



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

O quarteto de cordas friccionadas e as possibilidades acústicas nas salas

Grillo, M. L. N.¹; Baptista, L. R. P. L.²

^{1,2} Instituto de Física, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, marialucia@grillo.com.br, maestrobaptista@gmail.com

Resumo

Músicos profissionais muitas vezes enfrentam problemas com o espaço em que se apresentam. No caso do quarteto de cordas, uma formação muito tradicional e sofisticada desde Haydn, as preocupações são principalmente no sentido de: se o ambiente acústico é muito reverberante ou tende mais para uma câmara anecóica. Os extremos são sempre desagradáveis, tanto para quem toca música como para ouvintes pagantes, que não entendem a sensação frustrante de não entender a mensagem do compositor e dos intérpretes. Quem paga os ingressos merece respeito e qualidade de som. Há músicos que não se importam com o espaço musical em que trabalham e depois não entendem porque fracassam na profissão. Colocar as pessoas em uma sala inadequada para ouvir cordas friccionadas, como o quarteto de cordas, pode ser decepcionante e exaustivo. Algumas salas de concerto bem conhecidas possuem acústica ruim. Existem, então, alguns fatores essenciais para o sucesso dos ouvintes. A avaliação acústica da sala pode ser feita por meio de parâmetros objetivos (mensuráveis por meio de aparelhos ou por simulações) e subjetivos (avaliação feita por testes de percepção). Os principais parâmetros são o tempo de reverberação, a clareza (relativa à definição), o fator de força e a razão de graves e agudos. Os parâmetros subjetivos relacionados a esses parâmetros objetivos são, respectivamente: reverberância, clareza, nível sonoro subjetivo e timbre ou equilíbrio da sala. A avaliação subjetiva pode ser feita no local ou por meio de auralização, simulando a posição do ouvinte. Utilizamos o recurso de auralização e analisamos duas salas com o uso de dois cordofones friccionados, o violino e a viola. Vimos que com algumas modificações os espaços poderiam se tornar mais adequados para uso em apresentações de quartetos de cordas.

Palavras-chave: cordofones friccionados, quarteto de cordas, acústica de salas, auralização.

PACS: 43.55.Mc, 43.75.Yy, 43.75.De.

The bowed string quartet and the acoustic possibilities in the rooms

Abstract

Professional musicians often face problems with the space in which they perform. In the case of the string quartet, a very traditional and sophisticated formation since Haydn, the concerns are mainly in the sense of: whether the acoustic environment is very reverberant or tending more towards an anechoic chamber. Extremes are always unpleasant, both for those who play music and for paying listeners, who do not understand the frustrating feeling of not understanding the message of the composer and that of the performers. Who pays for tickets deserves respect and sound quality. There are musicians who do not care about the musical space in which they work and then do not understand why they fail in the profession. Putting people in an unsuitable room to hear rubbed strings, such as the string quartet, can be disappointing and exhausting. Some well-known concert halls have poor acoustics. There are then some essential factors for the success of the hearings. The acoustic evaluation of the room can be done through objective parameters (measurable by means of devices or by simulations) and subjective (evaluation made by perception tests). The main parameters are the reverberation time, the clarity (related to the definition), the sound strength and the bass and treble ratio. The subjective parameters related to these objective parameters are, respectively: reverberation, clarity, subjective sound level and room tone or balance. Subjective evaluation can be done on site or through auralization, simulating the position of the listener. We used the auralization feature and analyzed two rooms with the use of two rubbed cordophones, the violin and



the viola. We saw that with a few modifications the spaces could become more suitable for use in string quartet presentations.

Keywords: bowed chordophones, string quartet, room acoustics, auralization

1. INTRODUÇÃO

O quarteto de cordas friccionadas traz uma certa distinção para as Universidades e Escolas de Música que possuem esta formação musical. Um exemplo é o Quarteto Amadeus, que ficou famoso por suas interpretações, e outros tantos quartetos também. Geralmente músicos profissionais são obrigados, por contrato legal, a tocarem em ambientes muitas vezes reverberantes ou quase semelhantes a câmaras anecóicas (sem nenhuma reverberação). Na Alemanha, em Munique, os autores desse trabalho tiveram a oportunidade de assistir a um concerto de órgão, em uma igreja, que foi quase uma tortura: excessivamente reverberante, onde as pessoas se entreolhavam naquela balbúrdia de sons e sem entenderem o que acontecia. Lugares com torres ou tetos muito altos dispersam o som e fica difícil entender a música.

É notório que o quarteto de cordas friccionadas tem menos intensidade sonora que um grande órgão, porém não está livre dos problemas causados pela reverberação ou por um ambiente muito seco. Os músicos quando vão tocar em uma sala deveriam investigar qual é o tipo de sala de concertos mais adequada para receber o quarteto de cordas. Para contornar os possíveis problemas acústicos de salas há maneiras diferentes de tocar em ambientes diversos. Adequar o vibrato em ambientes mais secos, aumentando sua velocidade, e fazer vibratos discretos e lentos em ambientes reverberantes, é um dos cuidados a serem tomados pelos músicos do quarteto. Tudo pela inteligibilidade e mais conforto para os ouvintes pagantes. O repertório deve ser pensado da mesma maneira, adequando cada estilo às condições acústicas das salas.

Neste trabalho foram feitas medidas em um ambiente grande e outro pequeno (um Teatro e um Laboratório), em lugares diferentes da plateia para entendermos melhor os fenômenos acústicos que podem causar tantos problemas.

