

SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE UMA IGREJA BARROCA – COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS MEDIDOS E SIMULADOS

David Queiroz de Sant’Ana (1); Paulo Henrique Trombetta Zannin (2)

(1) Mestre Engenheiro pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
david@davidqueiroz.arq.br

(2) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, zannin@ufpr.br
Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Acústica Ambiental, Industrial e Conforto Acústico, Centro Politécnico - Jardim das Américas 81.531-990 - Curitiba, Paraná - Brasil - Caixa-Postal: 19011 Telefone: (41) 3361-3433

RESUMO

Programas de computador para a predição de propriedades acústicas de salas são cada vez mais empregados na indústria de arquitetura e construção civil. Contudo, os modelos de computador estão longe de uma resolução fiel da realidade. Dentre as dificuldades, as mais importantes são relacionadas ao detalhamento geométrico das salas e à caracterização das superfícies quanto às suas propriedades acústicas, particularmente os coeficientes de absorção e difusão sonora. Para que se obtenham resultados confiáveis é necessária a calibração dos modelos computacionais. Neste trabalho apresenta-se uma calibração de um modelo para a predição acústica de um recinto fechado, precisamente uma igreja barroca. A avaliação foi realizada em três etapas sucessivas 1) Medições *in situ*, 2) Reprodução das condições de campo em simulação computacional e 3) Análise estatística do modelo. O levantamento utilizou a técnica de integração de resposta impulsiva conforme recomendações da norma internacional ISO/3382-1: 2006. As predições foram realizadas com o auxílio do programa Odeon 7.01. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para aferição da precisão do modelo. Observou-se que os resultados obtidos podem ser considerados precisos, especialmente para o tempo de reverberação. As predições também permitem concluir a importância da correta caracterização acústica das superfícies para a obtenção de bons resultados.

Palavras-chave: acústica, acústica de salas, acústica de igrejas.

ABSTRACT

Computer programs for the prediction of the acoustical properties of rooms are increasingly being used in the industry of architecture and civil building. However, computer models still do not provide a high resolution picture of reality. The geometric details of the rooms and the characterization of the surfaces with respect to their acoustical properties, in particular the coefficients of absorption and diffusion, stand as some of the most important difficulties. In order for trustworthy results to be generated, it is necessary to calibrate the computational models. In this study we present the calibration of a model for the acoustical prediction of a closed room, precisely a baroque church. The evaluation has been conducted in 3 stages: 1) *In situ* measurements, 2) reproduction of field conditions in a computational simulation, and 3) statistical analysis of the model. We used the technique of integration of the impulsive response, according to the recommendations of the international standard ISO/3382-1: 2006. Predictions have been conducted using the software Odeon 7.01. Results were submitted to an analysis of variance (ANOVA), to test for the accuracy of the model. Results could be considered as accurate, especially for reverberation times. Predictions also allow to conclude about the relevance of the correct acoustical characterization of the surfaces, so that good results are obtained.

Keywords: acoustics, room acoustics, acoustics of worships.

1. INTRODUÇÃO

Em acústica de salas, o desenvolvimento de técnicas de predição é bastante recente. Os primeiros esforços nesta área surgiram no início do século XX com os trabalhos de Wallace Clement Sabine. Até então, a qualidade acústica de uma sala era obtida por um processo de tentativa e erro e de um pouco de sorte, ou da reprodução de casos de sucesso (CIRILLO; MARTELLOTA, 2006; LONG, 2006).

Nas décadas seguintes, várias técnicas de investigação de soluções acústicas foram desenvolvidas, dentre elas, a utilização de modelos físicos em escala. As maquetes foram largamente utilizadas para os testes de projeto de salas de concerto. Embora muito eficientes, os modelos em escala têm sido preteridos à medida que a capacidade de processamento dos computadores modernos aumenta.

Dentre as vantagens no uso de modelos digitais destacam-se, a flexibilidade na realização de testes de diferentes materiais, testes de diferentes condições de ocupação, a redução dos custos financeiros e a economia de tempo (ZANNIN; PASSERO; SANT'ANA, 2009). Entretanto, os modelos de computador ainda devem ser tratados com alguns cuidados.

“As simplificações necessárias para que se viabilizem os cálculos em um intervalo de tempo razoável, ainda os deixam [os modelos digitais] diante de uma visão imprecisa [da realidade], mas, com a sofisticação técnica e a habilidade computacional em desenvolvimento, os modelos melhorarão” (LONG, 2006, p. 781, tradução nossa).

