

## CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DAS IGREJAS BARROCAS DE OURO PRETO

**Marcelo Carvalho Bottazzini; Stelamaris Rolla Bertoli.**

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP.

13083-970, Campinas, SP – Brasil.

e-mail: ([marcelobottazzini@gmail.com](mailto:marcelobottazzini@gmail.com)), ([rolla@fec.unicamp.br](mailto:rolla@fec.unicamp.br)).

### RESUMO

O conforto acústico de um ambiente está relacionado com o propósito para o qual ele foi construído. A qualidade sonora de um auditório é formada por atributos acústicos subjetivos que proporcionam uma adequada inteligibilidade da fala. Um recinto destinado a práticas musicais deve possuir características que proporcionam uma sonoridade tal, que contribua com a música a ser executada. Com as mudanças litúrgicas ocorridas na igreja católica, nas últimas décadas, as celebrações desenvolvidas passaram a requerer não apenas qualidades acústicas para se entender a palavra falada, mas também para proporcionar uma boa audição musical. Várias reclamações sobre a inadequação desses espaços vêm sendo relatadas por padres e fieis. Tendo em vista as características arquitetônicas e a importância histórica das igrejas barrocas mineiras, somadas aos problemas acústicos relatados, um amplo projeto de pesquisa foi desenvolvido com o propósito de caracterizar a acústica destes edifícios. Parte dos resultados deste projeto é apresentado neste trabalho, analisando e discutindo os parâmetros acústicos e arquitetônicos de cinco igrejas barrocas, de Ouro Preto, a saber: Matriz de Nossa Senhora da Conceição, Matriz de Nossa Senhora do Pilar, Capela de Nossa Senhora do Monte do Carmo, Capela de Nossa Senhora do Rosário e Capela de São Francisco de Assis, todas com as mesmas características construtivas. Os parâmetros arquitetônicos analisados são: volume, formato, percentuais de talhas barrocas e percentuais de superfícies em madeira. A inteligibilidade foi analisada através do parâmetro STI. Os parâmetros acústicos tais como: clareza, definição, tempo de reverberação também foram analisados. Esses parâmetros foram obtidos através da técnica impulsiva, utilizando o programa de avaliação de salas Dirac da Bruel&Kjaer. Os resultados mostram que as características arquitetônicas destas igrejas exercem uma grande influência sobre suas qualidades acústicas.

Palavras chave: acústica de igrejas, inteligibilidade, STI, clareza, definição, tempo de reverberação.

### ABSTRACT

An environment acoustic confort is related to the purpose for which it was built. An auditorium sound quality is formed by subjective acoustic attributes that offer an adequate speech intelligibility quality. An area for music practice must have characteristics that provide such a sonority that contributes to the played music. With the liturgical changes that happened in the catholic church during the last decades the celebrations started requiring not only acoustic qualities to understand the spoken word, but also offer a good musical hearing. Several complaints about these places unsuitability have been reported by priests and followers. Taking under consideration the baroque Minas churches architectural characteristics and historical importance added to the acoustic problems reported a wide research project was developed with the purpose of featuring these buildings acoustic. Part of this research results is shown in this paper which analyses and discuss the acoustic and architectural parameters of five Ouro Preto baroque churches, they are: Nossa Senhora da Conceição church, Nossa Senhora do Pilar church, Nossa Senhora do Rosário chapel and São Francisco de Assis chapel. All of them with the same constructive characteristics. The architectural analysed are: volume, shape, percentile baroque cuts and wood surfaces percentile. The intelligibility quality was analysed using the STI parameter. Acoustic parameters like: clarity, definition and reverberation time were also analysed. These were obtained by means of the impulsive technique using Dirac rooms evaluation program by Bruel&Kjaer. Results show that theses churches architectural characteristics exercise a great influence over their acoustic qualities.

Keywords: churches acoustic, intelligibility, STI, clarity, definition, reverberation time.

## 1. INTRODUÇÃO

O conforto acústico em um ambiente depende da garantia de níveis de ruídos compatíveis com as condições humanas no desempenho de suas atividades. A qualidade sonora de uma sala de conferência é formada por uma série de atributos acústicos subjetivos que venham proporcionar uma adequada inteligibilidade da fala. Para que isso ocorra será preciso reduzir os níveis de ruído, além de fazer com que o ambiente não produza ecos, pois, sabe-se que a inteligibilidade da fala é deteriorada pelos ecos, para se evitar o mascaramento das palavras.

A reverberação pode ser entendida como uma série de ecos discretos distribuídos ao longo do tempo. Os ambientes destinados a conferências devem ter o seu tempo de reverberação reduzido. Entretanto, em um ambiente destinado a práticas musicais é aceitável que se tenha uma certa reverberação, que possa proporcionar uma sonoridade que venha a contribuir com a música que está sendo executada. Desta forma, pode-se observar que cada tipo de ambiente exige características distintas para atender a sua finalidade.

Com as mudanças promovidas pelo Concílio Vaticano II, como o uso da língua nacional, e a crescente participação dos fiéis nas celebrações, a igreja católica passou por várias modificações, tanto no que se refere à execução de músicas como na prática da oratória, que alteraram os costumes e conseqüentemente o uso destes ambientes. Com o surgimento de novos materiais construtivos e a necessária evolução dos projetos arquitetônicos com o objetivo de atender a esta nova realidade, as igrejas passaram a requerer atenção especial com relação as suas qualidades acústicas. Inúmeras reclamações têm sido relatadas por padre e fiéis sobre as condições de audibilidade destes espaços. Pois a maior dificuldade que se depara é que as igrejas são ambientes destinados à prática tanto da palavra falada quanto da música.

