

SOBRE A INFLUÊNCIA DO TETO MÓVEL NA QUALIDADE ACÚSTICA DA SALA SÃO PAULO

Roberto A. Tenenbaum e Lenine Vasconcellos

Laboratório de Acústica e Vibrações, Universidade Federal do Rio de Janeiro

rtenenbaum@mecanica.coppe.ufrj.br

Resumo. A Sala São Paulo de concertos é reconhecida por músicos e críticos em geral por sua “boa acústica”. Tendo dimensões similares a de salas de concerto famosas, tem ainda a peculiaridade de possuir acústica variável graças às inúmeras configurações possíveis de seu teto móvel, o que é explorado por músicos e maestros, dependendo do estilo musical executado. Este trabalho reporta ensaios acústicos executados na Sala, para uma posição da fonte, algumas posições do ouvinte e variadas configurações de teto. Mediram-se as respostas impulsivas utilizando-se a técnica de varredura com preservação de fase, das quais extrairam-se os parâmetros de qualidade acústica da sala. Foram também levantadas respostas impulsivas binaurais com o uso de cabeça artificial e obtida a família de correlações cruzadas interaurais. São tecidas considerações sobre a relação entre os gêneros musicais e as respectivas configurações de teto e os parâmetros de qualidade acústica correspondentes.

1. INTRODUÇÃO

A Sala São Paulo de concertos, concluída em Julho de 1999, é resultado de variados processos de transformação urbana, arquitetônica, social e política por que passou a cidade de São Paulo ao longo de sua história recente. Desde a velha Estação de São Paulo da Estrada de Ferro Sorocabana, construída em 1938, passando por sua renovação arquitetônica em 1962, transformando-se em Estação Júlio Prestes, foi mantido sempre o espaço vazio de seu Grande Hall. Por conta dessa condição, digamos, providencial e devido ao fato de suas dimensões corresponderem às de uma sala de concertos, foi tomada, por volta de 1996, a decisão de se construir, no espaço de seu Grande Hall, a Sala SãoPaulodeconcertos,queviriaasertambém sede da Orquestra Sinfônica do Estado de São Paulo (OESP) [1].

Com efeito, construída com dimensões similares às de algumas salas de concerto do período romântico, ainda características de boa difusão sonora, devido à decoração em seu interior é considerada, por críticos, músicos e outros apreciadores como uma sala de acústica excelente, como expressa este depoimento do Maestro Alceo Bocchino: “...se você quer saber qual a melhor acústica que já experimentei, lá vai: Uma foi a do Concertgbaum, de Amsterdã, onde se ouve até a respiração do melhor flautista do mundo... e a outra foi a da Sala São Paulo de Concertos, uma acústica excelente!...” [2].

A Sala São Paulo de concertos é concebida, arquitetonicamente, como uma geometria essencialmente retangular, com 48.5 m de comprimento, 21 m de largura e 24.5 m de altura máxima, ocupando uma área cerca de 1000 m². Comporta 1509 assentos distribuídos entre platéia, mezanino, balcões e coro, este por trás do palco. O projeto arquitetônico, a cargo de prestigioso escritório de São Paulo, contou com consultoria acústica de empresa especializada no exterior e um suporte adicional de consultora da própria cidade. O ponto fundamental do projeto - no que diz respeito a este trabalho - foi a decisão de prover a Sala de um forro ou teto móvel, permitindo assim a variação de suas características acústicas. Esse forro é composto por 45 placas retangulares dispostas em uma matriz de 5x9 com cada conjunto de três placas podendo mover-se independentemente. Na realidade, devido à extensa gama de variação de volume e de forma da sala, esta pode, ao menos teoricamente, ser afinada, ajustando-se às necessidades do estilo musical e preferências interpretativas do maestro ou solista.

A experiência de utilização da Sala São Paulo de concertos tem demonstrado que esse recurso é utilizado amiúde, por um processo *ad hoc*, seguindo muito mais a sensibilidade dos músicos - com sucesso - do que qualquer princípio científico. Este trabalho objetiva verificar o quão efetiva é, de fato, a variação das características acústicas da Sala em função das diversas configuração de teto, oferecendo assim algum suporte técnico-científico ao que já vem sendo realizado em termos acústicos e musicais na Sala São Paulo de concertos.

2. DOS ENSAIOS

Os ensaios acústicos na Sala São Paulo de concertos foram realizados concentradamente no dia 6 de junho de 2004, por uma equipe de pesquisadores e técnicos do Laboratório de Ensaios Acústicos (LAENA), do INMETRO, e do Laboratório de Acústica e Vibrações (LAVI), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Contou ainda com a colaboração da equipe técnica da Sala, em especial o profissional responsável pela operação do forro móvel, essência de nossas investigações.

2.1 Limitações do ensaio

Qualquer procedimento experimental esbarra inevitavelmente em limitações de ordem prática que nem sempre são previstas no planejamento original da medição. Tais limitações muitas vezes determinam o rumo possível do trabalho a ser realizado.

As três maiores limitações do trabalho decorreram de: a distância entre a Sala São Paulo de concertos e as sedes dos laboratórios envolvidos, demandando toda uma logística relativa ao transporte do equipamento de medição; a pequena disponibilidade da agenda da Sala São Paulo de concertos, exigindo que os ensaios experimentais fossem integralmente executados em uma única jornada; a impossibilidade, de certo modo resultante das anteriores, de conduzir os ensaios acústicos na presença de público.

Mesmo dentro dessas limitações, e graças ao extremo profissionalismo demonstrado por todos os envolvidos no processo, as medições foram extremamente bem sucedidas, tendo sido obtidos dados com todo o rigor técnico necessário para posterior análise.

2.2 Procedimento de aquisição de dados

Em cada medição, procedeu-se conforme descrito a seguir. Uma vez posicionados fonte, cabeça artificial e par de microfones e escolhida uma configuração de teto, procedia-se à medição propriamente dita. A sala era então excitada três vezes com o mesmo sinal de varredura, gerando assim três arquivos digitais a partir do sinal captado pelos microfones e/ou cabeça artificial. Após essas três excitações, as posições dos microfones eram modificadas, de modo a se levantar a resposta impulsiva em diversas posições. Foram selecionadas sete posições de microfone no interior da sala, representativas das distintas situações da audiência (platéia, mezanino, balcão etc). Essa foi uma escolha *ad hoc*.

Embora o número mais apropriado de repetições seja entre 5 e 10 [3], devido à limitação de tempo já mencionada, optou-se por um número inferior de repetições de modo a se obter maior variedade de dados, visto que o objetivo central é a comparação entre algumas das configurações de teto possíveis dentro da sala. Após a varredura das posições selecionadas, a configuração do teto era, então, alterada e o processo repetido. Para todas as configurações de teto as posições de microfone e da cabeça artificial foram exatamente as mesmas.

Na configuração C - que será explicada adiante, juntamente com as demais - escolheu-se, além das posições utilizadas nas outras configurações, duas posições no palco. Essa foi uma tentativa de investigar queixas dos músicos referentes ao conjunto da sala (*ensemble*), parâmetro que descreve a maior ou menor facilidade que os músicos experimentam, em uma determinada sala, de tocar juntos e ouvir-se mutuamente [4], especialmente em situações de grande orquestra. Esses resultados ainda estão em fase de análise, não sendo reportados neste trabalho.

Uma vez repetido o processo para seis diferentes configurações escolhidas, obtivemos, para uma sétima, a resposta binaural, exclusivamente para o assento normalmente utilizado pelo Diretor Artístico da Sala. Nesse ponto, a medição foi repetida seis vezes.

O sinal de excitação utilizado foi a varredura em frequência (*sweep sine*) com preservação de informação de fase. Essa técnica apresenta algumas vantagens em relação às outras técnicas conhecidas para o levantamento das respostas impulsivas de uma sala, tais como tiros de arma de fogo, explosões, sinais de banda larga, (como ruído branco ou rosa), ou ainda as seqüências de comprimento máximo (MLS - *Maximum Length Sequences*). Uma primeira vantagem é a gama dinâmica que a técnica escolhida fornece, uma vez que, diferentemente da maioria dos demais sinais, não há concentração de toda a energia em um tempo curto. Como se trata de um sinal determinístico, sua reprodutibilidade é total, característica esta que também apresenta a técnica de MLS [4]. Contudo, ao utilizar-se da técnica de MLS, é necessário um processo de correlação cruzada entre os sinais de entrada e saída, enquanto que a utilização de um sinal de varredura não demanda correlação. A terceira vantagem consiste na possibilidade de utilização de pré-ênfases, compensando espectro não plano do ruído de fundo presente e permitindo a equalização do restante do equipamento de medição [5].



Figura 1: Posicionamento da fonte sonora onidirecional sobre o palco.

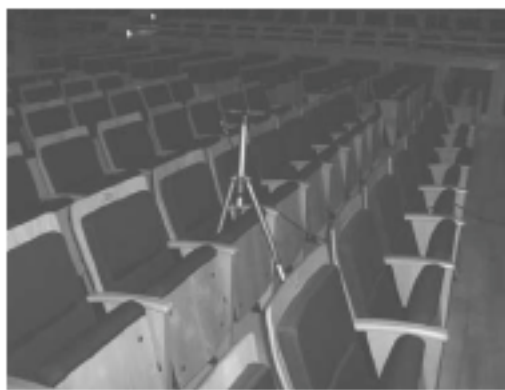


Figura 2: Posicionamento de um microfone com tripé

A sala foi excitada por meio de uma fonte onidirecional, constituída por um dodecaedro acoplado a um alto-falante de baixa frequência (woofer), posicionado sobre o palco, como mostrado na Fig. 1. Um filtro divisor de frequências (crossover) é encarregado de distribuir a energia pelos alto-falantes. A fonte foi alimentada, naturalmente, por amplificadores e o sinal de emissão (excitação) e imissão (aquisição) passaram por sistemas multiplexadores e placa AD/DA, esta última conectada a um microcomputador.

Toda a geração dos sinais e seu posterior pós-processamento foram executadas utilizando o software Monkey Forest para o tratamento de sinais em acústica de salas. Uma vez obtidas as respostas impulsivas para cada posição de microfone e cada configuração de teto, esses resultados eram armazenados para posterior determinação de curvas de decaimento e cálculo de parâmetros de qualidade acústica, tais como T_{30} , EDT, C_{80} , CT, BR etc. [6;7]

A Fig. 2 ilustra o posicionamento de um microfone entre os assentos da platéia. A altura do microfone corresponde, em qualquer caso, à cota média do ouvido de uma pessoa sentada. A Fig. 3 indica o posicionamento da cabeça artificial, colocada na platéia. A Fig. 4 mostra o posicionamento da cabeça artificial no balcão do primeiro andar. As respostas binaurais, obtidas pelos microfones fixados na cabeça, foram também utilizadas para o cálculo da família de correlações cruzadas interaurais.

