CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE ANFITEATRO UNIVERSITÁRIO

Stelamaris R. Bertoli (1); Lucas Esteves Castro (2); Lineu Passeri Júnior
(1) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Construção, rolla@fec.unicamp.br, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP – Cidade Universitária Zeferino Vaz – Campinas – SP 13083-852 Campinas - SP
(2) Engenheiro Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, l171561@dac.unicamp.br
(3) PhD, Arquiteto, CEO da PASSERI Acústica, lineu@passerieassociados.com.br, PASSERI Acústica – São Paulo – SP – 05446-050 – Brasil

RESUMO
O Anfiteatro da Universidade de São Paulo (USP), reaberto em 2018, passou por reforma alterando o espaço original para uma nova configuração como Sala de Concerto para abrigar a Orquestra Sinfônica da USP. A nova configuração motivou a caracterização acústica da sala por meio de medição dos parâmetros acústicos 2 Os parâmetros foram obtidos pelo método de resposta impulsiva da sala, utilizando o *software* Dirac para o processamento de sinais. Os resultados dos parâmetros acústicos medidos foram analisados de acordo com a resposta do ambiente às diferentes excitações sonoras e a comparação com valores de referência apresentados na literatura. O conjunto dos parâmetros obtidos revelou-se satisfatório para o uso predominante da sala (música de câmara) exceto o tempo e reverberação que ficou abaixo dos limites recomendados em função do volume útil do ambiente que não pode ser alterado com a reforma.

Palavras-chave: acústica de salas, qualidade sonora de salas, caracterização acústica de salas

ABSTRACT
The Amphitheater of the University of São Paulo (USP), reopened in 2018, underwent renovation that transformed the original space into a new configuration as a Concert Hall to house the USP Symphony Orchestra. The new setup motivated the acoustic characterization of the hall by measuring its acoustic parameters. The parameters were obtained by measuring the room impulse response using the Dirac software for signal processing. The results of the measured acoustic parameters were analyzed according to the room's response to different sound excitations and compared to reference values presented in the literature. The measured acoustic parameter results were analyzed based on the room's response to different sound excitations and compared with reference values presented in the literature. The set of obtained parameters proved satisfactory for the predominant use of the venue (chamber music), except for the decay time and reverberation, which fell below the recommended limits due to the unalterable volume of the space resulting from the renovation.

Keywords: room acoustics, sound quality in rooms, acoustic characterization of rooms

1. INTRODUÇÃO

A evolução do conhecimento sobre acústica de salas mostra cada vez mais a necessidade de se projetar ambientes acusticamente adequados ao seu uso. Os requisitos acústicos dos ambientes variam de acordo com as atividades a serem realizadas. Valores de parâmetros acústicos para salas destinadas a apresentações musicais são diferentes se as salas forem destinadas a fala. Salas múltiplo uso exigem variabilidade acústica.

Em ambientes universitários, as salas de aula são, sem dúvida, ambientes que necessitam de qualidade acústica para que o processo ensino aprendizagem não seja prejudicado. Além do ensino, a universidade desenvolve atividades artísticas, culturais e sociais que são realizadas em auditórios e/ou anfiteatros construídos para abrigar atividades como palestras e execução de gêneros musicais variados.

A Universidade de São Paulo tem em seu campus o Anfiteatro Camargo Guarnieri que foi inicialmente idealizado como uma sala multifuncional, para abrigar não só as atividades didáticas da Universidade, mas, também, os meios de incentivo à comunidade e à cultura. O espaço foi reformado e hoje se transformou no Complexo Cultural Camargo Guarnieri, incluindo outras salas. O antigo anfiteatro foi reformulado acusticamente e agora é uma sala para concertos, destinada exclusivamente para apresentações da Orquestra Sinfônica da Universidade de São Paulo (OSUSP).

A readequação acústica do espaço motivou a realização da sua caracterização acústica por meio de ensaios para medição de parâmetros acústicos e comparação desses parâmetros com valores de referência. O estudo visa contribuir para o entendimento da relação entre a arquitetura da sala e sua *performance* acústica, bem como identificar pontos favoráveis ou desfavoráveis que possam afetar a qualidade sonora do espaço.

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é apresentar a caracterização de um anfiteatro destinado a atividades musicais por meio de medição e análise de seus parâmetros acústicos.

3. MÉTODO

Este trabalho é de natureza experimental e teve como objeto de estudo um anfiteatro pertencente a uma universidade. Os procedimentos metodológicos para o desenvolvimento do trabalho foram baseados nas medições de seus parâmetros de qualidade sonora e na análise dos resultados, realizada pela comparação dos parâmetros medidos com os valores de referência adotados na literatura científica desses mesmos parâmetros.

3.1. Conhecendo o Anfiteatro

O objeto de estudo deste trabalho foi a sala de concertos do Complexo Cultural Camargo Guarnieri (antigo Anfiteatro Camargo Guarnieri), localizada no campus da Universidade de São Paulo (USP).

