

ACÚSTICA DE SALAS DE CONCERTO

Victor Mourthé Valadares
UFMG – EA/TAU/LABCON
R. Paraíba, 697, Funcionários
CEP 30.130-140 Belo Horizonte, MG - Brasil
victor_m_valadares@aol.com

Resumo - Nesta palestra faz-se uma síntese de termos descritores do ambiente sonoro percebido pelos ouvintes de música sinfônica em salas de concerto, dos quais surgiram atributos acústicos de caracterização do ambiente sonoro desses recintos. Tais termos descritores formam uma base de linguagem comum para que seja possível um diálogo entre acústicos, músicos e ouvintes, em busca de um aperfeiçoamento da arquitetura das salas de concerto e conseqüente melhoria do resultado sonoro obtidos nesses ambientes. Os atributos acústicos são úteis, nessa busca, para avaliação da qualidade acústica desses ambientes arquitetônicos mesmo ainda em fase de projeto de arquitetura. A relação dos atributos acústicos com o projeto de arquitetura das salas de concerto é apresentada. Através da compreensão do significado dos atributos apresentados, busca-se incentivar a verificação da resposta acústica da sala em relação aos atributos, ainda em fase de projeto de arquitetura através da avaliação de desempenho acústico dos ambientes, uma das fases do projeto acústico.

Abstract - This lecture presents a synthesis on sound environmental descriptors perceived by listeners of symphonic music in concert halls, from which acoustical attributes were borne to characterize the sound environment of the halls. These descriptors are a language basis to be possible a dialogue between acousticians, musicians and listeners, looking for an improvement of the architecture of the halls through the sound response of these rooms. The acoustical attributes are useful to evaluate the acoustical quality of the halls on the earlier phase of the architectural project. A relation between acoustical attributes and architecture of halls are shown. From the knowledge of the attribute meaning shown, it is possible to incentive the effort to verify the hall's acoustical response in the earlier phase of the architectural project, giving an evaluation of acoustic performance of the rooms, one of the focus of acoustical project.

I. INTRODUÇÃO

Esta palestra se baseia em resultados de estudos e pesquisas sobre desempenho acústico de salas de concerto durante as últimas três décadas aproximadamente, marcadas entre duas importantes e decisivas publicações de Leo L. Beranek, [1] e [2].

O conteúdo desse artigo não vai além daquele de domínio público nos círculos científicos e acadêmicos sobre acústica de salas. Sua contribuição reside no fato de (re)apresentar

meios de avaliar o desempenho acústico de salas através de recursos simplificados envolvendo equações, desenhos e gráficos elementares que estimulem sua aplicação em estágios iniciais de projetos de arquitetura procurando prever a resposta acústica das salas e verificando a adequação de soluções arquitetônicas propostas aos fins a que o ambiente se destina. Espera-se que, incorporando essa atitude na prática dos profissionais de arquitetura e consultores em acústica, haja uma melhora na qualidade e aperfeiçoamento da produção arquitetônica de auditórios, teatros e salas de concerto, evitando-se, assim, surpresas desagradáveis ou desconforto durante seu uso no futuro.

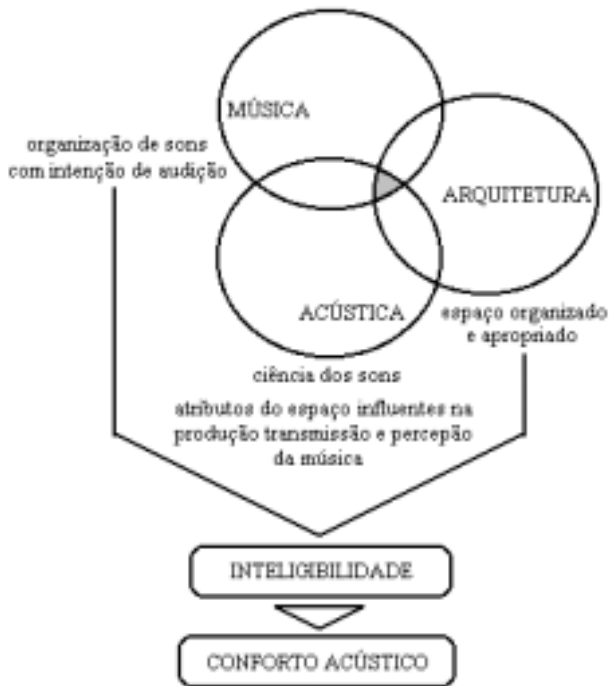
A estrutura do trabalho consiste em oito tópicos, sendo o primeiro deles essa breve introdução. O segundo tópico aborda algumas considerações conceituais sobre a questão do desempenho acústico de uma forma geral e focalizando a questão específica das salas de concerto. No terceiro tópico apresenta-se uma sinopse de vinte termos descritores da percepção em audições sinfônicas dos quais surgiram os atributos acústicos de maior consenso na comunidade científica, que são abordados no quarto tópico. No quinto tópico é feita uma revisão da teoria para predição da preferência subjetiva da qualidade acústica de salas de concerto. O sexto tópico faz uma revisão conceitual e de definições / procedimentos de cálculo dos seis atributos significativos evidenciados no tópico anterior. O sétimo tópico procura destacar aspectos influentes da arquitetura no desempenho dos atributos acústicos descritores do ambiente sonoro das salas de concerto. No oitavo e último tópico é feita uma breve conclusão deste artigo.

II. CONSIDERAÇÕES SOBRE DESEMPENHO ACÚSTICO

Ao abordar a questão de desempenho de ambientes, busca-se avaliar a adequação dos mesmos aos fins que se propõem, verificando as condições de atendimento a critérios de qualidade previamente estabelecidos. No caso específico de desempenho acústico de ambientes, necessidades humanas para comunicação com privacidade por meio da fala e da música devem ser atendidas para prover condições de comunicação inteligível e conseqüente conforto acústico.

A comunicação requer o uso de uma linguagem cuja inteligibilidade é influenciada pela arquitetura. Por linguagem, entende-se todo o sistema de signos que serve de meio de comunicação entre as pessoas e que pode ser percebido pelos diversos órgãos dos sentidos. Isto, então, implica na distinção entre uma linguagem visual, uma linguagem auditiva, outra tátil e assim por diante; ou em linguagens mais complexas constituídas, simultaneamente,

de elementos diversos [3]. Por inteligível, entende-se a compreensão do conteúdo da linguagem para se estabelecer a comunicação dentro de certa probabilidade desejada. No caso específico de salas de concerto a atenção deve estar focada na inteligibilidade da música no ambiente. O conforto acústico nesses ambientes está vinculado à inteligibilidade da música. A Figura 1 apresenta um diagrama sintetizando a interação entre música, acústica e arquitetura para dar



condições adequadas de inteligibilidade e conforto acústico.

Figura 1 – Interação entre os campos disciplinares da música, acústica e arquitetura para comunicação de qualidade.