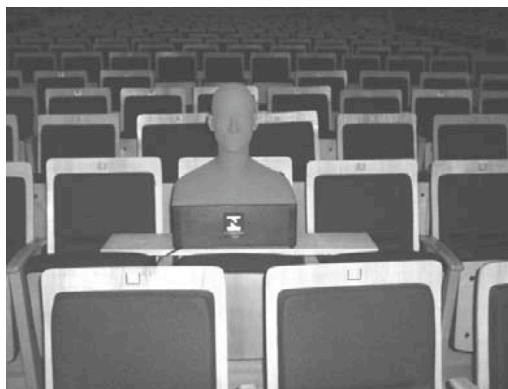


Figura 3: Posicionamento da cabeça artificial na platéia

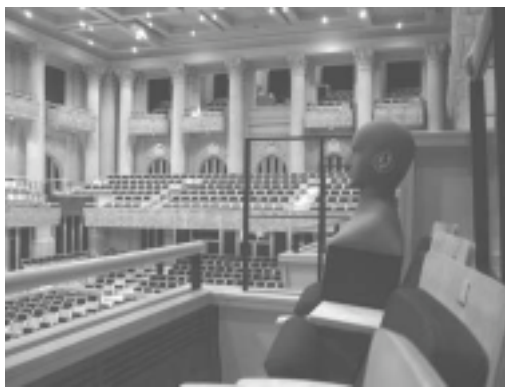


Figura 4: Posicionamento da cabeça artificial no balcão.

A Fig. 5 mostra a disposição dos microfones e da cabeça artificial no interior da sala. A cabeça artificial foi posicionada no assento G1 da platéia (posição 1) em todas as configurações de teto, exceto a configuração M, quando a cabeça foi colocada no camarote 9, assento 7 (posição 10).

Os microfones permaneceram nas posições indicadas na figura, segundo a nomenclatura adotada: platéia elevada E69 (posição 2), platéia O1 (posição 3), platéia elevada D2 (posição 4), mezanino D2 (posição 5), camarote 8 do primeiro pavimento, assento 12 (posição 6) e coro D23 (posição 7). Para os pontos no palco, foram medidos no fundo à esquerda, a uma distância de 1.0m do coro e 4.3m da lateral do palco (posição 8) e na frente à direita, a 8.2 m do coro e 4 m da lateral do palco (posição 9). Estas duas posições correspondem respectivamente à disposição da percussão e dos contra baixos em um espetáculo com grande orquestra.

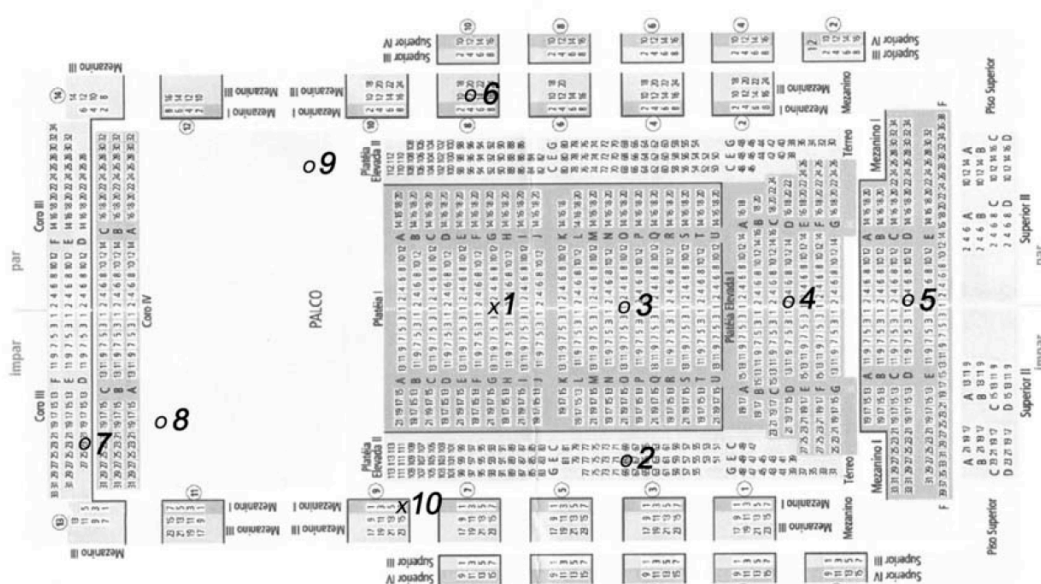


Figura 5: Planta geral dos assentos e posicionamento dos microfones.

2.3 Escolha e descrição das configurações de forro acústico adotadas

Seis diferentes configurações de forro acústico da Sala São Paulo, denominadas como configurações A, B, C, D, E e F foram selecionadas. Foi utilizada ainda uma sétima configuração, exclusivamente para obter-se a resposta binaural em um assento do camarote usualmente utilizado pelo diretor artístico da sala, denominada configuração M (ver Fig. 5). As configurações estão separadas em dois grupos. Em um primeiro grupo (A, B e F) estão as configurações sugeridas pela equipe de ensaio. No outro grupo (C, D, E e M) estão configurações que recentemente foram utilizadas em espetáculos na Sala São Paulo. Deu-se preferência a espetáculos mais recentes, favorecendo assim a experiência adquirida pelos músicos e técnicos da sala, que durante alguns anos de convívio a experimentação das configurações do forro acústico puderam desenvolver determinadas preferências dentre as infinitas possibilidades da Sala São Paulo.

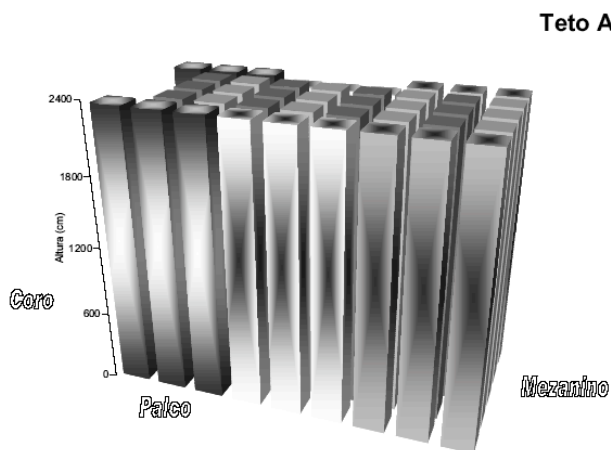


Figura 6: Configuração de teto A.

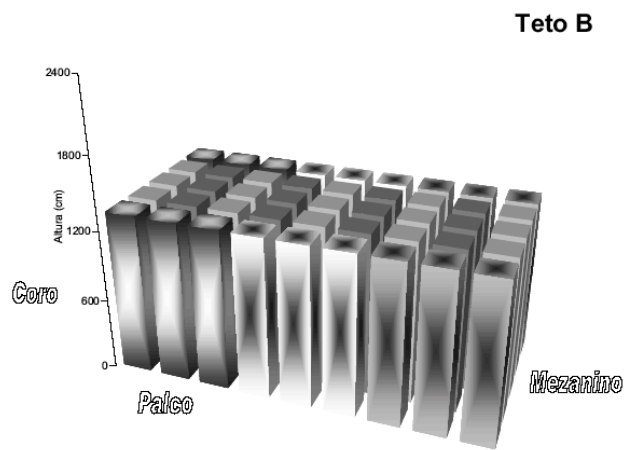


Figura 7: Configuração de teto B.

A Fig. 6 ilustra o espaço disponível na sala para a configuração A. As barras verticais indicam o volume de ar sobre a platéia, sob cada placa. Nessa configuração, buscou-se maximizar o volume da sala. As placas estavam posicionadas de forma plana e horizontal, plano este situado em sua elevação máxima, cerca de 23.7 m, relativo ao nível do palco. Excetua-se o conjunto de placas P1 (à esquerda, na figura) que, por um impedimento mecânico, tem sua elevação limitada a 20.1 m. Esta é, portanto, a configuração de teto que resulta no maior volume admissível da sala.

A Fig. 7 ilustra o espaço disponível na sala para a configuração B. Nessa configuração as placas formavam ainda um plano horizontal, porém na altura de 13.5 m, em uma posição mediana de suas possibilidades. Como esse nível corresponde a uma linha arquitetônica que circunda

horizontalmente a sala, esta adquire, nessa configuração, uma aparência natural, que sugere seu teto mais alto, embora este esteja rebaixado de 10.2 m.

A Fig. 8 ilustra o espaço disponível na sala para a configuração F. Aqui foi buscado o limite mیده altura das placas que ainda permite a utilização da sala. Nessa configuração as placas formam um plano horizontal a 8 m de altura, relativamente ao palco. Nessa configuração, os balcões do segundo andar ficam inutilizáveis pois permanecem acima do forro acústico. Ainda que nunca tenha sido utilizada essa configuração em performances musicais, é uma possibilidade que desejávamos investigar, colocando esse como um limite inferior de volume da Sala.

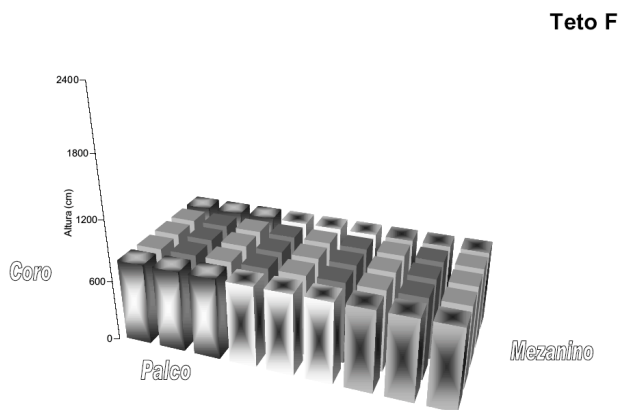


Figura 8: Configuração de teto F.

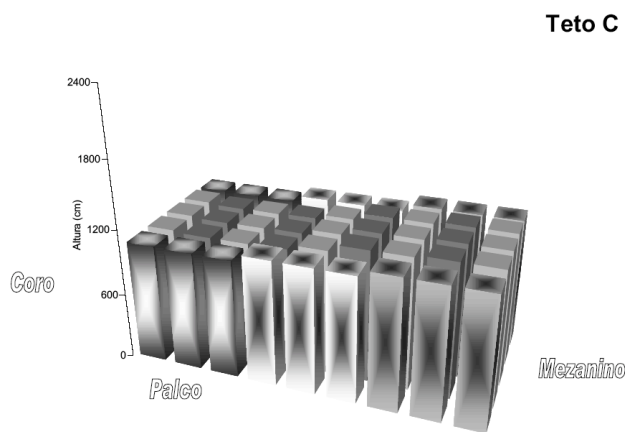


Figura 9: Configuração de teto C.

A Fig. 9 ilustra o posicionamento das placas na configuração C. Essa configuração foi utilizada em uma récita da Nona Sinfonia de Beethoven, com a OSESP sob a regência do maestro Roberto Minczuk, na abertura da temporada de 2004. Escolheu-se essa configuração por ter sido utilizada para a execução de uma obra para grande orquestra, inclusive coro, se tratando de uma disposição de interesse do ponto de escuta musical e acústico. A Nona Sinfonia é uma obra do fim do classicismo, que já contém elementos do romantismo em sua forma e instrumentação.

A Fig. 10 mostra o posicionamento das placas na configuração D. Essa configuração foi utilizada para a gravação da Segunda Sinfonia de Beethoven, com a OSESP sob a regência do maestro John Neshling. É uma obra com orquestração típica do período clássico e com o particular interesse de ter sido executada por um conjunto musical diferente - a orquestra clássica - em uma situação de gravação, também com a sala sem público, tal como no ensaio acústico.