Em virtude da precisão e confiabilidade dos resultados, as predições computacionais têm sido objeto de avaliações periódicas pela comunidade científica internacional. Vorländer (1995) e Bork (2000; 2005) conduziram rodadas internacionais para averiguação da precisão de programas de simulação acústica de salas.

Estes autores observaram que para todos os *softwares* avaliados, as debilidades concentram-se na precisão dos cálculos para as baixas frequências e no tratamento dos efeitos de difração sonora em arestas, especialmente na área de assentos. Outras dificuldades encontradas nos modelos referem-se a correta caracterização das superfícies quanto às suas propriedades de absorção e difusão sonora (VORLÄNDER, 1989, MOMMERTZ 2000, RINDEL, 2000, VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000, JEON; LEE; VORLÄNDER, 2004).

A comparação dos valores calculados com os dados obtidos por medição é fundamental para a verificação da qualidade do modelo. Segundo Bradley e Wang (2007, p. 85, tradução nossa), “o Tempo de Reverberação tem sido o parâmetro mais utilizado entre os acadêmicos e a indústria para a calibração dos modelos”. Dentre os motivos, enumere-se a facilidade de medição, sua pouca sensibilidade em relação à posição o que aumenta a repetibilidade da amostra e a consistência com que os programas calculam este parâmetro, fato que simplifica o tratamento estatístico.

Além disso, as predições devem ser comparadas com valores ótimos de referência para que se proceda o julgamento da qualidade acústica do modelo digital de predição. A norma internacional ISO/3382-1: 2006 recomenda valores ótimos para diversas métricas bem como limites de percepção para valores médios sobre a frequência em uma única posição em salas de concerto e auditórios multiuso com volumes acima de 25.000 m³ (tabela 1).

Tabela 1 – Valores ótimos propostos conforme impressão subjetiva do espectador

| Impressão subjetiva do campo sonoro | Descritor objetivo | Média sobre as bandas de oitava | Diferença perceptível | Intervalo típico |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------|------------------|
| Reverberância | Tempo de Decaimento Inicial | 500 a 1000 | Rel. 5% | 1,0 s; 3,0 s |
| Percepção da clareza sonora | Clareza, C80, em dB | 500 a 1000 | 1 dB | -5 dB; +5 dB |
| | Definição, D50 | 500 a 1000 | 0,05 | 0,3; 0,7 |
| | Tempo central, Ts, em ms | 500 a 1000 | 10 ms | 60 ms; 260 ms |

¹ Intervalo típico é para valores médios sobre a frequência em uma única posição em salas de concerto e auditórios multiuso com volumes acima de 25.000 m³

Adaptado de ISO/DIS 3382-1: 2006, revisão da ISO 3382: 1997.

Especial atenção seja dada à diferença perceptível que tem sido empregada como referência para o julgamento da qualidade de simulações computacionais. Este critério baseia-se nos limites psico-fisiológicos de percepção de diferenças de uma determinada característica acústica. Estas margens de tolerância favorecem a análise da qualidade dos dados simulados, mesmo quando os resultados estatísticos apontam para diferenças significativas entre os levantamentos *in situ* e as simulações computacionais.

No Brasil, a acústica de salas é objeto de normalização e os critérios para a execução de tratamentos acústicos em recintos fechados são recomendados pela NBR 12179/ABR. 1992. A norma brasileira leva em consideração apenas o Tempo de Reverberação para o condicionamento acústico. Recomenda a utilização das equações clássicas de Sabine ou de Eyring (EYRING, 1930), considerando como conformes, as

predições que apresentem desvios de até 10% aos valores medidos nas salas reais.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar uma calibração de um modelo computacional para predição de parâmetros acústicos de uma igreja localizada na cidade de Curitiba. A calibração será realizada a partir da comparação estatística do Tempo de Reverberação entre valores medidos *in situ* e os valores obtidos por meio da simulação computacional.

3. MÉTODO

Este trabalho está dividido em três etapas: 1) Caracterização da sala e medições *in situ*, 2) Reprodução das condições de campo em simulação computacional e 3) Análise estatística do modelo. Após a comparação estatística dos resultados simulados para o Tempo de Reverberação, os resultados das outras três métricas foram comparados em função das diferenças perceptíveis preconizadas pela norma ISO/3382-1: 2006.