O antigo Anfiteatro Camargo Guarnieri foi idealizado como uma sala multifuncional, para abrigar não só as atividades didáticas da Universidade, mas, também, os meios de incentivo à comunidade e à cultura. Começou a ser construído em 1973 e foi inaugurado dois anos depois, em 1975, com o nome de Anfiteatro da USP. Nesse mesmo ano foi criada a Orquestra Sinfônica da USP (OSUSP) que, desde então, adotou a sala como sua sede. Em 1995, o espaço foi rebatizado em homenagem ao maestro e compositor paulista Mozart Camargo Guarnieri, primeiro regente e diretor artístico da OSUSP.

Durante 35 anos, além das apresentações regulares da OSUSP, o anfiteatro recebeu vários tipos de eventos, desde espetáculos de música popular, coral, teatro, dança e cinema até palestras, congressos, simpósios e eventos de formatura das diversas unidades da USP. Em 2010, a sala apresentava diversas patologias que indicavam a necessidade de uma ação imediata sobre o edifício.

O projeto de reforma, desenvolvido ao longo de todo o ano de 2011, teve como partido a ampliação do edifício de 2.830m^2 para uma área total de 5.450m^2, tornando-o um verdadeiro complexo cultural, não apenas para a comunidade universitária, mas, também, para toda a cidade. Com isso, a sala multifuncional original do anfiteatro foi transformada em uma sala dedicada exclusivamente a espetáculos musicais (instrumental e coral), com o palco e a plateia unidos em um mesmo volume. Assim, foi necessário construir duas novas salas menores, com acessos exclusivos: uma sala para cinema e, outra, para teatro experimental. Além disso, o projeto do novo complexo previu a construção de novos camarins, salas de ensaio de orquestra e coral, salas de ensaio de instrumentos e naipes, salas de estudo, biblioteca de partituras, sala para a guarda de películas com temperatura controlada, oficinas para a construção de figurinos e cenários, lavanderia, copa, cozinha, três locais para a instalação de cafés, escritórios e diversos ambientes de apoio administrativo.

As obras de reforma e ampliação do edifício tiveram início em 2012 e o novo Complexo Cultural Camargo Guarnieri foi reinaugurado em 2018. Além da readequação acústica do antigo anfiteatro, agora

destinado exclusivamente a apresentações da OSUSP e do CORALUSP ambos da Universidade de São Paulo (CORALUSP), as duas novas salas menores foram projetadas e construídas com requisitos acústicos para receber, respectivamente, a programação do Cinema da Universidade de São Paulo (CINUSP) e do Teatro da Universidade de São Paulo (TUSP).

A nova sala de concertos do Complexo Camargo Guarnieri teve sua capacidade ampliada para 435 espectadores em poltronas e 12 espectadores em cadeiras de rodas na plateia e 28 espectadores em poltronas e 2 espectadores em cadeiras de rodas distribuídos em 4 camarotes. As Figuras 1e 2 mostram vista interna da sala de concerto antes e depois da reforma, respectivamente.



Figura 1 – Vista externa do Complexo Camargo Guarnieri



Figura 2 - Vista interna da sala de concertos

A sala de concertos tem área total (palco e plateia) de 494,25m^2, pé-direito variando entre 5,05m e 7,95m na plateia, resultando num volume útil de 3.351,50m^3 e numa relação de volume/espectador igual a 7,5. A área do palco, por sua vez, é de 114,25m^2.

O partido do projeto de readequação acústica da sala de concertos é baseado em grandes superfícies difusoras distribuídas pelas paredes e pelo teto, para compensar a formato em leque da sala, que tende a ser menos favorável à audição de música do que o formato *shoebox*, pelo fato deste último favorecer as primeiras reflexões em direção à plateia enquanto no formato leque as reflexões tendem a ser direcionadas para a parede de fundo da sala. Parte das paredes do palco e da plateia foi revestida com difusores de Schröeder e todo o forro da sala é composto por difusores convexos. Um detalhe muito importante, observado no palco, é a sua variabilidade que é obtida pela modificação da altura de 3 linhas de difusores convexos localizados sobre o palco, alterando o comportamento das primeiras reflexões decorrentes dessas superfícies. A planta do complexo é apresentada na Figura 3. No corte longitudinal apresentado na Figura 4 é possível ver as duas posições (alta e baixa) das conchas sobre o palco A Figura 5 mostra o detalhe dos difusores convexos móveis localizados sobre o palco e a Figura 6 mostra detalhe dos difusores de Schroeder aplicados nas paredes.