III. TERMOS DESCRITORES DA PERCEPÇÃO EM AUDIÇÕES SINFÔNICAS

As impressões e percepções sonoras ou mesmo as expressões quanto a inteligibilidade da música nos eventos sinfônicos tem estimulado descrições do ambiente sonoro vivenciado através de vários termos seja pela crítica musical, seja pelos próprios músicos ou mesmo pelos ouvintes mais experientes, acústicos ou não. Muito dos termos apresentavam caráter abstrato e subjetivo que dificultavam um diálogo entre críticos músicos e acústicos. Termos com definições mais claras, com enfoque mais objetivo e de compreensão uniforme, foram propostos no intuito de facilitar o diálogo e estimular uma reflexão mais profunda sobre os atributos do espaço influentes na produção transmissão e percepção da música¹. Surgiu, então, uma linguagem comum entre críticos, músicos e acústicos, com termos descritores de qualidades acústicas que contribuem para a impressão geral da audição sinfônica. A partir desses termos surgiram os atributos acústicos que constituem em

¹ Entende-se por produção desde a composição ou obra sinfônica assim como o ato de gerar os sons mediante a regência do maestro. Ambas as formas de produção são influenciadas pela arquitetura.

indicadores, critérios ou índices de qualidade em acústica de salas para adequação acústica dos ambientes e conseqüente conforto acústico nos mesmos. A seguir são apresentados vinte termos descritores básicos [2],[4],[5].

1) *Clareza* - audição das notas musicais iniciais, observando o grau no que são distintas ou separadas [4]. O grau no qual sons discretos numa performance musical permanece um do outro. Depende criticamente de fatores musicais como da agilidade e intenção dos músicos, mas é também intimamente relacionado à acústica da sala [1].

2) *Reverberação* - audição da persistência sonora nas freqüências médias som que persiste no recinto após sua interrupção repentina; tempo de reverberação, TR, é o número de segundos que um som leva para decair ao limiar de audibilidade após cessado; um recinto reverberante é denominado vivo, enquanto um recinto com tempo de reverberação curto é denominado morto ou seco [4].

3) *Vividez* - relativo ao TR nas médias e altas freqüências (acima de 350 Hz). Uma sala com vividez pode ser deficiente nos graves. Uma sala suficientemente reverberante nas baixas freqüências é dita como soando “quente”, relacionado com o termo seguinte, Calidez [4].

4) *Brilho* – um som tocado com brilho, clareza, rico em harmônicos é denominado brilhante. Neste tipo de som as médias freqüências são proeminentes e decaem vagarosamente. O som pode tornar-se muito brilhante se amplificação eletrônica for utilizada imprópriamente [2].

5) *Calidez* - audição da força e vigor dos tons baixos comparado com tons nas freqüências médias e agudas [4]. Evidência dos sons dos baixos, ou preenchimento de tons baixos, 75Hz - 350Hz, relativo aos tons de média freqüência, 350Hz-1.400Hz. Escuro é a sensação de recintos que possuem baixos muito fortes ou onde as altas freqüências são atenuadas excessivamente [2].

6) *Intimidade* – audição induzindo à percepção de uma sala de concerto como um recinto pequeno, embora suas dimensões físicas reais sejam bem maiores [4]. Consiste numa extensão do conceito de intimidade na percepção do ambiente visual para o ambiente acústico, ou seja, a impressão de que a execução da peça se dá em um recinto pequeno embora, na realidade ela ocorra em um recinto mais amplo. Este termo sugere ao ouvinte o tamanho do espaço do recinto. Não é necessário que a sala tenha dimensões particulares, mas que ela soe como se tal fosse apropriada ao estilo musical [2].

7) *Audibilidade* - audição do som direto e reverberante avaliando o conforto das passagens mais intensas e a capacidade de audição das passagens menos intensas [4]. É usualmente dividida em duas partes: audibilidade devido ao som inicial, ESL (early sound loudness) e ao som

reverberante, ². A primeira, ESL, é determinada pela soma da energia sonora direta e inicial (até 80 ms). A segunda, RSL (reverberant sound loudness), refere-se à energia sonora reverberante (após 80 ms) [2].

8) *Difusão* - sensação de envolvimento nos sons ou sentimento de imersão nos sons [4]. Deve-se abordá-la tanto em termos dos sons iniciais como em termo dos sons reverberantes [2].

9) *Ofuscamento Acústico* - surgiu da analogia com o ofuscamento visual, em termos das condições de superfícies do ambiente que produzem reflexões sonoras com antecedência e dureza e rispidez [2].

10) *Balanco* - audição do vigor e qualidade relativa de várias seções da orquestra e entre a orquestra e o solista ou coro [4]. O balanço diz respeito entre seções da orquestra, assim como entre os solistas e esta. Entre os ingredientes que dão um balanço adequado estão fatores acústicos e musicais. O fechamento do local da orquestra (stage desing) deve enfatizar certas seções da orquestra ou dar suporte ao solista. A partir daí o balanço está na mão dos músicos, de seus acertos e do controle do maestro [2].

11) *Ecos* - percepção de sons refletidos discretos e atrasados em certa direção e com intensidade audíveis suficiente para causar desconforto na audição [4]. Refere-se às reflexões atrasadas suficientemente altas para perturbar os músicos no palco e os ouvintes da audiência [2].

12) *Espaciosidade* - este termo envolve dois aspectos. O primeiro diz respeito à Largura aparente da fonte, ASW (apparent source width), onde o caráter de espaciosidade de uma sala reside no fato da fonte parecer ao ouvinte mais larga que a largura visual real [2]. O segundo aspecto refere-se à envolvimento do ouvinte, LEV (listener envelopment). Ela descreve a impressão da força e direções das quais o som reverberante parece chegar. O termo LEV é julgado elevado quando o som reverberante parece chegar aos ouvidos de forma equitativa de todas as direções (da frente, de cima, dos lados e de trás) [2].

13) *Coesão* - é definido como uma mistura de sons de vários instrumentos da orquestra de forma que o ouvinte perceba-os como expressão de uma textura musical [2].

14) *Conjunto* - refere-se à habilidade dos músicos em tocarem unidos, iniciando e conduzindo livremente as notas simultaneamente de forma que muitas linhas melódicas soem uma única. Depende da habilidade dos músicos em ouvir entre si. Pode ser dificultada pelo projeto do palco [2].

15) *Resposta Imediata* - capacidade da sala em responder imediatamente às notas sonoras. Está relacionada na maneira como as primeiras reflexões atingem os ouvidos do músico. Se ela chega muito atrasada será percebida como um eco; se

² O som inicial é definido como o som direto mais as primeiras reflexões de 0 a 80 mseg. Já o som reverberante é criado pelas reflexões que ocorrem após 80 mseg.

as reflexões são ouvidas apenas das envoltórias do palco à sua volta, o músico falhará em perceber a acústica do recinto completamente [2].

16) *Textura* - Impressão subjetiva dos ouvintes derivada do padrão no qual a seqüência das primeiras reflexões chegando em seus ouvidos. Num ótimo recinto, aquelas reflexões que chegam logo após o som direto segue numa seqüência mais ou menos uniforme. Em recintos acusticamente mais pobres, pode ser considerável o intervalo entre a primeira e as reflexões seguintes. Uma boa textura requer um grande número de reflexões iniciais uniformes, mas não precisamente espaçadas e não com uma simples reflexão dominando as outras [2].

