



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Estudo de Parâmetros de Qualidade Acústica de Salas Para Música: Análise de Solução de Acústica Variável e Difusores Sonoros

Liberato, P.¹; Mateus, D.²; Pereira, A.²

^{1,2,3} ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, patricialiberato.eng@gmail.com, {diogo. apereira}@dec.uc.pt

Resumo

Em termos de conforto acústico, os parâmetros acústicos a serem estudados variam para cada tipo de utilização do ambiente, assim como os valores de referência. Através da acústica variável pode-se projetar espaços multiusos, com materiais e volumes de forma eficiente para alinhar os parâmetros acústicos para cada tipo de uso da sala.

Neste artigo faz-se um estudo dos parâmetros acústicos de qualidade de salas de música, aplicável a salas de ensaio e de performance musical, com referência a norma norueguesa NS 8178, e na influência da difusão sonora em ambientes acústicos distintos, criados a partir da introdução de acústica variável. Para o efeito são desenvolvidos modelos computacionais, baseados no método do traçado de raios, de modo a permitir avaliar diferentes parâmetros de qualidade sonora de duas salas de música com diferentes dimensões, uma destinada a sala de ensaio e outra a performance musical, porém ambas utilizadas para a mesma tipologia musical. No que diz respeito à influência da difusão sonora, são analisadas distintas possibilidades de introdução de difusão, considerando dois ambientes acústicos distintos, um reverberante e outro absorvente, para analisar a influência que a inserção de difusão sonora acarreta nos variados parâmetros de qualidade sonora de sala. Com a análise de todos estes parâmetros, nota-se grandes vantagens na utilização de difusores sonoros.

Palavras-chave: acústica variável, difusores, salas de música, reverberação, qualidade sonora.

PACS: 43.55.Br, 43.55.Gx.

Study of acoustic quality parameters for music rooms: Analysis of variable acoustic solutions and sound diffusers

Abstract

When it comes to acoustic comfort, the acoustic parameters vary for each type of room use, as well as the reference values. Through variable acoustics it is possible to design efficiently multipurpose space, with different materials and volumes to align the acoustic parameters for each type of room use.

The objective is to preliminary study the acoustic quality parameters of music rooms, based on the Norwegian Standard NS 8178, applicable to rehearsal and musical performance, analyzing the influence of sound diffusion in different acoustic environments, created from the introduction of variable acoustic.

For this purpose, computational models are developed, based on the ray tracing method, in order to allow the evaluation of different parameters of sound quality of two music rooms with different dimensions, one destined for the rehearsal room and the other for musical performance, but both used for the same musical typology. Regarding the influence of sound diffusion, different possibilities of introducing diffusion are analyzed considering two different acoustic environments, one reverberating and the other absorbing. Analyzing all these parameters, great advantages can be seen in the use of sound diffusers.

Keywords: variable acoustic, diffusers, music rooms, reverberation, sound quality.



1. INTRODUÇÃO

A arquitetura flexível prevê que os espaços podem variar seus usos de acordo com modificações no interior do ambiente, buscando espaços multifuncionais, podendo ter dois ou mais usos em um mesmo ambiente [1].

Embora não seja algo novo, a multifuncionalidade de salas de espetáculos, por meio de acústica ajustável, ganhou espaço nos projetos de novas salas nos últimos 40 anos. Muitas vezes as razões econômicas estão envolvidas, visto que se torna mais rentável construir uma sala com usos distintos ao invés de múltiplas salas [2].

Estes espaços multifuncionais devem seguir garantindo o conforto de cada uso de maneira individualizada, pois muitos dos usos apresentam condições de conforto distintas. No contexto de conforto, o condicionamento acústico de salas visa o tratamento sonoro interior, com parâmetros acústicos de qualidade sonora, de modo a trazer conforto e excelência para os usuários do espaço [3].

Os parâmetros acústicos a serem estudados variam para cada tipo de utilização da sala, assim como os valores de referência. Através da acústica variável pode-se projetar espaços multiusos, com materiais e volumes distribuídos de forma eficiente para alinhar os parâmetros acústicos para cada tipo de uso da sala. Deste modo, com a acústica variável pode-se aumentar a quantidade de usos previstos para determinado espaço, ao adaptar o ambiente, sem perder o conforto acústico ótimo [4].

Neste mesmo cenário, a arquitetura moderna tem gerado restrições na acústica de salas, devido a capacidade de difusão quase inexistente das superfícies, que provocam defeitos acústicos, como ecos flutuantes.

“Uma boa sala para música é tão importante quando um bom instrumento”, afirmou Mstislav Rostropovich [5], célebre concertista russo. Em salas destinadas a música, as propriedades acústicas são decisivas para uma boa interação entre músicos, instrumentos e público. Durante anos, a arte e a ciência eram dois universos distintos, sendo que a acústica de salas para

música uniu estes mundos, com a busca conjunta de requisitos objetivos e subjetivos para se projetar salas de excelência [6].

A acústica variável é usualmente utilizada para variação da absorção de salas, porém também é uma estratégia para variação da difusão da sala. Para diferentes tipos de música e tamanho dos grupos musicais, diferentes características de resposta da sala são esperadas [7, 8].

As grandes salas de concerto construídas até início do século XX eram decoradas com esculturas de superfície irregular e com trabalhos em alto-relevo, assim como adornos e ornamentos em alto-relevo. Estes elementos decorativos tinham função de difusores sonoros, para criar condições de ampla dispersão das ondas na sala. Ao longo dos anos, as tendências arquitetônicas mudaram e este estilo foi substituído por salas mais simples, com grandes superfícies planas e poucos elementos de ornamentação, e, conseqüentemente, campos sonoros menos difusos [9].

Deste modo, este trabalho irá analisar a influência da aplicação de difusores sonoros nos parâmetros de qualidade sonora da sala, para diferentes ambientes acústicos, gerados por aplicação de soluções de acústica variável.

2. DIFUSÃO SONORA

A energia sonora refletida pode ser classificada como especular ou difusa. Um reflexo especular, como a luz refletida em um espelho, ricocheteia na superfície com o mesmo ângulo de entrada. Ocorre uma reflexão difusa quando a energia sonora é espalhada em direções não especulares. Os três mecanismos da reflexão difusa são: Rugosidade da superfície refletora; Difração da borda; e Tratamento de parede chamado difusor numérico [10].

Os difusores acústicos são correntemente utilizados no condicionamento acústico de salas com maior exigência acústica, como estúdios e salas de espetáculos, servindo para garantir uma acústica adequada, sem absorção excessiva ao espalhar o som com mais uniformidade pela sala. Eles também ajudam a eliminar os defeitos acústicos como ecos, primeiras reflexões intensas e zonas de sombra [11].

