



# Sociedade de Engenharia de Áudio

## Artigo de Congresso

Apresentado no 4º Congresso da AES Brasil  
10ª Convenção Nacional da AES Brasil  
08 a 10 de Maio de 2006, São Paulo, SP

*Este artigo foi reproduzido do original final entregue pelo autor, sem edições, correções ou considerações feitas pelo comitê técnico. A AES Brasil não se responsabiliza pelo conteúdo. Outros artigos podem ser adquiridos através da Audio Engineering Society, 60 East 42<sup>nd</sup> Street, New York, New York 10165-2520, USA, [www.aes.org](http://www.aes.org). Informações sobre a seção Brasileira podem ser obtidas em [www.aesbrasil.org](http://www.aesbrasil.org). Todos os direitos são reservados. Não é permitida a reprodução total ou parcial deste artigo sem autorização expressa da AES Brasil.*

## Parâmetros Acústicos em Salas de Música: análise de resultados e novas interpretações

Fábio Leão Figueiredo, Fernando Iazzetta  
Departamento de Música - Universidade de São Paulo  
São Paulo – SP - Brasil  
[fabioflf@hotmail.com](mailto:fabioflf@hotmail.com), [iazzetta@usp.br](mailto:iazzetta@usp.br)

### RESUMO

Este artigo apresenta análises e conclusões sobre resultados de medições de parâmetros acústicos estabelecidos como critérios para avaliação da qualidade acústica de salas de música. As medições foram realizadas em seis importantes salas de concerto de São Paulo, durante o ano de 2005, dentro do projeto AcMus desenvolvido na Universidade de São Paulo. Primeiramente exibimos um quadro geral dos resultados para cada parâmetro. Em seguida, buscamos nas características arquitetônicas das salas as causas ou explicações para os resultados observados. Verificamos as limitações de alguns parâmetros, e sugerimos novas interpretações que podem enriquecer a compreensão sobre a avaliação da qualidade acústica das salas de música.

### INTRODUÇÃO

Em 2003 iniciamos na Universidade de São Paulo, Brasil, um projeto de pesquisa em acústica de salas voltado para questões musicais. O núcleo de trabalho, intitulado AcMus [1], concentra-se no desenvolvimento de ferramentas computacionais para projeto, medição e simulação do comportamento acústico de salas destinadas à música.

O presente trabalho focaliza os resultados obtidos nas pesquisas de medições acústicas efetuadas com base na norma ISO 3382 [2]. Os resultados das medições foram processados de modo a levantarmos os parâmetros acústicos reconhecidos como critérios para avaliação da acústica de salas.

Os parâmetros acústicos subjetivos são critérios que definem a qualidade acústica de uma sala de música. A apreciação musical dentro da sala é afetada por diversas impressões acústicas que ocorrem ao mesmo tempo.

Cada uma dessas impressões é associada a um parâmetro acústico de natureza subjetiva que está correlacionado a uma grandeza física mensurável, constituindo um conjunto de parâmetros acústicos objetivos que formam uma base científica para a análise acústica das salas de música.

Determinamos a metodologia experimental mais adequada [3] e efetuamos medições em seis importantes salas de concerto em São Paulo, comparando os resultados. Realizamos uma análise crítica a respeito dos parâmetros acústicos obtidos e aprofundamos a compreensão sobre seus significados e suas utilidades. Por fim, fizemos uma análise subjetiva de júri correlacionando os parâmetros acústicos medidos às respectivas impressões acústicas sobre amostras musicais gravadas nas salas, que está detalhada na referência [3].

Os parâmetros analisados aqui são: RT60 (tempo de reverberação), BR e TR (razão de graves e razão de agudos), RDR (razão entre som direto e som reverberante), EDT (*early decay time*), e C80 (clareza).

Realizamos as medições nas salas do Teatro Municipal de São Paulo, Teatro Sérgio Cardoso, Anfiteatro Camargo Guarnieri (USP), Teatro Municipal de Diadema, Teatro São Pedro e Teatro do Memorial da América Latina.

## RESULTADOS

### Tempo de reverberação (RT60):

Os resultados de reverberação foram, em geral, condizentes com a fórmula de Sabine, ou seja: maiores valores de reverberação para salas com maior razão entre volume e capacidade de absorção. As salas menores (Camargo Guarnieri, São Pedro e Diadema) apresentaram menores tempos de reverberação em comparação com as maiores (Municipal, Memorial e Sérgio Cardoso). Porém, algumas sutilezas do comportamento do tempo de reverberação em função da frequência podem ser melhor entendidas quando observamos as particularidades do tratamento acústico de cada teatro.