Foi por causa da exploração do ouro e do diamante, que a antiga Capitania das Minas Gerais adquiriu um aspecto muito particular e que foi moldando, com o passar do tempo, por meio das criações artísticas e arquitetônicas a vida social dos mineiros, principalmente as de caráter religioso. Nestas manifestações artísticas, ocorridas às margens das lavras e dos garimpos, resplandece o estilo que marcou o século XVIII em que a mineração atingiu seu ponto mais alto: o barroco-rococó trazido de Portugal e colocado em prática com pequenas adaptações próprias do local, na época, (MOURÃO, 1986).

As igrejas e capelas foram construídas pela iniciativa das irmandades religiosas em todo Estado de Minas Gerais, tais como: Irmandade do Santíssimo Sacramento e Venerável Ordem Terceira de São Francisco de Assis. As formações destas irmandades foram estimuladas pela coroa, com o objetivo de repassar ao povo as despesas com suas obras. Grande parte das construções destas igrejas ocorreu ao longo de um século. Eram de taipa, inicialmente cobertas de sapé, em forma de quadrado ou retângulo, cumeeira duas águas. Não tinha torre nem janelas. A obra iniciava pela construção de uma capela. Logo a seguir, ampliava-se a capela acrescentando o altar mor ao fundo e uma torre lateral ou central. Na seqüência, a edificação evoluía ganhando mais três partes, que são características fundamentais de tais construções: a nave, com o aumento de grandes paredes laterais, a capela mor e a sacristia, atrás do altar mor. Surgia então, os dois corredores laterais que levam à sacristia ou ao consistório. Finalmente retirava-se a primeira cobertura e construía-se uma nova parede frontal, surgia aí o nártex e o coro, cobria-se com um novo e grande telhado definitivo.

Tendo em vista as características arquitetônicas e a importância histórica representada pelas igrejas barrocas mineiras, somadas aos problemas acústicos relatados por padres e fiéis, um amplo projeto de pesquisa foi desenvolvido com o propósito de caracterizar a acústica destes edifícios. Parte dos resultados deste projeto é apresentado neste trabalho, analisando e discutindo as características acústicas e arquitetônicas de cinco igrejas barrocas construídas no século XVIII, na cidade histórica de Ouro Preto (MG), a saber: Matriz de Nossa Senhora da Conceição (1729), Matriz de Nossa Senhora do Pilar (1730), Capela de Nossa Senhora do Monte do Carmo (1756), Capela de Nossa Senhora do Rosário (1761), Capela de São Francisco de Assis (1766).

A inteligibilidade da fala foi analisada por meio do STI (Speech Transmission index) parâmetro este que leva em consideração os efeitos da reverberação e também do ruído de fundo. Os parâmetros clareza (C80), definição (D50), tempo de reverberação (TR) e tempo de decaimento inicial (EDT) (Early Decay Time) também foram avaliados. Todos obtidos através da técnica impulsiva, utilizando o

programa de computador para avaliação de salas Dirac da Bruel&Kjaer. As definições de resposta impulsiva e destes parâmetros são apresentadas a seguir.

## 1.1 Resposta Impulsiva

A maior parte dos índices objetivos podem ser obtidos tendo como ponto de partida a resposta impulsiva do ambiente. O conceito de resposta impulsiva pode ser dado como sendo a resposta da pressão sonora que é registrada na posição de interesse do ouvinte quando um impacto que produz um sinal de excitação muito intenso de curta duração é produzido por uma fonte sonora em uma posição específica. Estas excitações podem ser produzidas por tiros de pistolas ou por pulsos elétricos enviados por alto-falantes. A resposta impulsiva é particularmente atrativa, porque ela oferece uma completa descrição da transmissão entre dois pontos, já que não se preocupa com a direção. Todas as medidas não levam em consideração a direção, exceto a fração de energia lateral primária (early lateral energy fraction), pois são medidas omnidirecionais e são também calculadas da resposta impulsiva, (BARROM, 1998).

Segundo Farina (2000), o estado da arte relacionado com as medições de áudio é representado por duas diferentes espécies de medidas: caracterização da função de transferência linear de um sistema, medido por meio de sua resposta impulsiva, e análises da não linearidade medida por meio da distorção de harmônicos em várias ordens. Estas medidas são bem distintas: para a medida da resposta impulsiva as técnicas que têm sido mais usadas são MLS (Maximum Length Sequence) e TDS (Time-Delay Spectrometry).

Hoje há uma grande tendência em se usar a técnica da deconvolução que usa varreduras de senos como sinal de excitação, tendo em vista que apresentam uma excelente distribuição de energia em seu espectro o que as torna bastante resistente a não linearidades, ao contrário de uma MLS que, quando usada, não-linearidades do sistema podem ser notadas na resposta impulsiva como rugosidade do sinal, repetições do sinal deslocadas no tempo e com menor amplitude, sendo que com a varredura é possível isolar completamente resposta impulsiva desejada das componentes presentes, porque as harmônicas geradas por não-linearidade do sistema aparecem em tempos negativos da resposta impulsiva.