A difusão sonora em uma sala se consegue mediante a colocação de elementos desenhados para dispersar o som, de forma uniforme e em múltiplas direções. A existência de difusor sonoro em salas de concerto permitirá que a energia sonora do campo reverberante chegue aos ouvidos dos espectadores de forma homogênea em todas as direções, criando um som altamente envolvente e aumentando o grau de impressão espacial existente. Quando maior o grau de impressão espacial, melhor será a avaliação subjetiva de qualidade acústica da sala. Para salas de palavra falada, como em teatros, também se percebe o benefício da utilização de difusores para evitar a distorção de reflexões iniciais, que são essenciais para fornecer inteligibilidade.

A difusão é muito utilizada para consertar ou prevenir defeitos acústicos em salas, conservando a energia sonora do espaço, sem que modifique a absorção e o tempo de reverberação na sala. É, por isso, que hoje em dia é consensual que, em locais, como as paredes traseiras de grandes auditórios ou quando existem paredes paralelas, os difusores sejam uma boa forma de tratamento, e podem mesmo superar o desempenho acústico das tradicionais abordagens de absorção [12].

Nas normas ISO 17497-1 (2004) e ISO 17497-2 (2012) encontra-se o procedimento para realização da avaliação laboratorial de um difusor sonoro, descrevendo o modo de obtenção das respostas polares, coeficiente de difusão e coeficiente de dispersão de um difusor [13, 14]. A difusão provocada por uma superfície pode ser classificada através de dois coeficientes, são eles:

Coeficiente de difusão (d) – é uma medida da uniformidade do som refletido. A finalidade deste coeficiente é permitir a conceção de difusores, bem como permitir a técnicos de acústica comparar o desempenho e as especificações das superfícies a utilizar.

Coeficiente de dispersão (s) – é uma relação entre a energia do som que dispersa de uma forma não especular e o total de energia sonora refletida. A finalidade deste coeficiente é caracterizar a dispersão superficial

normalmente para a utilização em programas de modelagem baseados em acústica geométrica [15].

3. METODOLOGIA

3.1 Ambiente de estudo

A fim de realizar os estudo propostos, optou-se por estudar dois tipos de salas previstas na norma norueguesa NS 8178 (2014) (que é uma norma conceituada para parâmetros acústicos de sala para música), sendo elas: uma Sala para Performance Musical, visando um modelo mais complexo, e uma Sala de Ensaio Para Música Alta, sendo um ambiente com menores dimensões e modelo mais simplificado [16, 17].

A Sala para Performance Musical, apresenta uma geometria retangular em planta, porém em corte, foram representados um palco e o mezanino. A sala apresenta menos de 500 lugares sentados e foi dimensionada para Música Alta de acordo com a norma norueguesa. A sala apresenta uma altura média de 8 metros, sendo o volume por pessoa maior que 10 m^3 . A área do palco é de 230 m^2 , ultrapassando o mínimo de 100 m^2 propostos pela norma.

Já em relação a Sala de Ensaio, trata-se de um ambiente simples, retangular em planta e em corte, com dimensões de $7\text{m} \times 15\text{m}$ e altura livre de $3,5\text{m}$, que é classificada pela norma norueguesa com uma Sala de Ensaio Pequena para música alta. Como pode ser verificado na norma, este tipo de sala suporta de 3 a 12 músicos, atendendo a altura mínima da sala de $3,5\text{m}$, e com seu volume de 367 m^3 , que corresponde ao mínimo requerido pela norma.

3.2 Hipóteses e cenários de estudo

Para análise dos efeitos da difusão em variados parâmetros acústicos, optou-se por realizar 3 (três) hipóteses de ambientes na Sala de Performance Musical e 2 (duas) hipóteses de ambientes na Sala de Ensaio. Seguem abaixo as hipóteses da Sala de Performance musical, sendo no Quadro 1 apresentadas as hipóteses e característica das modelagens e nas Figuras 1 a 3 subsequentes as imagens dos modelos 3D do CATT Acoustics, representando cada hipótese.



Ressalta-se que foi utilizado somente do coeficiente de dispersão do Difusor Sonoro tipo QRD, ou seja, não foi alterada a absorção do material em si, de modo que a única variável da simulação fosse a difusão.

Quadro 1: Hipóteses da Sala de Performance Musical e características de modelagem.

Hipótese	Modelagem
Sem difusão	Modelagem com paredes laterais e paredes do palco liso.
Com QRD	Modelagem com as paredes laterais e paredes do palco com difusor tipo QRD.
Com Difusores Geométricos	Modelagem com paredes laterais com quebra de paralelismo, com superfícies em cunha, e paredes do fundo do palco com difusores em forma convexa.

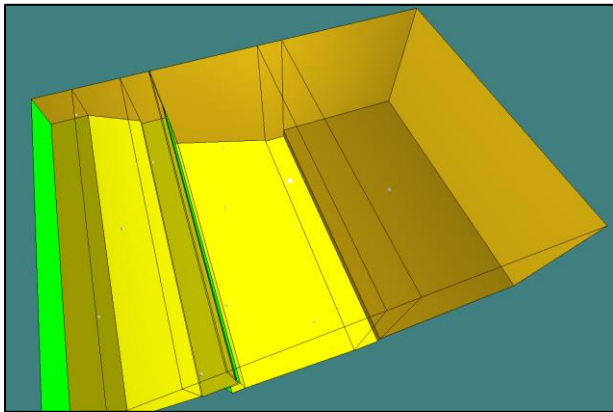


Figura 1: Hipótese Sem Difusão - Vista Topo - Sala de Performance Musical.

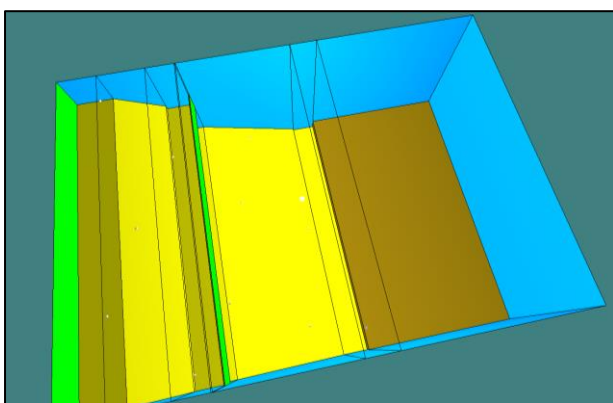


Figura 2: Hipótese Com QRD - Vista Topo - Sala de Performance Musical (em azul estão as superfícies com QRD).

O objetivo de criar a Hipótese com Difusores Geométricos modelados foi com o intuito de criar uma sala mais convencionalmente utilizada e mais econômica, visto que a

utilização de QRD em grande quantidade em salas de espetáculo não é convencional.