O Memorial, que tem praticamente todas as paredes cobertas por carpetes, e o Municipal, que também é bastante acarpetado, são as salas que mais dispõem de material absorvedor. O Camargo Guarnieri e principalmente o São Pedro têm relativamente pouca quantidade de material de absorção. Isso explica porque esses teatros apresentam tempos de reverberação mais estáveis nas altas frequências quando em comparação com teatros maiores, porém mais absorvedores.

O Sérgio Cardoso, que também é um teatro usado para arte dramática, possui um palco com 13.676 metros cúbicos, que é por si só um volume maior do que o de alguns teatros. Isso resulta numa câmara reverberante cujos efeitos podem ser comprometedores, quando não bem controlados. A presença de alguns painéis em torno do espaço da orquestra não se mostrou suficiente para diminuir os efeitos do excesso de reverberação causado pela câmara reverberante e o resultado pode ser observado no gráfico 1.

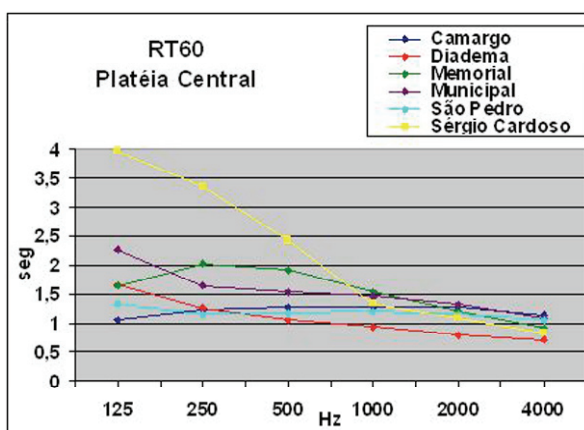


Fig. 1: RT60 nas platéias centrais dos teatros

Com exceção do Teatro Municipal, que apresenta maior variedade de locais para escuta, os tempos de reverberação se mostraram, em geral, uniformes para cada teatro, ou seja, não detectamos grandes variações de RT60, para cada faixa de frequência, dentro de uma

mesma sala. Entretanto, existem grandes diferenças na percepção auditiva conforme mudamos de lugar num mesmo teatro, como pode ser verificado através das amostras musicais gravadas para a análise do parâmetro RDR. Isso mostra como o parâmetro RT60 é absolutamente insuficiente para caracterizar a acústica de uma sala.

Verificamos que mesmo impressões como vivacidade e reverberação, usualmente atribuídas ao RT60, mudavam bastante de acordo com os diversos locais de escuta dentro de uma mesma sala, ainda que o parâmetro RT60 não apresentasse variações na mesma proporção. Certamente, outros parâmetros exercem, juntamente com o RT60, uma forte influência sobre a impressão de reverberação, conforme veremos mais adiante.

Conforme as indicações de Beranek [4] os resultados de RT60 para o Teatro Municipal o colocam essencialmente como um teatro bom para ópera, os teatros São Pedro e Camargo Guarnieri propícios para música de câmara ou reduzidas formações orquestrais.

### Equilíbrio entre graves e agudos (BR e TR):

O parâmetro BR é usualmente relacionado ao calor acústico, ou à presença de graves. O parâmetro TR é normalmente relacionado ao brilho acústico. Os valores de BR e TR apresentam relativamente pouca variação entre as diversas posições de captação numa mesma sala.

As grandes dimensões da câmara reverberante no palco do Sérgio Cardoso, e suas laterais de alvenaria, fazem com que as ondas de baixas frequências tenham longos tempos de reverberação, gerando valores de BR demasiadamente altos.

O Teatro de Diadema apresenta aberturas incomuns nas laterais do palco, ocasionando um aumento considerável na largura desse setor. Essa região torna-se propícia para o confinamento de ondas de baixas frequências, ocasionando valores de BR relativamente altos.

Além de ser o teatro mais estreito, o Camargo Guarnieri é o único que apresenta em toda a extensão lateral grande quantidade de superfície de madeira funcionando como membranas dissipadoras de energia das ondas de baixa frequência, o que resultou nos menores valores de BR.

As paredes descobertas e lisas dos teatros São Pedro e Camargo Guarnieri resultaram nos maiores índices de TR e o excesso de material absorvedor no Memorial causou os menores valores desse parâmetro.