17) *Faixa Dinâmica* - Intervalo de níveis no qual a música pode ser ouvida na sala. Vai desde o máximo pianíssimo possível de execução no recinto até o máximo fortíssimo produzido pelo elenco da orquestra. Audição de sons que não sejam música quando o solista toca notas com menor intensidade, ou quando o recinto está vazio. Todo ruído que chega à sala acima dos níveis de critério estabelecidos para conforto acústico causa distração e deve ser evitado [4].

18) *Ruído de Fundo* - Audição de sons que não sejam música quando o solista toca notas com menor intensidade, ou quando o recinto está vazio. Qualquer ruído externo é capaz de causar distração e interferir na execução das peças e sua audição, devendo, portanto, ser evitado [4].

19) *Qualidade Tonal* - A qualidade tonal é a beleza do tom. Como um fino instrumento, a sala de concerto deve ter uma qualidade tonal fina. A qualidade tonal pode ser prejudicada por vários meios, tais como ressonância, distorções. Outro efeito consiste na sensação de fontes deslocadas devido a reflexões que focalizam grande parte da energia sonora em direção a uma parte específica da audiência, de modo que os ouvintes percebam o som como emanando de uma determinada superfície ao invés de vir direto da orquestra [2].

20) *Uniformidade Sonora* - a qualidade da sala é debilitada se parte da audiência está sujeita a sons de natureza inferior, como em locais abaixo de balcões, nas laterais na frente da sala, ou em certos locais sujeitos a ecos, confusões ou falta de clareza. Consistem nos pontos mortos da sala segundo os músicos. Os acústicos usualmente usam este termo apenas em referência aos locais onde a música é especialmente fraca.

IV. ATRIBUTOS ACÚSTICOS PARA SALAS DE CONCERTO

Para comunicação através da música, um conjunto de atributos acústicos foram propostos, a partir dos termos descritores apresentados no item anterior, para verificação da qualidade ambiental acústica em salas de concerto e casas de ópera. Consistem nesses principais atributos, aqueles listados a seguir. A Tabela 1 agrupa os parâmetros de mensuração dos atributos.

1) *Reverberação*, mensurada pelo parâmetro **Tempo de Reverberação**, RT, em [seg.], ou **Tempo de decréscimo Inicial**, EDT, em [seg.], ambos utilizados para descrever as condições de decréscimo da energia sonora no tempo (para 60 dB e 10 dB, respectivamente) e no espaço.

2) *Calidez*, mensurada pelo parâmetro **Razão de Baixo**, BR, [ad.], para verificar as condições de persistência dos sons nas baixas frequências em relação às médias, que, se verificado, evidencia a sensação satisfatória de calidez acústica no recinto;

3) *Clareza*, mensurada pelo parâmetro **Fator de Clareza**, C_{80} , dB, para verificar a relação entre a energia inicial e reverberante no ambiente e suas implicações sobre a nitidez auditiva na percepção das notas e frases musicais.

4) *Audibilidade*, mensurada pelo parâmetro **Fator de Força nas Médias Frequências**, G_{mid} , em [dB], utilizado para verificação das condições de audibilidade no ambiente.

5) *Espaciosidade*, em seu primeiro aspecto, utilizada na avaliação das condições de impressão espacial nos ouvintes através da noção de Largura Aparente da Fonte (ASW), que pode ser avaliada pelo parâmetro **Coefficiente de Correlação Cruzada Inter-aural de Sons Iniciais**, em $IACC_{E(early)}$, [ad.], ou, através da **Fração Lateral**, LF_{E4} , [ad.], ou ainda, de forma simplificada, pela comparação o **Fator de Força nas Baixas Frequências**, G_{low} , em [dB], e o **Fator de Força nas Médias Frequências**, G_{mid} , em [dB].

6) *Envolvimento*, segundo aspecto da espaciosidade, que pode ser mensurada pelo parâmetro **Coefficiente de Correlação Cruzada Inter-aural de Sons Tardios**, em $IACC_{L(ate)}$ ou, de forma simplificada, pode ser avaliada por uma inspeção visual das irregularidades superficiais internas no recinto e mensurada pelo **Índice de Difusão Sonora** na sala, SDI, [ad.];

7) *Intimidade*, mensurada pelo parâmetro **Intervalo de Tempo de Atraso Inicial**, ITDG ou t_1 , em [seg.], que calcula a diferença temporal entre o som direto e outro refletido pela primeira reflexão sonora no centro da audiência principal, buscando verificar a condição dimensional do recinto percebida pelo ouvinte, que julga a apropriação da sala, quanto ao seu tamanho para execução de determinadas obras ou peças.

8) *Suporte de Palco*, mensurado pelo parâmetro **Fator de Suporte**, ST1, para verificar as condições de conjunto e balanço entre setores da orquestra.

TABELA I

Parâmetros de Avaliação da Qualidade Acústica de Salas

Identificação	Símbolo & Unidade	Atributo Relativo e Descrição do Parâmetro
Tempo de Reverberação	RT [seg.]	Referente à reverberação. É o tempo que um som muito audível requer para se tornar inaudível, na faixa dinâmica de 60 dB, quando cessada a fonte sonora. RT_{mid} refere-se a média dos tempos nas

		bandas de 500 Hz e 1kHz. RT_{low} refere-se a média dos tempos nas bandas de 125Hz e 250Hz.
Razão de Baixo	BR [ad.]	Referente à Calidez. A Razão de Baixo consiste na razão entre RT_{low} e RT_{mid} .
Fator de Clareza	C_{80} [dB]	Referente à Clareza. É a média espacial* da razão entre a energia sonora do som inicial devido a um som impulsivo chegando em receptores, $t_1 = 0$ até $t_2 = 80$ msec. e a energia do som reverberante, $t_1 = 80$ até $t_2 = 3000$ msec. Seu valor pode fazer referência a umas médias dos valores em frequências centrais 500Hz, 1kHz e 2kHz.
Fator de Força dos Sons Médios	G_{mid} [dB]	Referente à audibilidade. O Fator de força, G, é a diferença entre o nível de pressão sonora em um ponto na sala de uma fonte sonora omnidirecional localizada no palco, e o nível de pressão sonora que seria medido a uma distância de 10 m da mesma fonte de mesmo nível de potência sonora localizada em uma Câmara Anecóica. O valor de G_{mid} é a média espacial* do valor médio de G nas médias frequências(500Hz e 1kHz).
Coefficiente de Correlação Cruzada Inter-aural de Sons Iniciais	$IACC_E$ [ad.]	Referente à Espaciosidade, em termos do conceito da Largura Aparente da Fonte, ASW. Consiste na média espacial das diferença de sons chegando nos dois ouvidos. O $IACC_{E(early)}$, $t_1 = 0$ até $t_2 = 80$ msec., serve para quantificar o ASW, referindo-se a uma média nas bandas de 500 Hz, 1kHz e 2kHz.
Fração de Energia Lateral	LF_{E4} [ad.]	Referente à Espaciosidade, em termos do ASW. Consiste na razão da entre a energia sonora provida apenas das reflexões laterais e aquela oriunda de todas as direções incluindo o som direto, referente ao som inicial, ou seja, dentro do intervalo 0 de 80 msec., sendo uma média nas bandas de 125Hz, 250Hz, 500 Hz e 1kHz.
Fator de Força dos sons graves	G_{low} [dB]	Referente à Espaciosidade. O Fator de força nas baixas frequências é a média espacial* do valor médio de G nas baixas frequências (125Hz e 250Hz).
Coefficiente de Correlação Cruzada Inter-aural de Sons Tardios	$IACC_L$ [ad.]	Referente à Espaciosidade: Envolvimento. É a média espacial* da diferença de sons chegando nos dois ouvidos. O $IACC_{L(ate)}$, $t_1 = 80$ até $t_2 = 1000$ msec. Refere-se a uma média nas bandas de 500 Hz, 1kHz e 2kHz. O envolvimento também pode ser verificado por inspeção visual ou pelo Índice de Difusão Sonora, SDI.
Intervalo de tempo de atraso inicial	ITDG t_1 [mseg]	Referente à Intimidade. Intervalo de tempo entre a chegada do som direto do palco ao centro da audiência principal e a primeira reflexão sonora lateral.
Fator de Suporte	ST1 [dB]	Referente ao Suporte de Palco. É uma média espacial* da razão entre a energia sonora impulsiva de uma fonte sonora omnidirecional que chega ao músico, distanciado de 1 m da fonte, nos primeiros 10 msec, e aquela que chega no intervalo entre 20 msec. e 100 msec. no mesmo ponto