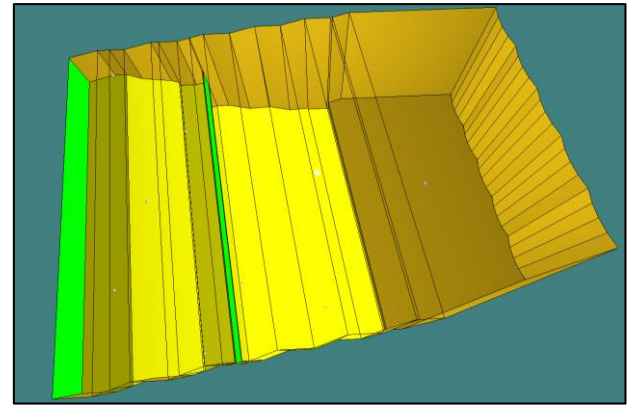


Figura 3: Hipótese Com Difusores Geométricos - Vista Topo - Sala de Performance.

Já para a Sala de Ensaio estão representadas no Quadro 2 as hipóteses e características das modelagens e na Figura 4 e Figura 5 subsequentes as imagens dos modelos 3D do CATT Acoustics, respectivamente. Em ambas as hipóteses foi modelada uma janela, com alguma difusão em uma das paredes laterais, como elemento de quebra de paralelismo, evitando defeitos acústicos. O QRD utilizado é o mesmo da Sala de Performance Musical.

Quadro 2: Hipóteses da Sala de Ensaio e características de modelagem.

Hipótese	Modelagem
Sem difusão	Modelagem com todas as paredes em material reflexivo.
Com QRD	Modelagem com as paredes laterais e paredes do fundo dos músicos com difusor tipo QRD.

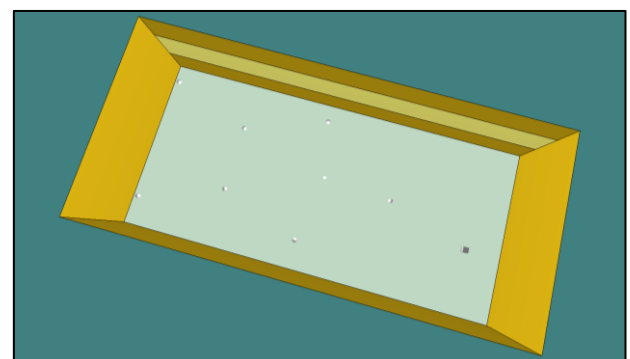


Figura 4: Hipótese Sem Difusão - Vista Topo - Sala de Ensaio.

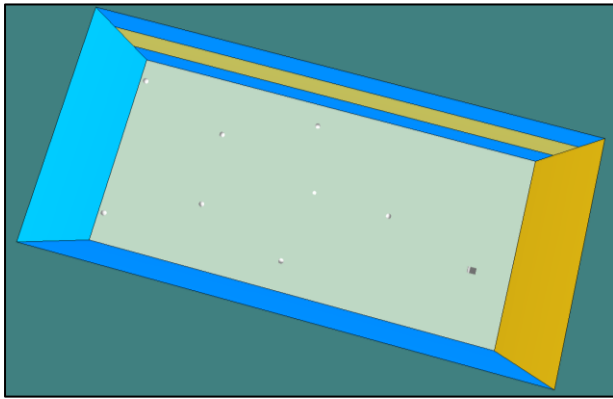


Figura 5: Hipótese com QRD - Vista Topo - Sala de Ensaio Musical (em azul estão as superfícies com QRD).

Além das hipóteses acima, foram gerados para ambos os tipos de sala dois cenários: Reverberante e Absorvente, para simular a acústica variável. A diferença entre estes cenários na modelagem é que no cenário Reverberante o teto modelado é de gesso liso, já para o cenário Absorvente o teto está modelado com gesso perfurado de alta absorção.

Para realização dos estudos, optou-se por posições de fontes e receptores aleatórias nos ambientes, de modo a criar uma amostragem suficiente para análise dos resultados. Para a Sala de Performance Musical optou-se por dez posições de receptores e duas posições de fonte. Já para Sala de Ensaio optou-se por sete posições de receptores e uma posição de fonte.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de analisar os efeitos da difusão em variados parâmetros acústicos de salas, foram realizadas as simulações descritas na seção anterior, onde a única variável é a difusão. Nos próximos itens serão detalhados os resultados dos parâmetros estudados.

4.1 Tempo de Reverberação - T_{20} e T_{30} - e EDT (*Early Decay Time*)

• Sala de Performance Musical

Optou-se em trabalhar com os T_{30} , T_{20} e EDT, visto que embora sejam parâmetros similares, o espaço de tempo de cada parâmetro torna-os singular. O T_{30} e o T_{20} , representam o tempo de reverberação determinados para decaimentos da energia sonora de 30 dB e 20 dB, respectivamente, excluindo os primeiros 5 dB.

Já o EDT, mesmo sendo expresso e medido da mesma maneira que o Tempo de Reverberação (T_{30} e T_{20}), é baseado nos primeiros 10 dB de decaimento do som. Se o ambiente for extremamente difuso, ou seja, o decaimento for completamente linear, o T_{30} , T_{20} e EDT serão idênticos. O EDT tem mostrado melhor correlação com o som mais percebidos pelos ouvintes. Nos Quadros 3, 4 e 5 são apresentados os valores do T_{30} , T_{20} e EDT previstos.

Quadro 3: T_{30} da Sala de Performance Musical para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	T_{30} (s)
SEM DIFUSÃO	2,6
COM QRD	1,7
DIFUSOR GEOMÉTRICO	1,8

Quadro 4: T_{20} da Sala de Performance Musical para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	T_{20} (s)
SEM DIFUSÃO	2,3
COM QRD	1,7
DIFUSOR GEOMÉTRICO	1,8

Quadro 5: EDT da Sala de Performance Musical para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	EDT (s)
SEM DIFUSÃO	1,6
COM QRD	1,6
DIFUSOR GEOMÉTRICO	1,5

Ao analisar os quadros acima, nota-se grande disparidade no T_{30} e T_{20} em relação a hipótese sem difusão. Os valores do Tempo de Reverberação com QRD e com Difusor Geométrico estão na ordem de 1,7s, já com a hipótese sem Difusão o tempo de reverberação sobe consideravelmente para 2,3s e 2,6s. Nota-se que este aumento da reverberação ainda é maior no T_{30} . Quando se analisa o EDT, nota-se que já não existe este pico na reverberação no ambiente sem difusão.

