso, entre outros. Em primeiro lugar, o trabalho explora os conceitos fundamentais da Acústica Física, relacionando-a com a Acústica Arquitetônica: frequência sonora, velocidade do som, comprimento de onda, fonte sonora, potência sonora e propagação do som com os fenômenos ondulatórios correspondentes, reflexão, difração, absorção e transmissão. Posteriormente, o trabalho aborda as sensações acústicas em relação à pressão sonora e à frequência. Com este aparato teórico, aborda-se os conceitos de conforto e desconforto acústico. Dessa forma, os projetistas poderão entender os fundamentos da Acústica Arquitetônica, facilitando o atendimento aos anseios de seus clientes por um ambiente residencial pronto para proporcionar o conforto acústico, tão almejado e desejado.

Palavras-Chave: acústica arquitetônica, fenômenos ondulatórios, conforto acústico

Abstract: This article emphasizes the importance of Physics concepts in acoustics in architectural projects, showing that the acoustic aspect of a building is as relevant as the structural, hydraulic, electrical, thermal and luminous, among others. Firstly, the work explores the fundamental concepts of Physical Acoustics, relating it to Architectural Acoustics: sound frequency, sound speed, wavelength, sound source, sound power and sound propagation with the corresponding wave phenomena, reflection, diffraction, absorption and transmission. Subsequently, the work addresses acoustic sensations in relation to sound pressure and frequency. With this theoretical apparatus, the concepts of comfort and acoustic discomfort are addressed. In this way, designers will be able to understand the fundamentals of Architectural Acoustics, facilitating the fulfillment of their customers' desires for a residential environment ready to provide the acoustic comfort, so desired.

Keywords: architectural acoustics, wave phenomena, acoustic comfort

INTRODUÇÃO

De um modo geral, o ser humano vive em ambientes ruidosos. Aglomeração em espaços urbanos, aumento da frota de veículos, expansão das

áreas industriais e todos os ruídos da modernidade geram um tipo de poluição mais danosa que a da água, a sonora. A poluição sonora só é superada em danos pela poluição do ar (WHO, 2011). Seja na residência, no trabalho, no lazer, o ruído está constantemente presente.

A *World Health Organization* (WHO) ou Organização Mundial da Saúde (OMS) trata da poluição sonora como questão de saúde pública (WHO, 2011). O dano físico mais conhecido resultante da exposição sonora é a surdez. Mas, há diversos outros problemas que podem surgir, como por exemplo, irritação, problemas psicológicos, dificuldade de aprendizado e comunicação, problemas no sono, alterações respiratórias, digestivas, cardiovasculares, levando inclusive ao enfarte (LAIRD; COYE, 1929; MILLER, 1974; DAVIES; VAN KAMP, 2012). Além dos problemas físicos e psicológicos, o incômodo gerado pelo ruído pode afetar a convivência social (GRIMWOOD, 1997). Como ilustração, é muito comum que brincadeiras de crianças ocorram no mesmo período de leitura ou descanso de outra pessoa.

Como a poluição sonora gerada nos ambientes domésticos é um problema de saúde pública, diversos países estabeleceram leis proibindo certos níveis de ruído entre vizinhos (ZAJARKIEWICCH, 2010). Na cidade de São Paulo o Programa Silêncio Urbano (Lei do PSIU[1]) é o órgão fiscalizador do excesso de ruído, cujos limites estão previstos na resolução CONAMA n°. 001/1990 (BRASIL, 1990). No entanto, o som em si não segue as legislações humanas. A redução e o controle do ruído dependem das leis da Física. Como conciliar as exigências das leis dos homens com a inexorabilidade das leis da Física?

Neste ponto do texto, é interessante estabelecer uma analogia entre o veneno das serpentes com seu antídoto, o soro antiofídico. A Física e suas aplicações tecnológicas transformaram o silencioso mundo antigo em um barulhento ambiente moderno. Motores, caixas de som e máquinas em geral são aplicações da Física. Paradoxalmente, a Física com suas aplicações também pode reduzir ou até neutralizar o som.

Há um ramo da Física especialmente voltado ao estudo do som, a Acústica. Atualmente, a Acústica é uma ciência de natureza multidisciplinar

1 Informações disponíveis em http://www.capital.sp.gov.br/cidadao/rua-e-bairro/legislacao/lei-do-psiu Acesso em 04 mai 2020.

(BISTAFA, 2006). Além dos físicos, engenheiros, tecnólogos, arquitetos, urbanistas, biólogos, entre outros, também pesquisam a acústica e podem atuar nessa área com a devida capacitação.

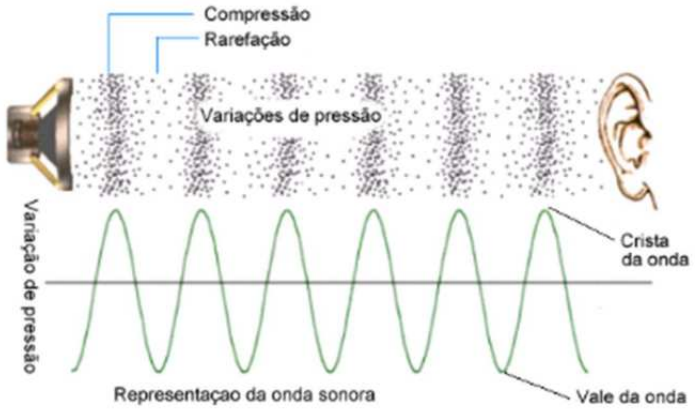
A Comissão Internacional de Acústica (ICA) declarou 2020 como Ano Internacional do Som (*International Year of Sound* 2020) (SOBRAC, 2019). Isso não se deve apenas à necessidade da redução da poluição sonora. Afinal, o som é fundamental na comunicação entre as pessoas, na cultura, seja em relação à arte musical ou das declamações em geral, nas aplicações tecnológicas, como nos microscópios acústicos e intervenções cirúrgicas com ultrassom etc. A própria escrita é o conjunto de símbolos visuais da oralidade.