*a média espacial é a média aritmética entre 8 e 20 posições diferentes na audiência, todas além de 3m do procênio, para uma de 3 posições da fonte sonora no palco. **Fonte:** adaptado de [2].

Idealmente, os parâmetros de mensuração dos atributos acústicos devem ser obtidos a partir de experimentos acústicos em escala real nos ambientes, em modelagem em escala reduzida ou mesmo através de simulação

computacional. Em fase de projeto de arquitetura de salas de concerto e teatros ou ambientes de uso múltiplo que também são sedes de eventos sinfônicos, é necessário desenvolver uma análise de desempenho acústico do ambiente em proposição, que pode estar sendo desenvolvida, inclusive, durante uma fase preliminar do projeto acústico.

Seja pelo fato de o projeto ainda não estar construído, seja por limitação de tempo e econômica, quando nem sempre é possível dispor de experimentos ou programas de simulação computacional em acústica para dar suporte às avaliações de desempenho, é necessário desenvolver procedimentos alternativos e simplificados para estimular o empenho de arquitetos e consultores em acústica na concepção de ambientes acusticamente adequados.

Nesse sentido, no item VI será feita uma revisão da definição matemática de um conjunto significativo de seis dos parâmetros envolvidos na avaliação de desempenho acústico de ambientes destinados a sediar eventos sinfônicos, considerados relevantes para predição da preferência subjetiva da qualidade acústica de salas de concerto.

A partir dessa revisão, serão ora apresentadas, ora propostas equações simplificadas que, conjuntamente com recursos da acústica geométrica, compõe uma rotina de procedimentos para avaliação simplificada das condições de desempenho acústico em ambientes destinados a sediar eventos sinfônicos, ainda em fase inicial de concepção. Através dessa avaliação simplificada é possível, por exemplo, prever a preferência subjetiva da qualidade acústica de ambientes para concertos sinfônicos que, quanto maior, maior será a condição de inteligibilidade musical proporcionado pelo local e, portanto, alcançado um maior grau de conforto acústico. A referida predição de preferência subjetiva será abordada no item V a seguir.

V. PREDIÇÃO DA PREFERÊNCIA SUBJETIVA DA QUALIDADE ACÚSTICA DE SALAS DE CONCERTO

Resultados de avaliações subjetivas podem ser preditos por uma simples equação, baseada na teoria de Ando para preferência subjetiva entre ambientes acústicos das salas de concerto [2],[6]. Estudos psicoacústicos demonstraram que a escala total de preferência subjetiva para salas de concerto pode ser relacionada à resposta subjetiva n-dimensional relativa a atributos acústicos significativos pela forma:

$$SP = \sum_{i=1}^n SR_i \quad (1)$$

onde:

SP_i: enésima preferência subjetiva unidimensional relativa a certo atributo acústico de um conjunto ortogonal N-dimensional.

Assim, a preferência subjetiva para um ambiente acústico, ou seja, a qualidade acústica de uma sala de concerto é dada pela soma expressa em (1), sendo que o valor da resposta subjetiva n-dimensional é obtida por:

$$SP_i = -a_i \cdot |X_i|^{3/2} \quad (2)$$

onde:

a_i: enésima constante numérica que determina a importância

relativa para cada enésimo parâmetro x_i,

X_i: enésima função relativa a um atributo acústico significativo de um conjunto ortogonal.

O conjunto ortogonal de atributos acústicos significantes proposto possui seis elementos, ou seja, com i= 1,2, ..., 6. Por conveniência, Ando sugeriu o valor “zero” para um valor máximo da resposta subjetiva, representando a situação de preferência ideal, quando, portanto, SP_{max} = 0 na equação (1). Para que isso fosse possível recorreu-se à transformações logarítmicas conforme pode-se observar nas equações sugeridas para cada função X em (2), e apresentadas a seguir:

$$X_1 = IACC_{E3} \quad (3)$$

$$X_2 = 10 \cdot \log[t_1 / (t_1)_{pref}] \quad (4)$$

$$X_3 = G_{mid} - (G_{mid})_{pref} \quad (5)$$

$$X_4 = 10 \cdot \log[EDT / (EDT)_{pref}] \quad (6)$$

$$X_5 = 10 \cdot \log[BR / (BR)_{pref}] \quad (7)$$

$$X_6 = 10 \cdot \log[S DI / (SDI)_{pref}] \quad (8)$$

Os valores para as constantes “a”, em (2) e os valores preferidos para os atributos contidos nas equações de (3) até (8) são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2

Valores para “a” e Preferidos dos Atributos Acústicos

Valores de a _i	Valores Preferidos dos Atributos Acústicos
a ₁ = 1,2	Para o IACC _{E3} , não há um valor preferido, mas o valor desse atributo deve ser baixo. Nas salas consideradas excelente do ponto de vista da qualidade acústica o valor desse atributo está em torno de 0,3.
a ₂ = 1,42	(t ₁) _{pref} = 20 mseg. ou menos.
a ₃ = 0,04 se G _{mid} < 4,0 a ₃ = 0,07 se G _{mid} > 5,0	(G _{mid}) _{pref} = [4; 5,5], dB
a ₄ = 9 se EDT > 2,2 a ₄ = 12 se EDT > 2,3	(EDT) _{pref} = [2; 2,3], seg.
a ₅ = 10 se RT > 2,2	(BR) _{pref} = [1,1; 1,25], seg., para RT = 2,2 (BR) _{pref} = [1,1; 1,45], seg., para RT = 1,8
a ₆ = 1	(SDI) _{pref} = 1,0

Fonte: adaptado de [2].