Conforme Perez e Grillo [1] a Acústica Musical é um ramo da acústica que se dedica ao estudo pormenorizado de todo som musical e suas particularidades em ambientes diversos. Neste trabalho foram analisados dois ambientes considerando as quatro características do som:

a) Altura - a região de atuação dos instrumentos, no quarteto de cordas friccionadas pode variar de Dó1 a Dó7, criando uma grande extensão sonora no quarteto de cordas, isso sem levar em consideração os harmônicos artificiais.

b) Intensidade - a dinâmica pode variar de um “fff” (fortissíssimo) a um “ppp” (pianissíssimo), que podem ser medidos pela quantidade de decibels, por um sonômetro.

c) Timbre - os timbres, que são a personalidade do som, do violino, da viola e do violoncelo, que apesar de obedecerem a um mesmo mecanismo de excitação, diferem pelo tamanho e proporção de suas caixas acústicas, bem como pela espessura das cordas, que proporcionam diferenças significativas no som produzido. Às vezes, os compositores colocam, por exemplo, o violoncelo mais agudo que o primeiro violino, essa inversão de papéis traz uma nova dimensão aos instrumentos e demonstra a versatilidade dos cordofones friccionados no quarteto. Para os ouvidos atentos, a percepção de qual instrumento está fazendo determinada função musical é fácil e o instrumento é reconhecido pelas particularidades sonoras que envolvem o timbre.

d) Duração - esses instrumentos (cordas friccionadas) levam uma grande vantagem sobre os instrumentos de sopro, por exemplo, que precisam constantemente de tomadas de ar (respiração obrigatória marcada). Os cordofones friccionados podem executar sons de duração infinita, principalmente quando o executante consegue esconder as trocas de sentido do arco (para baixo e para cima),

trazendo uma ideia parecida com a do grande órgão de tubos num contínuo soar interminável.

Se compararmos o quarteto de cordas com o quarteto vocal clássico, veremos que o violoncelo pode ser: baixo, tenor e até contralto. A viola seria o tenor, contralto e até soprano. Já os violinos (primeiro e segundo) podem executar contralto e soprano. Constatamos então que os instrumentos mais graves (violoncelo e viola) podem chegar a regiões muito agudas. Os instrumentos naturalmente agudos (violinos) possuem uma tessitura menor, com uma menor abrangência sonora (menor variação de frequências), dentro dos 97 sons da escala geral e nossa capacidade em ouvi-los.

Violino, Viola e Violoncelo formam um grupo interessante, que pode ser comparado a uma família, com pai, mãe e filhos. As origens desses instrumentos são controversas como a própria história humana, mas temos um ponto de partida confiável que são os modelos antigos que temos até hoje (Amati, Stradivari, Guarneri, dentre outros).

Antônio Stradivari, talvez o mais aclamado Luthier da época, virou sinônimo de perfeição na construção de violinos e outros cordofones friccionados. Segundo Sadie [2] Stradivari produziu cerca de 1.000 instrumentos, dos quais cerca de 600 ainda estão expostos em museus, coleções, acervos ou sendo tocados por músicos profissionais em orquestras sinfônicas internacionalmente renomadas.

Apesar do violino possuir de 80 a 84 componentes, basicamente podemos dividi-lo em três grandes partes: braço, corpo e arco, assim como a viola e o violoncelo, que pertencem à família. Materiais diferentes (madeiras) são usados na confecção dos cordofones friccionados.

As combinações sonoras nesta formação musical provocam inusitados efeitos que são estudados artisticamente e cientificamente. Violoncelo, viola e violinos podem emitir sons muito diferentes e interessantes acusticamente.

Segundo Donoso [3], em Berlin Einstein tocava sonatas com Max Planck e em Princeton se reunia semanalmente com colegas para tocar música de câmara, duos, trios, quartetos e quintetos. Em relação às pesquisas físicas, Jean Baptiste Biot (1774-1862), conhecido pela Lei de Biot-Savart, estudou o limiar de audição para altas frequências, os modos vibracionais do tampo do violino e a função do cavalete e da alma. Já Félix Savart (1791-1841) colaborou na invenção de novos instrumentos da família do violino, como a viola e o violoncelo. Também o físico alemão Hermann von Helmholtz (1821-1894), conhecido por formalizar o princípio de conservação de energia, estudou vibrações de colunas de ar, frequências de ressonâncias de cavidades e temperamento de escalas musicais.

Fizemos experimentos usando as cordas soltas dos instrumentos para verificar as diferenças naturais, além de trechos musicais e alguns efeitos. Um fator importante, acusticamente falando, são as articulações que provocam efeitos distintos, onde as notas musicais podem ser emitidas: ligadas, não muito ligadas, destacadas, saltadas e de várias outras formas. Essas articulações influenciam na forma como ouvimos os sons. Os ambientes onde o quarteto de cordas toca influi no modo de tocar, isso claro, se os músicos tiverem consciência da acústica de ambientes e sua importância. Normalmente os músicos não têm essa formação nas faculdades de música, torna-se então fruto de experiência ao longo do tempo passando por situações difíceis.

A acústica de salas é um ramo que se propõe a estudar a propagação sonora em ambientes fechados, como salas de concerto, ópera, teatros e auditórios. A propagação, a transmissão sonora e o isolamento acústico são assuntos atrelados aos ramos da acústica arquitetônica e de edifícios. Muitas vezes, encontramos o termo “acústica de auditórios”, uma vez que a maior parte das salas destinadas a música são auditórios. No entanto, muitos lugares não foram construídos com esse fim, embora apresentem uma boa acústica, como é o caso dos teatros, por esse motivo, costumamos utilizar o termo “salas” para abranger essas situações.



Os primeiros recintos destinados a espetáculos foram os anfiteatros gregos e romanos a céu aberto, que datam do período entre o século V a. C. ao século II d. C., e se prestavam ao teatro, à dança e à música. Eles podem ser considerados os ancestrais das salas de hoje [4].

As experiências acústicas foram feitas através da auralização, com simulações que colocam o ouvinte, de acordo com as medidas das salas, nos ambientes acústicos, e traz percepções interessantes tanto em uma sala grande, como o Teatro Odylo Costa Filho, quanto em salas pequenas, como o Lacustamm (Laboratório de Acústica Ambiental e Musical). Esse estudo é interessante para prever problemas na construção de salas com finalidades diversas. Os testes foram feitos na Universidade Técnica da Renânia do Norte-Vestfália, de Aachen, na Alemanha, durante pesquisas de pós-doutorado de um dos autores.

Os instrumentos de cordas friccionadas têm boa capacidade de adaptação e conseguem bom aproveitamento, mas quando o ambiente é seco demais, sonoridades indesejadas podem ser evidenciadas, como sons mais agressivos (notas acompanhadas de ruídos não harmônicos) em algumas regiões e cordas, também a possibilidade de pequenos “lobos” expostos, sons indesejáveis próprios dos cordofones friccionados. Esses são alguns problemas acústicos dos instrumentos do quarteto de cordas que pioram com uma sala inadequada.