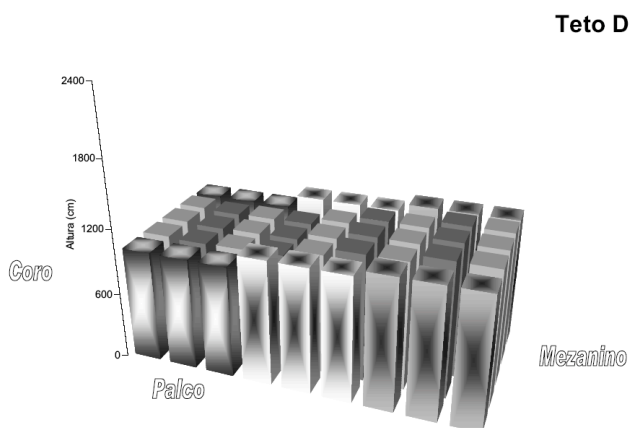


Figura 10: Configuração de teto D.

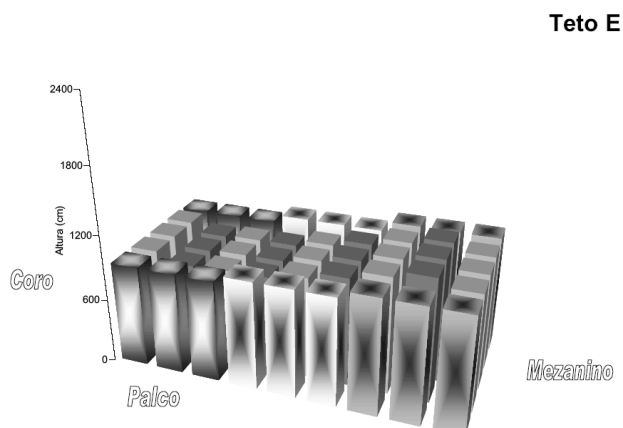


Figura 11: Configuração de teto E.

A Fig. 11 indica o posicionamento das placas na configuração E. Foi utilizada em um recital de música de câmara, onde foi interpretado o Quinteto para piano e cordas, KW116, de Mozart, com o pianista Stephen Kovacevich e músicos da OSESP. Aqui temos uma situação com um diferente conjunto musical, executando música do período clássico. A formação instrumental constou de 2 violinos, viola, violoncelo e piano.

Finalmente, a Fig. 12 ilustra o posicionamento das placas na configuração M. Essa configuração foi utilizada em uma récita da obra Pierrot Lunaire, de Arnold Schoenberg, regida pelo maestro John Neshling. A obra é de meados do século XX, representativa da ruptura buscada por

compositores desse período. Nessa obra, o conjunto musical é totalmente não convencional se comparado com o instrumental sinfônico ou de câmara tradicionais.

Teto M

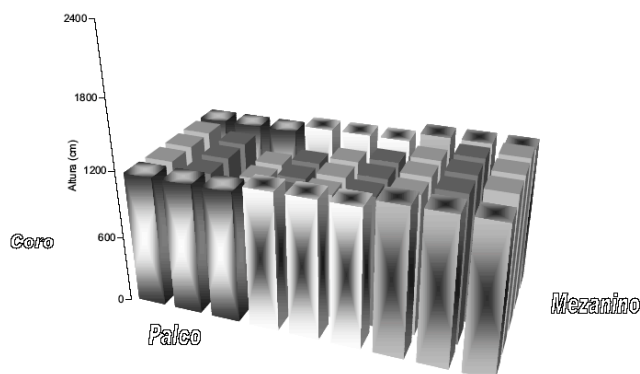


Figura 12: Configuração de teto M.

3. RESULTADOS OBTIDOS

O primeiro aspecto a ser observado é a variabilidade ou dispersão dos resultados obtidos para uma mesma configuração de teto nas diferentes posições dos microfones. As Figs. 13 a 16 mostram os resultados para T_{30} , EDT, C_{80} e CT, por banda de oitava, de 63 Hz a 8 kHz, para seis posições de microfones, na configuração C.

Nas quatro figuras, observa-se uma curva indicando a média do parâmetro de qualidade acústica. Para os parâmetros T_{30} e EDT a média é calculada a partir da média RMS das respostas impulsivas filtradas de cada posição de microfone. Essa opção metodológica deve-se ao fato de que, principalmente em baixas frequências, as respostas impulsivas integradas não serem propriamente retilíneas, sofrendo forte influência dos modos da sala. Essa opção produz resultados mais estáveis do que a simples média aritmética dos valores dos decaimentos em cada posição de microfone. Para as curvas de C_{80} e CT, as médias indicadas constituem a média aritmética simples dos valores do parâmetro em questão.

3.1 Influência da posição do ouvinte

O gráfico de T_{30} , Fig. 13, mostra que essa variabilidade com a posição é pequena, exceto na banda de 63 Hz, o que indica uma boa difusão na sala. Na banda de 63 Hz, a dispersão dos resultados era esperada, uma vez que estamos em pleno domínio modal, onde a posição do ouvinte exerce influência notável no tempo de reverberação medido. Nesta, assim como nas demais figuras, cada curva corresponde a um ponto de medição.

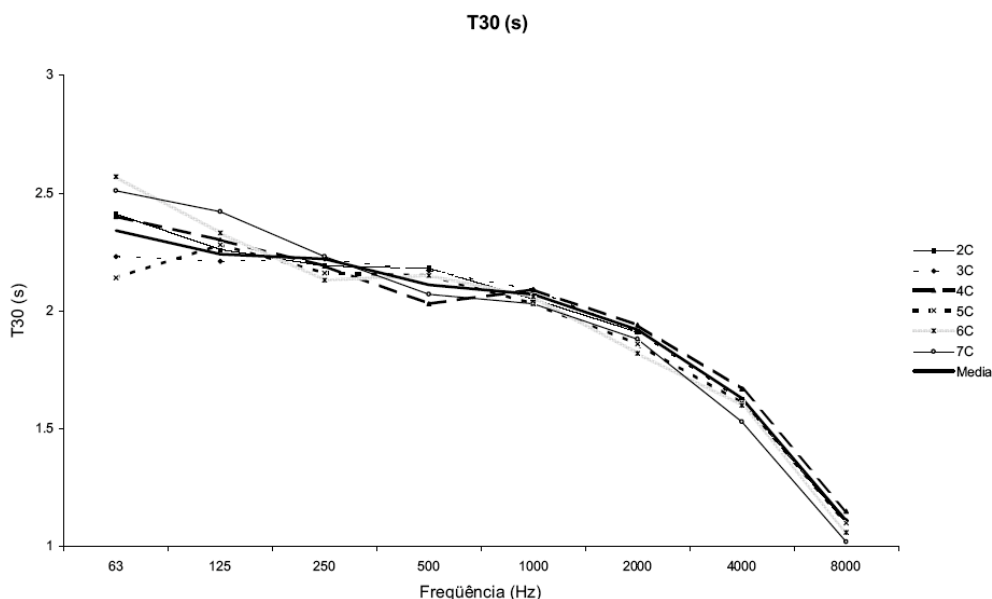


Figura 13: T_{30} nas diversas posições de microfones na configuração de teto C.

No caso do EDT, Fig. 14, há uma maior variabilidade em função de uma maior ou menor presença de primeiras reflexões, dependendo estas da posição onde se encontra o ouvinte. Com efeito, na banda de 500 Hz, o microfone 7 (coro) registrou um tempo de decaimento inicial de 1.8 s, enquanto no microfone 4 (platéia elevada) esse tempo foi avaliado em 2.26 s.

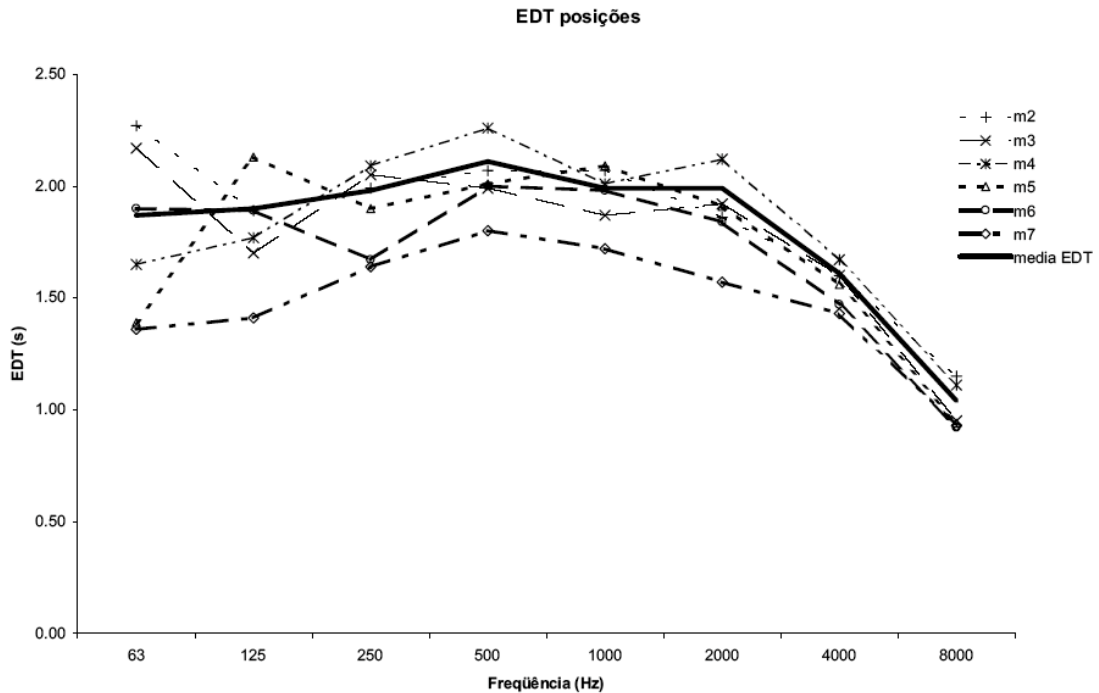


Figura 14: EDT nas diversas posições de microfone na configuração de teto C.

Quanto ao gráfico da clareza, Fig. 15, observa-se que, embora haja pequena variação de C_{80} com a frequência, há uma variância significativa com a posição do ouvinte. Dentre as posições medidas, a que apresenta maior índice de clareza é o assento 12 do camarote 8 (microfone 6). Observe-se adicionalmente que o índice de clareza no assento D 23 (microfone 7), no coro, também é alto. Esse padrão é mantido nas outras configurações de teto ensaiadas.