Trabalhando com acústica variável, alterou-se a absorção do teto da sala, criando um cenário mais absorvente, porém com as mesmas dimensões e hipóteses de difusão. Seguem nos Quadros 6, 7 e 8 os resultados obtidos.



Quadro 6: T_{30} da Sala de Performance Musical para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	T_{30} (s)
SEM DIFUSÃO	2,2
COM QRD	0,9
DIFUSOR GEOMÉTRICO	1,2

Quadro 7: T_{20} da Sala de Performance Musical para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	T_{20} (s)
SEM DIFUSÃO	2,0
COM QRD	0,9
DIFUSOR GEOMÉTRICO	1,1

Quadro 8: EDT da Sala de Performance Musical para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	EDT (s)
SEM DIFUSÃO	0,9
COM QRD	0,7
DIFUSOR GEOMÉTRICO	0,7

Efeito similar ao cenário reverberante acontece no cenário absorvente. O tempo de reverberação aumenta ainda mais significativamente na hipótese sem difusão, sendo esta diferença ainda maior no T_{30} . No EDT a diferença diminui, porém a hipótese sem difusão ainda apresenta valor maior.

• Sala de Ensaio

A mesma análise anterior foi repetida para a Sala de Ensaio simulada, visando compreender o fenômeno de difusão em uma sala mais simplificada, com menores dimensões e retangular (ver Quadros 9 a 11 para cenário reverberante).

Quadro 9: T_{30} da Sala de Ensaio para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	T_{30} (s)
SEM DIFUSÃO	2,3
COM QRD	2,2

Quadro 10: T_{20} da Sala de Ensaio para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	T_{20} (s)
SEM DIFUSÃO	2,3
COM QRD	2,2

Quadro 11: EDT da Sala de Ensaio para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	EDT (s)
SEM DIFUSÃO	2,2
COM QRD	2,0

Para o cenário reverberante da Sala de Ensaio nota-se pouca disparidade de valores entre hipóteses com e sem difusão, assim como entre os parâmetros T_{30} , T_{20} e EDT, porém o ambiente sem difusão continua com valores maiores que o com QRD. Nos Quadros 12 a 14 são apresentados os resultados para o cenário absorvente da sala de ensaio.

Quadro 12: T_{30} da Sala de Ensaio para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	T_{30} (s)
SEM DIFUSÃO	1,2
COM QRD	0,6

Quadro 13: T_{20} da Sala de Ensaio para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	T_{20} (s)
SEM DIFUSÃO	1,2
COM QRD	0,6

Quadro 14: EDT da Sala de Ensaio para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	EDT (s)
SEM DIFUSÃO	0,7
COM QRD	0,5

Nota-se que nos resultados acima que no cenário absorvente da Sala de Ensaio, o tempo reverberação volta a ser consideravelmente maior sem difusão na sala, reduzindo um pouco a diferença de valores no EDT.

Os resultados dos tempos de reverberações das simulações apresentadas demonstram a importância da difusão para Salas para Música. O aumento do tempo de reverberação nas hipóteses sem difusão reflete os defeitos acústicos causados, por exemplo, pelo paralelismo da sala.

Nota-se que estes defeitos acústicos são menos percebidos no EDT, visto que este parâmetro está relacionado com o decaimento inicial, ou seja, com as primeiras reflexões. Em

contrapartida, se compararmos o T_{20} com o T_{30} , percebe-se que os resultados do tempo de reverberação são maiores no T_{30} , visto que este acaba por medir mais tempo e, consequentemente, recebe as reflexões tardias, reafirmando os defeitos acústicos causados por superfícies paralelas sem difusão.

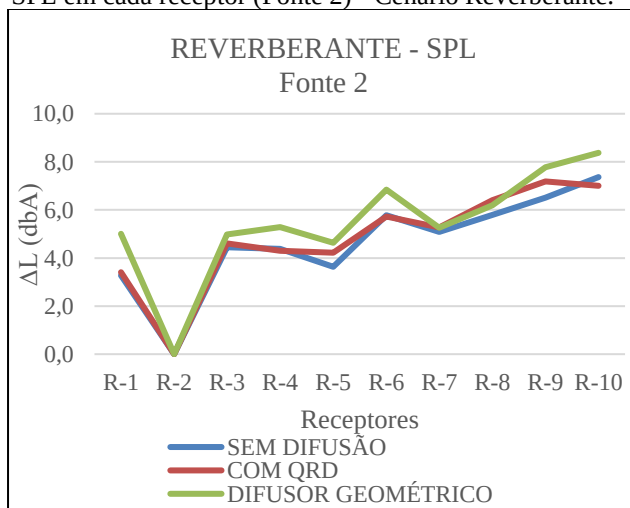
4.2 Nível de Pressão Sonora - SPL

Para esta análise, foi utilizada a diferença do SPL entre dois pontos de receptores na mesma plateia. Idealmente, quando menor a diferença entre receptores, mais homogênea é a distribuição do som no ambiente.

• Sala de Performance Musical

Para a análise da Sala de Performance Musical foram utilizadas duas posições de fonte sonoras, uma no centro do palco e outra na lateral do palco na posição usual do alto-falantes, tanto para cenário reverberante como absorvente. No Gráfico 1 (cenário reverberante – fonte na lateral), apresenta-se a diferença de nível de pressão sonora (ΔL) para cada receptor em relação ao receptor mais próximo da fonte sonora.

Gráfico 1: Sala de Performance Musical - Diferença do SPL em cada receptor (Fonte 2) - Cenário Reverberante.



No gráfico acima nota-se que a diferença entre os resultados das diferentes hipóteses não é grande, não havendo uma melhoria com a aplicação de difusores.

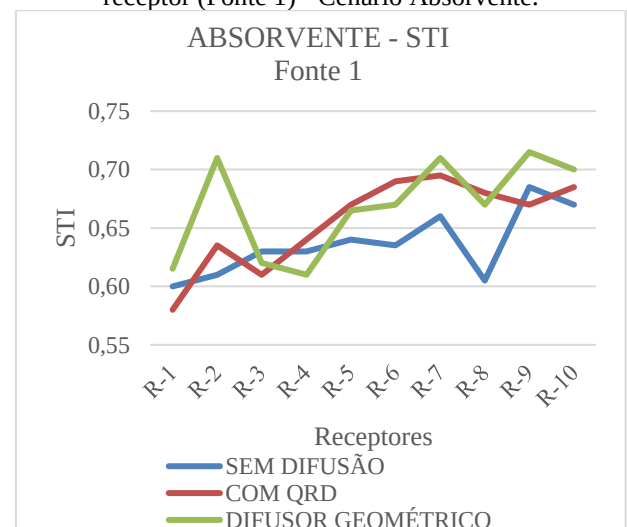
• Sala de Ensaio

Ao analisar os resultados da Sala de ensaio, para este mesmo parâmetro, os gráficos foram muito similares aos da Sala de Performance Musical, ou seja, também não há um padrão entre o ambiente sem difusão em comparação com o ambiente com QRD. Deste modo, não se pode falar que a introdução de difusão na sala ajudará a ter maior homogeneidade do som entre os ouvintes. Se a intenção é aumentar o SPL no fundo da sala, de modo a ter uma menor diferença do nível de pressão sonora entre o receptor mais próximo a fonte sonora e o mais longe, não se tem interesse em colocar difusão sonora em toda sala. Soluções mais específicas devem ser estudadas, como a geometria e inclinação de paredes e teto ideais para projeção do som, assim como posicionamento de difusores em lugares estratégicos, como exemplo na parte dos fundos da sala.