VI. REVISÃO DOS SEIS ATRIBUTOS ACÚSTICOS SIGNIFICATIVOS NA AVALIAÇÃO DA SP

Como pôde ser observado no item anterior, os seis atributos acústicos significantes para cálculo de SP, segundo a teoria de Ando, [2] e [6], são o Coeficiente de Correlação Cruzada Inter-aural de Sons Iniciais, IACC_{E3}, o Intervalo de Tempo de Atraso Inicial, t₁, o Fator de Força nas Médias Frequências, G_{mid}, o Tempo de Decremento Inicial, EDT, a Razão de Baixo, BR, e o Índice de Difusão Sonora, SDI.

A seguir será feita uma revisão de conceituação dos seis atributos, os quais serão apresentados por ordem distinta da

seqüência da Tabela 2, baseada na familiaridade dos atributos para os acústicos. No andamento das revisões, serão propostas, em certos casos, equações simplificadas de estimativa de seus valores, sem a necessidade de se recorrer a medições acústicas ou simulação computacional em programas específicos para obtenção de valores dos atributos em questão. Isto é justificado pela necessidade de tornar, em diversas circunstâncias, a avaliação mais prática e acessível a um maior número de profissionais.

Convém ressaltar que uma abordagem nesse sentido não deve ser considerada como uma desvalorização da atividade experimental e mesmo teórica de desenvolvimento de rotinas de cálculo mais sofisticadas e precisas que são a base de programas computacionais para acústica de salas. Ambas são imprescindíveis ao avanço do conhecimento científico. O que está sendo proposto, no entanto, é tornar o conhecimento mais acessível aos estudantes e profissionais das áreas de arquitetura e engenharia, uma vez que o contexto pragmático do cotidiano desses indivíduos exige procedimentos de avaliação mais objetivos e simplificados, porém capaz de oferecer uma compreensão geral sobre a qualidade do ambiente acústico de salas de concerto que estão sendo avaliadas, seja em fase de proposição ou não.

A. Tempo de Reverberação e Tempo de decremento Inicial

Quando uma fonte sonora é ativada e preenche de energia sonora um recinto fechado, sem ruído de fundo ou de outras fontes, percebe-se que ocorre um acréscimo do nível sonoro num certo intervalo de tempo partir do qual este tende a se estabilizar tendendo a um estado estacionário, ou seja, um campo sonoro com distribuição espaço-temporal uniforme, denominado campo difuso³ [7], [8]. A relação entre a densidade de energia sonora, resultante da soma das densidades de energia cinética e potencial numa área, e a pressão sonora em um campo difuso pode ser descrita da seguinte maneira:

$$\varepsilon(x,t) = p^2(x,t) / c^2\rho \quad (9)$$

onde:

$\varepsilon(x,t)$: densidade de energia sonora, [$\text{Wm}^{-3}\text{s}^{-1}$].

$p(x,t)$: pressão sonora da onda progressiva positiva, [N.m^{-2}].

c : velocidade da onda sonora no ar, [m s^{-1}].

ρ : densidade do meio de propagação, [kgm^{-3}].

A densidade de energia média no tempo para uma onda progressiva positiva é obtida integrando (9) em relação ao tempo, obtendo-se:

$$D = \langle \varepsilon(x,t) \rangle_t = \langle p^2(x,t) \rangle_t / c^2\rho \quad (10)$$

onde:

D : densidade de energia sonora, [$\text{Wm}^{-3}\text{s}^{-1}$].

$\langle p^2(x,t) \rangle_t$: valor médio quadrático de $p(x,t)$, em valor real, ou $p(x,t) = P \text{Re} \{ e^{i(\omega t - kx)} \}$, [$\text{N}^2.\text{m}^{-4}$].

$$\langle p^2(x,t) \rangle_t = 1/T \int P^2 \cos^2(\omega t - kx) dt \quad (11)$$

$$\langle p^2(x,t) \rangle_t = P^2/2 \quad (12)$$

³ Este tipo de campo acústico pode ser gerado numa câmara reverberante.

onde:

P : amplitude da pressão sonora, [N.m^{-2}].

De (12) pode-se obter a raiz média quadrática de $p(x,t)$

$$\langle p^2(x,t) \rangle_t = P/2 \quad (13)$$

Comparando (12) e (13),

$$\langle p^2(x,t) \rangle_t = P^2 \quad (14)$$

Levando (14) em (10),

$$D = P^2 / c^2\rho \quad (15)$$

onde:

D : densidade de energia sonora, [$\text{Wm}^{-3}\text{s}^{-1}$].

O tempo de reverberação consiste, pois, no intervalo de tempo em que ocorre o decaimento do campo sonoro. Assim, uma vez cessada a radiação sonora da fonte no ambiente, após ter-se estabilizado o campo difuso, percebe-se o desaparecimento do campo direto quase que imediatamente enquanto o campo reverberante ainda se mantém. Cessada a emissão sonora da fonte, desfaz-se o balanço de energia acústico anteriormente existente em campo difuso, onde a energia emitida pela fonte sonora é igual à energia absorvida pelas paredes e ar, condições do estado estacionário.

Desta forma, a energia sonora remanescente no campo reverberante é dissipada por absorção devido às sucessivas reflexões das ondas sonoras sobre as superfícies e pela influência do ar antes e durante os intervalos entre tais reflexões. Tal intervalo representa um tempo médio de percurso livre t' , a cada qual ocorre seqüencialmente o duplo fenômeno de absorção pelo ar e por cada reflexão. À cada intervalo t' , a densidade de energia D decai pelos fatores e^{-mx} e $(1-\alpha_d)$, respectivamente, devido ao duplo fenômeno acima colocado. Assim, para um intervalo t' :

$$D(t') = D (e^{-mx}) (1-\alpha_d) \quad (16)$$

onde:

$D(t')$: densidade de energia sonora após o intervalo t' em que se cessou a fonte [$\text{Wm}^{-3}\text{s}^{-1}$].

D : densidade de energia sonora com fonte operando, [Wm^3s^{-1}].

e^{-mx} : decaimento exponencial devido a absorção do ar.

m : constante de atenuação do meio.

x : distância média de percurso livre, [m].

α_d : coeficiente de absorção médio do ambiente, [ad].

O coeficiente de absorção sonora médio do ambiente é dado por:

$$\alpha_d = \sum (\alpha_s)_i s_i / S \quad (17)$$

onde:

α_s : coeficiente de absorção de incidência aleatória [sabines métricos]

s_i : área de cada tipo de superfície interna [m^2].

S : área total das superfícies internas, $S = \sum s_i$, [m^2].

Cada intervalo de tempo envolvido no duplo fenômeno em questão pode ser obtido por:

$$t' = x/c \quad (18)$$

onde:

x: distância média de percurso livre [m],
c: velocidade da onda sonora no ar [m s⁻¹].