3.1 Caracterização da sala e medições *in situ*

A atual Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito é uma construção do séc. XVIII em estilo barroco. Foi construída no lugar de uma capela em estilo colonial, erigida para uso dos trabalhadores escravos e tinha o nome de Igreja do Rosário dos Pretos de São Benedito. A igreja foi inaugurada em 1737 e serviu de matriz de 1875 até 1893 durante a construção da Catedral Metropolitana (figura 1).

O edifício é construído em alvenaria de pedra, as paredes no interior são rebocadas e pintadas com tinta à base de água. Vitrais coloridos iluminam o interior da igreja.



Figura 1 Igreja Nossa Senhora do Rosário de São Benedito – Interior

O piso é de tacos de madeira assentados sobre contra-piso de concreto e o forro de madeira é pintado em tinta com base oleosa, sem gravuras ou decorações.

Os bancos são de madeira e não têm revestimento. As naves abrigam aproximadamente 310 pessoas sentadas. Acima da entrada, um órgão de tubos foi instalado no coro. Um resumo das principais dimensões da sala é apresentado na tabela 1 adiante.

Tabela 1 – Dimensões Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

| Característica arquitetônica | Dimensão |
|--|-----------------------|
| Largura máxima – incluindo capelas laterais | 13,5 m. |
| Comprimento máximo – medido da entrada até o altar | 28 m. |
| Altura máxima – medida do piso até o forro ponto mais alto do arco, abobada ou de forro plano. | 8,6 m. |
| Altura do altar – medida do piso do altar até o ponto mais alto do forro. | 8,5 m. |
| Volume total | 2488,6 m ³ |
| Área total do piso | 305,4 m ² |

3.1.1 Medições

Para as medições no interior da igreja foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Uma fonte onidirecional modelo BK 4296 Brüel & Kjaer – conjunto de 12 altofalantes montados em um dodecaedro – com resposta plana para a faixa de frequência de 100Hz a 16KHz conectada a um amplificador de som modelo Lab 300 Labgruppen de 500 Watts de potência RMS.
- Um microfone onidirecional, modelo BK 4188 Brüel & Kjaer com especificações de filtros e polarização originais do fabricante conectado ao medidor de nível sonoro modelo BK 2238 Brüel & Kjaer.
- Software de geração de sinal e registro da curva de decaimento DIRAC 3.1, instalado em um microcomputador portátil Toshiba com processador Intel Pentium 4 de 1.4 MHz de frequência.
- Placa de áudio de interface *fire-wire* modelo Fireface 800 da fabricante RME, utilizada para a conexão dos equipamentos ao microcomputador.
- Tripés para montagem da fonte e do medidor e trena.

A fonte sonora foi posicionada em dois pontos do presbitério. Um sobre o eixo de simetria da capela-mor e outro sobre o púlpito de leitura da congregação. Utilizou-se a técnica de resposta impulsiva para as medições com um sinal de varredura logarítmica sobre a frequência (*e-sweep signal*) para a excitação do volume de ar da sala.

Os pontos de recepção foram distribuídos pelas naves segundo uma malha regular de 5x5 metros, totalizando seis pontos na nave principal e dois pontos na nave lateral (figura 2). Os microfones foram posicionados nas áreas de assentos, entre os bancos, com altura relativa ao piso de 1,2m o que reproduz a condição de audiência sentada (ISO 3382-1, 2006, p. 5). Três medições foram repetidas para cada par combinado de fonte e microfone das quais se obtiveram as médias para a análise.

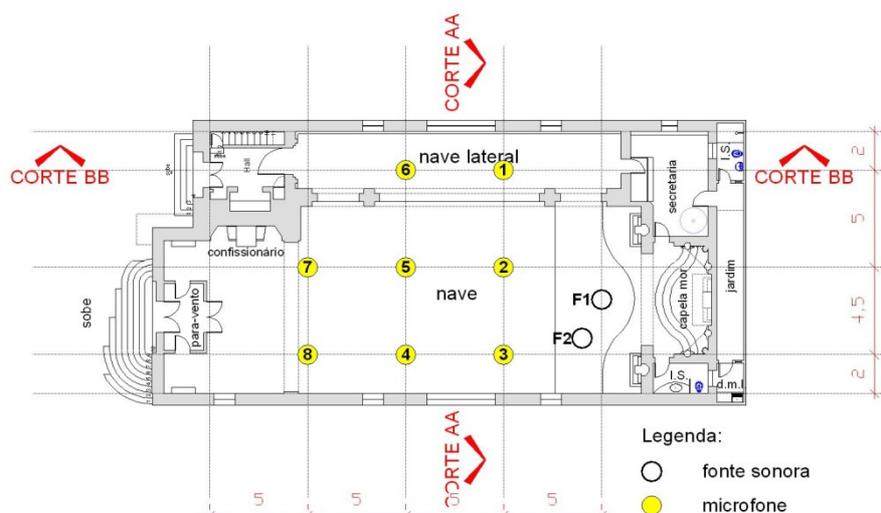


Figura 2: Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito – croqui: planta da nave e presbitério – Fonte Albatroz Arquitetura, Construção e Restauro.