4.3 Índice De Transmissão Da Fala - STI

O STI é o parâmetro utilizado para quantificar a inteligibilidade da fala, sendo que quanto maior o valor do STI maior a inteligibilidade da fala. Deste modo, para salas de música, busca-se STI mais baixos, comparados com salas para palavra falada. Visto que este parâmetro é desejável em ambientes onde o foco é a palavra falada. Apresentam-se abaixo somente os resultados para os cenários absorventes (ver Gráficos 2 e 3).

Gráfico 2: Sala de Performance Musical - STI em cada receptor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.

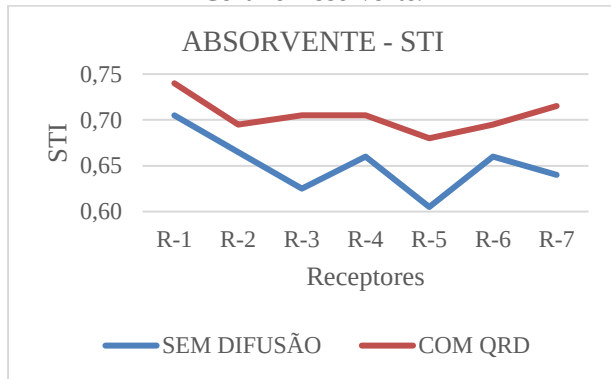


A sala de performance musical, devido a sua geometria mais complexa, apresenta poucos



defeitos acústicos, sendo assim, os difusores são menos importantes neste tipo de geometria. Porém, mesmo com estas condições, ainda se nota no Gráfico 2 o aumento médio do STI, com aplicação de difusores QRD e geométrico, para a maior parte dos receptores.

Gráfico 3: Sala de Ensaio - STI em cada receptor - Cenário Absorvente.



Pelo fato de a sala de ensaio apresentar paredes laterais paralelas, defeitos acústicos ocorrem, podendo mascarar os resultados. Deste modo, para avaliar se a utilização do QRD realmente melhora o parâmetro STI (ver Gráfico 3), descartando o efeito dos defeitos acústicos, fez-se outra simulação com as paredes laterais da sala inclinadas, conforme Figura 6.

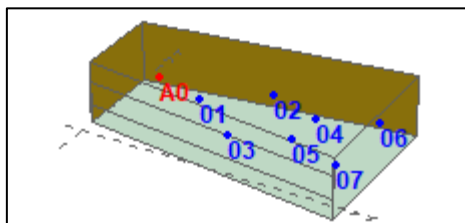
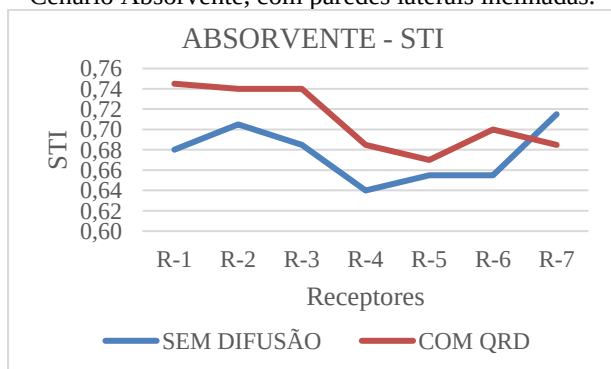


Figura 6: Sala de Ensaio com paredes laterais inclinadas.

Gráfico 4: Sala de Ensaio - STI em cada receptor - Cenário Absorvente, com paredes laterais inclinadas.



Nota-se no Gráfico 4 que as curvas estão mais próximas, ou seja, os defeitos acústicos da sala,

gerados pelo paralelismo entre as paredes, tem influência nos resultados. Por outro lado, mesmo corrigindo os defeitos acústicos, percebe-se que a inclusão do difusor QRD aumenta o parâmetro STI, melhorando a inteligibilidade da fala.

4.4 Definição - D50

Este parâmetro é determinado através da relação entre a energia registrada nos primeiros 50 msec e a energia total e quanto maior seu valor melhor será a inteligibilidade da palavra na sala.

Visto que este parâmetro é desejável em ambientes onde o foco é a palavra falada, apresenta-se abaixo somente os resultados para os cenários absorventes (ver Gráficos 5 a 7).

Gráfico 5: Sala de Performance Musical - D50 em cada receptor (Fonte 2) - Cenário Absorvente.