Para um enésimo intervalo de tempo t':

$$t' = nt \quad (19)$$

onde:

n : representa o enésimo duplo fenômeno.

tem-se que,

$$D(nt') = D (e^{-mx})^n (1-\alpha_d)^n \quad (20)$$

Levando (19) em (20) e combinando (18) em (19) para retornar à [20],

$$D(t) = D (e^{-mct})(1-\alpha_d)^{ct/x} \quad (21)$$

Partindo-se do princípio que é possível deduzir analiticamente ou provar experimentalmente que:

$$x = 4V / S \quad (22)$$

onde:

x: distância média de percurso livre no recinto [m],
V: volume do recinto, [m³],

e levando (21) em (22) além de rescrever $(1-\alpha_d)^{ct/x}$ como $\exp\{-tx/d[\ln(1-\alpha_d)^{-1}]\}$ pela propriedade da função exponencial $e^{\ln y} = y$, para $k > 0$:

$$D(t) = D\{\exp - [mtc + (tcS/4V) \ln (1-\alpha_d)^{-1}]\} \quad (23)$$

Combinando (14) com (23):

$$P^2_{(t)} / P^2_{(t=0)} = \exp-[mtc + (tcS/4V) \ln (1-\alpha_d)^{-1}] \quad (24)$$

Aplicando o logaritmo natural multiplicado por um fator de 10 em ambos os lados de (24):

$$10 \ln (P^2_{(t)} / P^2_{(t=0)}) = -tc/4V [4mV + S \ln (1-\alpha_d)^{-1}] \quad (25)$$

Pelo caso particular do teorema de conversão de base para logaritmos, $\ln y = \ln a \log_a y$, para $a > 0$, $a \neq 1$ e $y > 0$:

$$NPS_{(t)} - NPS_{(t=0)} = \{(1,086ct)[4mV + S \ln (1-\alpha_d)^{-1}]\} / V \quad (26)$$

onde:

$NPS_{(t=0)}$: nível de pressão sonora no instante do desligamento da fonte, [dB].

$NPS_{(t)}$: nível de pressão sonora no enésimo t' de ocorrência do duplo fenômeno, [dB].

Através de uma base empírica, concluiu-se que a diferença de nível no primeiro termo de (26), referente ao decaimento da densidade de energia sonora, expresso em desnível de pressão sonora, até atingir o limiar da audibilidade humana, é da ordem de 60 dB. O intervalo de tempo t correspondente

à ocorrência deste desnível, foi denominado *tempo de reverberação*, ou seja $t = RT$. Assim, tem-se que $60 = \{(1,086cRT)[4mV + S \ln (1-\alpha_d)^{-1}]\} / V$, ou seja:

$$RT = (55,3/ c) \cdot \{V / [- S \ln (1-\alpha_d) + 4m.V]\} \quad (27)$$

onde:

RT: tempo de reverberação do recinto [seg.].

4mV: termo referente à absorção do ar.

S.ln (1- α_d): termo referente à absorção das superfícies.

c: velocidade de propagação da onda sonora no ar [m s⁻¹].

O valor de c pode ser estimado por:

$$c = 331 + 0,6 T \quad (28)$$

onde:

T: temperatura do ar [°C].

Introduzindo a influência das pessoas e objetos do recinto na quantificação da absorção sonora, coeficiente de absorção sonora médio passa a ser calculado por:

$$\alpha_m = \sum (\alpha_s)_{i;s_i} + \sum (\alpha_s)_{i;i_n} / S \quad (29)$$

onde:

α_m : α_d considerando a influência de corpos e/ou objetos na absorção sonora do ambiente, [ad.].

n: número de pessoas e/ou objeto presentes no ambiente. E

Cada termo da soma no numerador em (29) são, respectivamente, as absorções sonoras parciais devido às superfícies, A_{PS} , e devido aos corpos e objetos, $A_{PC/O}$. O denominador do segundo termo do produto em (27) consiste na absorção sonora total do ambiente, A_T . Reescrevendo (27):

$$RT = \{[(55,3 V) / c] \cdot [A_T]\} \quad (29)$$

Considerando que a distinção entre RT e EDT está no valor do desnível de pressão sonora, adotado, respectivamente de 60 dB e 10dB, observa-se que:

$$EDT = RT/6 \quad (30)$$

Considerando que a distinção os valores de EDT variam menos com a variação da ocupação que os valores de RT⁴ e que não há grandes mudanças nos valores de EDT⁵ diante de variações da absorção sonora entre situações com e sem audiência para salas com assentos estofados (com maior capacidade de absorção sonora), recomenda-se o uso do valor do EDT ao invés do uso do RT, na determinação de SP, em (1), sendo, porém, considerado o EDT para situação sem audiência⁶. A partir de uma consistente base de dados experimentais, observou-se que, para ambientes do porte de salas de concerto atualmente existente:

⁴ Isto é válido para salas com ocupação igual ou superior a 1500 pessoas.

⁵ Nas médias frequências, considerando o valor médio entre 500Hz e 1 kHz.

⁶ Por facilidade de se fazer medições acústicas nem ambientes vazios.

$$EDT_{vz} = 0,2 + RT_{oc} \quad (31)$$

onde

EDT_{vz} : tempo de decaimento inicial sem audiência, [seg.],
 RT_{oc} : tempo de reverberação com audiência, [seg.].

B. Razão de Baixo

O valor de BR é obtido por:

$$BR = (RT_{125} + RT_{250}) / (RT_{500} + RT_{1.000}) \quad (32)$$

onde:

RT_i : tempo de reverberação na banda de oitava de frequência central de "i" Hz, estimado pela equação (27).

C. Fator de Força

O valor do G é definido por:

$$G = 10 \cdot \log \left\{ \frac{\int_0^{t_2} P^2(t) dt}{\int_0^{t_2} P_A^2(t) dt} \right\} \quad (33)$$

onde:

$P(t)$: variação temporal da pressão sonora rms num local no ambiente, [$N \cdot m^{-2}$].

$P_A(t)$: variação temporal da pressão sonora rms em campo livre a 10 m da fonte.

O valor do G pode ser rerepresentado como:

$$G = NPS_{L T CR} - NPS_{L T SR} \quad (34)$$

onde:

$NPS_{L T CR}$: nível linear total de pressão com influência de reflexões sonoras, [dB].

$NPS_{L T SR}$: nível linear total de pressão sonora sem influência de reflexões sonoras, [dB].

Considerando que os valores de $NPS_{L T CR}$ e $NPS_{L T SR}$ podem ser obtidos, respectivamente de:

$$NPS_{L T CR} = NWS + 10 \cdot \log \left\{ \left[\frac{Q_\theta}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \right] + \left(\frac{4}{A_T} \right) \right\} \quad (35)$$

onde:

NWS: nível de potência sonora da fonte, [dB].