Na prática o sinal de excitação emitido no ambiente de interesse pode ser gravado com um microfone conectado a um microcomputador através de uma placa digitalizadora de som. Por meio de um programa de computador específico, pode-se obter a curva de decaimento do som e o tempo de reverberação. Outros parâmetros também podem ser calculados segundo a norma ISO 3382 - Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to other Acoustical Parameters (1993).

Nos itens a seguir são definidos os parâmetros acústicos extraídos da resposta impulsiva que são utilizados neste trabalho.

## 1.2 Índice de Transmissão da Fala STI (Speech Transmission Index)

Este parâmetro é computado dos valores da modulação da função de transferência  $m(F)$ . Esta quantidade é definida pela razão da modulação da amplitude da energia recebida pela modulação da amplitude da energia original, fazendo uso de um sinal de excitação obtido em banda de 1/1 oitava de um ruído rosa filtrado, tendo uma energia envolvida (amplitude ao quadrado) lentamente modulada a uma frequência  $F$ , (TRONCHIN; FARINA, 2000).

O microfone ao receber o sinal amostrado apresenta uma energia envolvida com a profundidade da modulação reduzida. A modulação da função de transferência é obtida pela expressão:

$$m(F) = \frac{m_{out}}{m_{in}} \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

$m_{out}$  é a modulação da amplitude da energia na entrada do sistema acústico;

$m_{in}$  é a modulação da amplitude da energia na saída do sistema acústico.

O valor da modulação da função de transferência  $m(F)$  pode ser computado para cada modulação de frequência  $F$  em 1/3 de oitava variando de 0,63 a 12,5 Hz, em 14 bandas, e por sete bandas de 1/1 oitava com frequências centrais variando de 125 Hz a 8 kHz, cobrindo o alcance da modulação da voz humana. Assim, um completo jogo de valores de  $m(F)$  contém globalmente 98 valores.

Tecnicamente, o STI é calculado como peso da soma do Índice da Modulação de Transferência (MTI). Este índice é derivado dos valores da Modulação da Função de Transferência  $m(F)$  levando-se em conta os efeitos audíveis de acordo com a norma IEC 60268-16 – Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index, (2003-05).

De acordo com Bertoli e Gomes (2006), a metodologia usada para o cálculo do STI é bem mais complexa do que a utilizada para calcular os demais parâmetros. Entretanto, os resultados são mais representativos para avaliar a inteligibilidade da fala de um ambiente, uma vez que, implementado de forma computacional, o ruído de fundo pode ser levado em consideração ao ser gravado e adicionado à resposta impulsiva.

Segundo a norma ISO 60268-16, os valores de STI variam de 0 a 1, onde a inteligibilidade da fala é avaliada como mostra a Tabela 1.

**Tabela 1: Relação entre STI e a inteligibilidade da fala**

STI	0-0,3	0,3-0,45	0,45-0,6	0,6-0,75	0,75-1
Inteligibilidade	Ruim	Pobre	Razoável	Boa	Excelente

### 1.3 Definição D50 (Definition)

Definição é um parâmetro acústico baseado na característica da audição na qual as reflexões que atinjam o receptor até 50 ms, depois da chegada do som direto. São usualmente consideradas reflexões benéficas, pois dão suporte ao som direto, contribuindo para a audibilidade do som sem apresentar prejuízos em sua qualidade. As técnicas de gravação e visualização digital têm permitido integrar a energia sonora recebida em intervalos de tempo arbitrário, e desta possibilidade é extraída a individualização de relação entre a energia recebida imediatamente depois da onda e a sucessiva energia reverberante. A Definição é a razão entre a energia da resposta impulsiva entre 0 e 50 ms e a energia total da resposta impulsiva. Este parâmetro Definição está correlacionado com a inteligibilidade da fala, comparando a energia do som direto somada a energia das reflexões úteis com a energia total da resposta de impulso, (BARROM, 1998).

### 1.4 Clareza C80 (Clarity)

Este índice está relacionado com o equilíbrio entre a clareza percebida e reverberação, a qual pode ser particularmente delicada para audição de música. Assim pode-se definir a clareza como o tempo de integração para a energia útil chegando ao ouvido com 80 ms do som direto dividido pela energia tardia total que chega após os 80 ms do som direto (BARROM, 1998).

Quando a clareza estiver relacionada com a percepção musical, o intervalo de tempo é limitado em 80 ms, quando estiver relacionado com a fala, o intervalo de tempo é limitado em 50 ms (FARINA, 2000).

### 1.5 Tempo de Decaimento Inicial EDT (Early Decay Time)

A percepção subjetiva da reverberação está correlacionada mais fortemente com o decaimento inicial do que com o restante do campo reverberante, como foi demonstrado por Jordan (1981), e está diretamente ligada com a impressão subjetiva de como o sinal transmitido parece ser transformado pela reverberação do ambiente. O cálculo do EDT é feito no limite do decaimento entre 0 e -10 dB na curva integrada de Schoroeder, em segundos, multiplicado por um fator 6, uma vez que 10 dB ocorre em um período de tempo brusco equivalente a um sexto do tempo requerido para 60 dB de decaimento, definido como tempo de reverberação (BERANEK, 1996).

## 1.6 Tempo de Reverberação (Reverberation Time)

É definido como sendo o tempo necessário para que o Nível de Pressão Sonora (NPS) seja atenuado em 60 dB, após a interrupção da emissão do som pela fonte, e está relacionado com a inteligibilidade da fala.