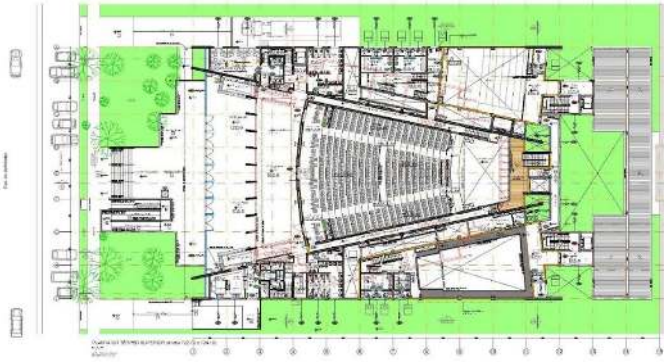


Figura 3 – Planta do complexo

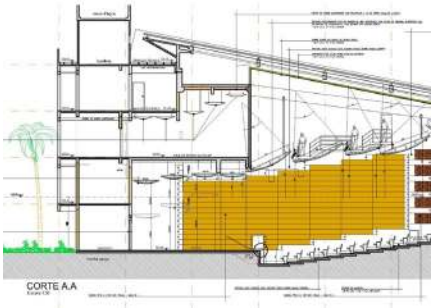


Figura 4 – Corte longitudinal da sala



Figura 5 – Vista dos difusores convexos móveis sobre o palco



Figura 6 – Vista dos difusores de Schroeder aplicados nas paredes

3.2. Procedimento de medição

Os parâmetros acústicos adotados para a avaliação da sala de concertos do Complexo Cultural Camargo Guarnieri foram: Tempo de reverberação (TR), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C80), Definição (D50) e Índice de Transmissão da fala (STI), obtidos pelo método de resposta impulsiva empregando o programa Dirac, próprio para medir parâmetros acústicos de salas. O som residual também foi medido no local.

Para a medição dos parâmetros acústicos TR, EDT, C80, D50 e STI foram empregados os equipamentos: fonte omnidirecional Brüel & Kjær modelo 4292-L, amplificador Brüel & Kjær modelo 2734, microfones Behringer modelo ECM80000, uma interface de áudio PreSonus modelo Audiobox 44USL e, para o som residual, o medidor de nível de pressão sonora BK 2238 da Bruel & Kjaer. Os parâmetros TR, EDT, C80, D50 foram medidos em função de frequência em bandas de 1/1 oitava entre 125 e 4000 Hz

A fonte sonora foi posicionada no centro do palco da sala de concertos. O foco deste ensaio de caracterização acústica da sala foram os ouvintes (espectadores). Assim, para as medições acústicas, foram escolhidos oito pontos receptores distribuídos na audiência, sendo seis pontos para receptores (microfones) localizados na plateia e dois pontos para receptores localizados nos camarotes. Esses pontos foram distribuídos ao longo da plateia, considerando somente metade do espaço. Tal procedimento é recomendado pela norma NBR ISO 3382-1 (ABNT, 2017), de medição de parâmetros de acústica para salas de espetáculos, quando a sala tem simetria em relação ao seu eixo central. A localização do posicionamento da fonte sonora (em azul) e dos receptores (em vermelho) é apresentada na Figura 7, em planta.

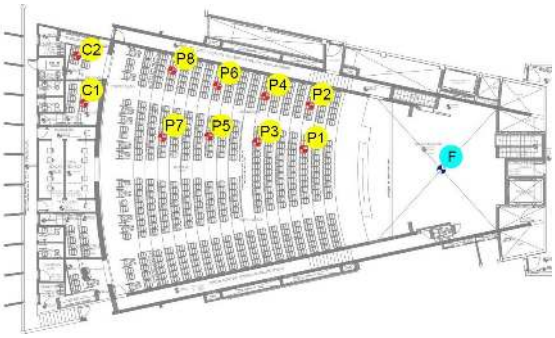


Figura 7 – Localização do posicionamento dos pontos de fonte sonora (em azul) e de receptores (em vermelho) utilizados na medição acústica da sala de concertos.

3.3. Valores de referência para análise

Buscou-se na literatura cientifica valores de referência para serem usados na análise dos parâmetros de qualidade sonora, a fim de caracterizar a resposta acústica do Anfiteatro Camargo Guarnieri para as atividades nele desenvolvidas.

Para avaliar acusticamente um espaço destinado à fala, empregam-se os parâmetros acústicos: Tempo de reverberação (TR), Definição (D50) e Índice de transmissão da fala (STI). Para espaços destinados à música, utilizam-se, no mínimo, os parâmetros: Tempo de reverberação (TR), Tempo de decaimento inicial (EDT), Clareza (C80).

O tempo de reverberação depende do volume e da finalidade de uso do ambiente. Para a análise dos resultados dos parâmetros avaliados foram levantados na literatura os seus valores de referência.

No caso da sala de concertos, cujo volume é de 3.351,50m^3 e sua capacidade é compatível com uma sala de música de câmara, Johnson (1962), Cooper (1976) e Egan (1988) indicam valores adequados para a frequência central de 500 Hz os seguintes tempos de reverberação: de 0,7<TR<1,1s para fala e 1,4<TR<1,7s para música de câmara. Por outro lado, de acordo com o gráfico de Bolt, Beranek & Newman, que subsidia a norma NBR 12.179 (ABNT, 1992) - Tratamento acústico em recintos fechados, os valores adequados para o tempo de reverberação na frequência central de 500Hz são os seguintes: 0,95s para fala e 1,4s para música.

A sensação de reverberância do ambiente está associada ao parâmetro Tempo de Decaimento Inicial (EDT). A análise desse parâmetro será feita por comparação com os valores de Tempo de Reverberação obtidos, de forma que se esses valores forem maiores ou menores que TR, darão a sensação de maior ou menor reverberância, respectivamente.