Este artigo tem dois objetivos: a apresentação do problema dos ruídos entre vizinhos no contexto dos conceitos fundamentais e dos modelos teóricos da Acústica, sem a formulação matemática completamente explícita.

Som

De acordo com a Física, o ar pressiona os objetos que ele envolve. Esta pressão é conhecida como “pressão atmosférica”. Movimentos bruscos fazem com que a pressão do ar de uma certa região aumente ou diminua. O ar comprimido exerce maior pressão, ao passo que o ar rarefeito, menor pressão. Por exemplo, as vibrações do diafragma de uma caixa de som provocam compressão e rarefação do ar à sua frente. O ar comprimido se expande, voltando a pressão que tinha antes. No entanto, uma porção do ar à frente fica comprimido e o processo se repete. Inversamente, o ar rarefeito se contrai, expandindo o ar à sua frente. O processo também se repete. Assim, regiões de alta pressão (ar comprimido) e baixa pressão (ar rarefeito) se propagam ao longo do ar (Figura 1). A propagação destas variações da pressão do ar é que constitui o som (TELLES; NETTO, 2013).

Figura 1 – Propagação de onda sonora.



Fonte: https://dex.descomplica.com.br/enem/fisica/extensivo-enem-ondulatoria/explicacao/1. Acesso em 18 abr 2020.

O som é classificado como onda mecânica porque depende de um meio mecânico para se propagar. O ar e os gases em geral são meios de propagação do som, mas não os únicos. Esses meios também podem ser sólidos ou líquidos. É por isso que o som se propaga em paredes, portas, janelas, piscinas etc.

Uma das questões fundamentais da Acústica Arquitetônica é a propagação do som do exterior para o interior da residência. Mesmo sem controlar os sons externos ou internos ao ambiente, o arquiteto pode projetar a edificação de modo a atenuar os efeitos indesejáveis do som. Por exemplo, paredes grossas podem reduzir o som que as atravessa, impedindo total ou parcialmente que os sons das ruas invadam as moradias. Estas mesmas paredes também atenuam os próprios ruídos internos das habitações, não permitindo que um vizinho atrapalhe os demais e preservando a privacidade de todos. Se uma parede não for suficiente, como em cinemas, pode-se projetar paredes duplas, triplas e assim e por diante. A colocação de material fibroso entre as paredes, como lã de vidro ou de rocha, amplia a eficiência na redução da transmissão do som. Existe solução ao alcance dos arquitetos.

A seguir, estão expostas as principais grandezas características do som.

Frequência sonora

Uma das características do som e de qualquer onda é a frequência. A frequência do som é o número de pulsos, ou vibrações, captados por tempo. A unidade de frequência é o hertz (Hz) que equivale a uma vibração por segundo

(TELLES; NETTO, 2013). Tomando como exemplo a frequência sonora de 400 Hz, ela corresponde a 400 vibrações por segundo. Ao contrário das demais unidades em português, o termo "hertz" não é usado no plural.

A orelha[2] humana tem uma sensação auditiva correspondente à frequência, mas isso será discutido em uma seção posterior.

Velocidade do som

A velocidade do som não depende da fonte, mas apenas do meio. Quanto mais denso o meio, mais rápida é a propagação do som. Nos sólidos, o som se propaga mais rapidamente do que nos líquidos e nestes últimos, com velocidade superior à dos gases. Por exemplo, a velocidade do som no vidro está compreendida entre 5.000 m/s e 6.000 m/s enquanto na água, atinge 1.460 m/s (BARROSO-KRAUSE et al., 2002). A velocidade do som no ar varia com a temperatura, quanto mais quente o meio atmosférico, mais veloz é o som. Por exemplo, a velocidade do som no ar é de 312,7m/s para -30°C, 343 m/s a 20°C e 349,2m/s para 30°C. Para problemas práticos, na acústica arquitetônica, normalmente se usa a velocidade do som no ar em 340m/s.

Comprimento de onda sonora

Outra característica do som e de qualquer onda é o comprimento. O comprimento de onda sonora é a distância de duas posições com pressão máxima em certo instante. De forma equivalente, o comprimento de onda pode ser definido como a distância de duas posições com pressão mínima em certo instante. A unidade de comprimento de onda é o metro, m. (TELLES; NETTO, 2013).

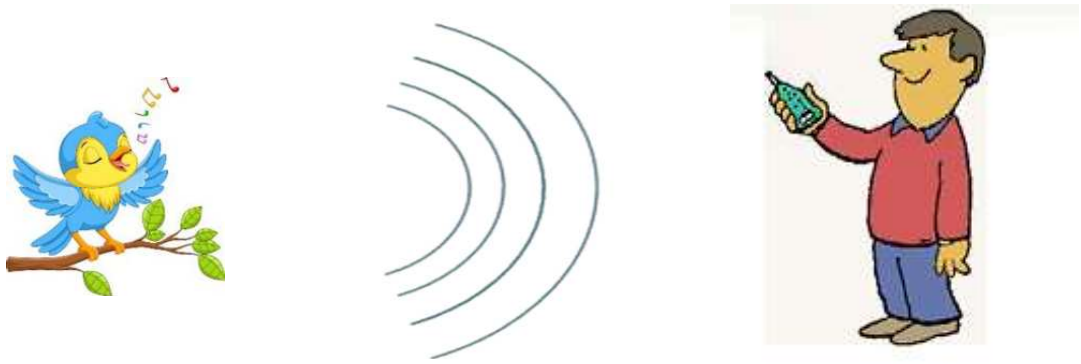
O comprimento da onda sonora depende da frequência e da velocidade (TELLES; NETTO, 2013). A relação entre comprimento, frequência e velocidade é dada por $\lambda f = v$. Por exemplo, na relação $\lambda f = v$ para uma onda sonora com frequência de 400 Hz e velocidade 340m/s tem-se $\lambda 400 = 340$, ou seja, o comprimento de onda é de $\lambda = 0{,}85$ m.

2 Segundo Bistafa (2006, p. 29), "Modernamente, *orelha* é a denominação preferível do sistema auditivo, em substituição à forma mais popular "ouvido", em geral atribuída a esse sistema". Na terminologia anatômica moderna, aplicam-se os termos orelha externa, orelha média e orelha interna. Disponível em: http://www.ceol.med.br/home/ouvido/ Acesso em 25 jun 2020.