## 2. METODOLOGIA

A inteligibilidade da fala das igrejas setecentistas foi avaliada pelos parâmetros: Índice de Inteligibilidade da Fala (STI) e Definição. Foram obtidos também os parâmetros acústicos Clareza (C80) relacionado à inteligibilidade musical, Tempo de Reverberação (TR) e Tempo de Decaimento Inicial (EDT). As igrejas e o método de medição são descritos e detalhados a seguir.

### 2.1 As Igrejas Avaliadas

As igrejas avaliadas foram edificadas no século XVIII. Todas no estilo barroco-rococó com as mesmas características. As alvenarias das igrejas foram executadas em taipa, seus tetos em madeira, bem como seus pavimentos. Todas possuem seis altares laterais, três de cada lado da nave, ornamentados com talhas barrocas. Exceto a igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição que possui dois a mais, em diagonal, entre a nave e a capela-mor. Ao fundo da capela-mor de cada igreja, os altares são também ornamentados com talhas barrocas. Cada uma das igrejas possuiu detalhes e medidas particulares que as distingue umas das outras, e são apresentadas a seguir.

*Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição (MNSC):* Igreja classificada como pertencente à terceira fase do barroco jesuítico brasileiro. Ela possui um formato retangular, com o corredor lateral separado da nave construído em taipa com grande espessura. O teto da nave é semi-arqueado, partindo de uma altura de 11,00 m até 15,00 m na parte central. O teto da capela-mor é totalmente arqueado com raio de 3,37 m.

*Capela de Nossa Senhora do Monte do Carmo (CNSC):* Igreja classificada como pertencente à quarta fase do barroco jesuítico brasileiro. Possui formato retangular. Nesta fase não apresenta os corredores laterais à nave. Suas alvenarias são também de taipa. O teto da nave é semi-arqueado, partindo de uma altura de 11,10 m até 15,72 m na parte central. O teto da capela-mor é totalmente arqueado com raio de 3,22 m.

*Capela de São Francisco de Assis (CSFA):* Igreja classificada também como pertencente à quarta fase do barroco jesuítico brasileiro onde o retábulo é desprovido de dossel, e sua decoração é de um tipo mais claro e simples. Ela também não possui os corredores laterais à nave. O teto da nave é semi-arqueado, partindo de uma altura de 11,96 m no encontro com as paredes laterais até 15,64 m na parte central. O teto da capela-mor é também totalmente arqueado com raio de 3,53 m.

*Matriz de Nossa Senhora do Pilar (MNSP):* Igreja classificada como pertencente à terceira fase do barroco jesuítico brasileiro. Tem como característica principal a colocação de um dossel no alto do retábulo. Possui uma nave em formato de elipse e corredores nas laterais no nível do piso do coro se assemelhando a uma varanda guarnecida de uma balaustrada de madeira torneada. O teto da nave é plano na parte central, sendo arqueado nas proximidades das paredes com um raio de 1,50 m. O teto da capela-mor é arqueado com raio de 3,11 m.

*Capela de Nossa Senhora do Rosário (CNSR):* Igreja classificada como pertencente à quarta fase do barroco jesuítico brasileiro. Possui tanto a nave como a capela-mor em forma elíptica, aladas por corredores laterais. O teto da nave é semi-arqueado, partindo de uma altura de 12,69 m no encontro com as paredes laterais até 17,15 m na parte central. O teto da capela-mor é totalmente arqueado com raio variável em função do formato.

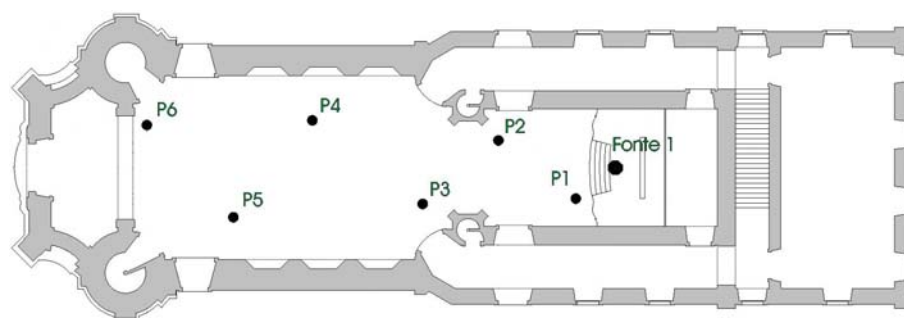
As talhas barrocas contidas nos retábulos destas igrejas são constituídas de esculturas feitas em madeiras de motivos fitomorfos e zoomorfos de cor dourada. Estes adereços e os materiais utilizados, bem como sua forma, podem influenciar no seu desempenho acústico. Deste modo foram levantados alguns parâmetros arquitetônicos e apresentados no Tabela 2.