A Clareza (C80), proposta em seu formato final por Reichardt et al (1975) é o parâmetro objetivo utilizado para caracterizar a transparência da música em salas de concerto. Baseia-se na característica da audição humana, que percebe as reflexões sonoras que cheguem ao ouvinte em até 80ms após a chegada do som direto como um "reforço" deste, melhorando a audibilidade da música. Portanto, consideram-se como reflexões úteis (ou benéficas) para a audição de música aquelas que são capazes de chegar ao ouvido do espectador em até 80ms após sua percepção do som direto (PASSERI, 2008).

A Clareza (C80) compara a energia contida no som direto mais a energia das reflexões que chegam ao ouvinte em até 80ms após a chegada do som direto, num determinado ponto da sala, com a energia total da cauda reverberante dessa mesma sala. Segundo Bistafa (2004), C80 = 0dB é considerado um valor suficiente, mesmo para passagens musicais rápidas, enquanto C80 = –3dB é considerado o valor mínimo admissível. Já Beranek (1996) indica que os valores contidos no intervalo -4dB<C80<4dB são os mais adequados para salas de concerto.

Segundo Brandão (2016), um valor positivo de C80 (C80 > 0dB) quer dizer que a região das primeiras reflexões possui mais energia que a região da cauda reverberante. Um valor negativo de C80 (C80 < 0dB) significa que a região das primeiras reflexões possui menos energia que a região da cauda reverberante. E um valor nulo quer dizer que a região das primeiras reflexões e a região da cauda reverberante possuem a mesma quantidade de energia.

A avaliação da qualidade da fala num ambiente está associada aos parâmetros Definição (D50) e Índice de Transmissão da Fala (*Speech Transmition Level*) STI. Ambos variam de 0 a 1. Deseja-se que esses valores sejam superiores a 0,5 (referência). Em especial a norma IEC 60.268-16:2011 qualifica a transmissão de acordo com a faixa de valor de STI. A Tabela 1 indica a correspondência de STI e a qualidade da fala.

Tabela 1 – Qualificação da transmissão da fala em função do STI.					
Intervalos	STI < 0,3	0,30 < STI < 0,45	0,45 < STI < 0,60	0,60 < STI < 0,75	STI > 0,75
Qualificação	Ruim	Pobre	Razoável	Boa	Excelente

Fonte IEC 60.268-16:2011

A Tabela 2 apresenta os valores de referência da NBR 10.152(ABNT, 2017) para níveis de pressão sonora internos a edificações de acordo com suas finalidades de uso.

Tabela 2 – Valores de referência segundo a Tabela 3 da NBR 10.152(ABNT, 2017)			
Finalidade de uso	Valores de referência		
	$\mathbf{R}_{LAeq}$ (dB)	$\mathbf{R}_{LASmax}$ (dB)	$\mathbf{R}_{LNC}$
Salas de concertos	30	35	25

Fonte: NBR 10.152(ABNT, 2017)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos das medições de qualidade sonora realizadas na sala de concertos do Complexo Cultural Camargo Guarnieri serão apresentados e analisados por parâmetro acústico. As discussões dos resultados seguem a mesma forma de apresentação e vem na sequência dos resultados obtidos.

4.1. Tempo de reverberação (TR)

As Figuras 8a e 8b apresentam os resultados dos tempos de reverberação obtidos em função de frequência para os pontos receptores adotados na audiência, nas condições de concha nas posições alta e baixa, respectivamente.

Observa-se o mesmo comportamento do tempo de reverberação (TR) em função de frequência para as duas condições de posicionamento da concha no palco. A elevação dos valores de TR para as frequências baixas é aceita na literatura. Os valores de TR em 500 Hz variaram de 0,99 a 1,11s em relação aos pontos receptores e atende o valor de referência para atividade de fala, mas é considerado baixo para atividade de música de câmara (JOHNSON, 1962; COOPER, 1976; EGAN, 1988), mesmo considerando JND de 5%.

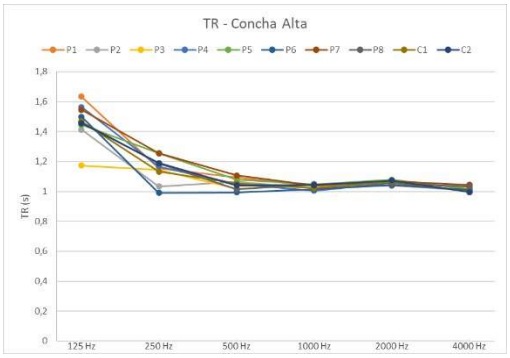


Figura 8a – Tempo de reverberação para concha alta

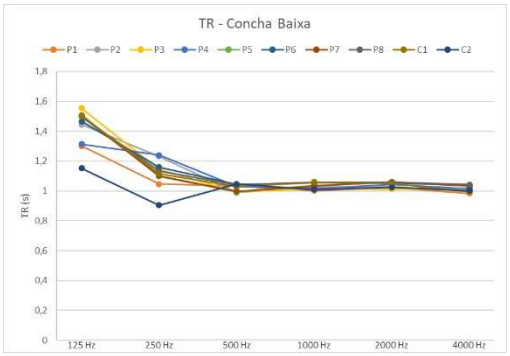


Figura 8b – Tempo de reverberação para concha baixa

As médias espaciais de TR para as condições de concha alta (CA) e concha baixa (CB) são apresentadas na Figura 9 com a finalidade de verificar a influência das alturas das conchas nos resultados de tempo de reverberação. Observa-se que, para frequências abaixo de 500Hz, os valores de tempo de reverberação são relativamente maiores, da ordem de 4%, quando a concha está na posição mais alta no palco. Entretanto, considerando o valor de 5% de JND, a diferença da sensação não seria percebida pela audiência.