Leis da Física e Acústica Arquitetônica

Especificamente no campo da Acústica, as Leis da Física são aplicadas em três etapas: inicia-se na emissão do som por uma fonte sonora com os conceitos de pressão e potência sonora, continua com a propagação do som e os fenômenos ondulatórios e finaliza-se com a recepção do som nas nossas orelhas, como representado na Figura 2.

Figura 2 – Fonte sonora, propagação do som e medição no ponto do receptor.



Fonte: https://br.freepik.com/vetores-premium/passarinho-bonito-canta-em-um-galho-de-arvore_6461729.htm. Acesso em 04 mai 2020 e Adaptado de Brüel & Kjær (20--).

Fontes sonoras

Fontes sonoras são quaisquer elementos que emitem sons, como por exemplo, carros, máquinas, seres humanos, animais em geral etc. São as fontes sonoras que determinam a frequência da onda.

Embora o arquiteto não projete as fontes sonoras de uma unidade habitacional, ele pode orientar o projeto e a construção levando em consideração as fontes sonoras internas e externas. Por exemplo, em um prédio próximo a uma avenida movimentada, onde os veículos são fontes sonoras constantes, os quartos podem ser construídos com janelas voltadas para o lado oposto a via movimentada. Os passos das pessoas são outra fonte sonora importante. Em uma edificação com vários andares, o arquiteto deve preocupar-se com a propagação do som dos passos dos moradores de um andar para o inferior.

Fonte e potência sonora

O termo *potência* normalmente lembra os motores dos carros: quanto mais potente for o motor mais rápido ou com maior força o carro chega ao destino. Potência sonora evoca a mesma ideia: quanto mais ruidosa é uma fonte sonora maior é sua potência sonora. Cada fonte tem uma potência sonora específica. Por isso, o liquidificador gera um grande ruído (alta potência sonora) e a geladeira, um pequeno barulho (baixa potência sonora).

As unidades habitacionais em si mesmas não são fontes sonoras. No entanto, os ocupantes de uma habitação e seus aparelhos eletrodomésticos são fontes sonoras que devem ser levadas em consideração em um projeto arquitetônico. Por exemplo, a cozinha com seus liquidificadores e os banheiros com seus secadores de cabelo podem ser locais com intensas fontes sonoras. É importante, na medida do possível, projetar cozinhas e áreas de serviço com a preocupação de que os sons produzidos nestes ambientes não cheguem intensamente nos outros cômodos e nas outras residências.

Mesmo com um projeto adequado, há aparelhos eletrodomésticos que atuam como fontes sonoras tão intensas que ameacem a convivência de um morador com seus vizinhos. Os arquitetos podem orientar os corretores de imóveis e futuros proprietários sobre a importância dos ruídos emitidos pelos aparelhos eletrodomésticos. Mais especificamente, o arquiteto pode recomendar direta ou indiretamente que os moradores de suas construções consultem o *selo ruído* para secadores de cabelo, liquidificadores e aspiradores de pó. O selo ruído é um certificado emitido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) para os eletrodomésticos citados. A Figura 3 exibe o selo ruído, indicando a potência sonora do eletrodoméstico, sendo o indicador 1, para mais silencioso e 5 para menos silencioso.

Figura 3 – Selo ruído do INMETRO



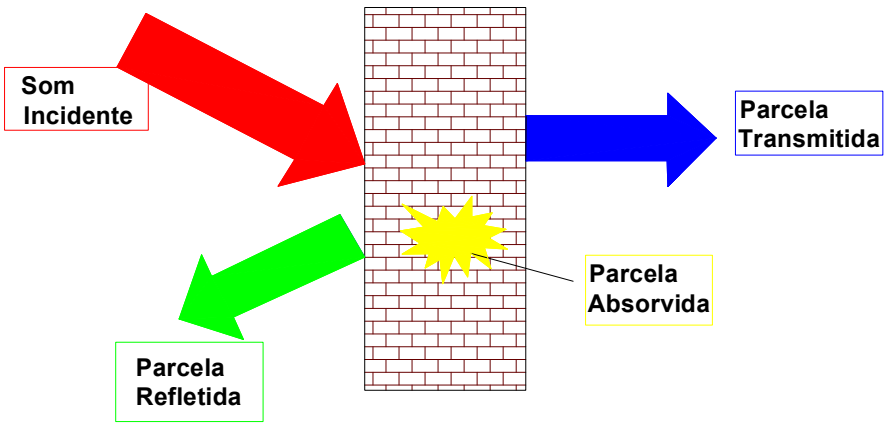
Fonte: http://www.inmetro.gov.br/noticias/verNoticia.asp?seq_noticia=3933. Acesso em 17 nov 2017 e http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/seloRuido.asp. Acesso em 18 abr 2020.

Propagação Sonora

O som transporta energia. Uma das leis mais fundamentais da Física é o princípio da conservação da energia, que é a base da emissão das ondas sonoras e de todos os fenômenos ondulatórios.

Para que uma fonte sonora emita um som, é necessário que ela retire energia de algo. Uma vez emitido, o som transporta energia proveniente da fonte. Quando o som encontra um obstáculo qualquer, como um edifício, uma parede, uma janela etc., a transferência de energia pode causar vários fenômenos ondulatórios, entre os mais conhecidos a transmissão, a reflexão e a absorção (Figura 4).

Figura 4 - Fenômenos ondulatórios.



Fonte: autores.

Quando o som encontra um obstáculo, ele pode passar a propagar-se no novo meio. Este é o fenômeno da transmissão. A onda do primeiro meio é denominada “onda incidente”, enquanto a onda do segundo, “onda transmitida”. A energia da onda transmitida vem da onda incidente. A frequência da onda transmitida é a mesma da onda incidente. Por exemplo, o som emitido na rua propaga-se pelo ar, podendo incidir em uma parede de alvenaria. A transmissão pode se repetir, a onda sonora na parede pode ser transmitida ao ar de uma sala. Assim, o som da rua pode chegar a uma sala com duas transmissões, uma do ar para a parede, outra da parede para o ar. O processo pode ser repetido enquanto houver energia.