2. DESCRIÇÃO DAS SALAS ESTUDADAS

O estudo foi feito com o uso de duas salas virtuais, que simulam duas salas reais da Universidade do Estado do Rio de Janeiro: Teatro Odylo Costa Filho e Lacustamm (Laboratório de Acústica Ambiental e Musical). As salas são muito diferentes em tamanho, materiais internos e usos, por isso fontes sonoras são percebidas de formas muito diferentes bem como seus parâmetros acústicos.

O teatro tem um volume aproximado de 22.800 m³, com 42 m × 33,4 m de área útil. Sua altura não é constante, variando de 20,8 m (palco) a 6,9 m (entrada). O teto fica mais alto à medida que os assentos se afastam do palco. O auditório pode acomodar até 1.250 pessoas. Os materiais

usados no interior são: cortinas de veludo, paredes e pisos acarpetados, bancos estofados com veludo, piso de madeira no palco, nove placas refletoras no teto e concreto acima dos refletores do teto e no palco atrás das cortinas. É usado basicamente para conferências e apresentações musicais.

O laboratório tem um volume de apenas 128 m³, e conta com três janelas com caixilharia de alumínio e vidro. O interior consiste de paredes, piso e teto de concreto, cadeiras revestidas de fórmica e quadro branco, uma estante de metal no fundo da sala, uma mesa com computador, mesa central do professor forrada com fórmica, outra mesa próxima a uma janela e quatro armários de madeira. O laboratório pode acomodar até 15 pessoas e é usado como uma sala de pesquisa e sala de aula.

Este trabalho estuda essas salas em uso, ocupadas até a capacidade máxima, sem microfones, com instrumentos acústicos de cordas friccionadas (violino e viola) e consideramos o ponto de vista apenas dos ouvintes. O ponto de vista do músico nestas salas foi estudado anteriormente [5].

As figuras 1 e 2 mostram os desenhos das salas em CAD (*computer aided design*) desenhadas com o *software* SketchUp. Podem ser observados alguns pontos brancos, que são as posições consideradas dos ouvintes.

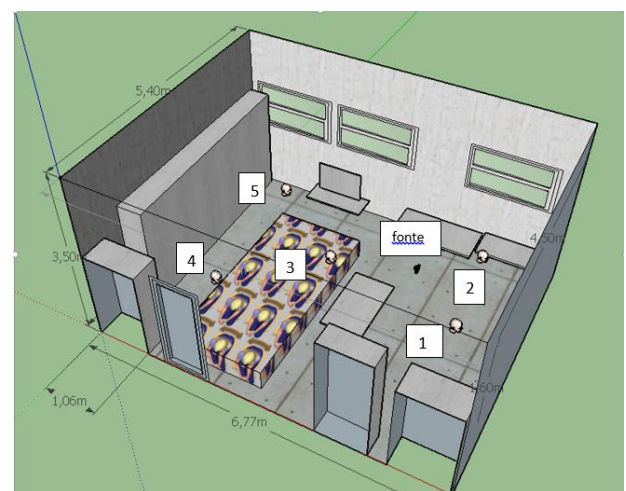


Figura 1: Laboratório mostrando a área de audiência lotada e cinco posições de ouvintes. Próximo à mesa no centro do laboratório está representada a posição do instrumento musical.

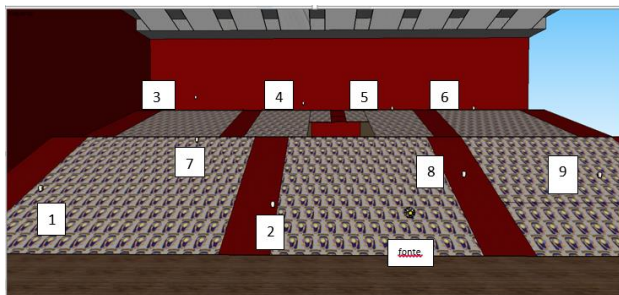


Figura 2: Teatro lotado, mostrando a posição de nove ouvintes e a fonte no palco.

3. OS PARÂMETROS ACÚSTICOS DAS SALAS E A AURALIZAÇÃO

Como nos lembra Brandão [6], a experiência de qualquer pessoa em uma sala é subjetiva, e é descrita por expressões como: nesta sala o som é confuso, esta sala é muito viva, o som é brilhante, etc. Ele nos lembra que, apesar das diferenças de idioma, gosto, cultura e treinamento auditivo, existe um grau de concordância na descrição da percepção dos sons em salas, uma vez que o sistema auditivo-cognitivo dos seres humanos é similar. A sensação subjetiva pode ser expressa através de parâmetros acústicos objetivos, a partir da resposta ao impulso da sala. Como a experiência subjetiva não apresenta um único aspecto, ou seja, uma sala não pode ser descrita por um único adjetivo, é adequado usar um conjunto de parâmetros objetivos para avaliar uma sala.

Uma sala pode ser avaliada por ouvintes posicionados em diferentes pontos da sala ou ainda através da auralização, com salas simuladas onde os ouvintes são posicionados virtualmente no interior da sala. Neste trabalho utilizamos a auralização para a avaliação das salas e os parâmetros objetivos foram medidos através das salas virtuais, que representam salas reais (conforme descrição na seção anterior).

Essa análise pode ser feita com diferentes objetivos. Alguns trabalhos [7, 8] buscam entender como era a acústica de salas que já foram parcialmente destruídas, outros procuram conhecer como será a acústica da sala mesmo antes de sua construção [9]. No presente trabalho foram estudadas duas salas já em uso. Com este tipo de estudo podem ser feitas

sugestões para modificações na sala ou mesmo adequação da performance de um músico [10] visando uma melhor escuta para os ouvintes.

A norma ABNT NBR ISO 3382-1 [11] apresenta os parâmetros de acústica de salas de espetáculos (como o teatro do presente trabalho) e como devem ser medidos. A segunda parte dessa norma (ISO 3382-2 [12]) apresenta a forma de medir o tempo de reverberação em salas comuns (como a sala menor usada como laboratório).