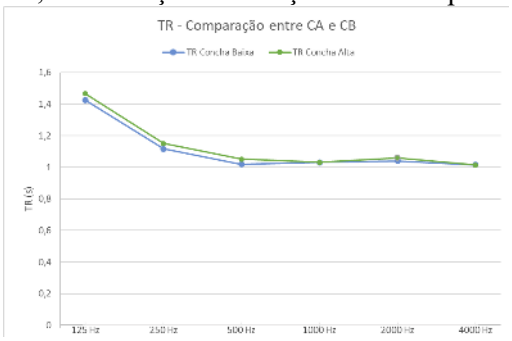


Figura 9 – Comparação da média espacial de tempo de reverberação para as condições de concha alta e baixa

4.2. Tempo de decaimento inicial (EDT)

As Figuras 10a e 10b apresentam os resultados das medidas dos tempos de decaimento inicial obtidos em função de frequência para os pontos receptores adotados na audiência, nas condições de concha nas posições de concha alta e baixa, respectivamente.

Observa-se o mesmo comportamento do tempo de decaimento inicial (EDT) em função de frequência para as duas condições de posicionamento da concha no palco. A variação de EDT entre os pontos receptores em todas as frequências são maiores que a variação dos TR. Os valores de EDT são significativamente menores que os valores de TR, o que indica uma sensação de reverberância menor em toda a audiência. Para a frequência de 500Hz, os valores de EDT variaram de 0,56s a 0,98s em relação aos pontos receptores. Os pontos dos camarotes foram os que apresentaram menor valor de EDT.

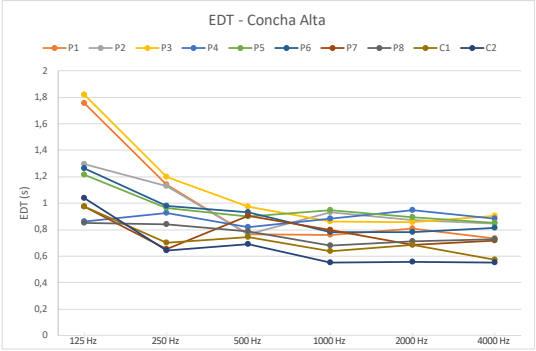


Figura 10a – Tempo de Decaimento Inicial concha alta

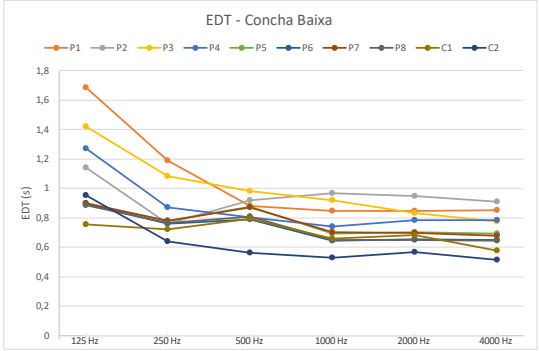


Figura 10b – Tempo de Decaimento inicial concha baixa

As médias espaciais de EDT para as condições de concha alta (CA) e concha baixa (CB) são apresentadas na Figura 11 com a finalidade de verificar a influência das alturas das conchas nos resultados do tempo de decaimento inicial. Observa-se que os valores de tempo de decaimento inicial são maiores para a condição de concha alta para todas as frequências exceto em 500Hz, indicativo da influência da concha elevada na melhoria das primeiras reflexões para a audiência.

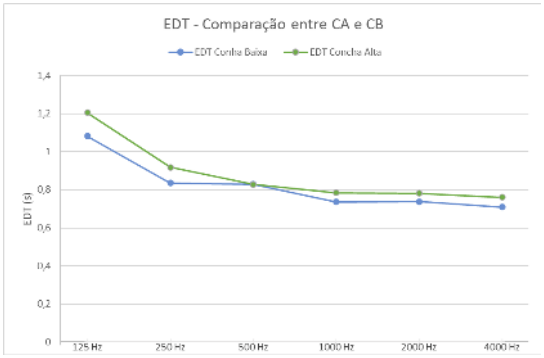


Figura 11 – Comparação da média espacial de tempo de decaimento inicial para as condições de concha, nas posições alta e baixa

4.3. Clareza (C80)

As Figuras 12a e 12b apresentam os resultados das medidas clareza obtidos em função de frequência para os pontos receptores adotados na audiência, nas condições de concha nas posições de concha alta e baixa, respectivamente.