**Tabela 2 – Parâmetros arquitetônicos das igrejas de Ouro Preto.**

Dimensões \ Igrejas	MNSC	CNSC	CSFA	MNSP	CNSR
Volume (m <sup>3</sup> )	4930	5204	4796	4997	4269
Capacidade	330	260	280	300	210
% de talhas barrocas	9,2	9,0	8,2	7,6	13,6
% de áreas em madeira	67,4	46,4	44,2	89,6	46,3

## 2.2 Método de medição

Os parâmetros acústicos das igrejas foram obtidos a partir da resposta impulsiva do ambiente. O sinal sonoro de excitação, varredura de senos, foi emitido pela fonte sonora omnidirecional tipo 4296, amplificado pelo amplificador de potência tipo 2716, ambos da Brüel & Kjaer, colocada dentro da capela-mor próximo ao altar, onde o padre realiza as práticas religiosas. O sinal sonoro foi gravado pelo microfone do medidor do nível de pressão sonora tipo 2260 também da Brüel & Kjaer, conectado a um microcomputador através da placa digitalizadora de som VXpocket v2, da Digigram. Para processamento dos sinais foi utilizado o programa de computador para avaliação de salas Dirac (Brüel&Kjaer). Os parâmetros acústicos foram calculados segundo a norma ISO – 3382 (1993). As medições foram realizadas em seis posições, de modo intercalado, desde a capela-mor até a entrada da igreja, fornecendo suficientes informações a respeito da acústica do ambiente, como exemplificado em uma das igrejas, figura 1.



**Figura 1 – Planta baixa da igreja CSFA com as posições de medição e fonte sonora.**

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Índice de Transmissão da Fala (STI)

Os valores de STI médios medidos nas cinco igrejas avaliadas são apresentados na Tabela 3, bem como seus respectivos ruídos de fundo. Das cinco igrejas avaliadas, segundo a Tabela 1, apenas uma foi classificada como “razoável”, mesmo assim próximo ao limite mínimo, as demais foram classificadas como “pobre”. O STI médio por posição de avaliação entre as cinco igrejas variou entre 0,54, na posição mais próxima da fonte sonora (P3), e 0,20, na posição mais distante (P6), apresentando uma inteligibilidade da fala maior na posição mais próxima da capela-mor, com uma grande variação para a posição mais distante.

**Tabela 3: STI médio e ruído de fundo das igrejas avaliadas**

Igrejas	STI	Ruído de Fundo (dB)
Matriz de Nossa Senhora da Conceição (MNSC)	0,47	38
Capela de Nossa Senhora do Carmo (CNSC)	0,23	61
Capela de São Francisco de Assis (CSFA)	0,34	30
Matriz de Nossa Senhora do Pilar (MNSP)	0,43	37
Capela de Nossa Senhora do Rosário (CNSR)	0,26	63

Além das faixas de qualificação subjetiva de ambientes, a norma ISO 60268-16 apresenta um gráfico correlacionando o STI a um escore de entendimento de palavras. Ao se consultar este gráfico tem-se a possibilidade de prever o índice de acertos, tanto de palavras como de frases. Estas previsões têm como base respectivamente, listas em inglês conhecidas como “Harvard Lists” e os resultados da inteligibilidade de sentenças SRT (Speech Reception Threshold). Apesar de serem qualificadas dentro da mesma faixa, as variações do STI obtida mostra uma substancial diferença no entendimento de palavras e frases, tendo em vista o rigor na avaliação deste índice (BERTOLI; GOMES, 2006). A igreja MNSC apresentou o melhor desempenho com o escore de entendimento de 84 % das palavras e 74 % das frases. A igreja MNSP apresentou escore de entendimento de 80 % das palavras e 58 % das frases. A igreja CSFA apresentou escore de 70 % das palavras e 38 % das frases. As igrejas CNSR e CNSC, com os piores índices de inteligibilidade apresentaram escore de entendimento em torno de 50 % das palavras e menos de 20 % das frases. Para efeito de comparação, ao se correlacionar o STI com os parâmetros arquitetônicos da Tabela 2, das igrejas onde o ruído de fundo não superou 38 dB, nota-se que ele é diretamente proporcional ao percentual das talhas barrocas presentes no ambiente. Isto se deve muito menos pela influência promovida pela absorção sonora, tendo em vista que este coeficiente é muito similar ao da própria madeira, e muito mais pela difusão sonora proporcionada pelas talhas barrocas (CARVALHO; LENCASTRE, 2002). É importante observar que mesmo tendo as igrejas CNSR e CNSC percentuais entre talhas e superfícies em madeiras semelhantes à igreja CSFA seus índices de inteligibilidade e escores de entendimento de palavras e frases foram bem inferiores. Isto se deve a grande influência exercida pelo ruído de fundo do local.

### 3.2 Definição D50 (Definition)

O parâmetro acústico Definição está relacionado à capacidade de se perceber melhor as articulações das palavras. Mesmo não havendo nenhum estudo a cerca dos valores ideais, pode-se afirmar: quanto mais próximo do valor “um”, melhor será a Definição. Ao se observar a Figura 2, nota-se que na medida que se distancia da fonte sonora, a Definição tende a diminuir nas igrejas MNSC, CNSC, CSFA, e a permanecer constante na área da nave das igrejas MNSP e CNSR. Fato bastante curioso que leva a acreditar que está relacionado à concentração de energia devido a sua forma elíptica.