3.2 Modelo Computacional

O modelo digital tridimensional foi elaborado com o auxílio do software VectorWorks 11.5 (NEMETSCHKE NORTH AMERICA, 2005) e ainda que de forma simplificada, reproduz as principais características geométricas da sala estudada.

A simulação acústica foi realizada com o programa Odeon 7.01 (ODEON A/S, 2005) e seguiu os seguintes passos:

1. Teste da geometria – identificação de erros das superfícies tridimensionais;
2. Posicionamento da fonte sonora e dos pontos de recepção conforme o levantamento de campo;
3. Caracterização das superfícies em função dos coeficientes de absorção e difusão sonora dos materiais de acabamento encontrados na sala.

Os coeficientes de absorção sonora utilizados foram, em sua grande maioria, os disponíveis na biblioteca do programa. Quando se fez necessário, novos materiais foram adicionados à biblioteca do programa. Os coeficientes de absorção empregados no modelo podem ser verificados na tabela 2 adiante.

Tabela 2 – Coeficientes de absorção dos materiais de acabamento empregados nas igrejas.

| Materiais | Frequência (Hz) | | | | | |
|--|-----------------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Wood sheathing, pine (KNUDSEN; HARRIS, 1978) | 0,10 | 0,11 | 0,10 | 0,08 | 0,08 | 0,11 |
| Chairs, lightly upholstered concert hall chairs, average | 0,35 | 0,45 | 0,57 | 0,61 | 0,59 | 0,55 |
| Lime cement plaster | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| Single pane of glass, 3mm | 0,08 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| Solid wooden door | 0,14 | 0,10 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,10 |
| Ceilings, plasterboard ceiling on battens with large air-space above | 0,20 | 0,15 | 0,10 | 0,08 | 0,04 | 0,02 |
| Floors, 10 mm soft carpet on concret | 0,09 | 0,08 | 0,21 | 0,26 | 0,27 | 0,37 |
| Floors, wood parquet on concret | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,07 |
| Windows, window glass | 0,35 | 0,25 | 0,18 | 0,12 | 0,07 | 0,04 |

Outra importante característica acústica das superfícies é sua propriedade de difusão dos raios refletidos. Em virtude da escassez de dados sobre os coeficientes de difusão dos materiais e de sua aplicabilidade ser baseada em grande parte na experiência de técnicos e pesquisadores (ZENG, 2006; NAYLOR; RINDEL, 1992), os coeficientes de difusão utilizados no modelo deste trabalho são aqueles sugeridos pelos fabricantes do programa de simulação utilizado (CRISTENSEN, 2003, p. 55). A regra prática para sua aplicação está descrita na tabela 3 adiante.

Tabela 3 – Critérios práticos para a aplicação do coeficiente de difusão sonora - caracterização das superfícies.

| Características da superfície | Coefficiente de Difusão Sonora |
|--|--------------------------------|
| Grandes superfícies rígidas ou macias. | 0.1 |
| Superfícies muito difusoras como audiência em uma sala de concertos. | 0.7 |
| Salas com muitos itens de pequeno porte que são ignorados no processo de modelagem em salas de aula e escritórios por exemplo. | 0.3 |

Adaptado de CRISTENSEN, 2003, p. 55.

O programa Odeon possui três métodos para calcular os parâmetros acústicos: 1) Investigação (*Survey*), 2) Engenharia (*Engineering*) e 3) Precisão (*Precision*). Aliados as formas de tratamento da difusão sonora nas superfícies (difusão total ou lei dos co-senos de Lamberts) pode-se chegar a 12 combinações diferentes de ajuste cada uma produzindo um conjunto de resultados. Com inúmeras possibilidades de predição faz-se necessária a comparação dos resultados para determinar que método de cálculo se mostra mais preciso.