Seguindo as orientações bibliográficas, analisamos as amostras musicais gravadas nos teatros de maior BR esperando perceber maior presença de graves nesses teatros. Isso não aconteceu. A presença dos graves percebida nas amostras não acompanhava a indicação dos valores de BR, isto é, teatros que apresentaram grande diferença nos valores de BR não apresentaram a mesma diferença na percepção auditiva da presença dos graves, o que pode ser verificado fazendo-se uma comparação entre as amostras gravadas e o gráfico geral de BR e TR.

Basta uma observação mais atenta na definição do parâmetro BR para concluirmos que de fato não faz muito sentido esperarmos que ele seja bem correlacionado com a presença de graves. O parâmetro BR engloba variáveis de RT60, que informam a rapidez do decaimento da energia acústica. A presença de graves deve estar mais relacionada à intensidade com que as

ondas de baixas frequências atingem um determinado ponto de captação. Devemos, portanto, esperar melhor correlação entre tal impressão e o parâmetro  $G$  (*strength*), tomado para baixas frequências.

Embora ainda referências modernas apresentem o referido equívoco, a conclusão anterior é confirmada por referências mais específicas e atualizadas. Em seu mais recente trabalho, Beranek [4] associa a impressão de presença dos graves ao novo parâmetro  $G_{low}$  que é a média dos valores do parâmetro  $G$  entre 125 Hz e 250 Hz.

A análise do parâmetro TR revelou fato semelhante. Encontramos amostras que eram muito mais “opacas” do que outras, apresentando, entretanto, praticamente os mesmos valores de TR. Seguindo o mesmo raciocínio usado para o parâmetro BR, podemos esperar que a impressão de brilho acústico esteja relacionada não a uma razão entre valores de RT60, mas à quantidade de energia de ondas de alta frequência captadas. Embora não apareça em nenhuma referência estudada, torna-se natural propor o emprego de outro novo parâmetro, o  $G_{high}$ , média dos valores do parâmetro  $G$  entre 2 KHz e 4 KHz, o qual, espera-se, esteja melhor relacionado ao brilho acústico.

A audição das amostras gravadas revelou uma outra utilidade, bastante importante do ponto de vista musical, para os parâmetros BR e TR. Ao contrário do que foi constatado anteriormente, essa nova utilidade está em perfeito acordo com a definição dos parâmetros.

O parâmetro BR é a razão entre os RT60 de graves e médios e o TR é razão entre os RT60 de agudos e médios. Observamos que as salas que apresentavam valores de BR próximos aos de TR soavam mais equilibradas com respeito à reverberação entre graves e agudos, enquanto que nas salas que apresentavam maiores discrepâncias entre esses parâmetros ouvia-se um desequilíbrio indesejável na reverberação entre graves e agudos.

Nas salas onde BR é maior do que TR (Teatro de Diadema, Municipal e Memorial) há uma perceptível “sobra” de graves quando em comparação com teatros em que os valores de BR e TR são mais próximos (Camargo Guarnieri e São Pedro) nos quais o decaimento sonoro entre graves e agudos é mais uniforme e agradável.

As conseqüências musicais desse desequilíbrio vão desde uma execução aparentemente infiel do texto musical (notas de mesma duração soando com diferentes durações) até a sensação de que os naipes estão tocando de forma desencontrada.

Concluimos, portanto, que a utilidade dos parâmetros BR e TR se restringe à importância que eles apresentaram como critérios eficientes para a avaliação do equilíbrio entre frequências dentro de uma sala.

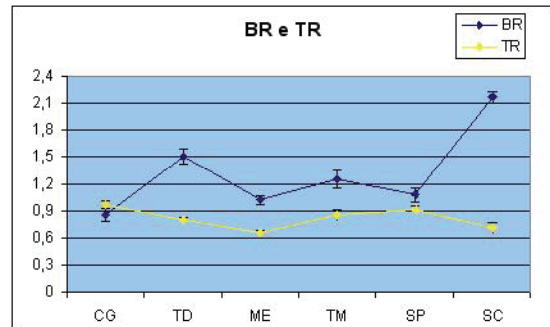


Fig. 2: Valores médios de BR e TR

As legendas no eixo horizontal são definidas por:

Sigla	Teatro
CG	CamargoGuarnieri
SP	São Pedro
TD	Diadema
SC	Sérgio Cardoso
ME	Memorial
TM	Municipal

Tabela 1: Legenda dos teatros

**Clareza (C80):**

O parâmetro C80 mede a razão entre a energia acústica que chega em um ponto de captação nos primeiros 80 ms e a energia remanescente. Essa distribuição de energia ao longo do tempo é determinada por características peculiares de cada teatro. Dada a diversidade de peculiaridades observadas nas salas que analisamos, é de se esperar também uma variedade no comportamento de C80.

