



paper ID: A021 /p.1

## Análise da Qualidade Acústica de uma Igreja por Comparação entre Métodos de Medição e Simulação Computacional

B.C.D. Araújo<sup>1</sup>, M.L. Belderrain<sup>2</sup>, T.H.L. Palazzo<sup>3</sup> & S.R. Bistafa<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> FAU-USP, Pós-graduação em Tecnologia da Arquitetura  
01240-001, São Paulo, SP, Brasil, [dantasbianca@gmail.com](mailto:dantasbianca@gmail.com), [mlacustica@hotmail.com](mailto:mlacustica@hotmail.com),  
[thaispalazzo@yahoo.com.br](mailto:thaispalazzo@yahoo.com.br)

<sup>4</sup>POLI-USP, Faculdade de Engenharia Mecânica, São Paulo, SP, Brasil, [sbistafa@usp.br](mailto:sbistafa@usp.br)

**RESUMO:** A qualidade acústica das salas tem por objetivo otimizar a geração e recepção de informações, visando o uso a que são destinadas. Os requisitos para se alcançar uma boa qualidade sonora estão diretamente relacionados a geometria do local e suas dimensões, características das superfícies internas e materiais de acabamento, entre outras. O presente trabalho pretende avaliar a qualidade acústica de uma igreja, a partir dos parâmetros objetivos e subjetivos de análise, obtidos a partir do software de medições AURORA e da simulação computacional no software CATT-ACOUSTICS. O trabalho analisa cinco parâmetros acústicos: tempo de reverberação (T30), “early decay time” (EDT), tempo central (Ts), clareza (C80) e definição (D50). Os resultados obtidos mostram variação entre as análises feitas pelos programas de medição e de simulação. São discutidas as razões para tais divergências e conclui-se que a igreja em questão não corresponde ao propósito para o qual foi idealizada, do ponto de vista acústico, uma vez que todos os parâmetros de qualificação indicam baixa inteligibilidade da fala.

**KEYWORDS:** Acústica de salas, Parâmetros acústicos, Simulação

## 1. INTRODUÇÃO

Os esforços técnicos para reduzir o nível de ruído num dado local procedente de um recinto contíguo exterior, ou deste local para os recintos adjacentes, constituem o que se convencionou chamar de “acústica destrutiva”. Já a “acústica construtiva” seria aquela com os esforços dirigidos a aperfeiçoar os níveis sonoros que se deseja conceber num local com um mínimo de interferência [1].

Referindo-se a esta “acústica construtiva”, o aperfeiçoamento acústico define as condições sonoras internas nos recintos, que se baseiam no objetivo fundamental de se conseguir otimizar a geração e recepção de informações, ou seja a comunicação. Os recintos referidos são aqueles em que o comportamento do som é definido pelo uso destinado ao espaço, e são comumente denominados salas.

Os requisitos exigidos a um recinto para se conseguir uma qualidade acústica satisfatória variam segundo o uso a que é estabelecido. Alguns destes requisitos estão diretamente relacionados com a geometria do local, outros com suas dimensões, características das superfícies interiores, e até com a implantação do recinto dentro do edifício e deste em relação à outra área exterior.

Cada sala exige critérios e condições particulares tanto para a comunicação como para o conforto acústico [1]. Os critérios gerais de definição de acústica de salas estabelecem a qualidade sonora das mesmas, como o tempo de reverberação, por exemplo, porém são especificados em relação ao seu uso. Podem ser critérios objetivos e subjetivos, estando sempre relacionados entre eles e o uso a que se referem, conforme mencionado.

O tempo de reverberação era o único parâmetro acústico que relacionava o fenômeno físico com as impressões produzidas nas pessoas. Hoje, parâmetros diferentes podem relacionar o comportamento físico da sala com diferentes tipos de sensações auditivas. Essas sensações podem ser descritas como, por exemplo: intensidade, impressão espacial, clareza, brilho, presença, dentre outros [2].

A garantia de níveis de ruído compatível com as atividades humanas tem sido a principal componente do conforto acústico em ambientes. No entanto, a acústica arquitetônica vem se desenvolvendo no sentido de propiciar algo mais aos usuários de ambientes diversos – a qualidade sonora.