Os dados de medição e predição computacional do tempo de reverberação foram explorados estatisticamente quanto à normalidade na distribuição das amostras, a variância das médias e a comparação múltipla entre as médias.

3.3 Tratamento Estatístico

Como dito anteriormente, 12 grupos puderam ser obtidos através de predições computacionais. Um grupo através de medições realizadas nas igrejas. Para a comparação este é o grupo de controle com o qual todos os outros foram comparados. Os grupos de predição foram numerados de 2 até 13. Os grupos foram criados a partir das combinações oferecidas pelo programa (tabela 4) e foram submetidos aos testes de Kolmogorov-Smirnov, Levene, ANOVA, Tamhane, e LSD.

Tabela 4 – Grupos de predição acústica estatisticamente testados.

| Descrição do grupo | nº do grupo |
|---|-------------|
| Valores medidos | 1 |
| survey+lambert+soft materials only | 2 |
| survey+lambert+all materials | 3 |
| survey+full+soft materials only | 4 |
| survey+full+all materials | 5 |
| engineering+lambert+soft materials only | 6 |
| engineering+lambert+all materials | 7 |
| engineering+full+soft materials | 8 |
| engineering+full+all materials | 9 |
| precision+lambert+soft materials only | 10 |
| precision+lambert+all materials | 11 |
| precision+full+soft materials only | 12 |
| precision+full+all materials | 13 |

O teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) demonstrou para todos os grupos analisados na Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito p-valor maior que 0,05. A distribuição dos dados é normal em todas as frequências e posições da fonte sonora.

Nesta igreja, as diferentes posições da fonte sonora influenciaram a homogeneidade da variância nos grupos estudados. As predições com a fonte na posição F1 forneceram amostras com variância homogênea, em todas as frequências, exceto em 125 Hz. Em contraste, para todos os grupos de predição e em todas as frequências, as variâncias foram não homogêneas para a posição F2 da fonte (ver tabela 5).

Tabela 5 – Teste de Homogeneidade da Variância – Igreja de Nossa Senhora do Rosário.

| Posição da fonte sonora | p-valor por frequência em bandas de oitava (Hz) | | | | | |
|-------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| F1 | 0,007 | 0,087 | 0,116 | 0,123 | 0,212 | 0,363 |
| F2 | 0,019 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,003 |

Além de não homogêneas, a hipótese nula para diferenças significativas entre os grupos não foi aceita para nenhuma das amostras submetidas à análise de variância (tabela 6) – p-valor é menor que 0,05.

Tabela 6 – Teste ANOVA – Igreja de Nossa Senhora do Rosário.

| Posição da fonte sonora | p-valor por frequência em bandas de oitava (Hz) | | | | | |
|-------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| F1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| F2 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Os testes de comparação múltipla, aplicados detectaram, em todos os grupos de predição, diferenças significativas entre estes e os valores medidos. As diferenças se concentraram especialmente nas frequências de 250 Hz e 4000 Hz, sendo mais uniformemente distribuídas para as demais. Quando comparadas, as diferentes posições da fonte sonora, as simulações para a fonte na posição F2 tiveram um desempenho significativamente melhor (tabela 7). O grupo 7 obteve a melhor reprodução dos valores medidos (p-valor > 0,05) para o maior número de bandas de oitava.

Tabela 7 – Teste de Comparação Múltipla – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

| Descrição do grupo | nº do grupo | Frequência em bandas de oitava (Hz) | | | | | |
|---|-------------|-------------------------------------|-----|-----|------|------|------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| survey+lambert+soft materials only | 2 | | | | | | |
| survey+lambert+all materials | 3 | | | | | | |
| survey+full+soft materials only | 4 | | | | | | |
| survey+full+all materials | 5 | | | | | | |
| engineering+lambert+soft materials only | 6 | | | | | | |
| engineering+lambert+all materials | 7 | | | | | | |
| engineering+lambert+all materials | 8 | | | | | | |
| engineering+full+all materials | 9 | | | | | | |
| precision+lambert+soft materials only | 10 | | | | | | |
| precision+lambert+all materials | 11 | | | | | | |
| precision+full+soft materials only | 12 | | | | | | |
| precision+full+all materials | 13 | | | | | | |

Legenda:

- p-valor < 0,05 para F1 e F2
- p-valor < 0,05 para F1
- p-valor < 0,05 para F2
- p-valor > 0,05



4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados medidos e calculados (grupo 7) para o Tempo de Reverberação podem ser observados nas figuras 3 e 4. O melhor desempenho estatístico para a predição da Fonte F2 pode ser notado na figura 4 como uma maior tendência dos valores calculados em relação aos dados obtidos na medição.