Selecionamos alguns parâmetros que consideramos mais relevantes para a presente análise. Usamos o mesmo conjunto nas duas salas, que são muito diferentes, o que naturalmente se reflete nos diferentes valores obtidos desses parâmetros. Seguimos a mesma seleção feita em Grillo, Baptista e Aspöck [5]. Os seguintes parâmetros acústicos foram investigados: T_{20} , G , EDT, D_{80} e C_{80} .

Os parâmetros T_{20} e EDT referem-se ao tempo de reverberação, são medidos em segundos e estão relacionados à percepção subjetiva da reverberância. O parâmetro EDT (*early decay time*) é o tempo de decaimento inicial e fornece informações sobre o comportamento da curva de decaimento do som logo após o término da emissão da fonte – mede o tempo necessário para um decaimento de 10 dB no nível de pressão sonora, após a fonte ser desligada (pode ser chamado de T_{10}). Segundo Carvalho e Rolla [13], EDT apresenta uma relação maior com o decaimento inicial do que com o resto do campo reverberante.

O fator de força G expressa a energia do som (*sound strength*) em decibels. Segundo Brandão [6], é uma medida da influência da sala no volume sonoro ou intensidade percebida do som (nível sonoro subjetivo – *loudness*). Está associado ao campo reverberante que fornece suporte ao som direto da fonte sonora. É a razão entre a pressão sonora no local investigado e a pressão sonora de uma fonte omnidirecional a uma distância de 10 m em campo livre [11].

Segundo Henrique [14], para a inteligibilidade da palavra, isto é, a clareza ou a definição de



uma sala para a palavra, consideramos o som, em decibels, que chega nos primeiros 50 ms depois do som direto. Usa-se então o C_{50} ou o D_{50} . No caso de música consideramos o som direto mais as primeiras reflexões que chegam nos primeiros 80 ms (parâmetros C_{80} ou D_{80}). Como esses parâmetros estão relacionados matematicamente, basta medir C ou medir D, conforme o interesse. Neste trabalho o interesse está na inteligibilidade da música, por isso medimos o C_{80} . A expressão física de clareza C_{80} (dB) é dada por 10 vezes o logarítmico da razão entre a energia recebida nos primeiros 80 ms e a energia restante. Ainda segundo Henrique [14], podemos considerar a clareza horizontal, relacionada à percepção dos sons executados sucessivamente, e a clareza vertical, que avalia o grau de definição com que ouvimos distintos sons executados simultaneamente.

Segundo Brandão [6], o timbre de uma sala é um parâmetro subjetivo relacionado à influência da sala no equilíbrio entre as baixas, médias e altas frequências. Usa-se então como parâmetros objetivos o BR (*bass ratio* ou razão de graves) e o TR (*treble ratio* ou razão de agudos), que podem ser definidos em função de T_{60} pelas equações 1 e 2:

$$BR = \frac{T_{60}(125Hz) + T_{60}(250Hz)}{T_{60}(500Hz) + T_{60}(1000Hz)} \quad (1)$$

$$TR = \frac{T_{60}(2000Hz) + T_{60}(4000Hz)}{T_{60}(500Hz) + T_{60}(1000Hz)} \quad (2)$$

ou da mesma forma em função de EDT ou de G. Uma sala ideal é aquela em que $BR = TR = 1$, onde todas as frequências são ouvidas da mesma forma.

Os sinais usados nos experimentos foram criados com uma simulação binaural baseada nas Funções de Transferência (HRTFs - *Head-Related Transfer Functions*). O sinal de saída binaural da simulação é gerado por uma convolução com a resposta impulsiva binaural da sala (BRIR - *binaural room impulse response*) [15, 16].

Os sons foram gravados com um microfone Neumann TLM 170 a uma distância de aproximadamente 1 m na frente do músico. A sala de gravação era um laboratório seco na Universidade Técnica de Aachen (RWTH), cumprindo os requisitos da recomendação ITUR BS.1116-3. A sala tem um volume de aproximadamente 115 m^3 e um tempo de reverberação $T_{20} = 0,15 \text{ s}$, em média para a banda de oitava de 500 Hz e 1000 Hz.

Esses sinais registrados foram convoluídos com os BRIRs que foram simulados para cada combinação fonte-receptor de ambas as salas. Os sinais simulados foram reproduzidos com o uso do software REAPER através de fones de ouvido. Os parâmetros acústicos foram obtidos com o *software* Auravis.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

A simulação para a obtenção dos parâmetros foi feita nas duas salas, seguindo as indicações das normas acústicas [11, 12]. Na sala menor (laboratório) foram escolhidas 5 posições. Na figura 1 são mostradas as 5 posições numeradas, com as seguintes distâncias da fonte, seguindo a ordem da numeração: 1,42 m; 1,61 m; 1,60 m; 3,35 e 3,46 m. Na sala maior (teatro) utilizamos 9 posições, com fonte no centro do palco, com as seguintes distâncias da fonte, seguindo a ordem da numeração: 11,17 m; 12,8 m; 32,11 m; 27,22 m; 24,5 m; 25,42 m; 16,47 m; 18,04 m e 17,06 m.

As simulações foram feitas com o programa Auravis, usando áreas de escuta (*audience áreas*) sobre algumas posições de ouvintes (ver figuras 1 e 2). A mudança de posição gerou variação nos parâmetros T_{20} , G, EDT, D_{80} e C_{80} em ambas as salas, sendo a variação muito maior no teatro, conforme já era esperado, uma vez que as distâncias variaram muito mais que no laboratório. Na figura 3 estão apresentados os parâmetros do Lacustamm correspondentes às posições 1 e 2 (frente), que aparecem também na tabela 1. Na figura 4 estão apresentados os parâmetros do Teatro nas posições 1 e 2 (frente), também listados na tabela 2.