“Entende-se por qualidade sonora, um conjunto de atributos acústicos subjetivos que venham de encontro às expectativas da experiência acústica do ouvinte. Conscientemente ou não, a expectativa do usuário de uma sala de conferências, é que esta propicie condições acústicas para uma adequada inteligibilidade da fala. Isto irá requerer baixos níveis de ruído com certeza, porém algo mais é necessário para a adequada comunicação oral neste ambiente.” [3]

Para cada finalidade da sala, há atributos acústicos subjetivos que devem ser atendidos. Diferentemente da sala onde o uso é a palavra falada, ou seja, uma sala de conferência, onde a reverberação deve ser reduzida, numa sala destinada à música, certa reverberação é necessária, no sentido de garantir a experiência acústica que o ouvinte espera ao escutar música [3].

Os atributos não se encontram ainda totalmente definidos para a maioria das salas de audição crítica, sendo muitos dos existentes, alvo de considerável debate e controvérsia, e por este motivo objeto de pesquisa e desenvolvimento. Os atributos de uma sala de conferências são diferentes daqueles de uma sala destinada à música; envolvem muitas vezes várias

dimensões subjetivas. Na sala destinada à música, um atributo subjetivo relevante é sentir-se “envolvido” pela música – uma outra dimensão subjetiva [3].

Para tanto, é necessário dispor-se de um índice que quantifique objetivamente esta impressão subjetiva. Neste sentido, existem alguns índices mensuráveis que se correlacionam com algumas das dimensões subjetivas, que são os parâmetros objetivos, ainda, também, sujeitos a discussões e pesquisas.

De forma a contribuir com o contexto apresentado, o presente trabalho busca avaliar, por métodos de medições e simulações, a qualidade acústica de uma sala com audição crítica, no caso uma igreja, a partir da interpretação e registro de parâmetros sonoros subjetivos e objetivos, com vistas a adequação do espaço ao uso concebido; além de permitir uma comparação dos métodos propostos para análise.

## 2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 2.1 Características gerais da edificação

A sala selecionada é uma Igreja Luterana – Igreja da Paz, localizada na Rua Verbo Divino, 392, Granja Julieta, São Paulo/SP. O uso predominante é para a palavra falada (cultos) e, eventualmente, música (apresentações de corais e orquestra de câmara); possui uma área em planta de 250 m<sup>2</sup> e um pé-direito médio de 9,0 m perfazendo um volume aproximado de 2.250 m<sup>3</sup>. A forma hexagonal da planta da edificação possui como programa de necessidades um altar, platéia e balcão. Os acessos são: entrada principal pela parede da frente; acesso alternativo pela parede lateral esquerda; acesso ao balcão por escada estruturada em parte da parede lateral esquerda.

As superfícies são constituídas por piso altar em mármore; piso platéia em granito; escada em mármore; piso balcão em madeira (taco); paredes em alvenaria rebocada e pintada; janelas em vitrais; portas e bancos em madeira; teto abobadado em laje maciça pintada. (Figuras 1 e 2).