O som também pode encontrar um obstáculo e retornar ao meio original. Este fenômeno é denominado “reflexão”. Assim como na transmissão, antes de encontrar o obstáculo, a onda é chamada de “onda incidente”. Após encontrar o obstáculo e voltar, a onda é intitulada “onda refletida”. A energia da onda refletida é proveniente da onda incidente e a frequência de ambas é a mesma. Um som refletido pode encontrar um novo obstáculo gerando uma segunda reflexão. Analogamente à transmissão, o processo pode se repetir enquanto houver energia. Um exemplo de reflexão do som, ocorre quando alguém canta no chuveiro. Durante as canções, o som é refletido várias vezes em todas as superfícies do banheiro. As orelhas do cantor recebem a primeira reflexão, a segunda, a terceira e todas as reflexões, dando a sensação de estrelato. O revestimento em azulejo é essencial para essa sensação. Durante a cantoria no banheiro, a pessoa se sente um grande astro, aumentando a potência sonora de sua voz e amplificando cada vez as reflexões sonoras.

Os fenômenos do eco e da reverberação estão relacionados à reflexão sonora e seus cálculos estão relacionados ao comprimento de onda sonoro. Estes conceitos e cálculos merecem um artigo à parte. Por exemplo, o que ocorre na música cantada no banheiro é efeito da reverberação, não do eco.

A absorção é o fenômeno em que o obstáculo absorve a energia da onda incidente. Como exemplo, há salas usadas em pesquisas acústicas onde as paredes são revestidas com material de alta absorção sonora. Estas salas são designadas “câmaras anecóicas”. O som que incide que na parede é quase totalmente absorvido.

Se toda a energia da onda é absorvida pelo obstáculo, não pode ocorrer reflexão e nem transmissão. Se apenas uma parte da energia sonora é absorvida, a energia restante pode ser transmitida ou refletida. Por exemplo, os materiais porosos como espuma ou fibrosos, como a lã de vidro, absorvem energia para reduzir a reflexão, mas não a transmissão.

É importante citar situações concretas de fenômenos ondulatórios no contexto da Acústica Arquitetônica e os desafios envolvidos. Por exemplo, a propagação do som é diferente para uma sala cheia de alunos e vazia. Os corpos humanos e roupas também absorvem o som, o que inibe a reverberação. Já em uma sala cheia, há menos reverberação, mas a intensidade da voz dos alunos pode aumentar a poluição sonora. Algumas salas de música de alta performance são projetadas para terem alta absorção sonora, mesmo quando vazias. Por exemplo, a sala São Paulo apresenta praticamente as mesmas características acústicas, estando cheia ou vazia. Os acentos da sala São Paulo apresentam características de absorção sonora muito próximas dos humanos. É como se a sala estivesse cheia o tempo todo. Dessa forma, o ensaio dos músicos fica mais tranquilo, porque saberão como o som se comportará quando a sala estiver lotada.

Durante a propagação, parte da energia sonora pode ser absorvida pelo próprio meio e pelos obstáculos. Seja ao ar livre (em um parque, na rua, em uma vila etc.) ou em um ambiente fechado (sala de aula, sala de estar, auditório, cozinha, banheiro etc.) o som é propagado até que toda a sua energia seja absorvida.

A dificuldade de audição do som à medida que o ouvinte se afasta da fonte não é causada apenas pela absorção do som. À medida que a onda sonora se afasta da fonte, ela ocupa um espaço cada vez maior. Assim, a energia que estava concentrada nas proximidades da fonte sonora se espalha. Esse processo é análogo à difusão de uma gota de tinta em um balde água. Então, a atenuação do som vem de uma combinação de absorção com a expansão da onda.

A propagação livre do som acontece quando segue diretamente, sem encontrar nenhum obstáculo à frente. Por exemplo, o ruído de motor de um carro propagando-se diretamente para a janela da sua sala. Se a janela estiver aberta, o ruído poderá ser ouvido com clareza, porque o som passará diretamente pela

abertura. Mas, se a janela estiver fechada, o som entrará reduzido, com menor volume. Isso quer dizer que houve perda de energia sonora no encontro com o obstáculo (janela) e parte da energia conseguiu passar a janela, isto é, foi transmitida.

Há ainda fenômenos da difração e da refração do som. É possível observar o fenômeno da difração quando uma pessoa ouve o som de um carro na esquina de um edifício em uma região onde o veículo não pode ser visualizado. Nesse caso, o som segue em propagação livre até encontrar a esquina do edifício, que provoca um desvio na propagação do som. E há o fenômeno da refração. Neste caso, há diferença na velocidade da onda quando passa de um meio para outro. Pode ser, por exemplo, do ar para a água, do ar para a alvenaria e da alvenaria para o ar. Isto quer dizer, que dentro da parede ocorrem os fenômenos da transmissão, refração e ainda a reflexão. Para efeitos práticos, nos cálculos da acústica arquitetônica, todos esses fenômenos são simplificados.

Recepção do som

Da fonte sonora, seguindo uma propagação livre ou com obstáculos, finalmente, o som encontra o alvo: as suas orelhas. A partir daqui o som pode ser agradável, desagradável, alto, baixo, e provocar uma infinidade de sensações psicoacústicas.

Se a sensação é de um som agradável, você não vai querer parar de ouvir. Se for desagradável, entra o conceito de desconforto acústico e a busca pelo conforto acústico.

Sensação auditiva

O som origina-se na fonte sonora, segue uma propagação livre ou com obstáculos, e pode chegar ao órgão responsável pela captação do som no corpo humano, a orelha.

O sistema auditivo é sensível às variações rápidas de pressão, logo, ele capta as variações de pressão associadas à propagação da onda sonora. O mecanismo do aparelho auditivo transforma o som recebido em sinal elétrico interpretado pelo cérebro (OKUNO et al., 1986). O processo é muito complexo e a interpretação cerebral é riquíssima. Por exemplo, o cérebro pode interpretar se

o som é alto ou baixo, grave ou agudo, falado ou cantado etc.