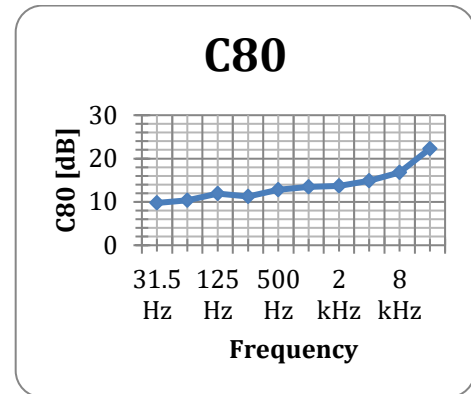
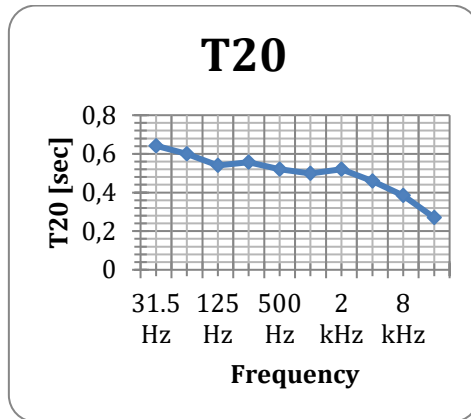
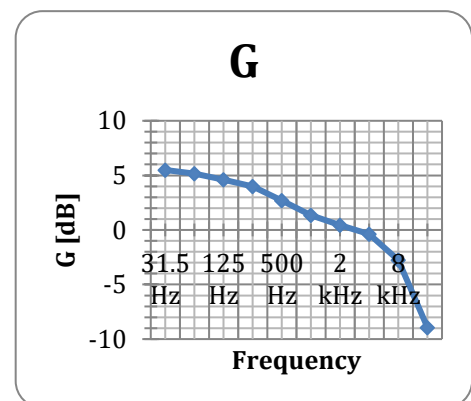
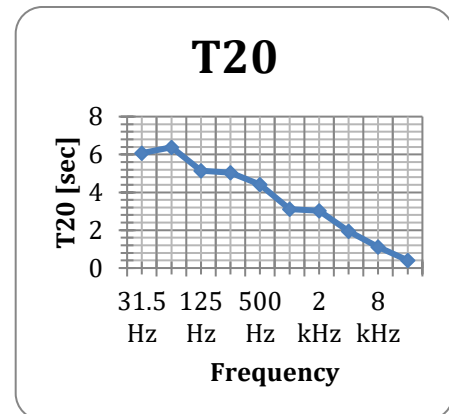
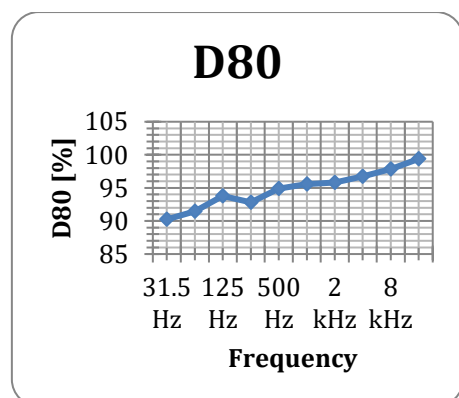
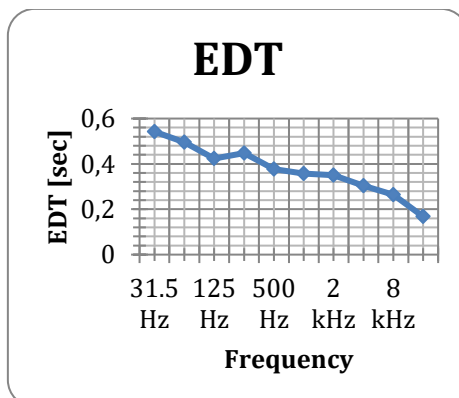
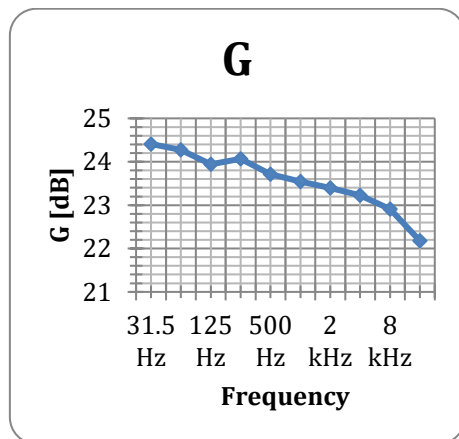


Figura 3: Parâmetros acústicos médios T20, G, EDT, D80 e C80 no Lacustamm, nas posições 1 e 2 do ouvinte (frente)



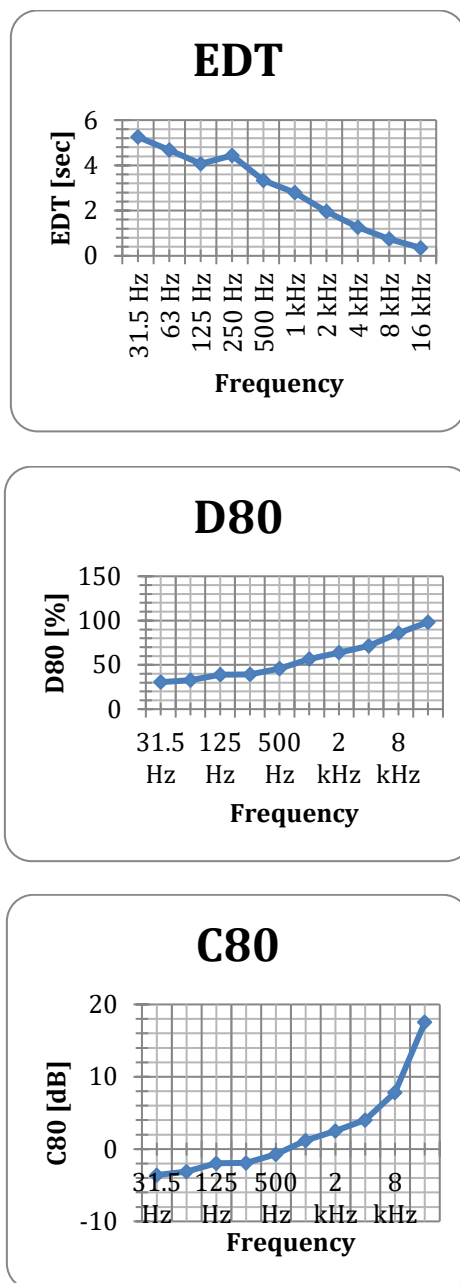


Figura 4: Parâmetros acústicos médios T20, G, EDT, D80 e C80 no Teatro, nas posições 1 e 2 do ouvinte (frente)

As tabelas 1 e 2 apresentam os parâmetros do laboratório em 2 posições e no teatro em 3 posições. Os parâmetros da posição frente do laboratório estão apresentados também na figura 3 e os da posição frente do teatro estão na figura 4.

