



ANÁLISE AMBIENTAL: ESTUDO ACÚSTICO DE SALAS – ESTUDO DE CASO DE UMA IGREJA

**Bianca Carla Dantas de Araújo (1); Maria Luiza Belderrain (2); Thaís Palazzo (3);
Sylvio Reynaldo Bistafa (4); Raissa Neves (5)**

FAUUSP, Pós-graduação em Tecnologia da Arquitetura, Rua Maranhão, 88 - São Paulo/SP

- (1) dantasbianca@gmail.com;
- (2) mlacustica@hotmail.com;
- (3) thaispalazzo@yahoo.com.br;
- (4) sbistafa@usp.br
- (5) raissa@sc.usp.br

RESUMO

As condições sonoras internas em salas se baseiam no objetivo fundamental de se conseguir otimizar a geração e recepção de informações, através da comunicação oral. Os requisitos exigidos a uma sala para se conseguir uma qualidade acústica satisfatória variam segundo o uso a que é destinada. Alguns destes requisitos estão diretamente relacionados com a geometria do local e suas dimensões, características das superfícies internas e materiais de acabamento, e também com o posicionamento da sala dentro do edifício. Cada sala exige critérios e condições particulares tanto para a comunicação como para o conforto acústico. Uma igreja, por exemplo, com o seu uso dirigido à palavra falada, deve apresentar condições acústicas que propiciem a inteligibilidade e a clareza, ou sua atividade principal será prejudicada. Desta forma, 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. Foram obtidos parâmetros objetivos de qualidade acústica, que são embasados em parâmetros subjetivos correspondentes, como o *Early Decay Time* (EDT) em relação ao Tempo de Reverberação (TR), por exemplo, o qual forneceu respostas não satisfatórias para o uso da palavra falada no ambiente. A inteligibilidade da fala mostrou-se muito baixa e, conseqüentemente, a atividade do espaço construído não corresponde ao propósito para o qual foi construído.

Palavras-chave: Acústica de salas, técnicas de medições, modelagem computacional, simulação.

ABSTRACT

Internal acoustics conditions in rooms are based on in the fundamental objective to get optimized the generation and reception of information, through oral communication. The requirements of a room to have a good acoustic are relate with its geometry, dimensions, characteristics of the internal surfaces and its finish materials, and also the place of the room in the build. Each room needs particular conditions to oral communication and also to acoustics comfort. A church for example, with its use to oral communication, has to show good acoustics conditions to intelligibility and clarity, or this principal activity will be damage. In this way, this research pretends to evaluate the acoustic quality of a church with some objective and subjective analysis parameters, got from a measure software – AURORA, and computational simulation software – CATT ACOUSTICS. To oral communication there were no satisfactory responses in the place analyzed, for example, the intelligibility were very low.

Keywords: Acústica de salas, técnicas de medições, modelagem computacional, simulação.

1. INTRODUÇÃO

Os esforços técnicos para reduzir o nível de ruído em um 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 com um mínimo de interferência (SANCHO, 1982).

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 (SANCHO, 1982). 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.

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 (GERGES, 2000).

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.” (BISTAFA, 2005, p. 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 (BISTAFA, 2005).

Para cada tipo de ambiente de audição crítica existem atributos acústicos subjetivos característicos. Estes 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 (BISTAFA, 2005).

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 sujeitos a discussões e pesquisas.

De forma a contribuir com o contexto acima descrito, 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 ao uso do espaço concebido.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Como procedimentos metodológicos da investigação desenvolvida foram realizadas duas etapas de análise: medições e simulações dos parâmetros acústicos da sala selecionada – uma igreja – de forma a avaliar o seu desempenho sonoro frente ao uso a que é submetida. A seguir serão descritos os materiais e métodos utilizados em cada etapa.

2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA EDIFICAÇÃO

A sala selecionada é uma Igreja Luterana – Igreja da Paz, localizada na R. Verbo Divino, Granja Julieta, São Paulo/SP. O uso predominante é para palavra falada (cultos de domingo) e música (apresentações de corais e orquestra de câmara); possui uma área em planta de 250,00 m² e um pé-direito médio de 9,00 m perfazendo um volume aproximado de 2.250,00 m³. 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.

A configuração espacial dos ambientes e das superfícies é constituída de altar em piso elevado com acesso por degraus; platéia em piso plano; balcão em piso escalonado com degraus; 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 em madeira; bancos em madeira; divisória na parede lateral esquerda (próxima ao altar) em madeira; teto abobadado em laje maciça pintada. (Figuras 01 a 06).