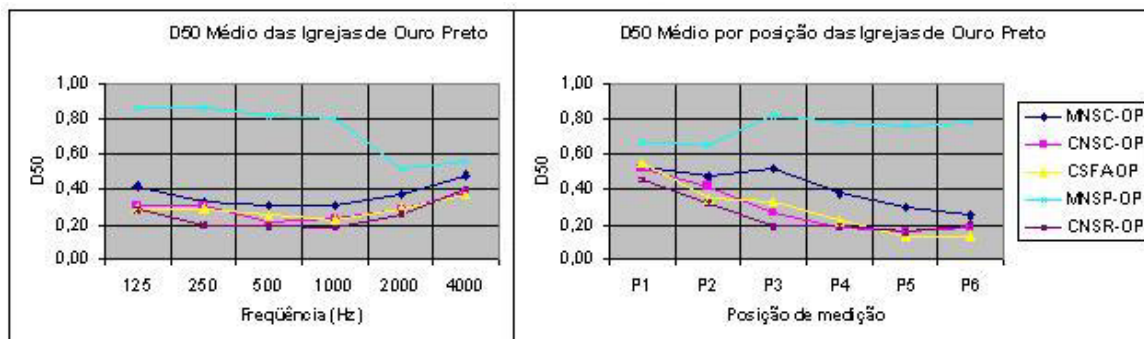


Figura 2 – Definição (D50) média por frequência e por posição de medição.

A pouca variação de Definição encontrada em todas as frequências, confirma a forte influência proporcionada pela difusão sonora produzida por suas talhas barrocas. Ao se comparar o parâmetro acústico D50 com os parâmetros arquitetônicos da tabela 2, nota-se que é diretamente proporcional a superfícies em madeira presentes no ambiente. O que não é garantia de uma boa inteligibilidade, pois um alto valor de ruído de fundo acaba por prejudicar a audição dentro de um ambiente com uma excelente Definição, como pode ser comprovado na avaliação do STI.

### 3.3 Clareza C80 (Clarity)

Fabbri *et al.*, (1998) define uma faixa de valores ótimos do parâmetro acústico Clareza entre -2dB e 2 dB. Sendo perfeitamente aceitáveis entre -4 dB e 4 dB. Deste modo, os valores de C80, apresentados na Figura 3 mostram que as igrejas MNSC, CNSC e CSFA são as que tem as melhores condições para a execução de música, ou seja, há uma influência positiva do ambiente sobre a inteligibilidade musical, uma vez que seus resultados são os mais equilibrados e estão dentro da faixa ideal. A igreja CNSR, embora apresentando valores um pouco inferior, em médias frequências, também pode ser

considerada boa para prática musical. O mesmo não pode ser dito da igreja MNSP, onde os valores distanciam muito do ideal.

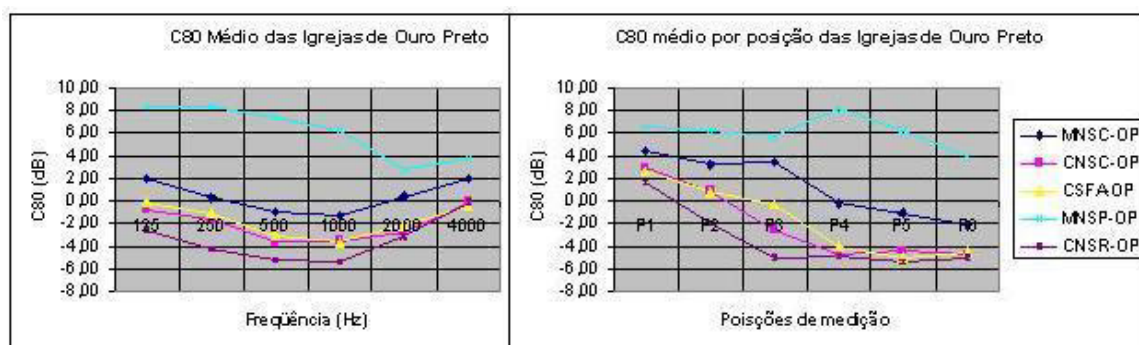


Figura 3 – Clareza (C80) média por frequência e por posição de medição.

Tomando como base a definição deste parâmetro pode-se concluir que: é necessário ter uma certa reverberação no ambiente avaliado para se ter um bom desempenho musical. Nota-se que as igrejas com melhor equilíbrio de C80 apresentaram variações pequenas nas diversas frequências. Observa-se também, que na medida que se distancia da fonte sonora este parâmetro tende a desequilibrar em todas as igrejas, exceto na igreja MNSC. Ao se comparar com os volumes das igrejas, percebe-se que este parâmetro arquitetônico exerce pouca influência sobre a Clareza, pois a que apresentou o melhor resultado MNSC possui um volume 20 % maior do que a de resultado não adequado MNSP. Finalmente, observa-se que o formato do ambiente é o fator que mais influencia a qualidade de C80, tendo em vista que as igrejas em forma de elipse apresentaram os piores resultados.

### 3.4 Early Decay Time (EDT)

Segundo Cocchi, Garai e Tavernelli (2000), o EDT é considerado subjetivamente mais importante que TR em relação à percepção da reverberação. Estando TR mais relacionado com as propriedades físicas do ambiente. Os resultados de EDT tanto para bandas de frequências centrais de 125 a 4000 Hz quanto por posição, obtidos das medições realizadas nos vários pontos são apresentados na figura 4.

O EDT de todas as igrejas, e em todas as frequências são menores que TR. Isso diminui a percepção da reverberação pelo ouvinte. Destaque deve ser dado à igreja MNSP, onde o TR em médias frequências é bem superior, certamente influenciado pelo formato que tende a concentrar energia, na região central da nave e em médias frequências, que no decurso do tempo tende a aumentar a reverberação. O EDT apresenta valores menores nas posições de medição mais próximas da fonte sonora, tendendo a aumentar nas posições mais distantes. Isto se deve à influência do som direto e das primeiras reflexões.