Segundo Bistafa (2004), C80 nulo é considerado um valor suficiente, mesmo para passagens musicais rápidas, enquanto C80 = –3dB é considerado o valor mínimo admissível. Já Beranek (1996) considera adequado para salas de concerto os valores contidos no intervalo -4dB<C80<4dB.

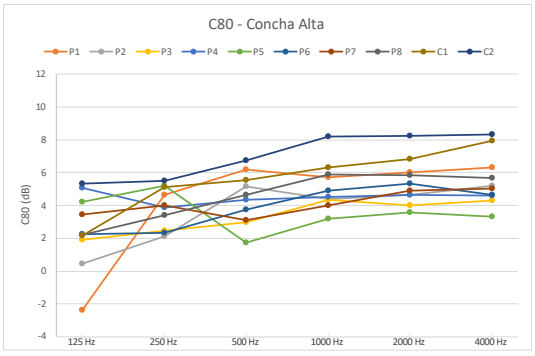


Figura 12a – Clareza (C80) para condição de concha alta

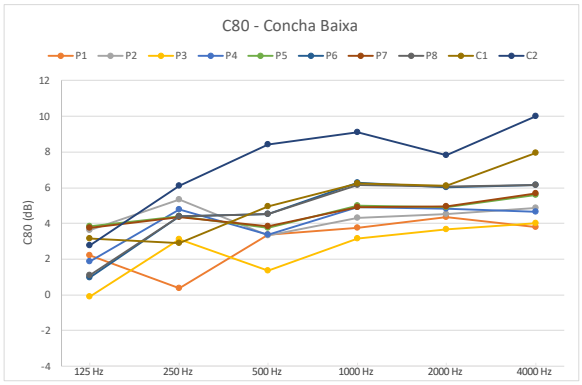


Figura 12b – Clareza (C80) para condição de concha baixa

Observa-se o comportamento crescente da clareza (C80) em função de frequência para as duas condições de posicionamento da concha no palco. A Clareza apresenta forte variação entre os pontos receptores para todas as frequências com valores todos positivos, exceto para P1 em 125Hz. Para a frequência de 500 Hz, os

valores de C80 variaram de 1,36dB a 8,43dB em relação aos pontos receptores. Considerando o intervalo de valores adequados de C80 (BERANEK, 1996) observa-se que o limite de +4dB foi em muito superado indicando um excesso de energia nos 80ms em relação ao campo reverberante. Os valores de C80 para os camarotes foram os mais elevados, provavelmente por estarem fisicamente "separados" do ambiente principal (palco/plateia), o que dificulta a percepção do campo sonoro reverberante em seu interior.

As médias espaciais de C80 para as condições de concha alta (CA) e concha baixa (CB) são apresentadas na Figura 13 com a finalidade de verificar a influência das alturas das conchas nos resultados da clareza. Observa-se que os valores de clareza não variam significativamente com a mudança da posição da concha. A variação não excede o JND de 1dB.



Figura 13 – Comparação da média espacial de Clareza (C80) para as condições de concha alta (CA) e baixa (CB)

4.4. Definição (D50)

As Figuras 14a e 14b apresentam os resultados da Definição (D50) obtidos em função de frequência para os pontos receptores adotados na audiência, nas condições de concha nas posições alta e baixa, respectivamente.

Observa-se o comportamento similar da Definição (D50) em função de frequência para as duas condições de posicionamento da concha no palco. A Definição apresenta forte variação entre os pontos receptores para todas as frequências com valores acima de 0,28. Para a frequência de 500 Hz, os valores de D50 variaram de 0,42 a 0,79 em relação aos pontos receptores.

Os maiores valores de D50 foram obtidos nos camarotes, provavelmente pela alta incidência de som direto em relação ao som refletido por estarem separados do grande volume principal da sala, formado pelo palco e pela plateia. Os menores valores de D50 foram obtidos nos pontos da plateia mais distantes do palco e, portanto, provavelmente sujeitos a uma maior incidência do som refletido em relação ao som direto.

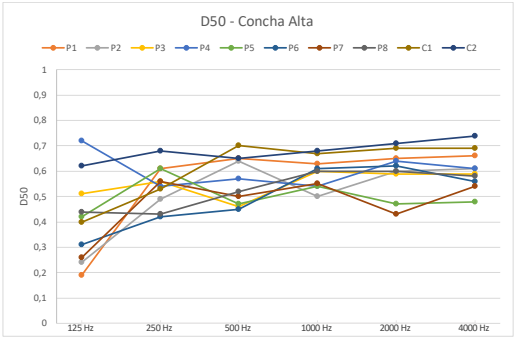


Figura 14a – Definição (D50) para concha alta

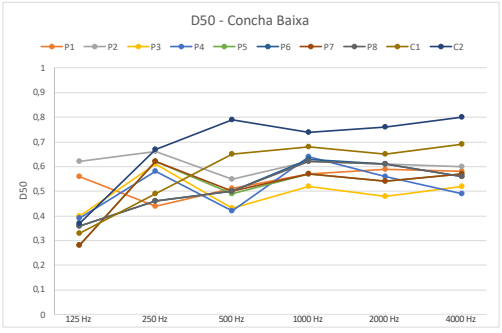


Figura 14b – Definição (D50) para concha baixa

Segundo Brandão (2016), os valores adequados para fala são aqueles superiores a 0,5, sendo considerados ideais os valores superiores a 0,7. Já os valores inferiores a 0,5 indicam que a cauda reverberante carrega a maior parte da quantidade de energia contida na resposta impulsiva. Verificou-se que, com a concha alta, 73,4% dos pontos receptores apresentaram valores de D50 superiores a 0,5 e, com a concha baixa, 80% dos pontos tiveram esse mesmo comportamento.