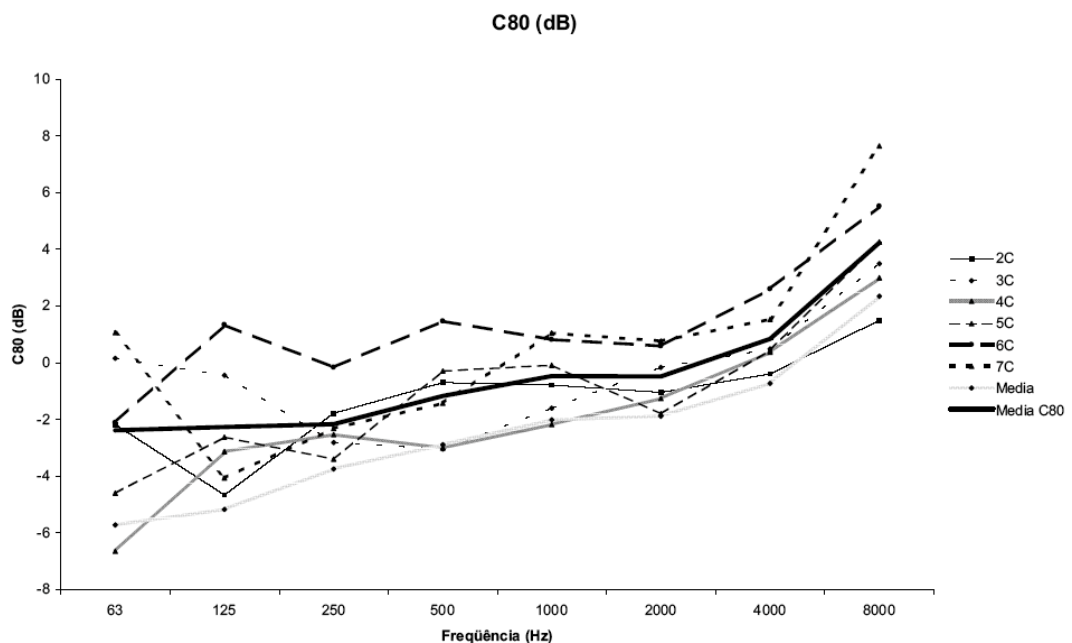


Figura 15: C_{80} nas diversas posições de microfone na configuração de teto C.

O gráfico de CT, Fig. 16, confirma o fato de que as posições 6 e 7, com maior clareza, são aquelas que apresentam menor valor de CT, como é usual. Note-se a dispersão significativa nos valores apresentados.

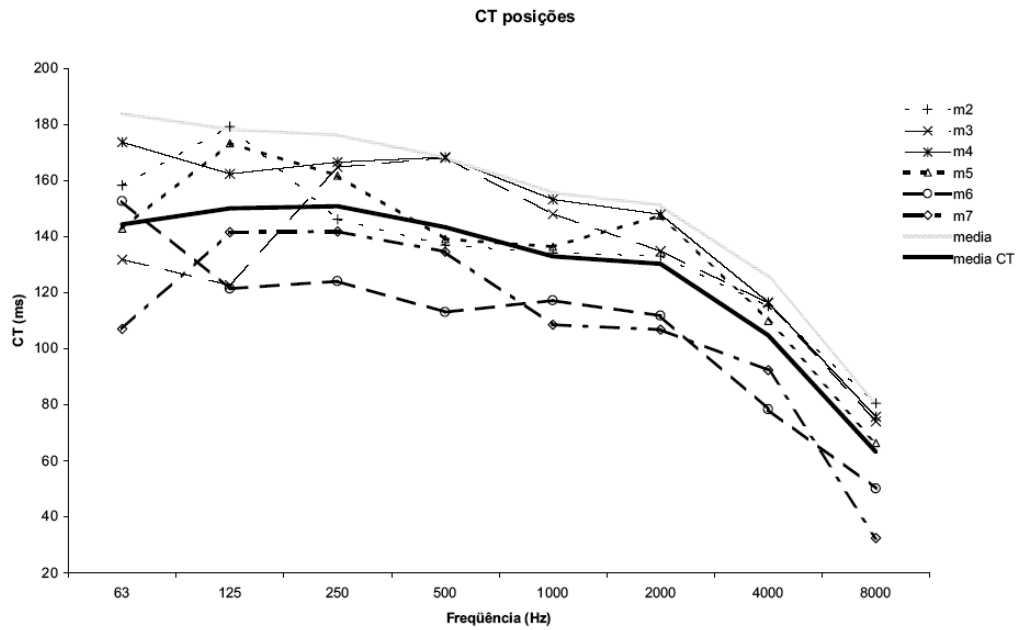


Figura 16: CT nas diversas posições de microfones na configuração de teto C.

As Figs. 17 a 20 ilustram os resultados correspondentes ao T_{30} , EDT, C_{80} e CT, para as seis posições de microfones, na configuração E.

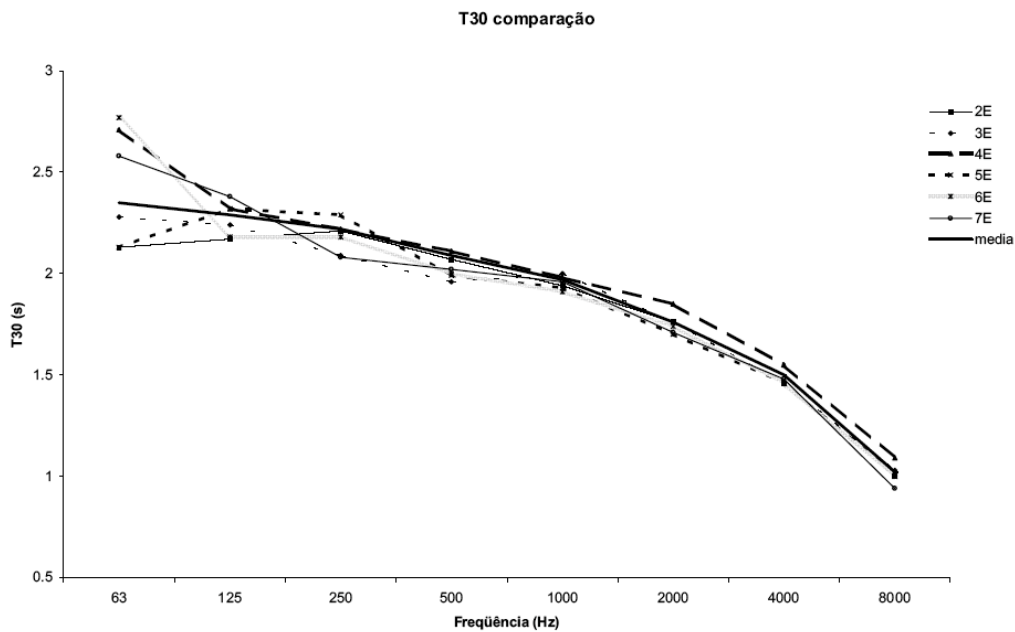


Figura 17: T_{30} nas diversas posições de microfones na configuração de teto E.

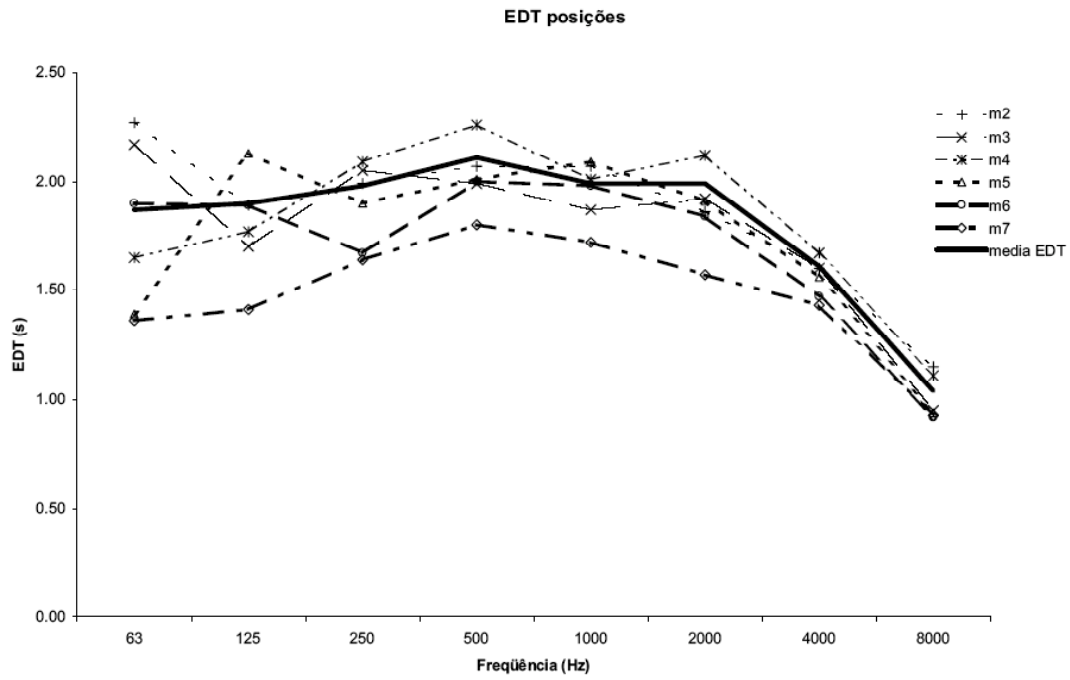


Figura 18: EDT nas diversas posições de microfone na configuração de teto E.

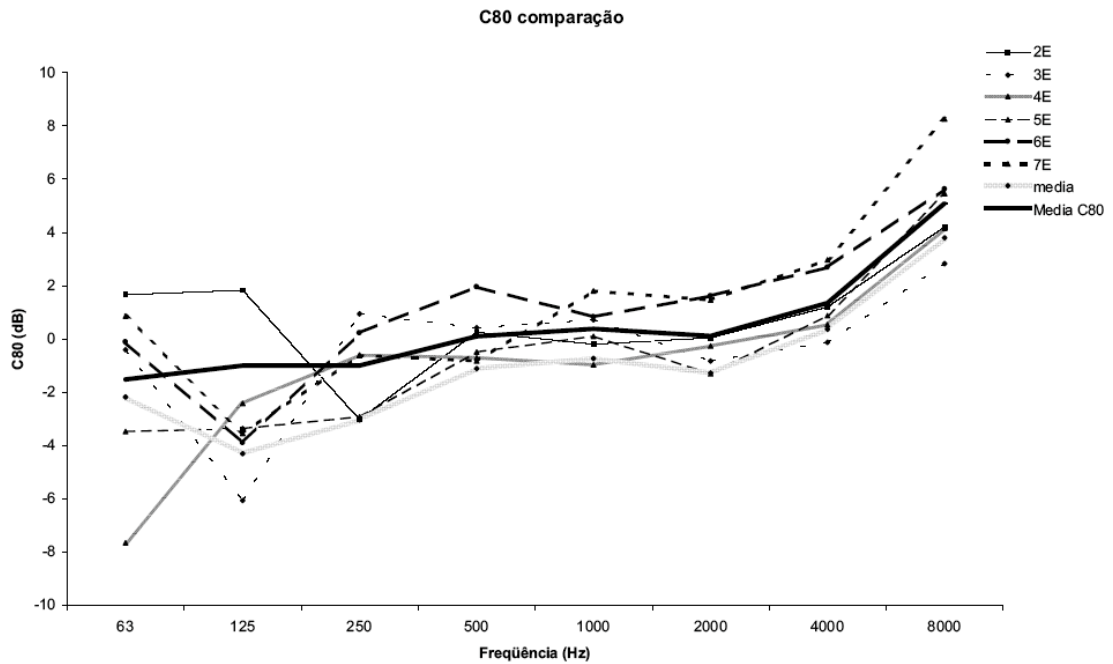


Figura 19: C₈₀ nas diversas posições de microfone na configuração de teto E.