Tabela 1 – Parâmetros acústicos médios do laboratório com lotação completa em duas regiões: frente (posições 1 e 2) e fundos (posições 4 e 5) – ver posições na figura 1

Frequências Hz	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000
T20 frente	0,6418	0,6003	0,5398	0,5560	0,5206	0,4979	0,5194	0,4588	0,3849	0,2699
T20 fundos	0,6205	0,5984	0,5569	0,5672	0,5269	0,4901	0,4736	0,4792	0,3800	0,2778
G frente	24,409	24,275	23,939	24,065	23,709	23,540	23,399	23,228	22,907	22,178
G fundos	21,291	20,984	20,397	20,631	19,839	19,457	19,256	18,905	19,900	16,822
EDT frente	0,5421	0,4955	0,4235	0,4483	0,3772	0,3572	0,3500	0,3032	0,2635	0,1675
EDT fundos	0,6024	0,5719	0,5131	0,5307	0,4860	0,4467	0,4228	0,4073	0,3400	0,2780
D80 frente	90,239	91,468	93,801	92,829	94,874	95,583	95,810	96,733	97,856	99,386
D80 fundos	85,523	86,971	89,768	88,861	90,993	92,597	93,594	94,410	97,000	98,638
C80 frente	9,7586	10,394	11,897	11,229	12,798	13,480	13,721	14,864	16,751	22,285
C80 fundos	7,7144	8,2452	9,4320	9,0200	10,044	10,972	11,646	12,276	15,300	18,599

Com os resultados obtidos para os parâmetros podem ser calculados também BR e TR, que são os parâmetros referentes ao timbre da sala, conforme citado na seção 4, nas equações 1 e 2. Esses parâmetros foram calculados considerando os valores de EDT na posição frente, e foram obtidos os valores para o teatro:

$$BR = 1,3870 \text{ e } TR = 0,5267$$

e para o laboratório:

$$BR = 1,1870 \text{ e } TR = 0,8894$$

Na posição fundo foram obtidos os valores para o teatro:

$$BR = 1,3411 \text{ e } TR = 0,5281$$

e para o laboratório:

$$BR = 1,1191 \text{ e } TR = 0,8899$$

Tabela 2 – Parâmetros acústicos médios do teatro com lotação completa em três regiões: frente (posições 1 e 2), meio (posições 7, 8 e 9) e fundos (posições 3, 4, 5 e 6) – ver posições na figura 2

Frequências Hz	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000
T₂₀ frente	6,0 775	6,3 823	5,1 433	5,0 385	4,4 175	3,1 060	3,0 317	1,9 497	1,1 238	0,40 78
T₂₀ meio	7,5 469	7,1 927	7,8 404	3,9 634	4,6 590	2,9 225	2,2 015	2,2 679	0,9 643	0,29 570
T₂₀ fundo	5,8 827	5,0 458	9,4 949	4,1 953	3,7 003	4,2 585	2,2 503	1,8 355	0,9 629	0,25 83
G frente	5,4 927	5,1 511	4,6 098	4,0 014	2,7 004	1,3 454	0,4 261	- 0,3 85	- 2,7 70	- 8,93 4
G meio	4,7 62	4,0 07	3,3 22	2,6 74	0,9 53	- 0,5 85	- 2,4 36	- 3,2 98	- 6,6 39	- 15,4 7
G fundo	4,7 34	4,0 49	3,5 59	2,4 91	1,0 59	- 1,2 89	- 3,3 45	- 6,5 04	- 9,4 46	- 21,8 4
EDT frente	5,2 511	4,6 757	4,0 673	4,4 397	3,3 325	2,8 008	1,9 651	1,2 657	0,7 397	0,35 16
EDT meio	5,1 860	4,6 616	4,5 422	3,8 542	3,0 970	2,0 060	1,7 173	1,3 561	0,6 297	0,35 99
EDT fundo	5,0 904	5,5 398	4,4 491	4,3 374	3,5 617	2,9 898	1,5 123	1,9 477	0,5 230	0,26 58
D₈₀ frente	30, 455	32, 881	39, 006	39, 269	45, 884	56, 673	63, 948	71, 453	85, 850	98,2 64
D₈₀ meio	27, 116	28, 913	32, 441	35, 719	42, 747	56, 173	70, 908	75, 044	87, 463	98,6 42
D₈₀ fundo	27, 880	29, 059	35, 033	34, 356	40, 879	59, 705	77, 487	73, 770	90, 741	99,0 01
C₈₀ frente	- 3,5 91	- 3,1 02	- 1,9 49	- 1,8 94	- 0,7 17	1,1 68	2,5 03	3,9 99	7,8 30	17,5 49
C₈₀ meio	- 4,3 10	- 3,9 27	- 3,1 98	- 2,5 58	- 1,2 72	1,0 80	3,8 87	4,8 01	8,4 70	18,7 49
C₈₀ fundo	- 4,1 27	- 3,8 86	- 2,6 82	- 2,8 13	- 1,6 06	1,7 13	5,3 82	4,5 41	9,9 44	19,9 62

6. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Foram apresentados os resultados obtidos, através de simulações, para 5 parâmetros em duas salas (laboratório e teatro) muito diferentes, o que acarretou na obtenção de parâmetros muito diferentes, o que já era esperado. Foram consideradas duas regiões,

para a posição dos ouvintes, no laboratório e 3 posições no teatro.

6.1) Parâmetros no laboratório

O tempo de reverberação T_{20} no laboratório variou pouco com a mudança de posição, ficando em torno de 0,6 e 0,4 s, conforme tabela 1. Esses valores são considerados um pouco baixos por Rindel [17]. Brandão [6] nos lembra que os valores do tempo de reverberação T_{20} , T_{30} e T_{60} são equivalentes, apenas a maneira de medir é diferente. O parâmetro EDT (early decay time), que também está relacionado ao tempo de reverberação, teve uma variação um pouco mais expressiva que o T_{20} , o que significa que logo após a fonte ser desligada, o tempo para o decaimento de 10 dB tem uma variação maior. Rindel [17] faz um estudo do tempo de reverberação e do fator de força adequados para salas para diferentes tipos de instrumentos e considera que para quarteto de cordas e salas com tamanho próximo ao laboratório, valores do tempo de reverberação são adequados em torno de 0,8 s.