As médias espaciais de D50 para as condições de concha alta (CA) e concha baixa (CB) são apresentadas na Figura 15 com a finalidade de verificar a influência das alturas das conchas nos resultados da definição. Observa-se que os valores de definição não variam significativamente com a mudança da posição da concha considerando um JND de 0,05.

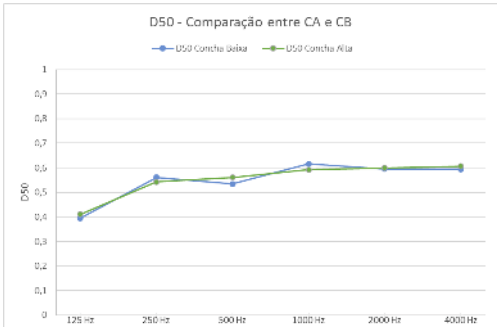


Figura 15 – Comparação da média espacial de Definição (D50) para as condições de concha nas posições alta (CA) e baixa (CB)

4.5. Índice de transmissão da fala (STI)

A Figura 16 apresenta os resultados do índice de transmissão fala para os pontos adotados na audiência e nos camarotes, considerando as configurações elevada e baixada dos difusores móveis (concha) no teto do palco.

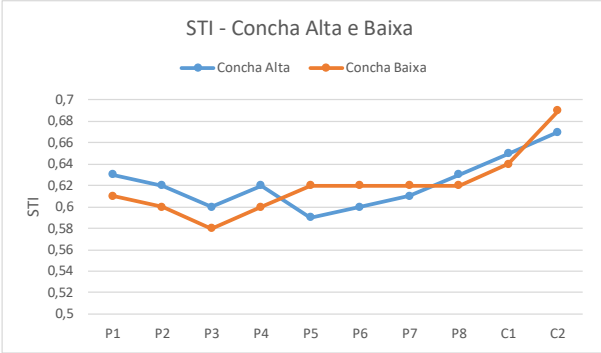


Figura 16 – Valores de STI em função dos pontos receptores

Observa-se que o comportamento de STI decresce até o meio da audiência voltando a crescer em direção ao fundo da audiência. Os valores de STI variaram de 0,58 a 0,69, qualificando o ambiente como sendo bom para fala. Os camarotes apresentaram os maiores valores de STI, provavelmente por estarem fisicamente separados do grande volume formado pela plateia e pelo palco. A concha na posição alta favoreceu os valores de STI para a metade da audiência mais próxima ao palco e a concha na posição baixa favoreceu os pontos mais ao fundo.

4.3. Nível de pressão sonora interno

O nível de pressão sonora equivalente ponderados em A foi medido no interior da sala de conforto. Os níveis de pressão sonora em função de frequência em bandas de 1/1 oitava entre 63Hz e 8000Hz também foram medidos e usados para obter a classificação NC do ambiente.

O valor de nível de pressão sonora equivalente ponderado em A obtido foi L_{Aeq} = 29,8 dB. O espectro medido apresenta valores menores que os níveis indicados para a curva NC15, portanto o ambiente foi classificado com NC15 que é a menor curva indicada na NBR 10152 (ABNT, 2017). Ambos os parâmetros atenderam a recomendação da norma conforme apresentado na Tabela 2. Esses resultados indicam um isolamento sonoro da sala em relação ao seu entorno muito bom.

5. CONCLUSÕES

Embora o formato original da sala (em leque) não seja o mais adequado para salas de concerto, as adequações do projeto acústico como, [i] a eliminação do sistema de urdimento sobre o palco; [ii] a eliminação da boca de cena e unificação do placo e da plateia em um único ambiente; e [iii] a adição de grandes superfícies refletoras e difusoras em paredes e no teto), amenizaram esse problema, o que se mostra pela pequena diferença observada entre os resultados de tempo de reverberação nos diversos pontos receptores localizados na plateia. As condicionantes estruturais do edifício, por sua vez, impediram um aumento significativo no volume interno da sala o que seria desejável para salas de concerto

Apesar da pequena diferença observada entre os resultados de tempo de reverberação nos diversos pontos receptores localizados na plateia, assim como uma pequena diferença (em 125Hz e 250Hz) entre as médias dos resultados de TR com os difusores no teto do palco (conchas) mais elevados e mais baixos, verificou-se que a sala necessitaria de providências para elevar o TR (no mínimo) em 40%, uma vez que tempos de reverberação em torno de 1s (500Hz) mostram-se melhores para a palavra falada do que para a música. A adequação da sala para elevar o TR é altamente recomendável

Considerando que o volume da sala não permite modificações e que a redução na quantidade de absorção da sala também não é possível, uma hipótese para a solução de adequação do tempo de reverberação da sala consiste na instalação de um sistema eletrônico de variabilidade acústica, capaz de modificar para mais o seu tempo de reverberação. Um sistema desse tipo (denominado ERES - Electronic Reflected Energy System) foi instalado no Atwood Hall e consiste em diversos sonofletores instalados nas próprias superfícies refletoras da sala. O som, captado no palco é reproduzido por esses sonofletores com um pequeno atrasado em relação ao som direto e às primeiras reflexões, proporcionando a sensação de uma cauda reverberante mais longa (SIEBEIN e KINZEY apud CAVANAUGH e WILKES, 1999).