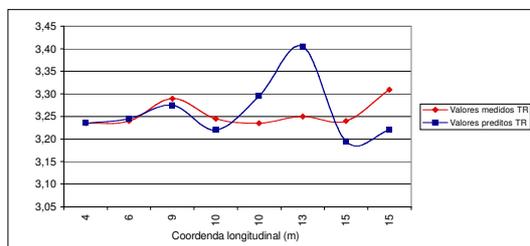


Figura 3: Valores medidos e preditos do Tempo de Reverberação (T₃₀ 500+1000Hz) para a Fonte 1.

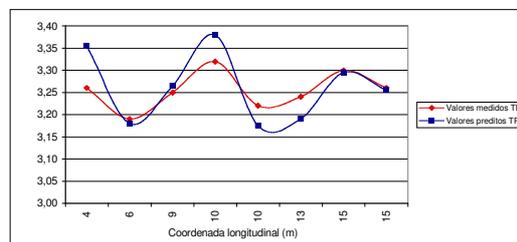


Figura 4: Valores medidos e preditos do Tempo de Reverberação (T₃₀ 500+1000Hz) para a Fonte 2

Pode-se afirmar que os resultados, obtidos através de simulação computacional, apresentaram para esta sala diferenças abaixo de 0,16 segundos. Esta diferença representa menos de 5% em relação ao T₃₀ medido ponto a ponto na sala.

Este desempenho atende às exigências de predição acústica das normas NBR 12179:1992 e ISO/3382-1: 2006 as quais recomendam diferenças toleráveis de 10 e 5% respectivamente. Tendo isto em vista, toma-se a modelagem do grupo 7 como representativa da sala existente e em virtude dos demais parâmetros calculados serem derivados do campo reverberante da sala, os resultados das outras três métricas objetivas (EDT, C₈₀ e D₅₀) serão apresentados e comparados com seus respectivos valores medidos.

4.1. Comparação dos resultados medidos e calculados para as demais métricas

A predição do Tempo de Decaimento Inicial (EDT) para a Igreja do Rosário produziu resultados com desvios entre 5% e 16% em relação aos valores medidos. Esses resultados apresentam uma dispersão dos dados aleatória em relação à tendência das medições. Embora a diferença entre os valores seja menor que 5% para a maioria dos pontos combinados à Fonte F1, os resultados calculados desenharam uma imagem distorcida da realidade (figuras 5 e 6).

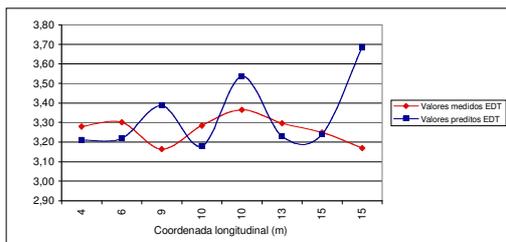


Figura 5 Valores medidos e previstos do Tempo de Decaimento Inicial ($EDT_{500+1000Hz}$) para a Fonte 1.

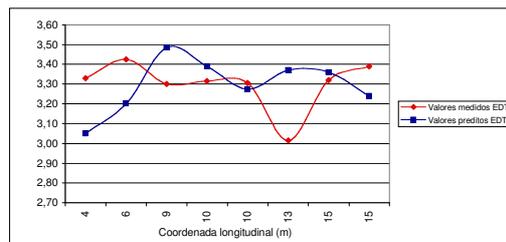


Figura 6: Valores medidos e previstos do Tempo de Decaimento Inicial ($EDT_{500+1000Hz}$) para a Fonte 2.

Grandes desvios nas simulações do Tempo de Decaimento Inicial foram observados também por outros autores (BRADLEY; WANG, 2007; BORK, 2005). Este parâmetro descritor de reverberação, ao contrário do Tempo de Reverberação, é significativamente dependente do som inicial (som direto e primeiras reflexões) o que resultou em uma superestimação para os pontos mais distantes da fonte e de forma inversa, nos pontos mais próximos, resultados subestimados.

Os resultados indicam que em se tratando dos descritores de reverberação, os modelos de computador têm melhor desempenho para o cálculo do Tempo de Reverberação (T_{30}) que para o EDT.