Sensação relacionada à pressão sonora

A variação da pressão do ar é interpretada pelo cérebro como intensidade sonora. Quanto maior a variação de pressão do ar relacionada à onda, mais intensamente o cérebro interpretará o som. Aumentar a intensidade sonora é como aumentar o volume do rádio. Os acústicos definem a "intensidade sonora" como uma grandeza proporcional ao quadrado da pressão sonora. Por exemplo, quando a pressão sonora dobra, a intensidade sonora quadruplica. Usando outra ilustração, se a pressão sonora triplica, a intensidade sonora é multiplicada por nove.

Para que o som sensibilize a orelha e seja interpretado pelo cérebro, ele deve ter uma pressão sonora mínima. Abaixo da pressão sonora mínima, o som não é ouvido. Essa pressão sonora mínima depende de cada pessoa. Estudos revelam que para os jovens, a pressão sonora mínima é de cerca de 0,00002 Pa (Pa é lido como Pascal). Para se ter uma ideia da sensibilidade da orelha humana, a pressão atmosférica é de aproximadamente 101.325 Pa (neste caso, Pa é lido como pascals[3]). O valor 0,00002 Pa é denominado "pressão de referência" e é representado por P_0.

O cérebro não interpreta a pressão sonora de forma linear e isso pode ser um complicador na análise do ruído. A sensação auditiva da pressão sonora segue uma escala logarítmica. Além disso, existe uma diferença mínima de pressão abaixo da qual a orelha é insensível e o cérebro não interpreta nada. Há ainda uma diferença de pressão máxima acima do qual o aparelho auditivo é danificado, causando dor e sequelas. A pressão mínima que a orelha humana ouve na maioria dos seres humanos é 0,00002 Pa, enquanto o valor máximo suportado é de aproximadamente 10^7 Pa (ou 100 milhões de Pascals). Para facilitar a associação entre a sensação auditiva e a pressão sonora, os acústicos definem uma outra grandeza, o "nível de pressão sonora". Essa grandeza está em base logarítmica, quantificando as sensações auditivas e facilitando o

3 O leitor não deve estranhar o termo "pascals". O Quadro Geral de Unidades de Medida (INMETRO, 2007), estabelece que a forma legal do plural de unidades derivadas de nomes próprios é feita acrescentando-se um "s". Por exemplo, a unidade pascal vem do nome do físico Blaise Pascal e o seu plural é Pascals.

manuseio com uma escala tão grande de valores de pressão, reduzindo o "tamanho" do número que se refere ao ruído, tornando-o mais fácil de interpretar. A unidade do nível de pressão sonora é o decibel (dB). Analogamente ao Pascal, o nome da unidade "decibel" é uma homenagem ao inventor Alexander Graham Bell. Ainda seguindo as regras do Quadro Geral de Unidades de Medida (INMETRO, 2007), o plural de decibel é "decibels". O decibel não é exclusivo da acústica, também é bastante utilizado em eletricidade e em outras áreas. No contexto da acústica, o nível de pressão sonora, *Lp*, em decibels é dado pela fórmula abaixo, onde a pressão de referência é $P_0 = 2.10^{-5}$ Pa (BISTAFA, 2006).

$$Lp = 20log\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

Em aplicações práticas envolvendo o nível de pressão sonora, é essencial dominar o cálculo logarítmico. Mas em termos didáticos, é interessante ter uma ideia intuitiva da relação entre a pressão sonora e o nível de pressão sonora. A pressão de referência é a pressão sonora mínima para que a orelha típica reconheça o som. O nível de pressão sonora correspondente a pressão sonora de referência é 0 dB. Quando a pressão sonora é 10 vezes maior do que a referência ($P_0 = 2.10^{-2}$ Pa), o nível de pressão sonora é associado a 20 dB. Se a pressão sonora é 100 vezes maior do que a referência, o som corresponde a 40 dB. Um nível de pressão sonora de 60 dB corresponde a uma pressão 1.000 vezes maior do que aquela de referência. Em resumo, cada aumento de 20 dB no nível de pressão sonora equivale a multiplicar a pressão sonora por 10. A Tabela 1 exibe a relação entre pressão sonora e nível de pressão sonora para alguns valores particulares.

Tabela 1 - Relação entre *pressão sonora* e *nível de pressão sonora* com alguns valores

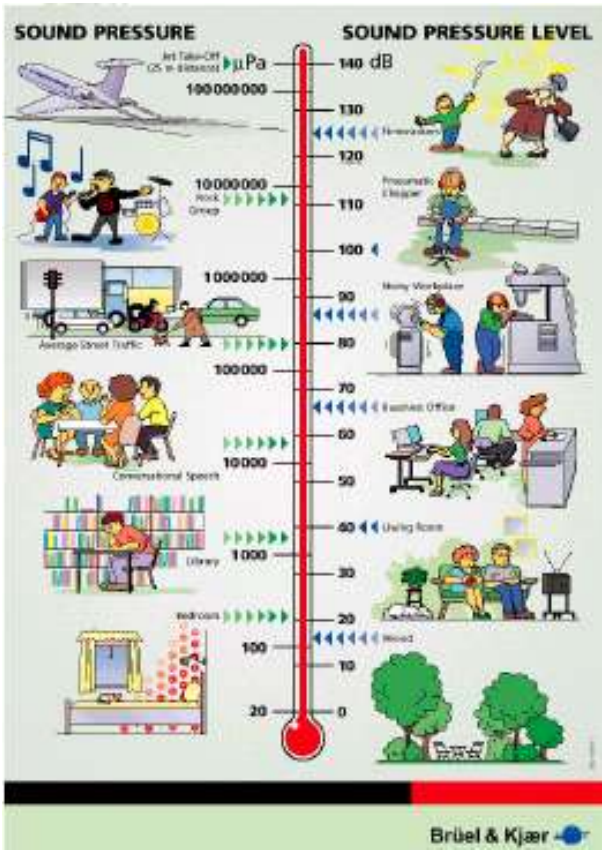
Pressão Sonora	**Nível de pressão sonora**	
0,00002 Pa	0 dB	Limiar da audição
0,0002 Pa	20 dB	
0,002 Pa	40 dB	
0,02 Pa	60 dB	
0,2 Pa	80 dB	
2 Pa	100 dB	
20 Pa	120 dB	
200 Pa	140 dB	Limiar da dor

Fonte: autores.