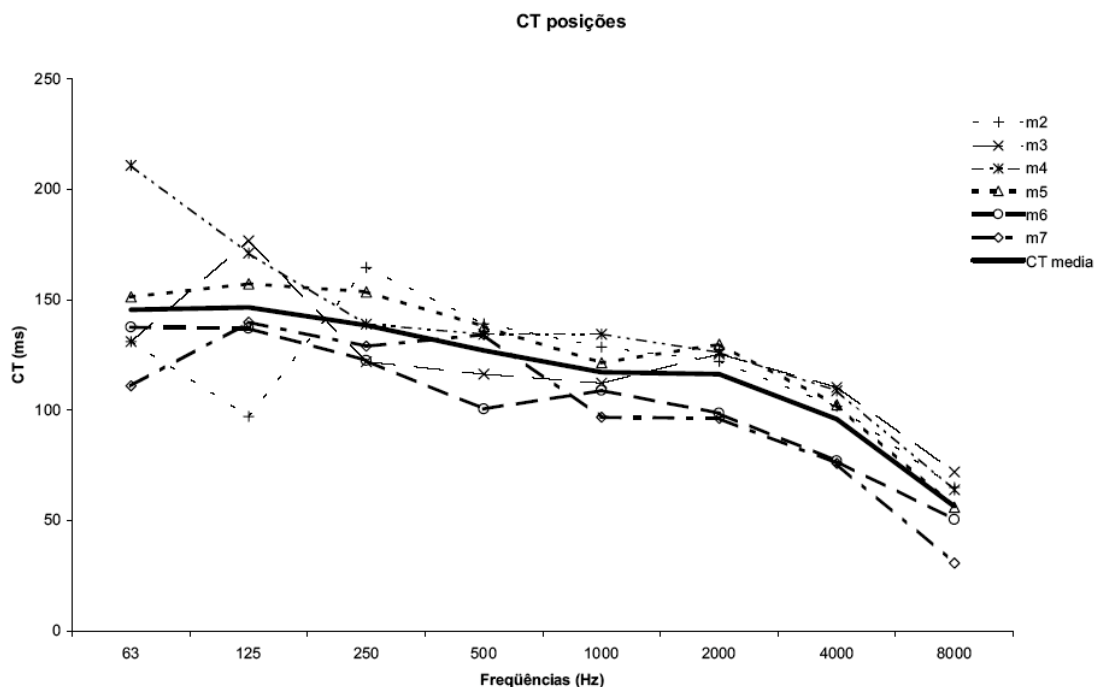


Figura 20: CT nas diversas posições de microfone na configuração de teto E.

O gráfico de T_{30} mostra comportamento similar ao da Fig. 13, com pequena sensibilidade à mudança da posição na sala e o esperado decaimento com a frequência. Naturalmente, como na configuração E a sala apresenta menor volume, todos os valores de T_{30} encontrados são inferiores aos da Fig. 13. Observando-se o gráfico de EDT, Fig. 18, é notável que, nessa configuração de teto, há uma menor dispersão entre os resultados comparativamente aos indicados na Fig. 14. Obviamente, os valores absolutos de EDT são um pouco inferiores. Quanto ao índice de clareza, Fig. 19, a variância com a posição do microfone é aproximadamente a mesma, indicada pela Fig. 15. Os dois assentos que apresentam maior clareza continuam sendo os correspondentes às posições 6 e 7, tal como na configuração vista anteriormente. Finalmente, com relação ao CT, Fig. 20, o que podemos notar, claramente, é que na configuração E as coordenadas temporais do centróide da resposta impulsiva são inferiores aos valores correspondentes obtidos na configuração C.

3.2 Influência da configuração de teto

Uma vez verificada a consistência e coerência dos resultados, o segundo aspecto a ser explorado é a variação da média espacial dos parâmetros acústicos com as diversas configurações de teto ensaiadas, o que é ilustrado nas Figs. 21 a 24.

O gráfico de T_{30} , Fig. 21, mostra uma variação de cerca de 1.5 s no tempo de reberação. Com efeito, na configuração A, onde o volume da sala é de cerca de 25000 m³, o T_{30} chega a 3.26 s, na banda de frequência de 250 Hz. Na configuração B, cujo volume corresponde a cerca de 13900 m³, o tempo de reverberação em 1 kHz é de cerca de 2.4 s. Nas configurações subsequentes (C, D, E e F), a variação de T_{30} é pequena, indo de 2.07 s (C) a 1.85 s (F). Com efeito, estas configurações têm diferentes formas porém volumes próximos.

A Fig. 22 nos mostra um resultado substancialmente distinto para o decaimento inicial medido. Enquanto o tempo de reverberação não apresentou grande sensibilidade à variação de configuração de teto, com exceção da configuração A, os resultados comparativos de EDT mostram haver extrema sensibilidade desse parâmetro para com as diversas configurações de teto. Tomando como exemplo a frequência de 500 Hz tem-se os seguintes valores de EDT, em segundos: A, 3.42; B, 2.47; C, 2.11; D, 2.09; E, 1.83 e F, 1.57, ou seja, os valores de EDT acompanham notadamente a redução de volume da sala. Essa sensibilidade é a grande responsável pela eficácia do teto móvel como elemento de afinação da Sala São Paulo, como veremos na seção seguinte.

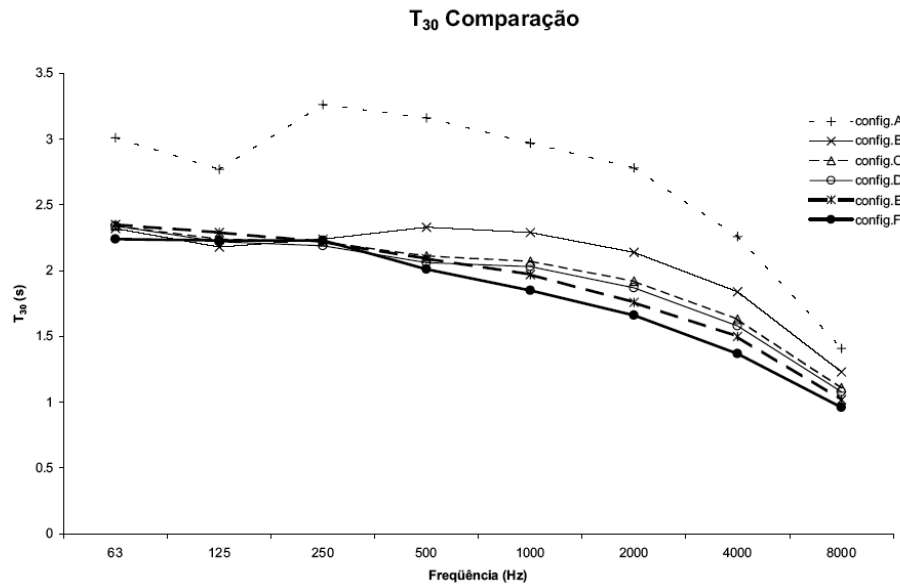


Figura 21: Comparação de T₃₀ entre as configurações de teto ensaiadas.

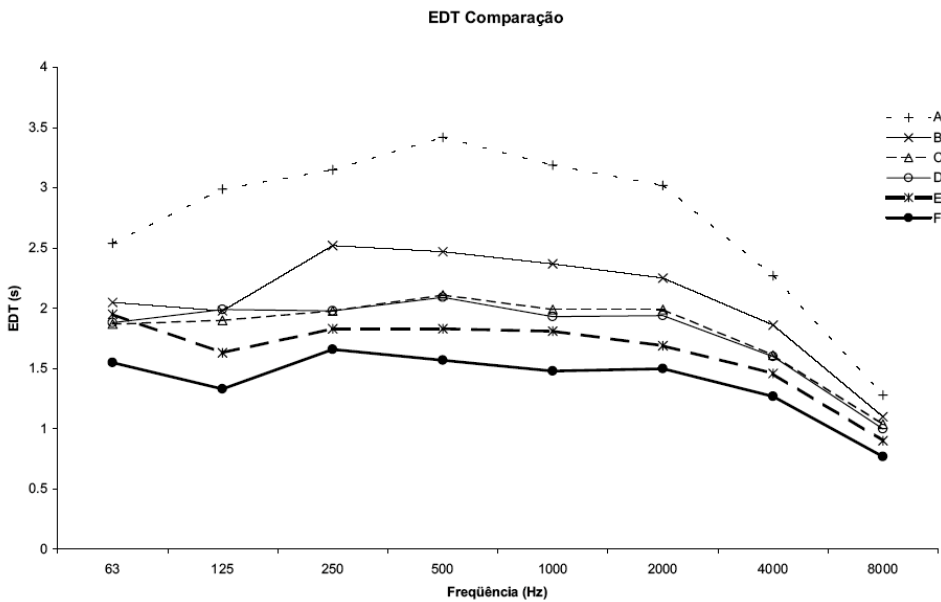


Figura 22: Comparação de EDT entre as configurações de teto ensaiadas.

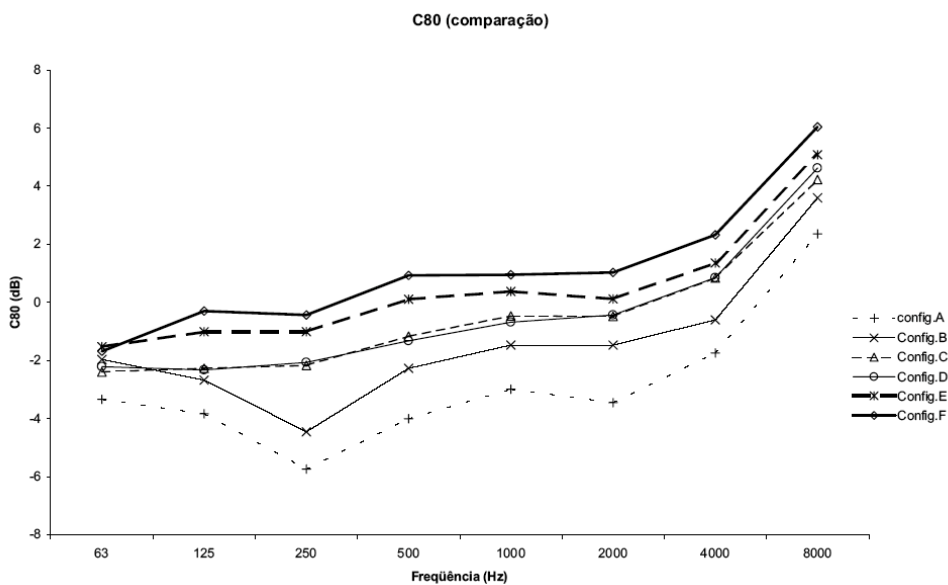


Figura 23: Comparação de C₈₀ entre as configurações de teto ensaiadas.