Quanto à Clareza, as diferenças entre os valores calculados de C_{80} e aqueles existentes para a sala real foram descritas nas figuras 7 e 8.

O modelo computacional superestimou a maioria dos pontos para a configuração da fonte F1. Ainda assim, a reprodução dos valores calculados apresentaram uma diferença em torno de 1 dB, limite da diferença perceptível para este parâmetro, o que caracteriza um bom desempenho do modelo (ISO/3382-1: 2006).

Os dados previstos para a fonte F2 apresentaram um desvio maior para os pontos mais distantes da fonte sonora (acima de 10 metros) e uma melhor reprodução dos pontos mais próximos.

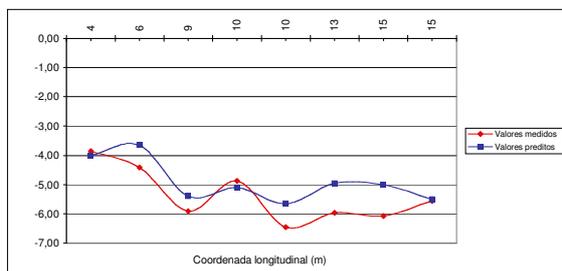


Figura 7: Valores medidos e previstos da Clareza (C_{80}), para a Fonte 1.

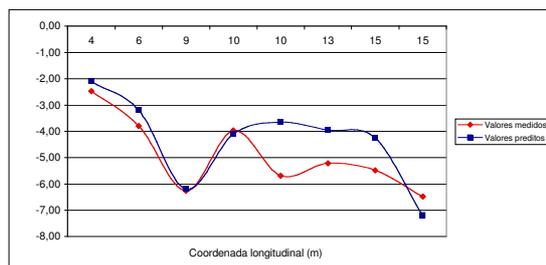


Figura 8: Valores medidos e previstos da Clareza (C_{80}), para a Fonte 2.

Os parâmetros de clareza C_{80} e D_{50} têm métodos de cálculo bastante similares. A Definição, contudo, leva em consideração um intervalo menor do som inicial (50 ms). Em virtude disso, os resultados são mais bem reproduzidos para esta métrica.

A simulação da Definição (D_{50}) apresentou desvios menores em relação aos valores medidos que os obtidos na predição do C_{80} . Tanto para a fonte F1 como para a F2, diferenças menores que 0,05 segundo (figura 9) foram observadas entre os dados medidos e calculados. O desempenho das simulações para a segunda posição da fonte sonora, entretanto, apresenta dois pontos com diferenças entre 0,05 e 0,10 segundos. Nestes dois casos, a tolerância para a predição é excedida (figura 10).

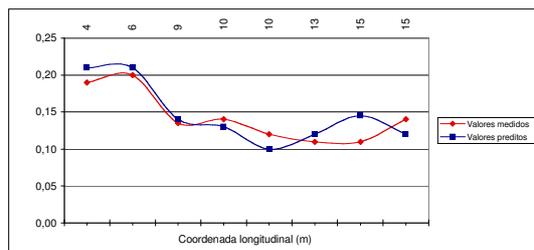


Figura 9: Valores medidos e previstos da Definição (D_{50}) para a Fonte 1.

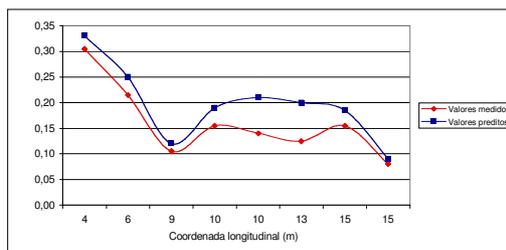


Figura 10: Valores medidos e previstos da Definição (D_{50}), para a Fonte 2.

5. CONCLUSÃO

É sabido que os parâmetros acústicos em recintos fechados são dependentes do volume das salas e das propriedades acústicas dos materiais empregados na construção e nos acabamentos das superfícies. Há muito foram demonstradas as interações entre o volume e a absorção sonora das salas e o tempo de reverberação.

A predição computacional permite, de forma rápida e com baixo custo financeiro, a estimação do Tempo de Reverberação e o cálculo de outros parâmetros fundamentais para a descrição acústica de salas. Entretanto, o grande volume de informação produzida dificulta à escolha de um modelo que reproduza o mais fielmente a realidade.