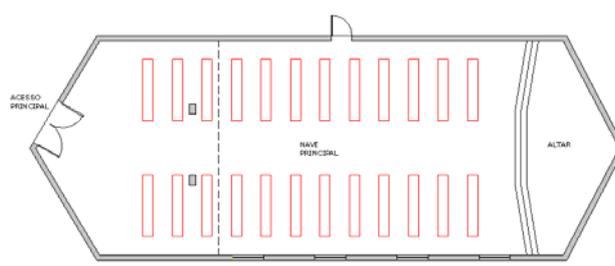


Figura 1: Planta Baixa da Igreja analisada

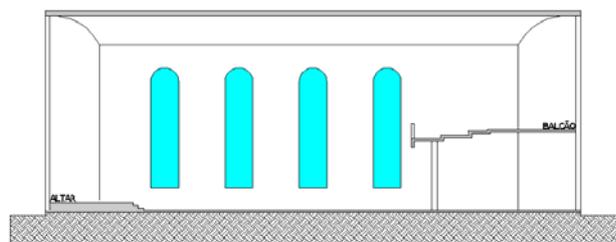


Figura 2: Corte esquemático da igreja analisada

## 2.2 Medições dos parâmetros acústicos

O princípio das medições é identificar os parâmetros objetivos de qualidade acústica da sala real, a partir da Resposta Impulsiva (RI). As medições foram viabilizadas com o uso do software *Aurora*, desenvolvido pelo professor Angelo Farina (Itália). A obtenção da Resposta Impulsiva (RI) foi realizada a partir de três sinais: Balão estourando; Multi MLS Signal; Sine Sweep (estes dois últimos emitidos pelo próprio programa de medição). A fonte sonora foi posicionada no centro do altar e a captação dos sinais foi feita em três locais da Igreja: na frente da audiência (P1), no fundo da audiência (P2) e no balcão (P3), conforme Figura 3.

Os sinais foram emitidos e captados com tréplica, ou seja, em cada ponto três vezes, e a partir daí retirada a média aritmética dos valores dos parâmetros objetivos da resposta impulsiva encontrada. Foi um total de 27 medições (9 para cada ponto).

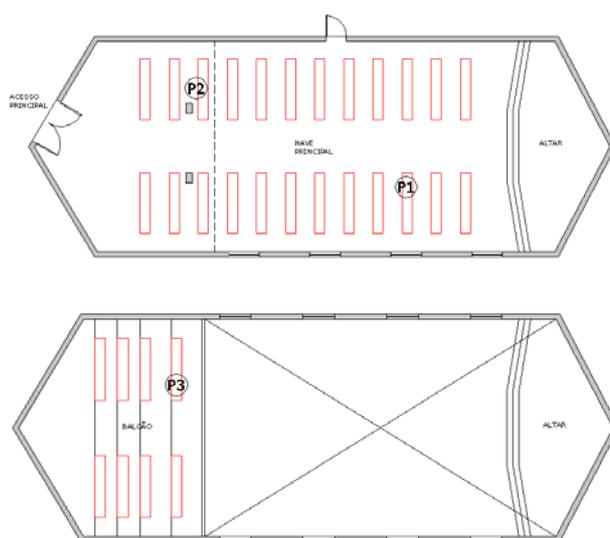


Figura 3: *Planta baixa da igreja analisada com destaque para localização dos pontos de medição*

Os equipamentos e materiais utilizados nas medições foram:

- Computador portátil (Sager 2850);
- Microfone sem fio (Gemini UHF 1610);
- Caixa de som (SP 5000);
- Potência (Crown 460 CSL);
- Pré-amplificador (Gemini PH 700);
- Cabos de conexão;
- Tripé RMW para caixa PA;
- Softwares: Adobe Audition; Aurora; Excel;*
- Balões de festa (bexigas).

As medições refletem a condição de “sala vazia” ou sem público. Os dados obtidos com o sinal MLS (maximum length sequence) apresentaram distorções, provavelmente em função do *hardware* utilizado, o qual não estava otimizado para este tipo de sinal de excitação.

Com relação às medições executadas com estouro de balão, observou-se muita discrepância entre algumas frequências, em certos parâmetros. Por esse motivo, na análise dos

resultados, optou-se por desconsiderar tanto as avaliações realizadas com o sinal MLS, como com o estouro de balão. Esse procedimento procurou aumentar a confiabilidade nos valores dos parâmetros em geral.

### 2.3 Simulações sonoras

As simulações do desempenho acústico da Igreja analisada foram desenvolvidas no *software Catt-Acoustics*. Foi necessário adequar o modelo geométrico 3D (sistema *Autocad*), de modo a definir todas as superfícies como planos formados por pontos no sistema ortogonal. O trabalho gráfico exigiu que os planos ficassem totalmente fechados, tornando o modelo da igreja estanque ou sem vazamentos.

Após essa etapa foi preciso fornecer ao software informações a respeito dos materiais de acabamento das superfícies (descritos anteriormente), através de coeficientes de absorção sonora e coeficientes de difusão sonora, nas frequências de 125 Hz a 4 kHz, disponíveis na literatura. A variação desses coeficientes tem o intuito de “calibrar” o modelo, de modo a se obter resultados mais próximos da realidade.

O arquivo *master.geo* sintetiza todos esses dados, enquanto os arquivos *source* e *receiver* referem-se ao posicionamento da fonte sonora (centro do altar) e dos receptores (pontos P1, P2 e P3).