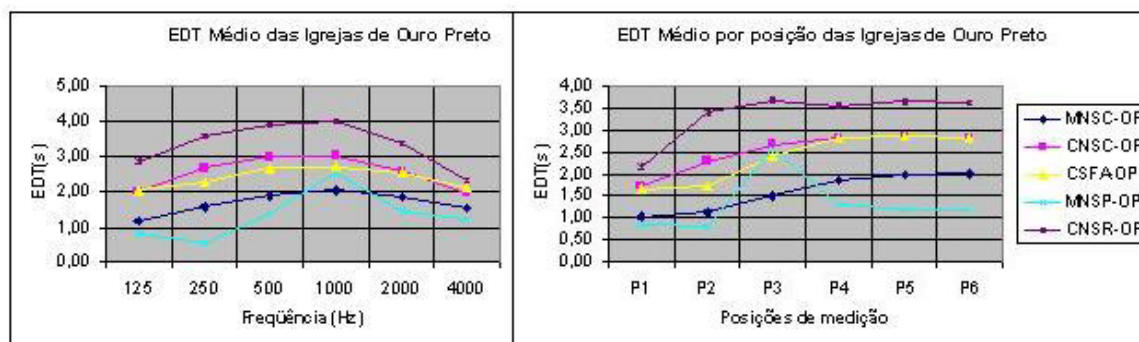


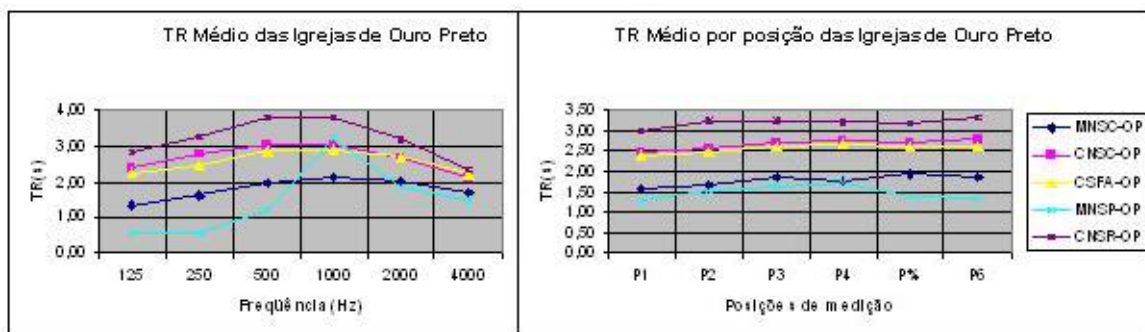
Figura 4 – EDT médio por frequência e por posição de medição.

### 3.5 Tempo de Reverberação (Reverberation Time)

Os resultados dos TR médios comparativos, tanto por posição como por frequência, das cinco igrejas avaliadas são apresentados na Figura 5. Cabe observar que eles são bastante homogêneos para todas as



posições de medição. Para as igrejas MNSC, CNSC, CSFA e CNSR têm pouca variação com relação à frequência. Por outro lado, a igreja MNSP embora no geral apresentando valores de TR inferiores às demais em médias frequências, ela excede o que seria considerado razoável para igrejas, (JOHNSON, J.; METHA, M.; ROCAFORT, J., 1999).



**Figura 5 – TR médio por frequência e por posição de medição.**

Observa-se que tanto o EDT quanto TR são proporcionais à presença de superfícies em madeira. Entretanto, a forma exerce forte influência no aumento ou diminuição dos mesmos. Isto pode ser notado ao se comparar às igrejas CNSR e CNSC que mesmo tendo percentuais de madeira iguais, a igreja CNSR que possuiu forma elíptica apresenta EDT e TR maiores, mesmo tendo um ambiente com volume muito menor. Isto está relacionado à forma elíptica da igreja, que por este motivo, apresenta tendência a grande concentração de energia, e ao desenvolvimento de frente de ondas “defeituosas”, (BISTAFA, 2004). Por outro lado, a forma retangular proporciona a formação de um grande número de frentes de ondas e uma melhor distribuição do som no ambiente. Nota-se que o TR apresenta valores bem semelhantes em todas as posições; evidenciando a influência das talhas barrocas, que certamente são responsáveis por uma maior difusão sonora criando um campo acústico mais homogêneo, (CARVALHO; LENCASTREM, 2002).