A análise estatística se mostra como ferramenta útil à seleção da melhor predição. Neste trabalho, os dados obtidos em simulação para o grupo 7 que utilizou o método de engenharia combinado com o modelo de difusão sonora de Lamberts produziu resultados com desvios dentro dos limites de precisão preconizados pela NBR 12179 e ISO/3382-1.

A calibração estatística do Tempo de Reverberação permite que os modelos computacionais possam ser utilizados como ferramentas confiáveis para a investigação de parâmetros de mais difícil levantamento de campo como as frações laterais de energia sonora (LF) e decaimentos de pressão sonora por dobro de distância (DL2).

Finalmente, as possibilidades de predição acústica dos programas de computador podem servir à análise de soluções de projeto de salas que proporcionem boas condições para fala e para música.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179** Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992.
- BORK, I. A comparison of room simulation software — The 2nd round robin on room acoustical computer simulation. **Acustica united with Acta Acustica**, v. 86, p. 943-956, 2000.
- BORK, I. Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation – part I: Measurements. **Acustica united with Acta Acustica**, v. 91, p. 740-752, 2005.
- BORK, I. Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation – part II: Calculations. **Acustica united with Acta Acustica**, v. 91, p. 753-763, 2005.
- BRADLEY, D. T.; WANG, L. M. Comparison of measured and computer-modeled objective parameters for an existing coupled volume concert hall. **Building Acoustics**, v. 14, n. 2, p.79-90, 2007.
- BRADLEY, J.S. Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls. **Acoustic, Science and Technology**, v. 26, n. 2, p. 170-178, 2005.
- BRÜEL & KJAER SOUND & VIBRATION MEASUREMENT A/S, **Dirac Room Acoustic Software Type 7841 for Windows. Version 3.0, Instruction Manual**, Brüel & Kjaer Sound & Vibration A/S, Nærum outubro, 2003.
- CIRILLO, E.; MARTELOTTA, F. **Worship, acoustics, and architecture**. Essex: Multi-Science Publishing Company LTD, 2006.
- CRISTENSEN, C.L. Odeon Room Acoustics Program User Manual Version 7.0, p. 1-86 2003.
- EYRING, C. F. Reverberation time in “dead” rooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 1, n. 2, jan. 1930.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/DIS 3382-1** Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance rooms. Genebra, 2006.
- JEON, J. Y.; LEE, S. C.; VORLÄNDER, M. Development of scattering surfaces for concert halls. **Applied Acoustics**, v. 65, p. 341-355, 2004.
- KNUDSEN, V.O.; HARRIS, C.M. **Acoustical design in architecture**. Acoustical Society of America, 5ª edição, 1978.
- LONG, M. **Architectural acoustics**. New York: Elsevier Academic Press, 2006.
- MOMMERTZ, E, Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces. **Applied Acoustics**, v.60, p 201-203, 2000.
- NAYLOR, G.; RINDEL, J. H. Predicting room acoustical behavior with the odeon computer model. In: 124th ASA meeting, 1992, New Orleans, **Paper 3aAA3**, New Orleans, nov. 1992.
- NEMETSCHKE NORTH AMERICA, VectorWorks for Windows. Version 11.5: Nemetschek NA, 2005. 1 CD-ROM.
- ODEON A/S, Odeon for Windows. Version 7.01: Odeon A/S, 2005, 1 CD-ROM.
- RINDEL, J. H., The use of computer modeling in room acoustics. **Journal of Vibroengineering**, v. 3, n. 4, p. 219-224, index 41-72, Paper of the International Conference BALTIC-ACOUSTIC 2000, 2000.

- VORLÄNDER, M. International round robin on room acoustical computer simulations. In: 5th International Congress on Acoustics – ICA95, 1995, Trondheim, p. 689-692.
- VORLÄNDER, M. Simulation of the transient and Steady State sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 86, n. 1, p. 172-178, jul. 1989.
- VORLÄNDER, M.; MOMMERTZ, E. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. **Applied Acoustics**, v. 60, p. 187-199, 2000.
- ZANNIN, P. H. T.; PASSERO, C. R. M.; SANT'ANA, D. Q. **Acoustic Design of Enclosed Spaces**. In: BRINKERHOFF, B. N. (Editor). Ergonomics: Design, Integration and Implementation. Nova Science, [2009]. (In press/ https://www.novapublishers.com/catalog/products_new.php).
- Zeng, X.; Christensen, C.L.; Rindel, J.H. Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model. **Applied Acoustics**, v. 67, p. 771-786, 2006.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ pelo apoio financeiro que permitiu a elaboração deste projeto.