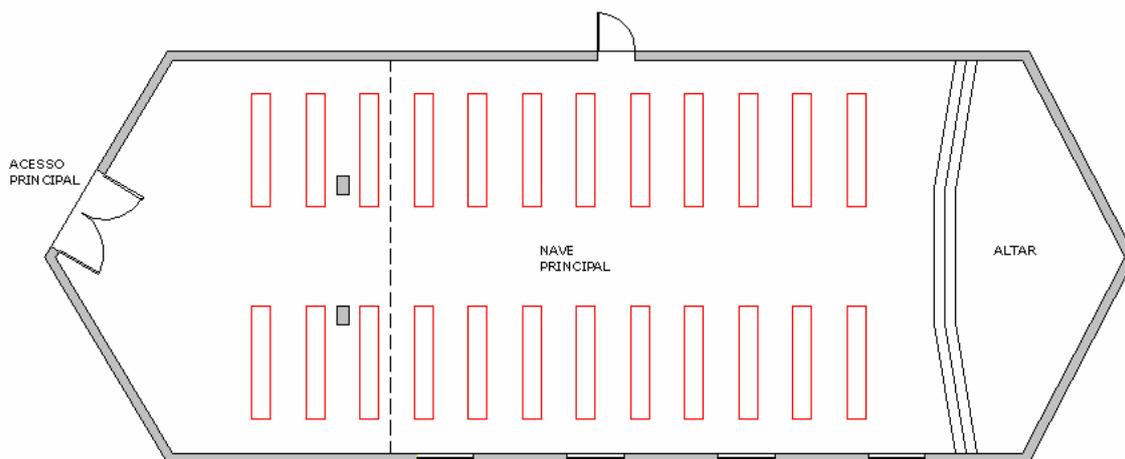


Figura 01 – Planta baixa da Igreja

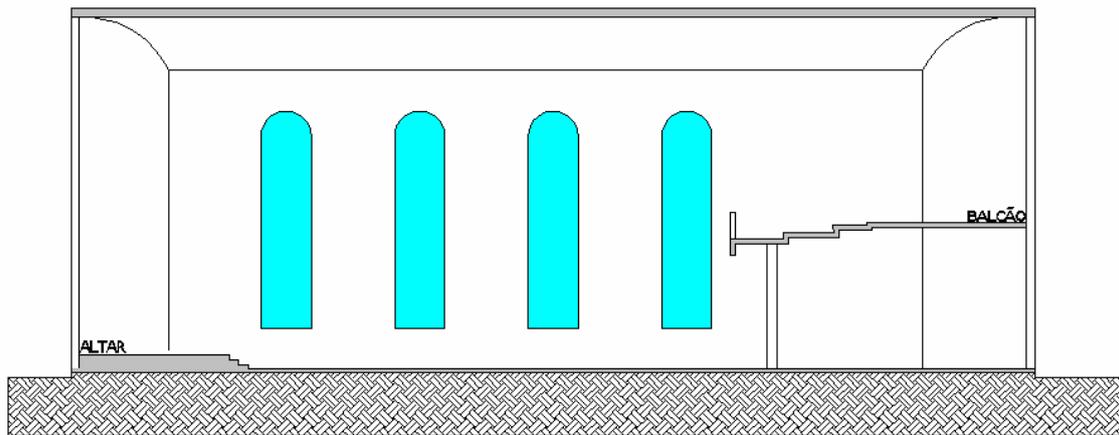


Figura 02 – Corte Longitudinal da Igreja



Figura 03 – Foto da fachada principal (entrada) da Igreja

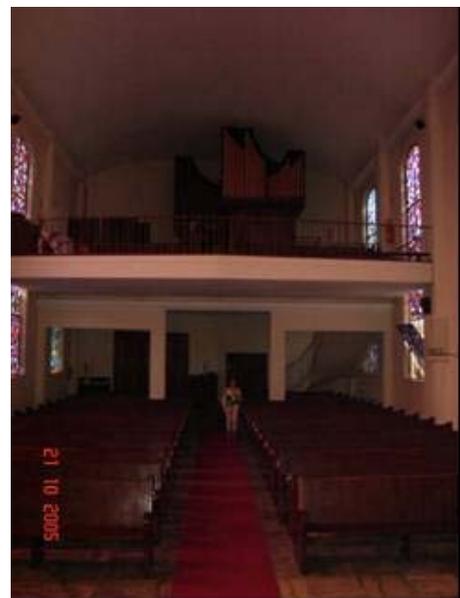


Figura 04 – Foto da igreja internamente – visão do altar



Figura 05 – Foto da visão da platéia



Figura 06 – Foto da visão do balcão

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 prof. Angelo Farina (Itália). A obtenção da Resposta Impulsiva (RI) foi realizada a partir de três sinais: Balão estourando (realizado *in-loco*); 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, no fundo da audiência e no balcão (Figura 07).