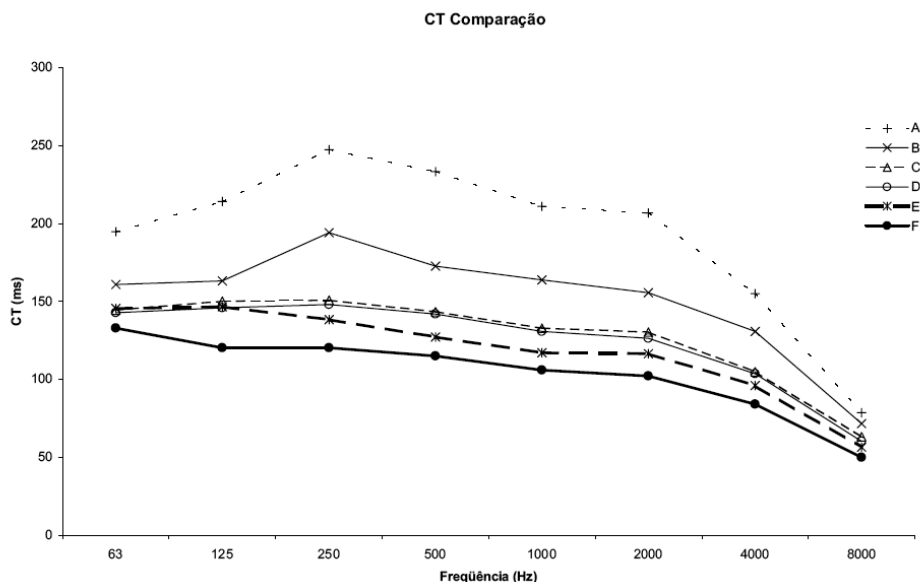


Figura 24: Comparação de CT entre as configurações de teto ensaiadas.

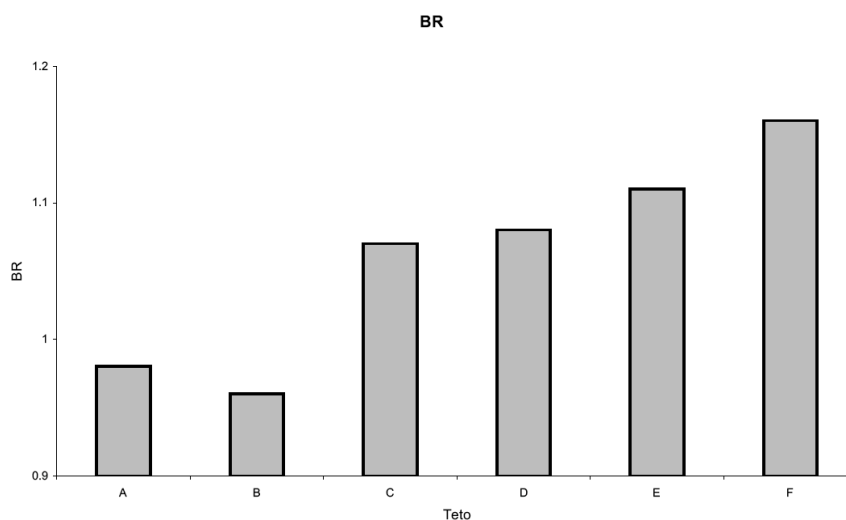


Figura 25: Comparação de BR entre as configurações de teto ensaiadas.

Os valores comparativos de C80 estão apresentados na Fig. 23. Como já visto anteriormente, as curvas são quase monotonamente crescentes com a frequência, com exceção das configurações A e B, onde há um mínimo em 250 Hz. Observa-se uma razoável sensibilidade do índice de clareza às configurações de teto, variando aquele de mais de 4dB na frequência de 500 Hz, por exemplo. As curvas acompanham de forma consistente a redução do volume da sala, apresentando maior clareza para menores volumes, como era de se esperar.

Os resultados do tempo central, CT, estão apresentados na Fig. 24. Vê-se que em 1 kHz os valores flutuam entre 106 ms (F) e 211 ms (A), uma relação de praticamente 2:1. Esse quadro ilustra as diferenças encontradas nas respostas impulsivas (médias espaciais) da sala nas diversas configurações de teto. A exemplo dos demais parâmetros, o tempo central acompanha consistentemente a variação de volume da sala.

A Fig. 25 indica os valores da razão de baixos, BR, para as seis configurações. Excetuando-se a configuração B, tem-se uma razão de baixos que varia inversamente com o volume da sala. Para configurações intermediárias, geralmente utilizadas em concertos, BR varia entre 1.07 (C) e 1.11 (E). O parâmetro de qualidade acústica objetivo BR é usualmente associado à impressão subjetiva denominada “calor” de uma sala. Quanto maior o BR, maior será sua resposta nos graves e maior será a sensação de “calor” da sala.

3.3 Correlação cruzada inter-aural

Um dos parâmetros de maior importância na avaliação da qualidade acústica de uma sala é a família das correlações cruzadas interaurais, IACC, dentre as quais privilegiaremos a IACC_L e a

IACCE. O L, referindo-se a tardio (*late*), ou seja, no intervalo de tempo após 80 ms, contado da chegada do som direto, e o E, referindo-se a precoce ou inicial (*early*), ou seja, no intervalo entre 0 e 80 ms. A avaliação de IACC foi obtida a partir dos sinais medidos com uma cabeça artificial para levantar a resposta impulsiva binaural, conforme descrito na Seção 2. Para todas as configurações de teto a posição da cabeça artificial foi mantida. Uma medição adicional foi realizada na configuração denominada M, em posição distinta, como já mencionado.

Um dos atributos de qualidade acústica de uma sala refere-se ao som reverberante atingindo o ouvinte como se fosse proveniente de todas as direções, qualidade subjetiva esta usualmente denominada envolvimento do ouvinte (LEV - *Listener Envelopment*). Esse atributo tem sido associado à correlação cruzada interaural tardia, na forma $1 - IACCL$, ou seja, quanto menor for a correlação cruzada interaural tardia, maior será o envolvimento do ouvinte.

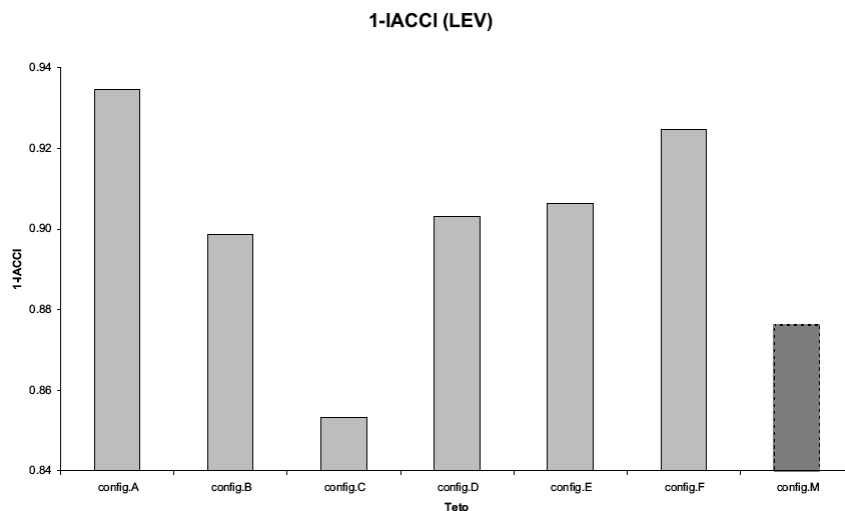


Figura 26: Envolvimento do ouvinte, LEV, estimado por $1 - IACCL$.

A Fig.26 indica o valor de $1 - IACCL$ para as sete configurações de teto, obtidos a partir de médias nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1 e 2 kHz. Observa-se que todos os valores estão compreendidos na faixa que se situa entre 0.85 e 0.94, valores altos portanto. Isso se deve, evidentemente, ao alto grau de difusão sonora que a sala promove, devido a irregularidades, ornamentos, colunas etc., presentes na Sala São Paulo. Não se evidencia nenhuma correlação entre volume da sala e o valor do parâmetro $1 - IACCL$.

Outro atributo de qualidade acústica de suma importância é dado pelo atributo de espacialidade da sala que é primordialmente avaliada por um parâmetro subjetivo denominado tamanho aparente da fonte (ASW - *Apparent Source Width*). Desse modo, quanto maior o tamanho aparente da fonte, maior sensação de espacialidade a sala oferece, dando “corpo” à música. A melhor forma disponível até o momento de se avaliar o ASW é a partir da correlação cruzada interaural precoce, pela expressão $1 - IACCE$, ou seja, quanto menor for a correlação cruzada interaural precoce, maior será o ASW, indicando melhor qualidade da acústica sala.

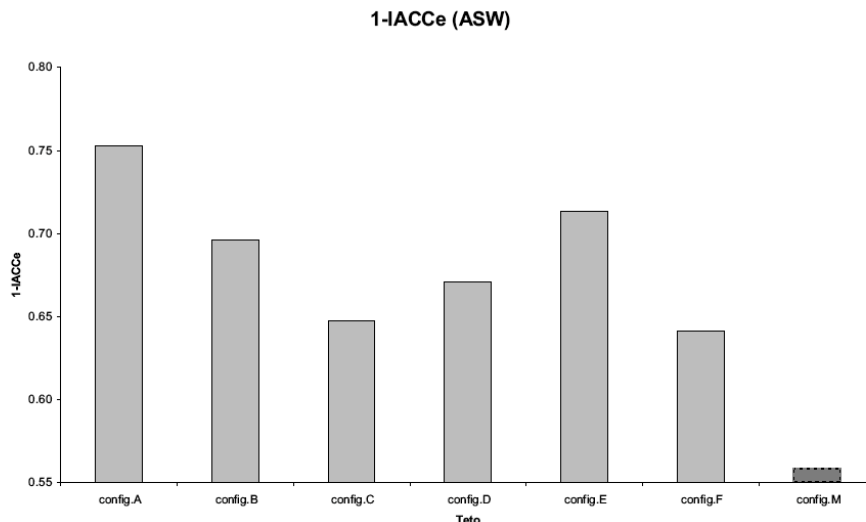


Figura 27: Tamanho aparente da fonte, estimado por $1 - IACCE$.

A Fig. 27 indica o valor de $1-IACC_E$ para as sete configurações de teto, obtidos a partir de médias nas bandas de oitava de 500 Hz, 1 e 2 kHz. Esse parâmetro também é referido por alguns autores como índice de qualidade binaural, (BQI - *Binaural Quality Index*). Os valores obtidos, excetuando-se a configuração de teto M, situam-se entre 0.63 e 0.76, valores considerados no limite superior para salas de concerto.[8;9] Curiosamente, na configuração de teto M esse valor decaiu para 0.55. Isso tem pelo menos uma explicação plausível. Nessa configuração, como já mencionado, a posição da cabeça artificial foi modificada, passando para um assento de camarote, lateral portanto, onde se verifica menor tamanho aparente da fonte, ou seja menor sensação de espacialidade. Como esta não foi uma configuração de teto de volume mínimo (D, E e F apresentam volume menor) outros fatores devem ser ainda investigados para fundamentar a explicação.