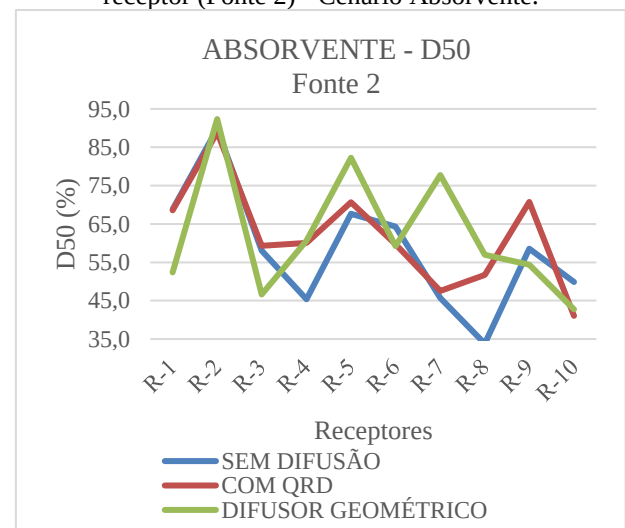


Gráfico 6: Sala de Ensaio - D50 em cada receptor - Cenário Absorvente

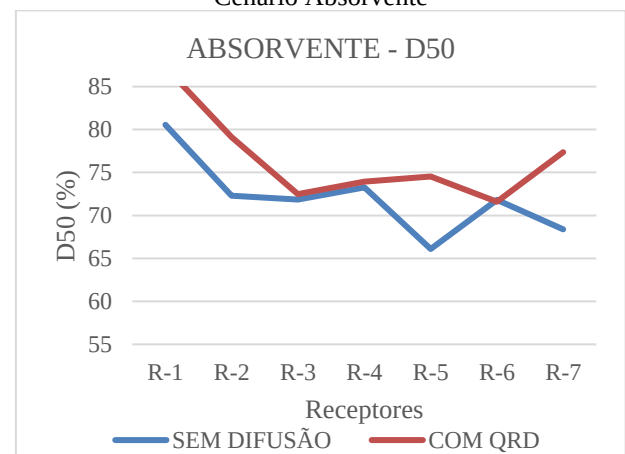
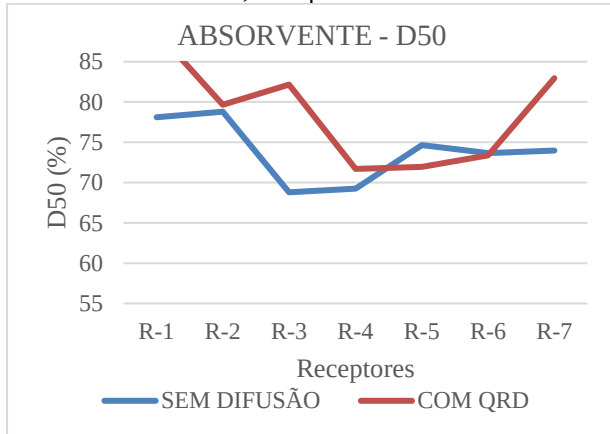


Gráfico 7: Sala de Ensaio - D50 em cada receptor - Cenário Absorvente, com paredes laterais inclinadas.



Nota-se no Gráfico 6 que há um sensível aumento na definição sonora com a utilização dos difusores sonoros, porém não tão significativa quanto o tempo de reverberação, visto que a janela temporal é reduzida para este parâmetro. Assim como no estudo do STI, também foi realizada uma simulação considerando as paredes laterais inclinadas, de modo a verificar se os defeitos acústicos influenciam nos resultados. No Gráfico 7 percebe-se que não houve grande influência no resultado.

4.5 Índice De Claridade Musical - C80

Este parâmetro relaciona a energia registrada nos primeiros 80 msec e a energia a partir do 80 msec. Para salas de concerto, valores menores de C80 são esperados, como o intervalo de -4 dB a +1 dB sugerido por Beranek.

Visto que este parâmetro é desejável em ambientes onde o foco é a música, apresenta-se abaixo somente os resultados para os cenários reverberantes (ver Gráficos 8 e 9).

Gráfico 8: Sala de Performance Musical - C80 em cada receptor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.

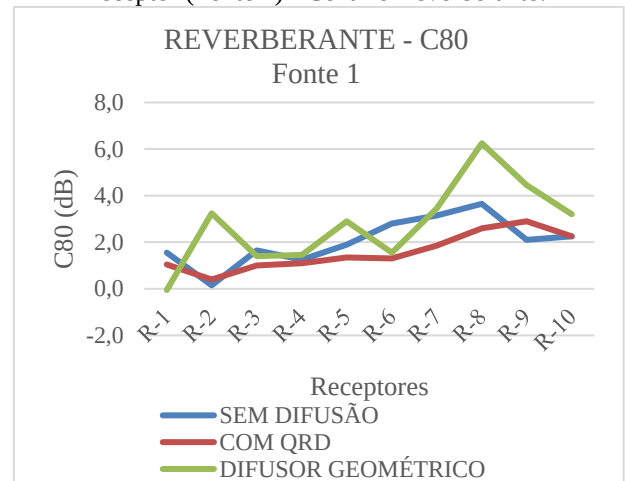
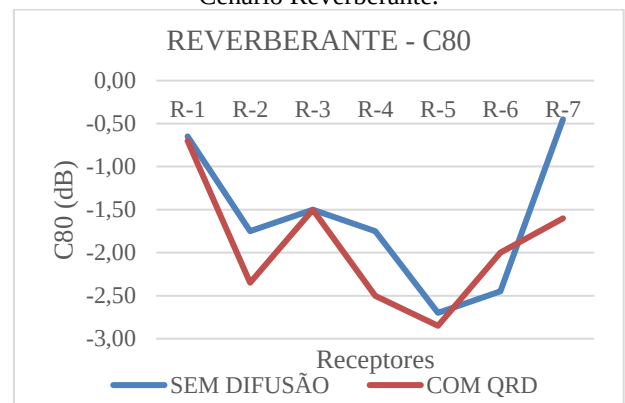


Gráfico 9: Sala de Ensaio - C80 em cada receptor - Cenário Reverberante.



Com a fonte centralizada no palco, percebe-se no Gráfico 8 que a claridade musical diminui com a utilização de QRD, o que é favorável para uma sala de performance musical, mostrando a importância da utilização de difusão sonora nas salas destinadas a música.

Os resultados da Sala de Ensaio (Gráfico 9) seguem os resultados da Sala de Performance musical, ou seja, em geral, com a introdução do difusor QRD a claridade musical diminui.

4.6 Eficiência Lateral – J-LF

A eficiência lateral (J-LF) corresponde à relação entre a energia que chega lateralmente a um ouvinte, dentro dos primeiros 80mseg após a chegada do som direto, e a energia recebida em todas as direções no mesmo intervalo de tempo. Nos Gráficos 10, 11, 12 e 13 apresentam-se os resultados obtidos (cenário reverberante e absorvente) para a Sala de Performance Musical e Sala de Ensaio.



Para este parâmetro foi utilizado para análise somente a Fonte 1, central, visto que não faria sentido analisar a eficiência lateral de maneira não simétrica.

Gráfico 10: Sala de Performance Musical - J-LF em cada receptor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.

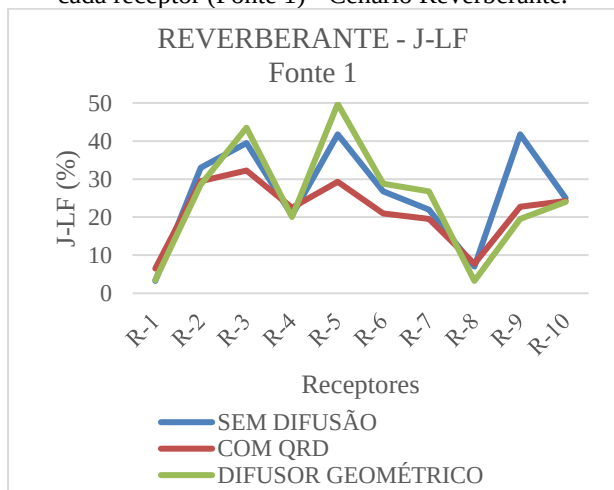


Gráfico 11: Sala de Performance Musical - J-LF em cada receptor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.