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. Foram um total de 27 medições (sendo 9 para cada ponto). As denominações para as rotinas seguiram a seguinte nomenclatura:

- Tipo de sinal
 - Estouro do balão – E
 - MLS sinal – M
 - Sine Sweep sinal – S

- Ponto de medição
 - Ponto de medição na platéia próximo ao altar – P1
 - Ponto de medição no meio da platéia – P2
 - Ponto de medição no fundo da platéia – P3

- Seqüência de medições
 - Primeira medição de cada sinal – a
 - Segunda medição de cada sinal – b
 - Terceira medição de cada sinal – c
 - Média das medições - m

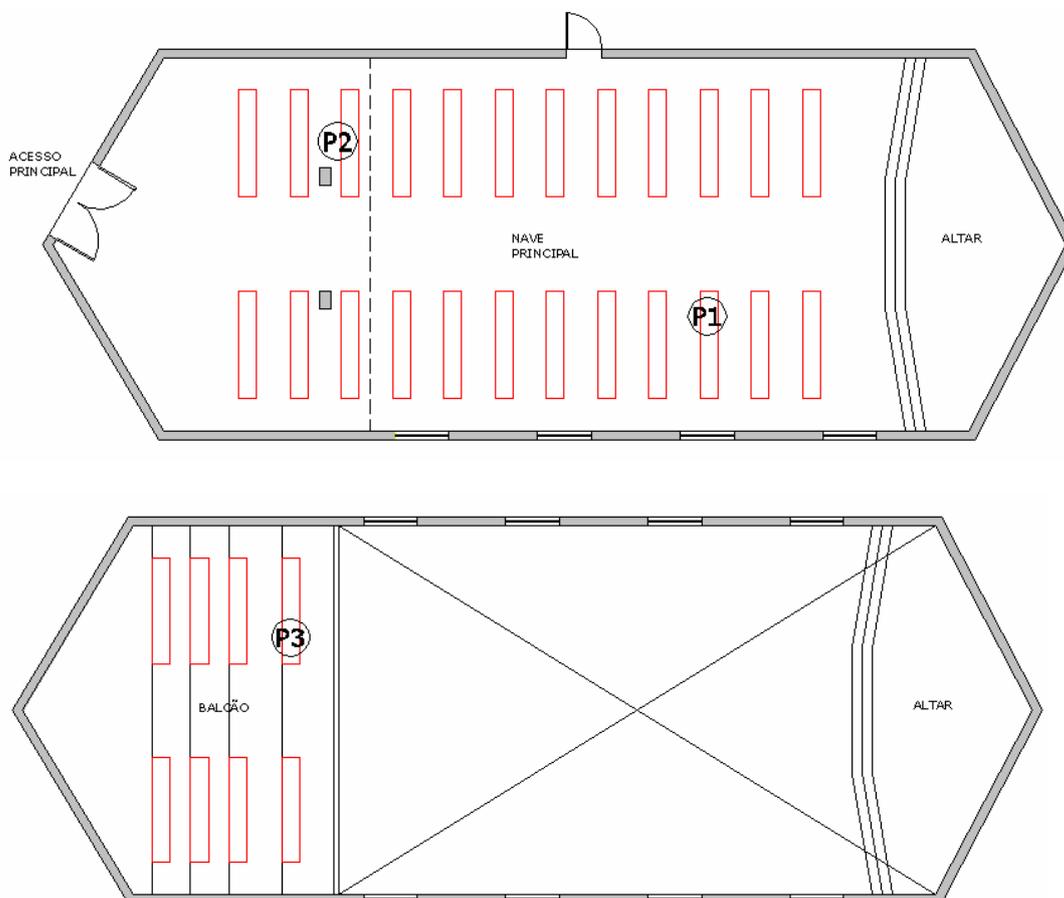


Figura 07 – Planta da Igreja com localização dos pontos de medição (P1, P2, P3)

Os equipamentos e materiais utilizados nas medições foram:

- Computador portátil (Sager 2850);
- Microfone sem fio (Gemini UHF 1610);
- Caixa de som (SP 5000 – 2 vias mono amplificada com woofer de 15” e corneta de titânio 12”);
- Potência (Crown 460 CSL);
- Pré-amplificador (Gemini PH 700)
- Cabos de conexão;
- Tripé RMW para caixa PA
- *Softwares: Adobe Audition; Aurora; Excel;*
- Aproximadamente 10 balões de festa.