O fator de força, G, está relacionado com a intensidade do som que é percebida pelo ouvinte. A posição mais próxima da fonte sonora apresentou valores de G maiores, o que é coerente, já que a intensidade decai com a distância à fonte. Para um quarteto de cordas, Rindel [17] considera como valores adequados entre 21 e 26 dB.

Os valores de D_{80} e C_{80} variaram relativamente pouco com a variação da posição do ouvinte, no laboratório. Os maiores valores são os mais próximos da fonte, o que era esperado, já que esses parâmetros expressam a definição, clareza ou inteligibilidade da música, que naturalmente é maior quanto mais próximo está o ouvinte da fonte. Nas duas posições os valores são elevados, refletindo em uma boa definição.

Com esses valores foram calculados mais dois parâmetros: a razão de graves e a razão de agudos, que estão listados na seção 5. A variação desses parâmetros foi muito pequena com a mudança de posição. Observa-se que há uma predominância de frequências baixas sobre



as altas. Os valores de BR são maiores que 1 e os de TR menores, porém todos estão próximos de 1, o que seria mais adequado.

Os parâmetros acústicos de forma geral não variam muito com a posição no laboratório, o que é um fator positivo para pequenas apresentações. Uma boa sala para apresentações é aquela onde o ouvinte pode se sentar em qualquer lugar e ouvir da mesma maneira as músicas. Porém por não ser muito grande naturalmente não é adequada para apresentações de um quarteto de cordas, que segundo Rindel [17] pode chegar a 95 dB quando tocando em forte. Considerando um dueto, por exemplo de viola e violino, os níveis seriam naturalmente menores, sendo então mais adequado para esse espaço.

6.2) Parâmetros no teatro

Conforme Beranek [18], o tempo de reverberação adequado, em salas de concerto para orquestra sinfônica, deve ficar entre 2 e 2,3 s e o fator de força entre 4 e 5,5 dB. Conforme tabela 2 e figura 4 os valores de T_{20} são elevados no teatro na maior parte das frequências, sendo mais adequados em posições mais distantes do palco e em frequências agudas e os valores de G são adequados em frequências graves. Pela figura 4 vemos que T_{20} e G variam muito com a frequência e pela tabela 2 vemos que também há variação entre as posições dos ouvintes. O parâmetro EDT variou relativamente menos entre as posições dos ouvintes, ao contrário do laboratório.

Os valores de D_{80} e C_{80} são bem mais baixos que no laboratório, evidenciando uma perda de clareza e inteligibilidade da música, o que justifica o uso de microfones e autôfalantes no teatro.

O equilíbrio de percepção entre graves e agudos foi também calculado, em função de EDT. Vemos na seção 5 que BR e TR são mantidos aproximadamente constantes com a mudança de posição. Os valores de BR são elevados e TR próximos de 0,5, então a percepção de frequências baixas é maior que as agudas, concordando com os valores de G, que são adequados em frequências baixas.

O equilíbrio sonoro do teatro não é adequado, considerando a variação dos parâmetros com a mudança de posição dos ouvintes. O tempo de reverberação é elevado, G é mais adequado em frequências graves, concordando com os valores de BR e TR. O nível de inteligibilidade da música também não é o indicado. Apresentações de quarteto de cordas podem ser feitas no espaço, ou até grupos com mais instrumentos, como uma orquestra sinfônica, já que é um espaço grande. O uso de refletores acústicos no palco é recomendado, o que tem sido feito para minimizar as perdas sonoras no palco, que é bem grande, com cerca de 10.600 m³ de volume.

6.3) Efeitos musicais e percepções

Os autores fizeram análises dos sons nos dois espaços através da auralização, com o uso de um efeito na viola, o *saltellato*, e três trechos musicais. O *saltellato* [5] é um efeito do controle extremo de arco enquanto ele salta vigorosamente de nota para nota em ritmos bem marcados e acentuados, como no primeiro movimento do Concerto de Aranjuez, de Joaquín Rodrigo. A passagem é uma improvisação imitando música tradicional espanhola na viola. Os trechos musicais escolhidos foram: passagens rápidas do início do primeiro movimento da Primavera, das Quatro Estações, de Vivaldi em violino; Bourrés I e II da Suíte III de J. S. Bach em viola e um Estudo em Sol menor para violino, de Luiz Roberto P. L. Baptista, com arpejos rápidos. Consideramos a auralização feita com as salas preenchidas em suas capacidades máximas, da mesma forma como foram obtidos os parâmetros. A percepção muda um pouco com a mudança do estilo musical e da intensidade da fonte.

Com o trecho da Primavera e com as Bourrés, no laboratório, foi confirmado o resultado obtido para o parâmetro G, que diminui com o aumento da distância ao instrumento. Na região mais próxima (ouvintes 1, 2 e 3) foram percebidos inclusive os ruídos do violino, o que não foi observado em posições mais distantes, que são então mais adequadas para uma melhor apreciação da música. A sala em posições mais distantes funciona como um filtro, usado em

gravações para reduzir ruídos indesejáveis. Todas as posições apresentaram boa audibilidade. O *saltellato* foi considerado como não adequado para o tempo de reverberação do laboratório, o trecho musical ficaria melhor em salas mais reverberantes. Com esse efeito a inteligibilidade também foi considerada melhor em posições mais distantes da fonte. O estudo para violino, com arpejos rápidos, é mais apropriado para locais menos reverberantes, que é o caso do laboratório. Foi evidenciado o equilíbrio entre as frequências (relacionado a BR e TR próximos de 1) e boa inteligibilidade, considerada melhor em posições mais distantes, que servem de filtro para os ruídos do instrumento (como observado no trecho da Primavera).