## 3. ANÁLISE DA QUALIDADE ACÚSTICA

### 3.1 Escolha dos parâmetros

O software *Aurora* fornece inúmeros parâmetros acústicos que qualificam uma sala, tais como: tempos de reverberação (T20, T30, Tuser), “early decay time” (EDT), tempo central (Ts), definição (D50), clareza (C80), força (“strength”), etc.

A fim de comparar os mesmos parâmetros que também o software de simulação fornece, são apresentados cinco deles: T30 (s), EDT (s), C80 (dB), D50 (%) e Ts (s). A seguir são apresentadas as definições dos parâmetros selecionados, conforme Barron [4]. Tem-se:

- **T30 (s) – tempo de reverberação:** tempo que a energia acústica dentro de um recinto leva para decair 30 dB (usualmente de – 5 dB a – 35 dB), depois que a fonte sonora é cessada, multiplicado por dois. Ou seja, é o T60 extrapolado de uma porção da curva de decaimento da sala. Os valores de T60 para salas destinadas à fala variam entre 0,8 e 1,2 s.
- **EDT (s) – “early decay time”** ou tempo do decaimento inicial, é uma medida da taxa de decaimento sonoro, baseada na primeira porção de 10 dB do decaimento. Em espaços altamente difusos, onde o decaimento é linear, as duas quantidades: EDT e T60 tendem a ser coincidentes. O parâmetro EDT mostra ser mais bem relacionado à sensação subjetiva de reverberação, do que o próprio T60 (Schroeder, 1965).
- **C80 (dB) ou clareza objetiva** está relacionada ao equilíbrio entre a clareza percebida e a reverberância, o que é particularmente delicado no caso de audição musical. Corresponde à razão entre a energia que chega ao ouvinte até os primeiros 80 ms e a energia total, expressa em dB. Este parâmetro está associado à clareza com que se percebe as nuances das passagens musicais curtas. Recomendam-se valores de clareza objetiva compreendidos entre  $-3 < C80 < 0$ .

- D50 (%) ou definição está diretamente relacionada à inteligibilidade da fala. Corresponde à razão entre a energia que chega até os primeiros 50 ms e a energia total, expressa em porcentagem. Assim, D50 é sempre um número entre 0,0 e 1,0. D50 > 70% representa uma inteligibilidade da fala de 95%.
- Ts (s) ou tempo central representa o centro de gravidade da área da resposta impulsiva integrada [próxima a um triângulo, no gráfico: nível de pressão sonora (dB) x tempo (ms)]. O tempo central indicado para salas destinadas à palavra falada é em torno de 70 ms.

### 3.2 Valores obtidos com os softwares *Aurora* e *Catt-Acoustics*.

As médias obtidas em cada ponto, para cada parâmetro, relativas aos resultados do *Aurora* e do *Catt-Acoustics*, comparados aos valores ideais relativos à sala (lembrando que seu uso principal é para a palavra falada) estão registradas nas tabelas 1 e 2. Os resultados obtidos são bem distintos em cada ponto, devido às suas diferentes localizações, principalmente em relação à fonte sonora, a qual não é onidirecional.

Tabela 1: *Valores obtidos no AURORA x critérios de qualidade*

Param	V. Ideal	P1	Comp	P2	Comp	P3	Comp
T30 (s)	1,0 s	2,87	>>	2,85	>>	2,66	>>
EDT (s)	1,0 s	3,42	>>	3,26	>>	3,09	>>
C80 (dB)	-3 a 0 dB	- 4,2	<	- 7,0	<<	- 5,2	<
D50 (%)	70%	17,7	<<	8,2	<<	7,8	<<
Ts (s)	70 ms	246,5	>>	251,1	>>	260,6	>>

A Tabela 1 mostra que todos os parâmetros T30, EDT, C80, D50 e Ts medidos in situ com o sistema *Aurora* não são adequados ao uso da sala, demonstrando que a Igreja em questão é muito reverberante, o que implica na baixa inteligibilidade da fala e na falta de clareza para a música. Entre os pontos analisados, o ponto P1 – localizado na parte frontal da igreja – apresenta condições acústicas um pouco melhores do que os pontos P2 e P3, em função da proximidade em relação à fonte sonora.