O sucesso das medições para obtenção da Resposta Impulsiva está diretamente relacionado à escolha do instrumental, que deve ser capaz de produzir uma relação sinal / ruído favorável. Por esse motivo, além da caixa acústica ser potente é preciso que o ruído de fundo seja baixo. Nesse sentido, o horário escolhido para as medições foi um dia de semana à tarde, sem atividade na igreja. Assim, os resultados refletem a condição de “sala vazia” ou sem público.

Apesar das medições seguirem uma rotina pré determinada, deve-se observar que os dados obtidos com o sinal MLS (maximum length sequence) apresentaram distorções, em função da igreja em questão ser muito reverberante (devido às suas superfícies lisas), o que foi agravado pela condição de ambiente vazio. Na realidade, o programa utiliza como dado de entrada um parâmetro relacionado à reverberação da sala: quando esse parâmetro não está adequado, os resultados ficam imprecisos.

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 desprezar tanto as avaliações realizadas com o sinal MLS, como com o estouro de balão. Acreditamos que esse procedimento - utilizar apenas os resultados obtidos com o sinal “sine sweep” - aumenta a confiabilidade nos valores dos parâmetros em geral.

Após a realização das medições os dados mensurados foram salvos no aplicativo *Excel*, e em seguida tratados em forma de gráficos e tabelas, que serão apresentados na análise desenvolvida dos parâmetros acústicos em item a seguir.

2.3 SIMULAÇÕES SONORAS

As simulações do desempenho acústico da igreja analisada foram desenvolvidas no *software Catt-Acoustics*, a partir da implantação do modelo virtual no programa para processamento dos dados e características do local.

Para modelagem do projeto foi necessária uma rotina de adequação do modelo geométrico 3 D construído no software *Autocad*, de modo a definir todas as superfícies que compõem a igreja – no caso, pisos, paredes, vitrais, portas, balcão, audiência e cobertura – através de planos formados por pontos previamente identificados, a partir de um sistema de eixos ortogonais.

Nesta etapa da modelagem, o trabalho gráfico é minucioso e exige muita atenção, para que os planos fiquem totalmente fechados e o modelo da igreja - como um todo – seja estanque, quer dizer, sem vazamentos.

O próprio *Catt-Acoustics* gera um arquivo que contém todas as informações pertinentes ao modelo geométrico, inclusive apontando possíveis erros na definição dos planos (o que levaria a incongruências ou vazamentos). Após a correção e adequação geométrica do modelo, é preciso fornecer ao software informações a respeito dos materiais de acabamento das superfícies.

Tais dados ficam sintetizados e tabelados na forma de coeficientes de absorção sonora e coeficientes de difusão sonora, para cada superfície, nas frequências de 125 Hz a 4 kHz. A variação desses coeficientes permite “calibrar” o modelo, de modo a se obter resultados mais próximos da realidade.

Todas as informações da geometria e das características técnicas dos materiais de acabamento da sala são armazenadas no arquivo master.geo. Além desse arquivo, o software trabalha com mais dois arquivos: um referente ao posicionamento da fonte sonora e outro referente ao posicionamento dos receptores.

A fim de possibilitar a comparação entre os parâmetros obtidos pelo *Aurora* e pelo *Catt-Acoustics*, mantivemos os receptores nos 3 locais previamente definidos: frente da audiência, fundo da audiência e balcão. Também a fonte foi posicionada no centro do altar.

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”, tempo central (Ts), definição (D50), clareza (C80), força (“strength”), etc. A fim de comparar os mesmos parâmetros que também o software de simulação fornece, serão apresentados cinco deles: T30 (s), EDT (s), C80 (dB), D50 (%) e Ts (s). A seguir apresentamos as definições dos parâmetros acima, conforme BARRON, 2000. Temos:

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. O parâmetro mais conhecido é o T60, correspondente ao decaimento sonoro dentro de um recinto para a energia diminuir 60 dB, o qual foi desenvolvido por SABINE, 1922 através da relação inversamente proporcional entre o volume da sala (m³) e a quantidade de absorção total da sala (m².sabin). Os valores de tempo de reverberação 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, expressa do mesmo modo que o tempo de reverberação, baseada na primeira porção de 10 dB do decaimento. Em espaços altamente difusos, onde o decaimento é completamente linear, as duas quantidades: EDT e T60 (tempo de reverberação para um decaimento de 60 dB) serão idênticas. O parâmetro EDT mostrou ser melhor relacionado à sensação subjetiva de reverberação, do que o próprio tempo de reverberação (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. Pode ser expressa por:

$$C80 (dB) = 10 \log \frac{[\text{energia que chega antes de 80 ms do som direto}]}{[\text{energia que chega depois de 80 ms do som direto}]}$$

A energia que chega no intervalo de 80 ms do som direto inclui aquela do som direto e as reflexões iniciais. Este parâmetro tem equivalência direta com a fala. Os valores da clareza devem estar compreendidos entre $-3 < C80 < 0$; quanto mais próximo a zero, melhor.