A pressão sonora de 200 Pa é o limiar da dor, isto é, até a pressão sonora suportada pela orelha humana. Conforme a tabela acima, o nível de pressão sonora máximo suportado pelo ser humano é 140 dB.

Como se pode avaliar o nível de um ruído no cotidiano? Quantos decibels correspondem a um som alto? Por exemplo, 40 dB é um som alto ou baixo? Para se ter uma ideia, 80 dB é o nível de ruído de uma via de tráfego rodoviário muito intenso. Já 40 dB é o nível de ruído que deveria ter em uma biblioteca. O leitor pode consultar os valores correspondentes da pressão sonora na Tabela 1. A Figura 5 mostra o nível de pressão sonora em várias situações do dia a dia.

Figura 5 - Nível de ruído em situações quotidianas



Fonte: Brüel & Kjær (20--).

No lado esquerdo da Figura 5, verifica-se que os sons estão representados com valores em pressão sonora. A pressão sonora apresenta mais dígitos do que o lado direito que está mostrando o nível de pressão sonora

em decibel. Essa é a vantagem de usar o decibel: caracterizar os sons com números mais fáceis de ler.

O aparelho utilizado para medir o nível de pressão sonora em um ambiente é chamado de sonômetro (ABNT, 2017). Esse aparelho capta a pressão sonora de um som qualquer através de um microfone. A informação é convertida por um circuito elétrico e através de cálculos complexos a leitura do nível de pressão sonora é dada em decibel. Como a unidade decibel não é utilizada exclusivamente em Acústica, não é correto chamar o medidor de nível de ruído de “decibelímetro” (INMETRO, 2007).

O nível de pressão sonora também pode ser calculado a partir da intensidade sonora mencionada no início da seção (NETO, 2014). No entanto, como a intensidade sonora não tem uma interpretação física imediata, o texto apresenta esta forma mais didática de estimativa do nível de pressão sonora.

Sensação associada à frequência sonora

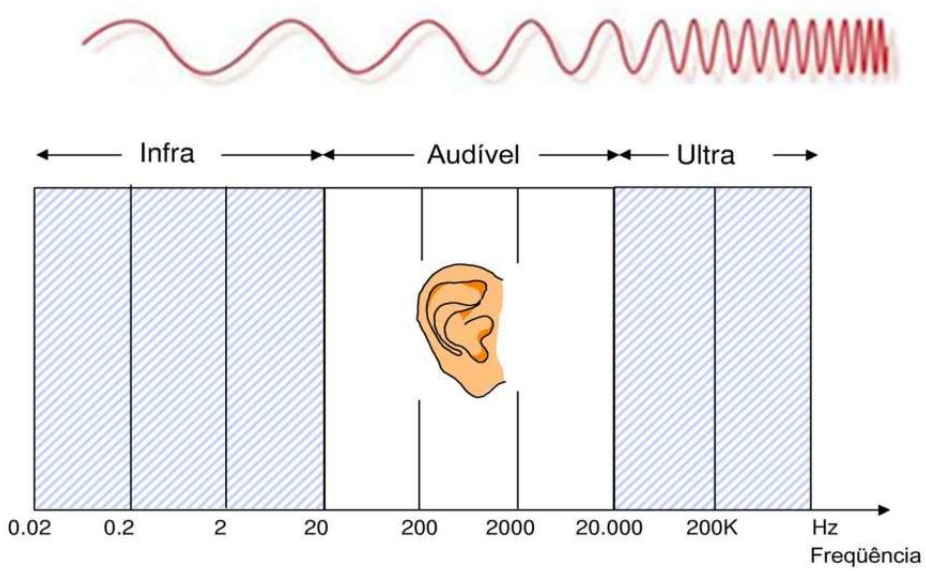
Analogamente ao que ocorre com a pressão sonora, o cérebro também traduz a frequência sonora em sensações. Os sons não são ouvidos abaixo de uma frequência mínima e nem acima de uma frequência máxima. Para a maioria da população mundial, o som será audível se a frequência sonora estiver entre 20 Hz e 20.000 Hz. Abaixo de 20 Hz, o som é chamado de “infrassom” e acima de 20.000 Hz, “ultrassom” (Figura 6).

As sensações relacionadas ao grave e ao agudo estão associadas às baixas e altas frequências. Quanto maior a frequência mais agudo é o som. E quanto menor a frequência mais grave é o som. No entanto, não existe um critério único para classificar um som como de “alta frequência” ou “baixa frequência”. Consequentemente, não há uma classificação única para grave e agudo (NETO; SANTOS, 2018). Por exemplo, duas pessoas concordarão que um som com 3.000 Hz é mais agudo do que aquele de 1.000 Hz. Um otorrinolaringologista classificará ambas as frequências com baixas pois estão abaixo de 10.000 Hz. No caso de um fonoaudiólogo, 3.000 Hz e 1.000 Hz são consideradas frequências respectivamente alta e baixa porque o divisor de sua classificação é 2.000 Hz (NETO; SANTOS, 2018).

Anteriormente, foi visto que $\lambda f = v$. Assim, para uma dada velocidade, o comprimento de onda e a frequência sonora são inversamente proporcionais.

Por exemplo, se v = 340 m/s, uma frequência sonora f = 340 Hz corresponde à um comprimento de λ = 1m. Já para a frequência sonora f = 680 Hz, o comprimento de onda é de λ = 0,5 m. A figura 6 representa como uma onda com comprimento cada vez menor está associada à uma frequência sonora cada vez maior.

Figura 6 – Infrassom, frequências dos sons audíveis e ultrassom.



Fonte: Brüel & Kjær (20--) e Adaptado de http://www.nupic.fe.usp.br. Acesso em 02 fev 2018.