Q_θ : fator de diretividade da fonte na direção θ , [ad.].

r: distância entre a fonte sonora e o receptor, [m],

e

$$NPS_{L T SR} = NWS - [10 \cdot \log(r_A^2 / r_{ref}^2) + 11] \quad (36)$$

onde:

r_A : distância de 10 m entre a fonte sonora e o receptor.

r_{ref} : distância de 1 m tomada como referência,

observando que o termo entre colchetes na equação (36) torna-se uma constante igual a 31 dB e, levando (35) e (36) em (34), tem-se que:

$$G = 10 \cdot \log \left\{ \left[\frac{Q_\theta}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \right] + \left(\frac{4}{A_T} \right) \right\} + 31 \quad (37)$$

O valor de G_{mid} é obtido por:

$$G_{mid} = (1/N) \cdot \sum_{i=1}^N [(G_{i, 500} + G_{i, 1000}) / 2] \quad (38)$$

onde:

N: número total de posições do receptor, entre 24 e 60.

$G_{i, 500}$: valor do fator de força em 500Hz na i -ésima posição.

$G_{i, 1000}$: valor do fator de força em 1k Hz na i -ésima posição.

D. Índice de Difusão Sonora, SDI

O valor de SDI é obtido por:

$$SDI = \frac{\sum_{i=1}^n s_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \quad (39)$$

onde:

s_i : área de cada superfície interna, excluindo-se o piso, [m^2].

d_i : coeficiente de difusividade; alto, $d_{HD} = 1$; médio, $d_{MD} = 0,5$; baixo, $d_{LD} = 0$, conforme [2].

E. Intervalo de Tempo de Atraso Inicial

O valor de ITDG é obtido em uma única posição, no centro da sala na audiência principal, por:

$$t_1 = (x_i - x_d) / c \quad (40)$$

onde:

x_i : distância entre fonte e receptor na trajetória direta, [m].

x_d : distância entre fonte e receptor na trajetória indireta, [m].

F. Coeficiente de Correlação Cruzada Inter-aural

Uma medida bi-aural de diferença de sons que atingem os dois ouvidos de uma fonte sonora no palco envolve a função de correlação cruzada inter-aural valor do $IACF_i(\tau)$ é definido por:

$$IACF_i(\tau) = \left\{ \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_L(t) \cdot P_R(t+\tau) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_L^2(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} P_R^2(t) dt} \right\}^{1/2} \quad (41)$$

onde:

$P_L(t)$: pressão sonora rms no ouvido esquerdo, [$N \cdot m^{-2}$],

$P_R(t)$: pressão sonora rms no ouvido direito, [$N \cdot m^{-2}$].

O valor de $IACC_i$ relaciona-se com $IACF_i(\tau)$ por:

$$IACC_i = |IACF_i(\tau)|_{\max}, \quad \text{para } -1 < \tau < +1 \quad (42)$$

O valor de $IACC_E$ é obtido para um intervalo de integração entre 0 e 80 msec. Considerando que a largura aparente da fonte, ASW, o termo descritor do aspecto da espaciosidade de interesse para cálculo de SP, em (1), pode ser mensurado através de $(1 - IACC_E)$ ou da $LF_{E 4}$, fração de energia lateral, também no intervalo dos 80 msec. iniciais do som entre a fonte e o receptor em um certo ponto na audiência, por questão de simplicidade é conveniente propor uma equação simplificada para cálculo de $LF_{E 4}$, a partir do qual pode-se obter o valor de $(1 - IACC_E)$ e, conseqüentemente, o valor de $IACC_E$, [2].

Por definição, tem-se que:

$$LF_{E 4} = \left\{ \frac{\int_{0,05}^{t_2} P_8^2(t) \cdot dt}{\int_0^{0,08} P^2(t) dt} \right\} \quad (43)$$

onde:

$P_8^2(t)$: variação temporal da pressão sonora rms inicial em um arranjo de 8 microfones direcionais captando sons de reflexões

laterais apenas,

$P^2(t)$: variação temporal da pressão sonora rms inicial em um microfone omnidirecional.

Considerando que, conceitualmente, a LF consiste na razão da entre a energia sonora provida apenas das reflexões laterais e aquela oriunda de todas as direções incluindo o som direto, referente ao som inicial, pode-se propor:

$$LF = 10 \cdot \log [10^{0,1 \cdot (NPS_a - NPS_b)}], \text{ para } r \leq 27 \text{ m} \quad (44)$$

onde:

NPS_a : nível linear total de pressão oriundo de reflexões sonoras laterais, apenas, em uma posição na audiência, [dB].

NPS_b : nível linear total de pressão com influência de reflexões sonoras e do som direto, [dB].

r : distância limite de afastamento entre a fonte e o ponto receptor, para assegurar a determinação de NPS_a e NPS_b no intervalo inicial de 80 msec.

Os valores de NPS_a e NPS_b podem ser estimados pela equação (35). No caso do cálculo do NPS_a , o valor de A_T a ser utilizado deve considerar os coeficientes de absorção sonora de teto e piso igual a 0,99. Uma vez calculado o valor da LF_{E4} , obtém-se o valor de $(1 - IACC_E)$ pela equação de correlação entre esses dois parâmetros, para, então, obter $IACC_E$ [2].

G Observações Gerais

Como sugestão para melhorar a precisão dos atributos RT, G_{mid} e LF_{E4} e, conseqüentemente a predição de SP, deve-se corrigir os valores desses parâmetros a partir da equação de correlação entre valores experimentais de RT, G_{mid} e LF_{E4} da base de dados de [2] e valores calculados de RT, G_{mid} e LF_{E4} conforme os modelos de cálculo simplificados apresentados podem neste trabalho. Nos atributos acústicos cujos resultados são uma média espacial, além da média em um certo grupo de frequências centrais de bandas de oitava, tal média deve ser calculada a partir de uma amostra, de no mínimo 24, pontos na audiência.

VII. ASPECTOS DA ARQUITETURA DAS SALAS DE CONCERTO INFLUENTES NOS SEIS ATRIBUTOS ACÚSTICOS BÁSICOS PARA PREDIÇÃO DA SP

Para Reverberação é necessário que o tratamento acústico distribua e determine a quantidade ótima de absorção sonora através de materiais e sistemas construtivos especiais para absorção sonora de forma a ajustar especificação de materiais de revestimento / acabamento interno às questões acústicas.

Para Calidez, a partir do ajuste do RT_{low} e do RT_{mid} , o ajuste do BR vem naturalmente. O valor de BR aliado ao valor de G_{low} determinam, juntos, a percepção de presença forte dos sons graves. Para se evitar problemas causados pela falta e percepção nos baixos é conveniente: (a) evitar o uso de madeira com espessura inferior a 2,5 cm, sendo preferível acima de 3,8 cm, nas paredes laterais, no teto, limitando-se ao uso estritamente necessário deste material; (b) use camada de gesso com espessura acima de 2,5 cm, alvenaria de bloco de concreto pintada nas paredes laterais. Se a aparência de madeira é desejada, aplicar papel de parede direta sobre o

gesso; (c) selecione poltronas que não absorva excessivamente nos baixos; (d) em ambientes mais vivos com baixa capacidade de absorção nas baixas frequências, pode ser necessário introduzir sistemas especiais de absorção sonora nos graves para conter um excesso de energia sonora nas baixas frequências.

Para Audibilidade, deve-se determinar o valor preferencial de G_{mid} e RT para, então, definir sua audiência e conseqüentemente o volume da sala. É importante enfatizar que a audiência deve ser definida somente a partir de G_{mid} .