#### 4. CONCLUSÕES

Os STIs obtidos das medições indicam uma estreita relação com as talhas barrocas do ambiente e seus resultados são fortemente influenciados pelo ruído de fundo. O parâmetro acústico D50 apresenta melhores resultados nas igrejas com maior quantidade de superfícies em madeira, e sua regularidade por todo ambiente se devem à distribuição das talhas barrocas ao longo da nave. O parâmetro C80 está mais relacionado com a forma do que com as dimensões das igrejas, embora seu equilíbrio também seja influenciado pela presença de talhas e superfícies em madeira. Os EDTs obtidos diminuem a sensação de reverberação, o que influencia positivamente sobre o conceito a cerca da qualidade acústica do ambiente. De um modo geral as igrejas setecentistas de Ouro Preto apresentam um comportamento acústico bastante peculiar, principalmente no que diz respeito ao tempo de reverberação. Ou seja, valores reduzidos de TR em baixas frequências, com ligeiro aumento em médias frequências e redução em altas. Este comportamento acústico é raro em outros estilos arquitetônicos de igrejas. Das 43 igrejas avaliadas por Lubman e Wetherill (1983), Estados Unidos, México e Japão, 80 % possuem tempo de reverberação muito grande em baixa frequência, e uma vertiginosa queda em médias e altas frequências. Das demais igrejas, apenas 3 mostraram comportamento acústico com uma certa semelhança, as outras, embora apresentando valores de TR reduzidos em baixas frequências, apresentaram tendência de aumento em altas frequências. Da mesma forma, Sanchidrián e González (2006) obtiveram resultados de TR com as mesmas características ao avaliar a igreja do Monastério de Santo Domingo de Silos, Espanha. Podendo ser constatado também nas avaliações da Catedral Metropolitana de Porto Alegre realizadas por Simões e Nabinger (2001) e na correção acústica da Basílica de San Domenico em Foligno, Itália, com o objetivo de transformá-la em sala de concerto, realizada por Cocchi e Farina (1987). Deste modo, é possível perceber o quão especial é a acústica destas igrejas barrocas construídas no século XVIII em Ouro Preto, onde o estilo arquitetônico, comprovadamente, exerce grande influência sobre as qualidades sonoras tanto para atender aos requisitos de inteligibilidade da fala como da inteligibilidade da música.

## 5. REFERÊNCIAS

- BARROM, MICHAEL. **Auditorium Acoustics and Architectural Design**. London: E & FN Spon, 1998. 443 p.
- BERANEK, L.L. Concert and Opera Halls - How They Sound. **Acoustical Society of America**, 1996.
- BERTOLI, STELAMARIS ROLLA; GOMES, MÁRCIO HENRIQUE DE AVELAR. **Técnicas de Medição para Acústica de Salas**. Campinas: [S.n.], 2005. 65 p. (Apostila da Disciplina: Acústica III – Aprofundamento).
- BISTAFA, S.R. Difusão sonora em salas: paradigmas do passado e estado da arte. *In: I SEMINÁRIO - MÚSICA, ACÚSTICA E TECNOLOGIA, I*, 2004, São Paulo. **AcMus - I Seminário - Música, Acústica e Tecnologia**. São Paulo, 2004. p. 98-130.
- CARVALHO, A.P.O.; LENCASTRE, M. Absorção sonora de Retábulos em talha barroca. **Revista Estudos Patrimônio - IPPAR**, Porto, n. 3, p. 14-18, 2002.
- COCCHI, A.; GARAI, M.; TAVERNELLI, C. Boxes and sound quality in an italian opera house. **Journal of Sound and Vibration**, n. 232, p. 171-191, 2000.
- COCCHI, ALESSANDRO; FARINA, ANGELO. **Correzione Acustica di Ex-Chiese Riadattate per Utilizzo Concertistico: Un Esempio di Progettazione di Interventi non Sabiniani con L'Ausilio del Calcolatore**. Parma, p. 16, [1987?]. <http://pcfarina.eng.unipr.it>. Acesso em: 04 abr. 2005.
- FABBRI, P.; FARINA, A.; FAUSTI, P.; POMPOLI, R. Il Teatro degli intrepidi di Giovan Battista Aleotti rivive attraverso le nuove tecniche dell'acustica virtuale. **Giambattista Aleotti e gli Ingegnere del Rinascimento**, Firenze, p. 195-205, 1998.
- FARINA, ANGELO. Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion With a Swept-sine Technique. *In: AES - AN AUDIO ENGINEERING SOCIETY PREPRINT*, 108., 2000, Paris. Paris, 2000. p. 1-24.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382**: Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to other Acoustical Parameters.. Genève, 1993.
- INTERNATIONAL STANDARD. **IEC - 60268-16**: Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Genève, 2003-05.
- JOHNSON, JIM; METHA, MADAN; ROCAFORT, JORGE. **Architectural Acoustics: Principles and Design** Upper Saddle River, New Jersey: Merrill Prentice Hall, 1999. 446 p.
- LUBMAN, DAVID; WETHERILL, EWART A. **Acoustics of Worship Spaces**. *In: MEETING OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, 106., 1983, San Diego. **Acoustics of Worship Spaces**.. New York: [S.n.], 1985. p. 1-91.
- MOURÃO, PAULO KRÜGER CORRÊA. **As Igrejas Setecentistas de Minas**. 2 ed. Belo Horizonte: Itatiaia, 1986. 180 p. (Reconquista do Brasil.)
- SANCHIDRIÁN, CÉSAR DIAZ; GONZALEZ, ANTONIO PEDRERO. La Acústica de la Iglesia del Monasterio de Santo Domingo de Silos y su Adecuación a la Práctica del Canto Gregoriano. **TecniAcústica**, Madrid, 2006.
- SIMÕES, F.M.; NABINGER, L.B. Análise das Condições Acústicas e Projeto de Condicionamento Acústico da Catedral Metropolitana de Porto Alegre, RS. *In: VI ENCONTRO NACIONAL E III ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*., 6., 2001, São Pedro, 2001.
- TRONCHIN, LAMBERTO; FARINA, ANGELO. **Acoustics of the Former Teatro "La Fenice" in Venice**. University of Bologna. Bologna, 2000.