A Tabela 2 revela que os valores dos parâmetros T30, EDT, D50 e Ts obtidos com o software de simulação acústica de salas *Catt-Acoustics*, também não atendem ao uso destinado à sala, apesar dos valores de C80 (dB) clareza – estarem dentro da faixa recomendada.

Tabela 2: *Valores obtidos no CATT-ACOUSTICS x critérios de qualidade*

Param	V. Ideal	P1	Comp	P2	Comp	P3	Comp
T30 (s)	1,0 s	2,78	>>	3,08	>>	3,08	>>
EDT (s)	1,0 s	3,07	>>	2,97	>>	2,92	>>
C80 (dB)	-3 a 0 dB	- 0,8	ok	- 1,4	ok	- 2,1	ok
D50 (%)	70%	34,6	<	30,5	<	26,0	<
Ts (s)	70 ms	175,1	>>	193,2	>>	197,2	>>

De uma forma geral, as ordens de grandezas dos valores encontrados foram coerentes nos dois métodos utilizados, no entanto, pode-se perceber que há um distanciamento bastante grande entre os valores dos parâmetros medidos e simulados.

A fim de permitir a comparação direta entre os valores medidos e simulados, os gráficos de cada parâmetro são apresentados com os valores médios dos seguintes parâmetros analisados: T30, EDT, C80, D50 e Ts; com os resultados do *Aurora* e do *Catt-Acoustics* para os pontos P1, P2 e P3 (Figuras 4 a 8).

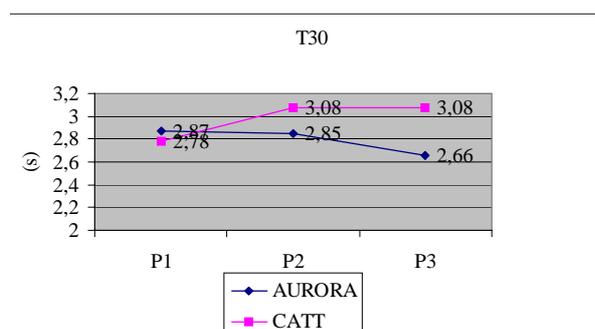


Figura 4: Valores de T30 medidos e simulados.

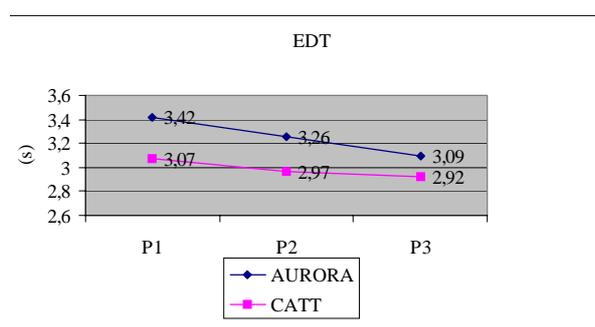


Figura 5: Valores de EDT medidos e simulados

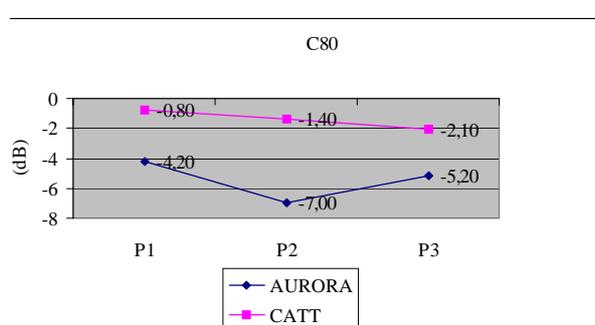


Figura 6: Valores de C80 medidos e simulados.

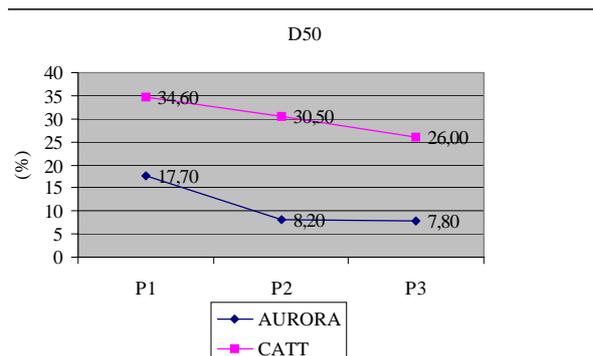


Figura 7: Valores de D50 medidos e simulados.