4. ANÁLISE QUALITATIVA

Esta seção apresenta dois tipos de exame dos parâmetros obtidos no ensaio acústico realizado na Sala São Paulo de concertos. Em uma primeira etapa os dados da sala são comparados àqueles, disponíveis na literatura, das três salas de concerto qualificadas como Superiores - A+, segundo o critério de Beranek [6] – por críticos e músicos, nominalmente: *Concertgebouw*, em Amsterdã; *Synphony Hall*, em Boston; e *Grosser Musikvereinssaal*, em Viena. Análises comparativas entre salas de concerto, sob a ótica de seus atributos de qualidade acústica, vêm sendo publicadas na literatura especializada. [10;8] Para as comparações analisadas neste trabalho, são apresentados os gráficos dos parâmetros acústicos em consideração por banda de oitava, nas bandas de 125 a 4000 Hz, para cada uma das salas citadas e para cinco configurações de teto da Sala São Paulo, a saber: configuração

A (teto mais alto); configuração F (teto mais baixo); e configurações C, D e E (teto intermediário). As curvas para as configurações A e F delimitam dois extremos da faixa de operação da Sala.

Na segunda parte da análise, os parâmetros acústicos são relacionados com o gênero musical, grupo instrumental ou opção interpretativa dos maestros, uma vez que, no caso da Sala São Paulo de concertos, identifica-se uma relação entre preferências estéticas e os valores que os parâmetros de qualidade acústica assumem em função da configuração adotada.

4.1. Análise comparativa com salas reconhecidas mundialmente

Inicialmente, vale considerar os resultados comparativos entre as três salas citadas acima e a Sala São Paulo no que diz respeito ao tempo de reverberação, indicado na Fig. 28. Todos os dados são para salas desocupadas.

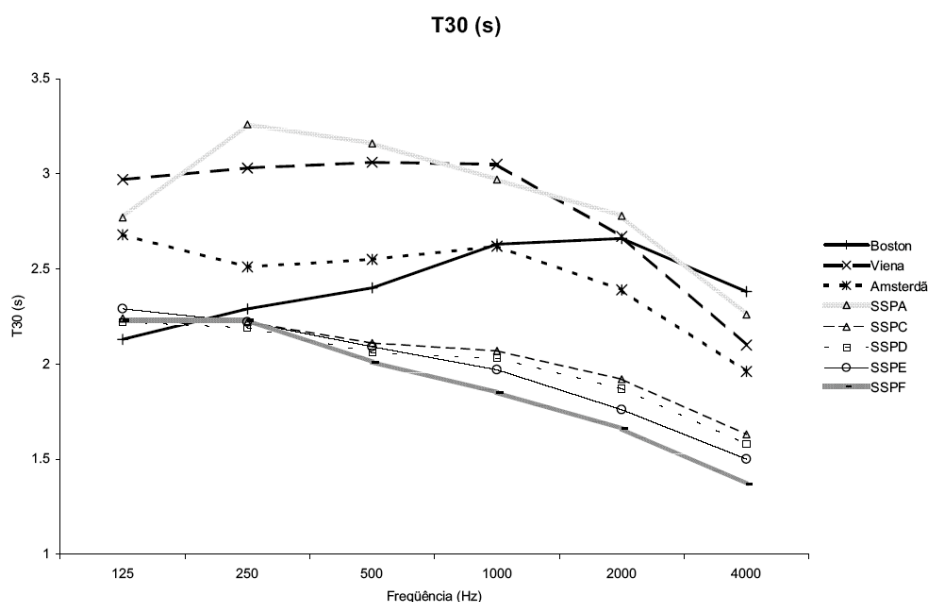


Figura 28: T₃₀ comparado entre a Sala São Paulo e as salas de referência.

Observa-se que a região onde opera a Sala São Paulo de concertos compreende uma faixa onde situam-se as três salas tomadas como referência. Com efeito, os limites superior (A) e inferior (F) das curvas de T_{30} englobam as três salas de referência. Contudo, nas configurações mais utilizadas (C, D e E), apresenta tempos de reverberação inferiores, especialmente em alta frequência, como mostra a figura. Devemos lembrar, contudo, que esses resultados comparativos são para salas desocupadas, mesma condição em que foram efetuados os ensaios na Sala São Paulo. Uma vez que os resultados não podem ser extrapolados para salas plenamente ocupadas, condição usual dos espetáculos, pouco se pode afirmar quanto aos tempos de reverberação da Sala São Paulo de concertos para as diversas configurações, comparativamente às salas de referem condição de concerto. Este comentário vale, naturalmente, para os outros quadros comparativos.

O EDT é um parâmetro de qualidade acústica de grande influência na apreciação musical. Observa-se que as três salas consideradas superiores, apresentam EDT na faixa entre 2 e 3 s em toda a gama de frequências. Como se pode observar da Fig. 29, com exceção das configurações A e B (veja também a Fig. 22), todas as outras mostram um resultado de EDT inferior, na faixa de 1.3 a 2.1 s.

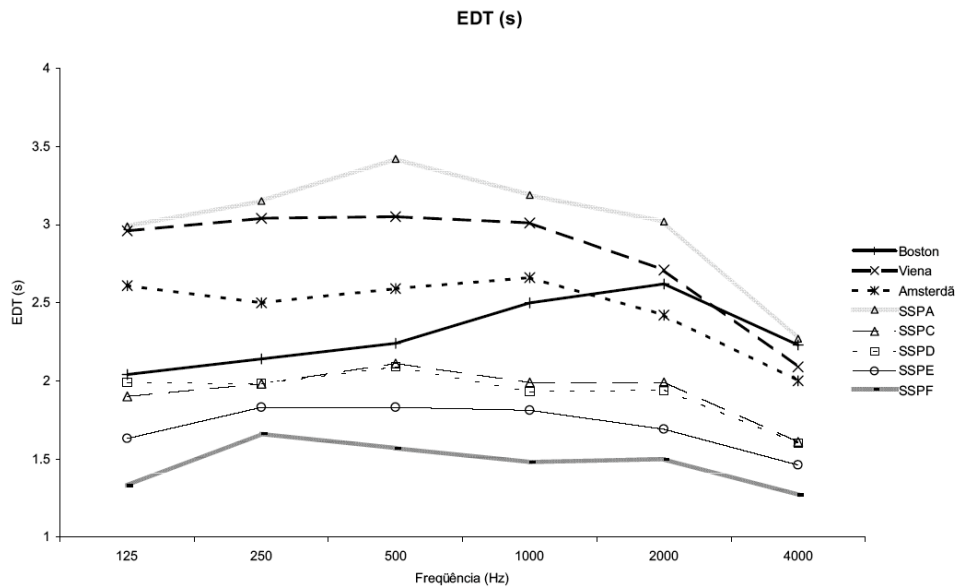


Figura 29: EDT comparado entre a Sala São Paulo e as salas de referência.

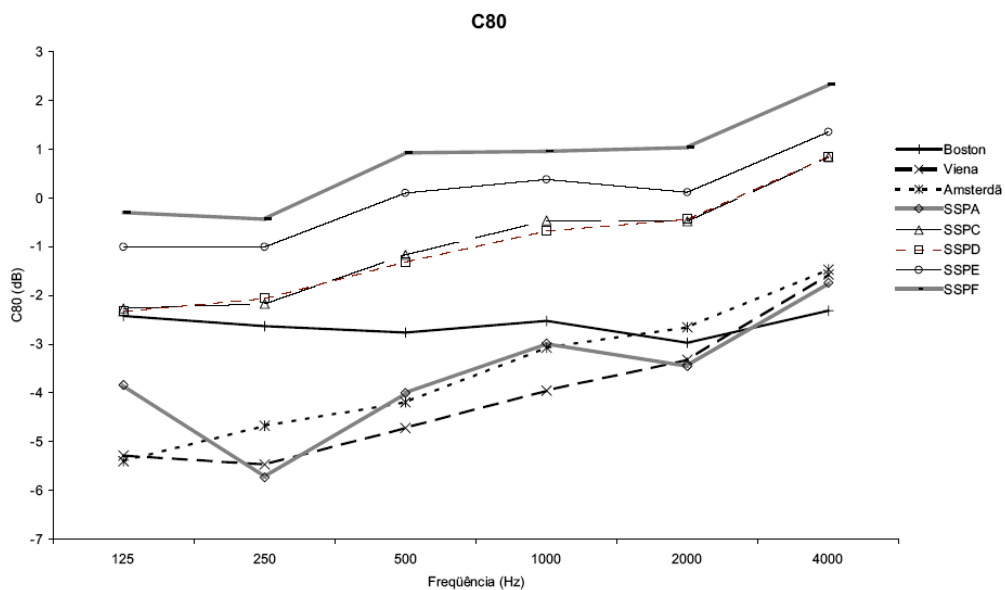


Figura 30: C_{80} comparado entre a Sala São Paulo e as salas de referência.

A Fig. 30 apresenta os resultados comparativos para o índice de clareza, sempre em banda de oitava entre 125 e 4000 Hz e para as salas desocupadas. Observa-se que, para a configuração de

teto A, o índice de clareza situa-se bem proximamente aos da sala de Viena e de Amsterdã. Para as demais, contudo, os índices de clareza mostram valores acima aos das salas de referência. Note-se que a curva de C_{80} para a configuração de teto E varia entre -1 dB em 125 Hz e 1.4 dB em 4 kHz, uma clareza excepcionalmente alta. Os dados para CT das salas de referência não estão disponíveis na literatura, não sendo portanto possível a comparação.

A seguir, veremos como se comporta a Sala São Paulo comparativamente às salas tomadas como referência no que toca à razão de baixos, BR. A Fig. 31 mostra essa comparação. A razão de baixos das três salas, situa-se entre 1.03 (Boston) e 1.11 (Viena). As configurações de teto A e B da Sala São Paulo apresentam valores de BR inferiores, da ordem de 0.97, enquanto as configurações de teto C, D e E apresentam valores de BR quase idênticos aos das salas de referência. A configuração F, entretanto, pode ser considerada uma sala “mais quente”, com um valor de BR igual a 1.16.

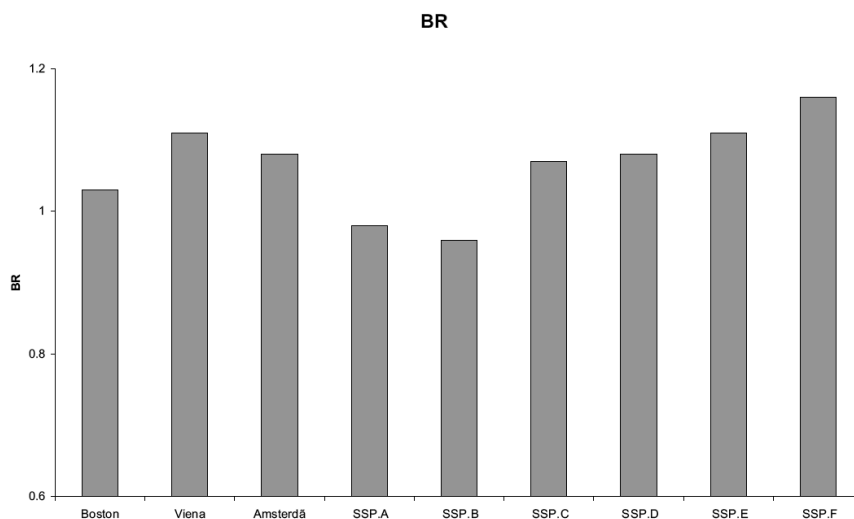


Figura 31: BR comparado entre a Sala São Paulo e as salas de referência.