D50 (%) ou definição está diretamente relacionada ao entendimento da fala. Corresponde à razão direta entre a energia que chega nos primeiros 50 ms e a energia total. Assim, D50 é sempre um número entre 0 e 1,0. Por exemplo, $D50 > 70\%$ representa uma inteligibilidade de 95% da fala.

Ts (s) ou tempo central representa o centro de gravidade da área da resposta impulsiva integrada [equivalente a um triângulo, no gráfico: nível de pressão sonora (dB) x tempo (ms)]. O tempo central indicado para a fala corresponde a 70 ms.

3.2 VALORES OBTIDOS COM O SOFTWARE AURORA

Como já mencionado no item 2.2, selecionamos os resultados obtidos com o sinal “sine sweep”, por ser o que apresentou maior homogeneidade. Cada ponto receptor representa a média de três medições. É importante ter em mente que o receptor P1 está localizado na frente da audiência da Igreja, o receptor P2 nos fundos dessa audiência (embaixo do balcão) e o receptor P3 no piso do balcão, pois os resultados obtidos são bem diferenciados para cada ponto.

A tabela 1 a seguir apresenta todas as médias dos pontos P1, P2 e P3 para cada parâmetro, comparadas aos valores ideais dos mesmos, considerando que o uso primordial da Igreja da Paz é para a fala (comunicação oral).

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 analisados: T30, EDT, C80, D50 e Ts estão desfavoráveis, ou seja, a Igreja em questão é muito reverberante, o que implica na baixa inteligibilidade da fala e falta de clareza. 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.

3.2 RESULTADOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO NO CATT-ACOUSTICS

Os parâmetros apresentados são os mesmos daqueles selecionados da medição com o software Aurora.

A tabela 2 a seguir apresenta todas as médias dos pontos P1, P2 e P3 para cada parâmetro, comparadas aos valores ideais dos mesmos, considerando que o uso primordial da Igreja da Paz é para a fala (comunicação oral).

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	>>

A tabela 2 mostra que os parâmetros analisados: T30, EDT, D50 e Ts estão desfavoráveis; entretanto, os valores de C80 (dB) - clareza estão dentro da faixa ideal. Isso mostra que a relação entre a energia sonora inicial (até 80 ms) e a energia sonora tardia (após 80 ms) é boa. Observa-se ainda que os parâmetros D50 (%) – definição e Ts (s) – tempo central, apesar de fora dos valores recomendados, são melhores do que aqueles obtidos com o software de medição *Aurora*.

Outra constatação é a de que as curvas obtidas para os 3 pontos: P1, P2 e P3, na simulação acústica, são muito próximas entre si, com exceção do parâmetro T30. No caso do parâmetro EDT, as curvas são quase coincidentes. Esses resultados diferem bastante daqueles obtidos na medição, a qual não apresentou similaridade entre as curvas para os diversos pontos.

4. CONCLUSÕES

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

A condição reverberante da sala – em função da maioria das superfícies construtivas e de acabamento serem lisas – implica na deterioração da inteligibilidade da fala, ou seja, o local não está adequado acusticamente ao seu uso principal.

É preciso comentar que tanto as medições quanto a simulação foram feitas com o recinto vazio, o que agrava o problema da reverberação. Pode-se supor que na presença de audiência (parcial ou completa), devido à absorção oferecida pelo público, a qualidade acústica da igreja seja melhor.

De qualquer modo, em função do distanciamento dos valores obtidos em relação aos valores ideais, para os parâmetros pesquisados, indica-se a necessidade de correção acústica à sala considerada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BISTAFÁ, S. R. (2005). **Acústica Arquitetônica: Qualidade Sonora em Salas de Audição Crítica. Descrição detalhada.** Disponível em: www.poli.usp.br/p/sylvio.bistafa/ACUSARQ/ACUSARQ_CNPq.pdf . Acesso em: 25 out. 2005.

BARRON, M. (2000). **Auditorium Acoustics and Architectural Design.** E&FN SPON. 2000.

GERGES, S.H.Y. **Ruído: Fundamentos e Controle.** Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. 1ª Edição, Florianópolis, 1992.

SANCHO, V.M., SENCHERMES, A.G. **Curso de Acustica en Arquitectura.** Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid, 1982.