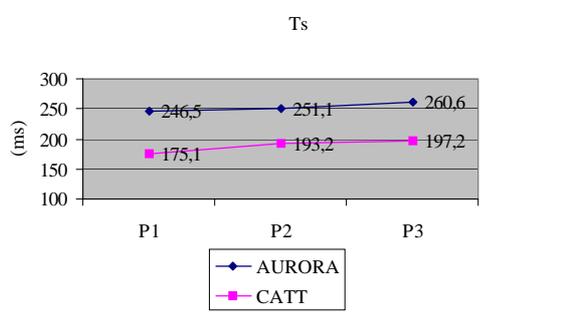


Figura 8: Valores de Ts medidos e simulados.

Observam-se nas Figuras 1-8 grandes discrepâncias entre os valores medidos e simulados. Acredita-se que tais discrepâncias possam ser reduzidas após uma maior experiência com a utilização do programa de simulação *Catt-Acoustics*. Adicionalmente, há sempre uma incerteza na seleção dos coeficientes de espalhamento e de absorção das superfícies da sala, o que requer um processo de ‘calibração’ tendo por base as medições in situ, a fim de que os resultados da simulação na fase de projeto de uma nova sala apresentem uma maior confiabilidade.

#### 4. CONCLUSÕES

A análise da qualidade acústica da Igreja da Paz, feita através de medições acústicas in situ, com o uso do software *Aurora* e também da simulação computacional, com o uso do software *Catt-Acoustics*, apresentaram conclusões esperadas, quando confirmaram tanto a percepção subjetiva tida “in loco” pelos autores, quanto à opinião emitida pelo pastor da referida Igreja, de que a mesma não é apropriada à fala (pregação), por ser muito reverberante, mesmo com público.

Apesar de ter sido realizado o estudo da sala vazia, os valores identificados do tempo de reverberação estão muito superiores ao ideal para fala, constatando-se que mesmo a presença de pessoas não é capaz de reduzir o tempo de reverberação em um valor máximo tolerado de 1,66 s, considerando o menor valor de T30 (2,66 s) encontrado independente do método.

Outro resultado desfavorável constatado foi a acentuada discrepância entre os valores medidos e simulados. Acredita-se que estas se devem aos seguintes fatores:

- Imprecisão na definição dos coeficientes de difusão sonora e, em menor escala, dos coeficientes de absorção sonora das superfícies da sala, na simulação;
- Necessidade de simplificação do modelo geométrico 3D da sala, para a simulação computacional, distanciando-o do modelo real;
- Realização das medições e simulação com a sala vazia, o que realça a condição reverberante do espaço (pode-se supor que na presença de audiência, parcial ou completa, devido à absorção oferecida pelo público, a qualidade acústica da igreja seja um pouco melhorada).

Este trabalho ressalva a necessidade de mais estudos neste contexto, a fim de subsidiar a “apuração”, ou seja, a melhoria dos métodos utilizados para simulação de salas de audição crítica, além de revisão e adaptação das normas existentes, e criação de outras mais específicas.

Em função do distanciamento dos valores obtidos em relação aos valores ideais, para os cinco parâmetros pesquisados, nos dois métodos analisados, indica-se a necessidade de correção acústica à sala considerada, Igreja Luterana da Paz.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sancho, V.M., Sencherms, A.G. (1982). Curso de Acustica en Arquitectura. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid, 1982.
- [2] Gerges, S.N.Y. (1992). Ruído: Fundamentos e Controle, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. 1ª Edição, Florianópolis.
- [3] Bistafa, S.R. (2005). Acústica Arquitetônica: Qualidade Sonora em Salas de Audição Crítica. Descrição detalhada. Acesso em out. 2005. Disponível em: [www.poli.usp.br/p/sylvio.bistafa/ACUSARQ](http://www.poli.usp.br/p/sylvio.bistafa/ACUSARQ)
- [4] Barron, M. (2000). Auditorium Acoustics and Architectural Design. E&FN SPON. 2000.