Para Espaciosidade acústica, existem hoje quatro tipos de soluções disponíveis incrementar a percepção deste atributo pela audiência: (a) estreitar as paredes laterais mantendo a forma retangular do recinto; (b) construir grandes painéis refletores a partir das paredes laterais, para reflexão da energia sonora inicial em diversas partes da audiência; (c) explorar, caso seja viável, o uso de balcões laterais, cujos frontões possam difundir energia sonora inicial na audiência; (d) utilizar elementos/painéis refletores sobre a audiência aumentando a quantidade de energia sonora inicial que chega à audiência por cima desta, evitando excessiva ou baixa densidade destes painéis para que o efeito desejado seja atingido.

Para prover um bom Envolvimento, a regra, do ponto de vista da arquitetura, consiste em criar irregularidades em tantas superfícies quantas for possível, aumentando o coeficiente de difusividade das mesmas, assim como evitar áreas de focalização sonora dentro da sala. É conveniente evitar balcões profundos e incorporar ao teto, paredes laterais e frontões dos balcões o máximo de irregularidades. No projeto em questão seria conveniente distribuir o balcão pelas paredes laterais reduzindo a profundidade do balcão do fundo da sala e criando nova área de balcão de pequena profundidade.

Para Intimidade, é importante fazer com que o valor de t_1 atinja, pelo menos, a ordem de grandeza de 20 ms que pode ser obtido locando as fontes sonoras naturais mais próximas da boca de cena, ou tornando a sala um pouco mais estreita.

Atenção deve ser dada ao desenho do palco. Evitar palco muito largo é aconselhável, evitando que os músicos ouçam em tempos diferenciados os diferentes setores da orquestra mais próximos e mais afastados de si, prejudicando na coesão. Neste caso o regente terá mais dificuldade de alcançar um bom conjunto da orquestra. Palco muito profundo também deve ser evitado de forma a evitar que os ouvintes na audiência percebam diferenças temporais entre os instrumentos mais ao fundo em relação aos mais frontais no palco. Uma área da ordem de 205 m² é considerada um valor ótimo, com 16,8 m de largura e 12,2 m de profundidade. As envoltórias do palco devem apresentar superfícies refletoras, sendo conveniente incluir a presença de difusores acústicos para auxiliar na mistura da energia sonora no palco, proporcionando a projeção da energia sonora para audiência. Também é necessária a presença de painéis superiores acima dos músicos, em certos casos, para proporcionar um melhor espalhamento da energia sonora entre os mesmos, assim como para auxiliar na projeção da energia sonora em direção à audiência [2].

No caso de salas de uso múltiplo, o volume de abrigo do

palco também abriga os urdimentos de cenário. Se as superfícies internas deste volume adicional forem absorvedoras, uma grande parcela de energia acústica será absorvida, contribuindo para a diminuição da eficiência acústica da fonte sonora, principalmente quando esta se localizar exatamente abaixo dessa cavidade superior. Se tais superfícies passarem a ser mais reflexivas, esse volume extra irá proporcionar maior vividez à sala (aumento do tempo de reverberação nas médias e altas frequências), e eliminar a dureza de textura da sala quando esta possui as envoltórias mais reflexivas. Porém, deve-se incorporar a este volume de palco painéis móveis com articulações fixadas nas paredes, para serem rebaixados acima dos músicos para lhes prover reflexões sonoras iniciais, melhorando as condições de balanço entre as seções da orquestra, por exemplo. A presença de cenários armazenados neste volume sobre o palco pode contribuir para tornar um ambiente muito seco, sendo conveniente poder isolá-lo do nível do palco através de uma estrutura de vedação da qual possam surgir os painéis refletoras sobre o palco [2].

VIII. CONCLUSÃO

O presente trabalho procurou fazer uma síntese de termos descritores do ambiente acústico de salas de concerto a partir dos quais se originou atributos acústicos e respectivos parâmetros de quantificação que constituem em indicadores, critérios ou índices para avaliação da qualidade em acústica de sala de concerto para adequação acústica dos ambientes e conseqüente conforto acústico nos mesmos. A partir daí foi possível rever a teoria de predição da preferência subjetiva da qualidade acústica de salas de concerto, destacando seis atributos acústicos que devem ser quantificados no processo de avaliação de desempenho acústico de ambientes destinados a sediar eventos sinfônicos.

Especialmente para os atributos G_{mid} e LF_{E4} foram propostas equações simplificadas de estimativa de seus valores que, usualmente só eram possíveis de serem quantificados a partir de medições acústicas, em escala real ou reduzida, ou a partir de simulação computacional.

Espera-se que o resultado deste trabalho venha estimular a quantificação de SP em atividades de estudo e principalmente de novos projetos ou reformas de salas de concerto e ambientes correlatos.

Convém ressaltar, mais uma vez que o esforço de apresentar procedimentos simplificados de avaliação da acústica de salas de concerto não deve ser considerada como uma desvalorização da atividade experimental e mesmo teórica de desenvolvimento de rotinas de cálculo mais sofisticadas e precisas que são a base de programas computacionais para acústica de salas. Ambas são imprescindíveis ao avanço do conhecimento científico. O que está sendo proposto, no entanto, é tornar o conhecimento mais acessível aos estudantes e profissionais das áreas de arquitetura e engenharia, sendo a própria sociedade a maior beneficiada nesse processo.

Em breve o autor estará desenvolvendo no LABCON as sugestões apresentadas no sub-item G do item V, para avanço do estágio em que se encontra seu trabalho através da

verificação da validade das equações de G_{mid} e LF_{E4} aqui propostas.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à comissão organizadora do 1º SEMEA pelo convite de participar desse promissor evento como palestrante. O autor também agradece a pessoa do Prof. Samir Niagi Yousri Gerges, do Laboratório de Acústica e Vibrações – LVA, no Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina – CTC / UFSC, através do qual teve à bibliografia principal que deu base a este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BERANEK, Leo L. **Music, Acoustic & Architecture**. New York, John Wiley & Sons, 1962.
- [2] BERANEK, Leo L. **How they sound concert and opera hall**. New York, Acoustical Society of America, 1996.
- [3] FERREIRA, Aurélio B. de Holanda. **Novo Aurélio Século XXI: o dicionário da língua portuguesa**. 3ª. ed. – Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.
- [4] EGAN, M. David. **Architectural Acoustics**. New York, McGraw-Hill, 1988, 200p.
- [5] CAVANAUGH, William J.; WILKES, Joseph A. **Architectural acoustics: principles and practice**. New York, John Wiley & Sons, 1999.
- [6] ANDO, Y. **Concert Hall Acoustics** (Springer-Verlag, Berlin), 1985.
- [7] GERGES, Samir N.Y. **Ruido: fundamentos e Controle**. Florianópolis, S.N.Y. Gerges, 1992. cap. 1, 7 e 8.
- [8] REYNOLDS, Douglas D. **Engineering principles of acoustics : noise and vibration control**. Allyn & Bacon inc. Boston, 1981.