Conforto acústico

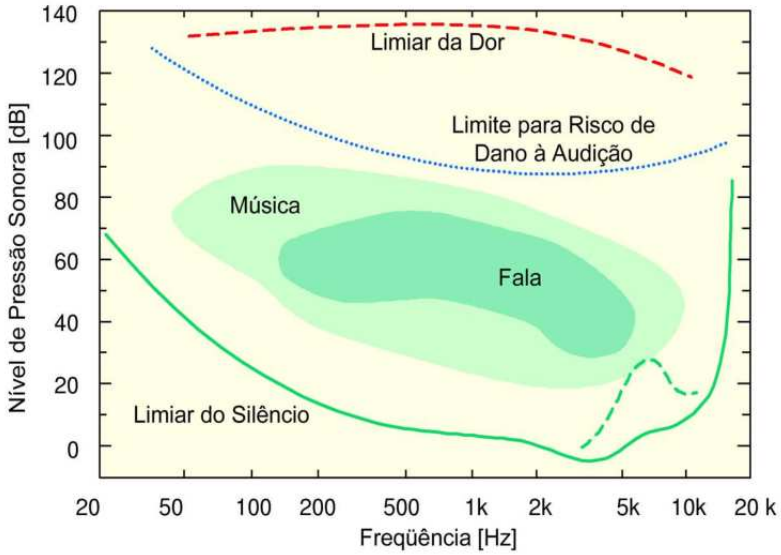
As sensações podem ser agradáveis ou desagradáveis. As sensações sonoras não são exceções. O conceito de desconforto acústico está associado às sensações acústicas desagradáveis. Em contrapartida, a busca pelo conforto acústico está relacionada às sensações acústicas agradáveis ou pelo menos a ausência delas, o silêncio.

O conceito formal de conforto acústico (FREITAS, 2005) pode não ser compreendido pela maioria da população, mas isso não diminui seu caráter prático. Em concordância com a introdução deste artigo, o conforto acústico é uma questão de saúde pública. Devido a isso, a exigência de morar em ambientes acusticamente confortáveis está se tornando cada vez mais frequente.

O conforto acústico é um dos fatores que implicam na qualidade de vida e no bem-estar. Assim, o arquiteto deve priorizar a elaboração de projetos acusticamente confortáveis (SOUZA et al., 2006; MEHTA et al, 1999). Em uma edificação, o conforto acústico é tão importante quanto os aspectos estéticos, os confortos ambiental, térmico e luminoso, o encanamento, a rede de esgoto, a instalação elétrica, a segurança contra incêndios e a localização.

Embora a pressão sonora e nível de pressão sonora sejam independentes da frequência, ambas as grandezas determinam o conforto acústico. Por exemplo, um som de 40 dB pode ter tanto 400 Hz como 800 Hz (Figura 7), mas pode acontecer de que os 40 dB em 400 Hz possam incomodar mais do que os 40 dB em 800 Hz. Assim, as intensidades e frequências dos sons vizinhos à uma edificação, devem ser cuidadosamente estudados antes da realização e execução de um projeto.

Figura 7 – Campo auditivo.



Fonte: Adaptado de Brüel & Kjær (20--).

O desconforto acústico surge quando o nível de ruído ao redor atrapalha a execução de algumas atividades que necessitam de um certo nível de silêncio. A impossibilidade de realizar tais atividades gera desconforto físico ou psicológico. O desconforto físico induz o psicológico e vice-versa. A partir daí surgem os elevados índices de reclamação.

Os arquitetos têm em mãos o poder de realizar projetos acústicos que podem evitar esses problemas. As normas de acústica são auxiliares aos projetistas. Através das normas, o arquiteto vislumbra um caminho para atender

às necessidades acústicas de um espaço urbano ou de desempenho de edificações para alcançar o conforto acústico tão almejado por moradores e residentes. Dentre as normas, citam-se a NBR 10151 (ABNT, 2019) que trata da avaliação do ruído ambiente externo à edificação. A NBR 10152 (ABNT 2017) que indica os níveis de pressão sonora em ambientes internos com diversas finalidades, para trabalho ou descanso. O conjunto de seis partes da norma de desempenho de edificações NBR 15575 (ABNT, 2013) é fundamental porque define critérios de desempenho para diversos requisitos, entre eles, o desempenho acústico em edificações residenciais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em projetos de acústica arquitetônica os fenômenos ondulatórios estão constantemente presentes. Os projetos de isolamento precisam ter atenção a transmissão sonora. Bons materiais, altamente isolantes acústicos, devem fazer parte de paredes de geminação e da fachada, seja de residências, cinemas, salas de escritório etc.

Adicionalmente à transmissão sonora, a absorção e a reflexão precisam ser cuidadosamente pensadas nos projetos em salas de aula, auditório, cinema ou teatro. Estes são ambientes onde o controle da reverberação é a essência do projeto. Nestes casos, o controle da reflexão é extremamente importante e se faz com materiais de absorção. O revestimento das paredes com materiais com absorção sonora adequada e até a colocação de móveis com absorção devidamente calculada ajudará aos ouvintes a compreender a palavra falada no ambiente projetado.

Os conceitos de absorção e reflexão estão intimamente ligados à reverberação. Quanto maior a absorção, menor é a reflexão e menor será a reverberação. Em projetos acústicos, a reverberação é controlada com a adição ou remoção de materiais que absorvem a energia sonora. Ambientes reverberantes não são propriamente ruins, se forem utilizados para a música. Já para a palavra falada, ambientes específicos como os auditórios, requerem uma menor reverberação. Cada projeto precisa ser pensado adequadamente a seu propósito.

Na acústica arquitetônica, a relação entre comprimento de onda e

frequência também é extremamente importante. Como já foi mencionado, frequências altas têm comprimentos de onda pequenos e são fáceis de resolver. As frequências baixas têm comprimentos de onda grandes e são mais difíceis de controlar.