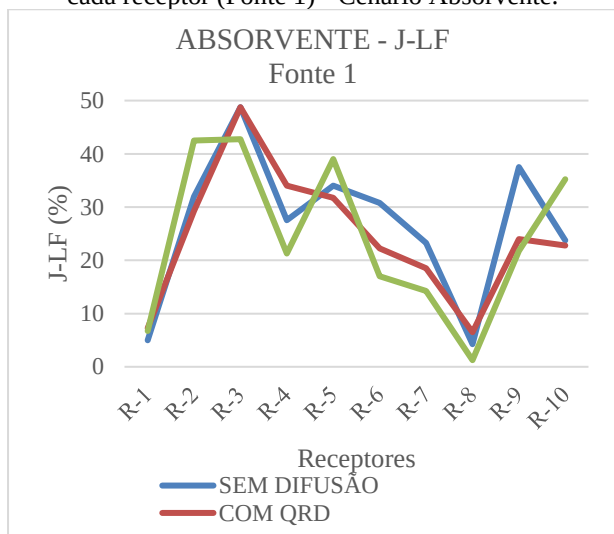


Gráfico 12: Sala de Ensaio - J-LF em cada receptor - Cenário Reverberante.

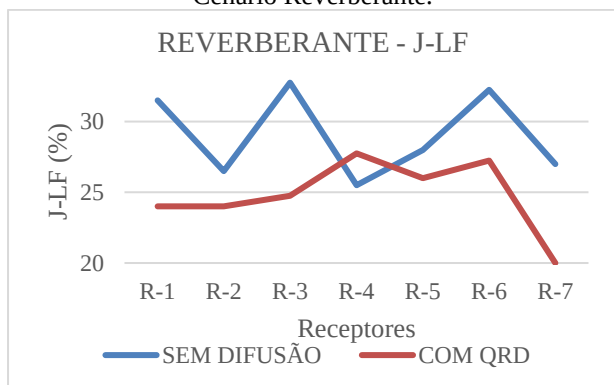
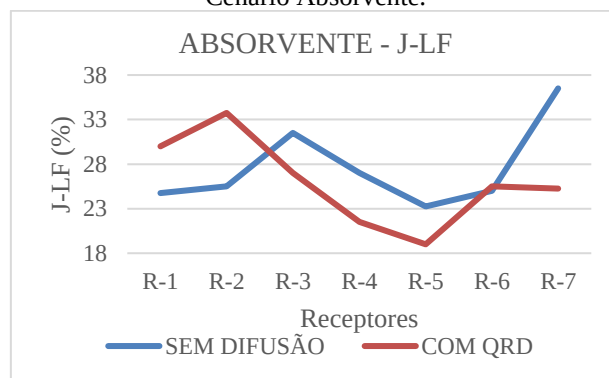


Gráfico 13: Sala de Ensaio - J-LF em cada receptor - Cenário Absorvente.



Ao analisar o Gráfico 10 nota-se que a curva com QRD está mais homogênea em relação as demais, ou seja, a utilização do difusor QRD faz com que haja um espalhando melhor do som, apresentando maior uniformidade sonora independentemente da posição do receptor/ouvinte na sala. Já observando o Gráfico 11 nota-se que a difusão sonora não influencia os resultados. Esta diferença ocorre, pois, este cenário tem muita absorção, fazendo com que o campo direto seja mais determinante que o campo refletido/reverberante.

Analisando os resultados da Sala de ensaio (ver Gráficos 12 e 13) percebe-se que os resultados confirmam as conclusões já apresentadas na Sala de Performance Musical, onde no cenário reverberante há uma maior homogeneidade entre os receptores com a utilização do difusor QRD. Já no cenário absorvente não é possível verificar este fenômeno, visto que o campo direto é mais significativo do que o campo reverberante.

4.7 Força Sonora - G

Este parâmetro corresponde à diferença entre o nível total de pressão sonora produzido por uma fonte omnidirecional em um receptor em uma sala e o nível sonoro produzido pela mesma fonte situada em campo livre e medida a 10 m de distância.

Visto que este parâmetro é desejável em ambientes onde o foco é a música, apresenta-se abaixo somente os resultados para os cenários reverberantes (ver Gráficos 14, 15 e 16).

Gráfico 14: Sala de Performance Musical - G em cada receptor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.

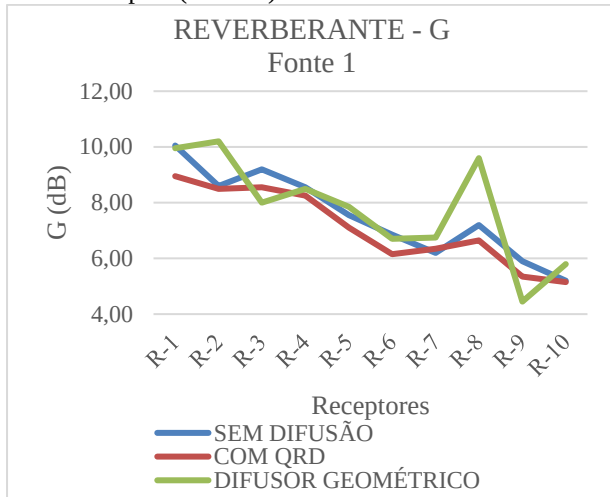


Gráfico 15: Sala de Performance Musical - G em cada receptor (Fonte 2) - Cenário Reverberante.

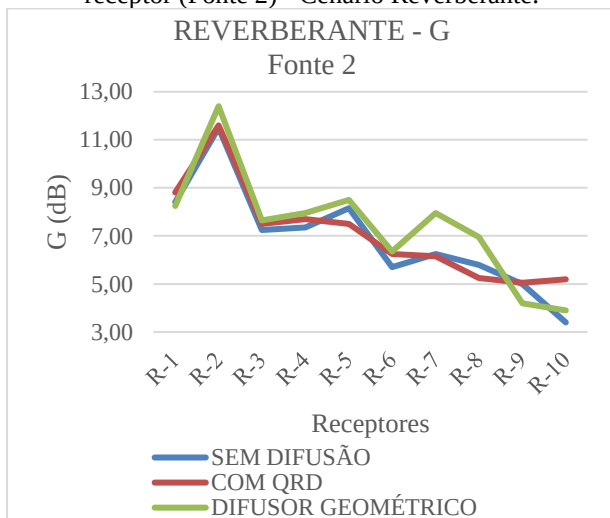
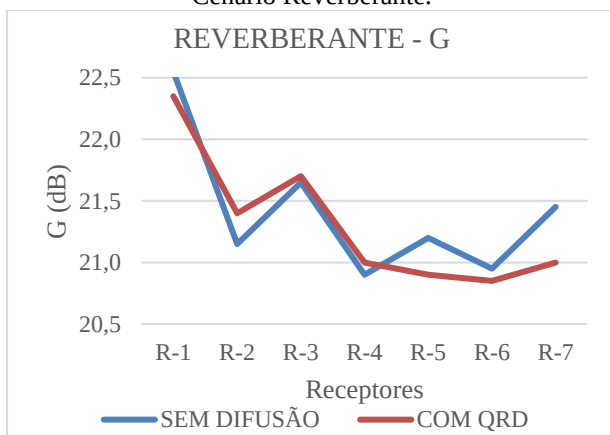


Gráfico 16: Sala de Ensaio - G em cada receptor - Cenário Reverberante.