Os mesmos trechos da Primavera e das Bourrés foram utilizados na auralização do teatro. Mesmo em posições mais próximas o som foi percebido com pouca intensidade, o que está de acordo com os parâmetros obtidos: G é adequado para sons graves (a passagem musical usa notas muito agudas, de 554,4 Hz a 1.661,2 Hz). Em todas as posições o som foi percebido com alta reverberância, o que prejudica a inteligibilidade e leva ao cansaço do ouvinte e por isso também à falta de interesse. Naturalmente a posição 6 foi considerada a pior, por ser a mais distante. O *saltellato* foi ouvido no teatro em baixa intensidade em todas as posições, porém com reverberância adequada nas posições próximas do músico, o que contribuiu para uma melhor clareza. Nas posições mais distantes (3, 4, 5, 6 e 9) o som foi percebido com intensidade muito baixa, com baixa inteligibilidade. O tempo de reverberação relativamente alto do teatro não prejudicou a inteligibilidade dos arpejos rápidos, que foram percebidos com maior clareza que o *saltellato*, especialmente em posições mais próximas do músico. Em distâncias médias (posições 7, 8 e 9) o ruído é filtrado e a inteligibilidade é mantida.

Foi confirmada a importância do recurso da auralização para o estudo da acústica de salas e melhor entendimento dos valores dos parâmetros acústicos. Foi também evidenciada

a necessidade de variar os parâmetros acústicos conforme o estilo musical, com possibilidade de rebaixamento de teto e uso de refletores sonoros atrás dos músicos. Em algumas situações é adequado que o músico modifique a forma de tocar para melhorar a inteligibilidade. Confirmamos que a mudança da arquitetura pode levar a novas possibilidades acústicas. Algumas adaptações nas salas seriam necessárias a fim de torná-las mais adequadas para apresentações musicais, especialmente de quartetos de cordas. Seria interessante a realização de testes também com o violoncelo, que faz parte do quarteto de cordas e emite frequências mais baixas, o que poderia confirmar os valores dos parâmetros obtidos em frequências mais baixas. Um outro estudo possível seria a realização dos testes considerando as salas com lotação não completa, o que implica em mudanças na percepção bem como nos valores dos parâmetros acústicos.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe do Instituto de Acústica na RWTH Aachen University, especialmente o Prof. Michael Vorländer e o Engenheiro Lukas Aspöck, por suas contribuições e por tornarem as instalações e equipamentos disponíveis para a pesquisa.

Os auxílios recebidos da FAPERJ e do CNPq foram importantes para a realização desse e de outros trabalhos.

REFERÊNCIAS

- [1] Grillo, Maria Lúcia e Perez, Luiz Roberto (org.). A Física na Música. Rio de Janeiro: Eduerj, 2013. ISBN 978-85-7511-280-9.
- [2] Sadie, Stanley (org.). Dicionário Grove de Música. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1994. ISBN 978-85-7110-301-6.
- [3] Donoso, José Pedro; Tannús, Alberto; Guimarães, Francisco e de Freitas, Thiago Corrêa. A Física do Violino. Rev. Bras. Ensino Fís., 30 (2), 2008. ISSN 1806-1117. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/C3nWHMpYS6gZpmBm vF9BFcw/?lang=pt>
- [4] Perez, Luiz Roberto e Grillo, Maria Lúcia. A Física e a Música do Quarteto de Cordas: 2 violinos, 1 viola e 1



violoncelo. São Paulo: Livraria da Física, 2019. ISBN 978-85-7861-618-2.

[5] Grillo, Maria Lúcia N., Baptista, Luiz Roberto Perez L. e Aspöck, Lukas. Study of the Interaction of Bowed String Instruments with Two Rooms from the Musician's Perspective. *Acta Acustica United With Acustica* Vol. 104 (2018) 1094 – 1103. ISSN 1610-1928. doi: [10.3813/AAA.919274](https://doi.org/10.3813/AAA.919274).

[6] Brandão, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1a ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.

[7] Pires, Josiane Reschke; Nunes, Maria Fernanda de Oliveira e Patrício, Jorge Viçoso. Reconstrução Acústica da Igreja São Miguel Arcanjo das Missões Jesuíticas. Em: 46º Congresso Espanhol de Acústica, 2015, Valência, Espanha. Disponível em: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Valencia15/ASL-0%20009.pdf>.

[8] González, Antonio Pedrero; Sanchidrián, César Díaz; Díaz-Chyla, Alexander; Saturio, María de los Ángeles Navacerrada. La Acústica de las Iglesias Prerrománicas Hispanas en su Estado Primitivo. Em: 46º Congresso Espanhol de Acústica, 2015, Valência, Espanha. Disponível em: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Valencia15/ASL-0%20005.pdf>

[9] Peters, Brady; Nguyen, John e Omar, Randa. Parametric Acoustics: Design techniques that integrate modelling and simulation. Em: *Euronoise 2021*, Madeira, Portugal. Disponível em: <http://www.sea-acustica.es/index.php?id=871>

[10] Kalkandjiev, Zora Schärer e Weinzierl, Stefan. The influence of room acoustics on solo music performance – an empirical case study. *Acta Acust. united Ac.* vol. 99, n. 3, 433–441, 2013. ISSN 1610-1928. doi: [10.3813/AAA.918624](https://doi.org/10.3813/AAA.918624).

[11] ISO 3382-1: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces. International Organization for Standardization (ISO), Geneva (CH), 2009. ISBN 978-85-07-07015-3.

[12] ISO 3382-2: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. International Organization for Standardization (ISO), Geneva (CH), 2008. ISBN 978-85-07-07022-1

[13] Bottazzini, Marcelo Carvalho e Bertoli, Stelamaris Rolla. Acústica de igrejas barrocas, arquitetura que faz a diferença. Em: VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008, Buenos Aires, Argentina. Disponível em: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/BuenosAires08/a-121.pdf>

[14] Henrique, Luís L. *Acústica Musical*. Lisboa: Ed. Calouste Gulbenkian, 2007. ISBN 978-972-31-1212-2.

[15] Schröder, Dirk. *Physically based real-time auralization of interactive virtual environments*. Berlin: Logos Verlag, 2011. ISBN 978-38-3253-031-0.

[16] Vorländer, Michael. *Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic*

virtual reality. Berlin: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-48829-3.

[17] Rindel, Jens Holger. Rooms for music – Acoustical needs and requirements. Em: *Baltic-Nordic Acoustics Meeting*, Estônia, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265893735_Rooms_for_music_-_Acoustical_needs_and_requirements

[18] Beranek, Leo. *Concert halls and opera houses: Music, acoustics, and architecture*. Springer-Verlag, New York, 2004. ISBN 0-387-95524-0.