4.2. Análise do ponto de escuta musical

As três salas utilizadas como referência comparativa, datam do período musical conhecido como Romantismo. A música sinfônica composta nesse período privilegia o atributo subjetivo denominado preenchimento do som (*fullness of tone*), com uma busca de imersão completa do ouvinte nas geralmente longas linhas melódicas executadas pelas grandes orquestras românticas. Esse preenchimento pode ser alcançado em salas com um valor de EDT mais elevado, tipicamente entre dois e três segundos, como ocorre com as salas românticas mundialmente reconhecidas como superiores, tomadas como referências anteriores. Um valor de EDT menor privilegia um gênero musical em que são mais frequentes melodias com transientes rápidos, típicos da música do período conhecido como Clássico.[11] Dentre as configurações ensaiadas, as A e B são aquelas que apresentaram valores de EDT que condizem com os valores requeridos pela música operária romântica. Por outro lado, as configurações C, D e E, apresentam valores médios do parâmetro EDT que qualificam a Sala São Paulo de concertos para execução de música do período clássico. Para essas três configurações, o decaimento inicial é baixo o bastante para permitir passagens musicais com transientes mais velozes. Com efeito, a configuração C foi a adotada para a execução da Nona Sinfonia de Beethoven; a configuração D foi aquela adotada para a execução da Segunda Sinfonia de Beethoven; e a configuração E foi a adotada para a execução de um Quinteto para piano e cordas de Mozart.

O alto índice de clareza encontrado na Sala São Paulo apresenta algumas vantagens do ponto de escuta musical. Primeiramente, em melodias com transientes velozes ou ritmos acelerados, um alto índice de clareza permite maior inteligibilidade musical, sem mistura, ou seja, sem “embolamento” sonoro. Como um exemplo, as músicas contemporâneas com importante parte percussiva, tal como a Sagração da Primavera, de Igor Stravinsky [12], requerem um C_{80} alto, de modo que o ouvinte não perca a fidedignidade, principalmente rítmica, de certas passagens. A Sala São Paulo de concertos apresenta, com frequência, peças de canto coral. O alto índice de clareza encontrado auxilia na inteligibilidade, inclusive da palavra, em obras para canto coral ou para cantor solista e orquestra.

Dentre todos os períodos da história musical, é o Barroco que vai possuir uma relação mais forte entre as composições e a variação dos valores do tempo de reverberação. No Barroco, não havia padronização no que diz respeito aos espaços onde se ouvia música. Assim, a variação dos parâmetros acústicos que os dados da Sala São Paulo mostram, possibilita a adequação desta para os variados tempos de reverberação ideais em cada obra. Os compositores nesse período exerciam

seu ofício em salas acusticamente distintas, geralmente igrejas e capelas que não foram erguidas segundo uma única norma arquitetônica que unificasse as construções.[13] Segundo especialistas na música barroca [14], os valores ideais de T_{30} são dados pela velocidade das mudanças harmônicas dentro de cada obra. Uma sala que possibilita a mudança de seus parâmetros acústicos oferece aos músicos a opção de adequar a sala à sua interpretação da música - e não o contrário. Como exemplo, a configuração A com T_{30} em torno de 3 s, estaria mais adequada a uma música barroca cujas mudanças harmônicas fossem mais lentas, como em boa parte da obra de Vivaldi; enquanto que, por exemplo, a obra de Bach, que freqüentemente apresenta mudanças harmônicas mais velozes, soaria melhor nas configurações B, C, D e E, com tempos de reverberação em torno de 2 s.

Devido à natureza do instrumental barroco, que possui, em geral, pequena potência de emissão sonora, dentre todas as configurações de teto ensaiadas, talvez a configuração F, devido ao seu menor valor de T_{30} e por impor uma redução no número de ouvintes na sala, fosse a mais indicada para a performance de música barroca, com rápidas mudanças harmônicas, principalmente em uma interpretação com instrumentos de época.

5. CONCLUSÕES

As respostas impulsivas da Sala São Paulo de concertos, desocupada, para uma posição da fonte, oito posições de microfone e sete distintas configurações de teto foram levantadas utilizando a técnica de varredura em freqüência com preservação de informação de fase. Adicionalmente, uma cabeça artificial foi utilizada para obter as respostas impulsivas binaurais para cada uma das configurações de teto escolhidas. Com base nessas medições, as curvas de decaimento, o tempo de reverberação, T_{30} , o tempo de decaimento inicial, EDT, o índice de clareza, C_{80} , o tempo central, CT e a razão de baixos, BR, foram calculados para cada posição de microfone e cada configuração de teto. Além disso, as correlações cruzadas interaurais precoce, $IACCE$, e tardia, $IACCL$, foram avaliadas para a posição da cabeça artificial, em cada configuração de teto.

Essencialmente, os resultados mostraram que todos os parâmetros de qualidade acústica são sensíveis às variações de configuração de teto, sendo essa sensibilidade menor para o tempo de reverberação e maior para o tempo de decaimento inicial, para o índice de clareza e para o tempo central. A razão de baixos, que indica o "calor" da sala, também mostrou-se bastante sensível às modificações de forma e volume. Isso nos permite concluir que a afinação da sala a partir de seu forro móvel é efetiva, estando inclusive de acordo com o "ponto de escuta" acústico, algumas das escolhas de configuração adotadas pelos músicos.

Na comparação dos atributos de qualidade acústica da Sala São Paulo de concertos com os das outras três salas classificadas como superiores (A+), verificou-se que, para as configurações de teto medidas e já utilizadas em espetáculos (C, D e E), a Sala apresenta tempos de reverberação ligeiramente menores (tipicamente 2.0 s em 1 kHz), com um decaimento um pouco mais acentuado em altas freqüências. O mesmo sucede com o EDT, (tipicamente 1.7 s em 1 kHz), o que indicaria um julgamento subjetivo de menor reverberação.[5] Esse resultado é também compatível com um fator de clareza ligeiramente mais elevado que a maioria das salas de referência. No que toca à razão de baixos, a Sala São Paulo é inteiramente equivalente às salas de referência.

As contingências de natureza arquitetônica da Sala São Paulo de concertos, tais como suas proporções similares, por exemplo, às da Boston Symphony Hall [7] ou às suas características amplamente difusoras são oriundas, em grande parte, de características do espaço disponível para sua construção. Mas a decisão de garantir, por exemplo, seus balcões com superfícies difusoras, ajudaram a dar à Sala São Paulo as características de "boa acústica", de que falamos no início. O forro móvel é um recurso adicional que permite efetivamente afinar a Sala, ajustando-a a estilos musicais tão distintos como o Romantismo, o Classicismo, e a música Contemporânea. Até que ponto esse ajuste pode ser otimizado ainda é precoce afirmar, sendo necessário um conjunto bem maior de ensaios - especialmente testando outras configurações de teto. Contudo, ao que tudo indica, os critérios *ad hoc* dos músicos parecem vir tendo razoável sucesso. Alguns aspectos sobre o conjunto da sala, extraídos das medições adicionais feitas por microfones situados no palco também necessitam análise mais cuidadosa.

Dentre os atributos da Sala São Paulo de concertos um dos mais importantes é justamente o forro móvel que permite a Sala apresentar qualidades acústicas variáveis. Nas tentativas encontradas na literatura de classificação de salas de concerto segundo categorias (ranqueamento), pouco se leva em consideração o estilo musical mais adequado aos atributos de qualidade acústica da sala. Contudo, sabe-se que uma sala construída no período romântico não é estritamente adequada à execução de música do período clássico, por exemplo. No caso da Sala São Paulo, há a possibilidade de afinação da sala de um modo bastante eficaz, como se comprovou neste trabalho, pela alteração da configuração do teto. Acreditamos que a experiência atual dos músicos com esse

recurso seja ainda insuficiente para extrair do ambiente todas as suas possibilidades. Muitas outras configurações de teto serão certamente testadas e acreditamos que este trabalho possa oferecer importantes subsídios para o sucesso da performance musical na Sala São Paulo, enriquecendo ainda mais a nossa paisagem sonora. [15]

6. AGRADECIMENTOS

Queremos deixar expresso nosso profundo agradecimento ao Maestro John Neschling, Diretor Artístico da Sala São Paulo de concertos, e à Sra. Marilda Suyama Tegg, Assessora técnica de Gabinete da Secretaria de Estado da Cultura do Estado de São Paulo, por sua pronta e gentil disponibilização da Sala para os ensaios acústicos dos quais foram extraídos os dados para este trabalho. Também gostaríamos de deixar registrada a colaboração dos técnicos da sala, especialmente o Sr. Cássio Mendes, responsável pela operação do forro móvel.

Desejamos sobretudo agradecer à equipe do Laboratório de Ensaios Acústicos (LAENA), do INMETRO, na pessoa de seu chefe, Dr. Marco Antonio Nabuco de Araújo, que, com sua larga experiência em ensaios acústicos e o suporte de equipamentos do LAENA, viabilizou as medições.

Finalmente, desejamos registrar a inestimável contribuição para o eventual sucesso deste trabalho do Dr. Swen Müller, autor e desenvolvedor do excelente *software* Monkey Forest para processamento de sinais acústicos - com o qual temos trabalhado em diversas teses acadêmicas - um colaborador sempre solícito e prestativo. O Dr. Swen esteve à frente dos ensaios na Sala São Paulo.

7. REFERÊNCIAS

- [1]. Di Marco, A.R. e Zein, R.V., *Sala São Paulo de Concertos*, Alter Market, São Paulo, 2001.
- [2]. Bocchino, A., Depoimento pessoal aos autores, 2004.
- [3]. ISO 3382:1997, Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, 1997.
- [4]. Kuttruff, H., *Room Acoustics*, Fourth Edition, E&FN Spon, London, 2000.
- [5]. MÄuller, S. and Massarani, P.M., Transfer-function measurements with sweeps, Publicação interna do LAENA, INMETRO, pp. 1- 49, 1999.
- [6]. Barron, M., *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, E&F Spon, London, 1993.
- [7]. Beranek, L.L., *Concert and Opera Halls: How They Sound*, Published by Acoustical Society of America, Woodbury, 1996.
- [8]. Hidaka, T. and Nishihara, N., Objective evaluation of chamber-music halls in Europe and Japan, *Journal Acoust. Soc. Am.*, 116 (1), pp. 357- 372, July 2004.
- [9]. Ando, Y., *Architeturial Acoustics*, Springer-Verlag, 1998.
- [10]. Schroeder, M.R., Gottlob, D. and Siebrasse, K.F., Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters, *Journal Acoust. Soc. Am.*, 56, 1195- 1201, 1974.
- [11]. Rushton, J., *A Música Clásica*, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1988.
- [12]. Griffiths, P., *Música Moderna*, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1989.
- [13]. Harmoncourt, N., *O discurso dos sons*, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1982.
- [14]. Fagerlande, M., Depoimento pessoal aos autores, 2004.
- [15]. Schafer, R.M., *A afinação do mundo*, Editora UNESP, 1997.