Nota-se no Gráfico 14, Gráfico 15 e Gráfico 16 que a curva com o QRD é mais homogênea e uniforme que as demais, mostrando-se favorável a utilização de difusão. A difusão faz

com que o som alcance os receptores com força semelhante.

Percebe-se nos gráficos da Sala de Performance Musical que há picos no difusor geométrico em alguns receptores. Isto ocorre devido ao efeito de focalização que a forma geométrica pode proporcionar em alguns pontos, mostrando a importância de projetar esta geometria com rigor.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os difusores sonoros são comumente empregados no condicionamento acústico de salas com maiores exigências acústicas, como salas de espetáculos e performance musical, estúdio, salas de ensaio, etc. São materiais que visam o espalhamento do som mais uniforme pela sala, sem absorções excessivas e minimizam os defeitos acústico como ecos ou zonas de sombra.

Por meio das simulações realizadas nos dois estudos de caso (Sala de Performance Musical e Sala de Ensaio), diversas respostas e conclusões podem ser coletadas dos resultados quando realizada a comparação de ambientes com e sem difusão sonora. Ressalta-se que para cada sala foi criado cenários de acústica variável, considerando um ambiente mais absorvente e outro mais reverberante.

Ao avaliar o Tempo de Reverberação da sala, pode-se perceber a importância da difusão sonora em Salas para Música, em particular para salas com formas simples que conduzam aos designados “defeitos acústicos”. O aumento do tempo de reverberação nas hipóteses sem difusão sonora reflete os defeitos acústicos causados, por exemplo, pelo paralelismo da sala.

Avaliando a diferença do Nível de Pressão Sonora (SPL) em diferentes receptores na plateia não se pode afirmar que a introdução de difusão nas salas ajudará a ter maior homogeneidade do som entre os ouvintes. Contudo, é provável que para geometrias específicas e com o posicionamento de difusores em lugares estratégicos, se consiga uma melhoria significativa, podendo ser objeto para trabalhos futuros.



O Índice de Transmissão da Sala (STI) e Definição Sonora (D50), apresentaram um sensível aumento com aplicação de difusores QRD e geométrico, melhorando a inteligibilidade da fala.

Ao avaliar Claridade Musical (C80), percebe-se que com a introdução do difusor QRD a claridade musical diminui, o que é favorável para salas para música. Já sobre a Eficiência Lateral foram percebidas respostas distintas para o cenário absorvente e reverberante. Para o cenário reverberante, percebe-se que a utilização de difusor QRD faz com que haja um espalhamento melhor do som, apresentando maior uniformidade sonora independentemente da posição do receptor/ouvinte na sala. Já para o cenário absorvente, não é possível verificar este fenômeno, visto que o campo direto é mais significativo que o campo reverberante. Sabe-se que para as salas reverberantes são onde se faz mais sentido valorizar este parâmetro e sua homogeneidade, sendo favoráveis os valores encontrados.

Ao analisar o parâmetro Força Sonora (G), para cenário reverberante, nota-se que a curva com o QRD é mais homogênea e uniforme do que as demais, mostrando-se favorável a utilização de difusão para este parâmetro. A difusão faz com que o som alcance os receptores com força semelhante.

Com a análise de todos estes parâmetros, nota-se grandes vantagens na utilização de difusores sonoros.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito de uma dissertação referente à 3ª edição do Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Os autores agradecem o apoio facultado.

REFERÊNCIAS

- [1] Guedes, S.V. (2016). “Lote da Estação Velha Ensaio Sobre Arquitetura Evolutiva, Flexível e Adaptável”. Universidade do Porto.
- [2] Kuttruff, H. (2000) “Room acoustics”. 4ª edição, Spon Press, Londres.
- [3] Barron, M. (2010) “Auditorium Acoustics and Architectural Design”. 2ª edição, Spon Press, Londres.
- [4] Arau-Puchades, H. (1997). “Dependencia del tiempo de reverberación com el tamaño de audiência em salas de pública concurrencia”. Revista de Acústica, 28, 7-12.
- [5] Sá, L.R.; Acústica e Educação em Música: Estudo Qualitativo Para Sala de Ensino e Prática de Instrumento e Canto. Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, 2010.
- [6] Hidaka, T.; BERANEK, L. L. (2000) “Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas”. The Journal of the Acoustical Society of America.
- [7] Beranek, L. (2004) “Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture”. 2ª edição, Springer Verlag, Nova York.
- [8] Bistafa, S. (2004). “Difusão Sonora em Salas: Paradigmas do Passado e Estado da Arte”. I Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [9] Parreira, R. (2018). “Difusores acústicos 3D com forma orgânica – estudo numérico e optimização”. DEC - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [10] Rathsam, J. and Wang, L. (2006). “A Review of Diffuse Reflections in Architectural Acoustics”. Architectural Engineering – Faculty Publications, University of Nebraska, Lincoln.
- [11] D’Antonio P. and Cox T.J. (1998). “Two Decades of Sound Diffusor Design and Development, Part 1: Applications and Design,” J. Audio Eng. Soc.
- [12] Godinho, L.; Mateus, D.; Mendes, P.; Pereira, A. (2015). “Difusores Acústicos – apontamentos de apoio”, DEC - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [13] Norma ISO 17497-1 (2004). “Acoustics. Sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room”.
- [14] Norma ISO 17497-2 (2012). “Acoustics. Sound-scattering properties of surfaces. Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field”.
- [15] Afonso, Marcos Alberto Carvalho (2014). “Estudo numérico de painéis difusores acústicos”. DEC - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [16] Norma NS 8178 (2014), “Acoustic criteria for rooms and spaces for music rehearsal and performance”.
- [17] Rindel, J. H. (2014) “New Norwegian standard on the acoustics of rooms for music rehearsal and performance”. Multiconsult AS, Oslo, Norway.