Para as altas e médias frequências, há materiais de absorção sonora específicos, como os fibrosos e porosos, para cada grupo de frequências. Já para as baixas frequências, a solução poderá não ser tão simples quanto para as outras frequências. Por isso, o projetista precisa saber quais faixas de frequências estão produzindo os problemas para aplicar a solução adequada.

O arquiteto também deve preocupar-se com o contexto do espaço urbano. A propagação da onda sonora é livre até encontrar um obstáculo, que pode ser uma edificação, um muro, ou o relevo da região. No projeto urbanístico não se pode deixar de lado a topografia para colocar o conforto acústico em pontos estratégicos. Por exemplo, uma rodovia colocada após a construção de uma escola levará o ruído diretamente às dependências escolares. Para reduzir esse impacto, a construção de barreiras acústicas reduzirá o ruído por transmissão sonora e por difração. Se acontecer o inverso, isto é, a escola for construída após a rodovia, deve-se estudar a redução sonora por meio do relevo natural da região.

Se a edificação tiver um entorno ruidoso a fachada precisa ser projetada adequadamente para atender à legislação local e às normas. Alvenaria ou outro sistema construtivo em composição com as esquadrias requerem índices de redução sonora próprios para atender às necessidades dos moradores.

Em todos os lugares, há problemas com vizinhança barulhenta. O primeiro passo a ser dado em caso de vizinho barulhento é recorrer ao diálogo. Nessa hora, coloca-se em prática a cidadania, o bom senso e a política da boa vizinhança. No entanto, há que salientar a importância do papel do arquiteto. Um bom projeto acústico evitará desconfortos e tornará o ambiente residencial como um verdadeiro lar, para trabalho e/ou descanso.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151**. Acústica – medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – aplicação de uso geral. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152**. Acústica – níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**. Edifícios habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro. 2013.

BARROSO-KRAUSE, Claudia et al. **Bioclimatismo no projeto de arquitetura**: dicas de projeto. DTC-Proarq, FAU-UFRJ. 2002.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle do ruído,** São Paulo: Edgard Blücher, 2006, 368 p.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 001/1990** - "Dispõe sobre critérios e padrões de emissão de ruídos, das atividades industriais" - Data da legislação: 08/03/1990 - Publicação DOU, de 02/04/1990, pág. 6408. Disponível em: http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=98. Acesso em 04 mai 2020.

BRÜEL & KJÆR. **Acústica.** Course in company. [20--].

DAVIES, Hugh; VAN KAMP, Irene. Noise and cardiovascular disease: A review of the literature 2008-2011. **Noise and Health.** v. 14, n. 61, p.287-291. London, mar. 2012. Disponível em: http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2012;volume=14;issue=61;spage=287;epage=291;aulast=Davies. Acesso em 30 abr 2020.

FREITAS, Ruskin. O que é Conforto? In: encontro nacional do conforto no ambiente construído, 8., 2005, Maceió - AL. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. p. 726-735.

GRIMWOOD, Colin. Complaints about Poor Sound Insulation between Dwellings in England and Wales. **Applied Acoustics**, Great Britain, v. 52, n. 3/4, p. 211-223, Nov./Dec. 1997.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - INMETRO. **Quadro geral de unidades de medida**: Resolução CONMETRO n° 12/88. 4ª ed. Rio de Janeiro: SENAI; 2007.

LAIRD, Donald A. e COYE, Kenneth. Psychological measurements of annoyance as related to pitch and loudness. **Journal Acoustical Society of America**, v. 1, p. 158-163. 1929.

MEHTA, Madan; JOHNSON, Jim; ROCAFORT, Jorge. **Architectural Acoustics:** Principles and Design. London: Prentice Hall,1999. 446p.

MILLER, James D. Effects of noise on people**. Journal of the Acoustical Society of America.** v. 56, n. 3, p. 729-764. September 1974.

NETO, Maria de Fátima Ferreira. **60+60=63?** 2014. Portal Píon. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/v1/portalpion/index.php/artigos/23-60-60-63. Acesso em: 6 maio 2020.

NETO, Maria de Fátima Ferreira; SANTOS, Leonardo Sioufi Fagundes dos. Medição de frequências e classificação em grave e aguda. **Revista Intellectus**, Jaguariúna, v. 1, n. 46, p. 40-58, ago. 2018. Trimestral. Disponível em: http://www.revistaintellectus.com.br/ArtigosUpload/48.585.pdf. Acesso em: 06 maio 2020.

OKUNO, Emico; CALDAS, Iberê L.; CHOW, Cecil. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. São Paulo: Harbra Ltda. 1986. 490p.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA – SOBRAC. **Ano do som em 2020**. 2019. Disponível em: http://acustica.org.br/2019/04/ano-do-som-em-2020/. Acesso em: 14 abr 2020.

SOUZA, Léa C. L.; ALMEIDA, Manuela G; BRAGANÇA, Luís. **Bê-ábá da acústica arquitetônica: ouvindo a arquitetura.** São Carlos: EDFUSCAR, 2006. 150p.

TELLES, Dirceu D.; NETTO, João M. (org.). **Física com aplicação tecnológica:** oscilações, ondas, fluidos e termodinâmica. v. 2. São Paulo: Edgard Blücher, 2013. 352p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Burden of disease from environmental noise:** Quantification of healthy life years lost in Europe. 2011. Disponível em: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf. Acesso em 15 abr 2020.

ZAJARKIEWICCH, Daniel Fernando Bondarenco. **Poluição sonora urbana:** principais fontes. Aspectos jurídicos e técnicos. 2010. 235 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Direito, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2010.

SOBRE OS AUTORES

MARIA DE FATIMA FERREIRA NETO
Física, Drª. Engenharia Civil
Responsável técnica na Apoio Acústico ltda.
e-mail: fatimafneto2@gmail.com

LEONARDO SIOUFI FAGUNDES DOS SANTOS
Físico, Dr. Física
Professor Adjunto IV de Física da UNIFESP, campus Diadema
Criador do Blog Quente e Calculista
www.quentecalculista.blogspot.com
Coordenador do Portal Píon da Sociedade Brasileira de Física
http://www.sbfisica.org.br/v1/portalpion/
e-mail: leosioufi@gmail.com