Como os resultados de tempo de decaimento inicial (EDT), em geral, estão (em média) 20% abaixo dos valores de TR, conclui-se que a sensação de reverberância da sala pode ser considerada baixa para os padrões que se espera em salas de concerto. Conclui-se, portanto que a instalação de um sistema de arquitetura eletrônica pode ser uma solução para esse ajuste, tornando o ambiente mais reverberante.

De acordo com os resultados de clareza (C80), é possível concluir que, na sala em estudo, a região das primeiras reflexões possui mais energia que a região da sua cauda reverberante. No entanto, em determinados pontos, principalmente no interior dos camarotes, essa quantidade de energia das primeiras reflexões se mostrou excessivamente superior à quantidade contida em sua cauda reverberante, o que indica a necessidade de ajuste, não tanto pela audibilidade da música em si, mesmo para passagens rápidas, mas para assegurar outros atributos subjetivos de qualidade sonora, principalmente em 1kHz, 2kHz e 4kHz. Nesse sentido, mais uma vez, a instalação de um sistema de arquitetura eletrônica, poderia se mostrar com uma solução possível, no sentido de reequilibrar a distribuição da energia entre a região das primeiras reflexões (decorrentes da forma, do volume e dos materiais da própria sala) e a região da sua cauda reverberante (que decorreriam desse sistema de arquitetura eletrônica).

Os resultados de definição (D50) corroboram os resultados de clareza (C80). A grande quantidade de pontos receptores em que se observou resultados de D50 iguais ou superiores a 0,5, indicam a presença de uma quantidade de energia contida nas primeiras reflexões excessivamente superior à quantidade contida em sua cauda reverberante, decorrentes principalmente do tempo de reverberação (que é baixo para música, mas é ideal para a fala), em função do pequeno volume interno do ambiente.

Considerando que a finalidade da sala de concertos, o ajuste no TR e o outros parâmetros específicos para salas de música mostra-se como uma decisão altamente recomendável, ainda que tais ajustes possam implicar em algum prejuízo para D50.

Acompanhando os resultados de definição (D50), o comportamento do índice de transmissão da fala (STI (variando entre 0,58 e 0,69 na plateia), qualificam o ambiente como sendo bom para a percepção da fala. Nesse sentido, apesar do TR ser considerado baixo para música, mas adequado para a fala, o projeto acústico da sala foi capaz de distribuir as reflexões de forma equilibrada em toda a audiência.

O nível de pressão sonoro equivalente ponderado em A e o critério NC da sala atendem os requisitos para a finalidade de salas de concerto indicando que o isolamento sonoro da sala em relação ao seu entorno foi efetivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 3.382-1** Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas Parte 1: Salas de espetáculos. São Paulo, 2017.

____. **NBR 10.152** Acústica – Níveis de pressão sonora internos a edificações. São Paulo, 2017.

____. **NBR 12.179** Tratamento acústico de recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992.

BERANEK, L. **Concert and Opera Halls: how they sound**. New York: Acoustical Society of America, 1996.

BISTAFA, S. R. **Acústica arquitetônica: qualidade sonora em salas de audição crítica**. In: http://www.poli.usp.br/p/sylvio.bistafa. Projeto de pesquisa apresentado ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ, 2004.

BRANDÃO, E. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. Ed. Blucher, São Paulo, 2016.

COOPER, J. **Building a recording studio**. Synergy Group, Inc., Los Angeles, 1976.

EGAN, M. D. **Architectural Acoustics**. McGraw-Hill, New York, 1988.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION **IEC 60268-16** Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2011.

JOHNSON, R. Considerations of reverberation, variable by nonelectronic means, in the design of small concert halls. In: **The Journal of the Acoustical Society of America**, 34(5), p. 726, 1962.

PASSERI Jr., L. **Subsídios para o projeto de teatros e auditórios multifuncionais: recursos de variabilidade acústica**. Tese de Doutorado, Departamento de Tecnologia da Arquitetura, FAUUSP, São Paulo, 2008.

REICHARDT W., Abdel, A. e Schmidt, W. Clarity. In: **Acustica**, Vol. 32, pp 126, 1975.

SIEBEIN, G.W. e KINZEY, Jr., B. Y. **Recent innovations in acoustical design and research.** In: **Architectural Acoustics: Principles and Pratice** – ed. Willian Cavanaugh e Joseph Wilkes, John Wiley and Sons Inc. New York, pp. 233-304, 1999.