Por exemplo, a platéia do Teatro São Pedro têm forma de concha e há pouco material absorvedor nas superfícies. Isso faz com que as ondas de alta frequência transitem mais pelo teatro, causando os menores valores de C80 para essa faixa de frequência. No Memorial há um excesso de material absorvedor e a distância entre as paredes laterais é muito grande. Além disso, o teto parabólico transforma os fundos da platéia num calabouço para ondas de alta frequência. Como resultado, os valores de C80 para essa faixa de frequência na posição central do Memorial foram os maiores.

Os valores de C80 no palco foram maiores que os da platéia em todos os teatros. Isso é desejável por facilitar o trabalho do maestro e tornar a audição mais agradável para o público.

A partir de um ponto de vista conceitual, somos induzidos a esperar que quanto maior a reverberação numa sala, menor será a clareza. De fato, os aglomerados de curvas de RT60 em função da frequência são descendentes, enquanto que os de C80 em função das mesmas frequências são ascendentes.

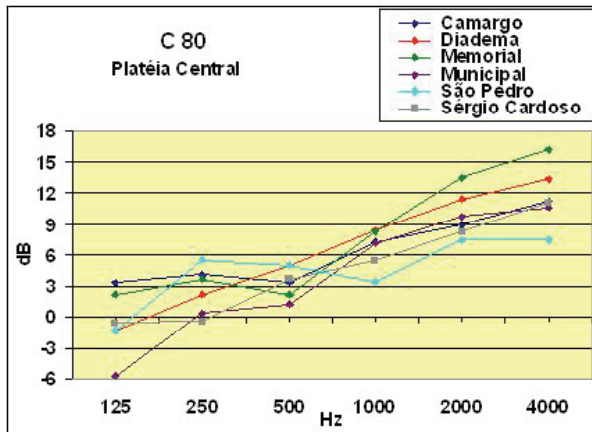


Fig. 3: C80 nas platéias centrais dos teatros

Esse resultado deve-se ao fato de que ondas de baixas frequências são mais difusas e transpõem melhor os obstáculos, enquanto que as de altas frequências são mais direcionais e mais suscetíveis de serem absorvidas em cada incidência sobre uma superfície. Assim, as ondas de baixas frequências serão captadas por mais tempo e sofrerão um decaimento menos acentuado do que as de altas frequências, ou seja, maior RT60 e menor C80. O mesmo raciocínio se aplica às ondas de alta frequência, levando a um RT60 menor e C80 maior.

Porém, constatamos que essa regra geral vale para tendências estatísticas com respeito à frequência, mas nem sempre para comparação direta entre valores isolados; isto é, dada uma determinada frequência, não podemos olhar no gráfico de RT60, tomar o valor de um teatro que esteja abaixo de todos os outros e afirmar que ele estará acima de todos os outros no gráfico de C80. Por exemplo, o Municipal apresenta os maiores valores de C80 no palco, entretanto seus valores de RT60 estão numa região intermediária com relação aos outros teatros. O teatro de Diadema é o que apresenta menores valores de RT60, porém, é o que tem menores valores de C80 na região dos graves, e na região dos agudos está numa zona intermediária.

Podemos compreender tais possibilidades se observarmos os conceitos mais atentamente. O RT60 informa *quanto tempo* dura o decaimento, mas o C80 informa *como* esse decaimento se dá. Para um mesmo tempo de decaimento podemos ter várias possibilidades de distribuição de energia ao longo do tempo, ou seja, para um mesmo valor de RT60 há diversos valores possíveis de C80.

Esse fato pode ser facilmente verificado quando observamos os parâmetros medidos em alguns teatros. Por exemplo, as três diferentes posições de captação na platéia central do São Pedro apresentaram praticamente o mesmo RT60, porém seus valores de C80 são bastante diferentes; o mesmo vale para as posições do balcão daquele mesmo teatro. Um caso ainda mais acentuado é o dos pisos superiores (balcões e galeria) do Teatro Municipal, que também apresentam valores de RT60 semelhantes entre si, mas os valores de C80 divergem fortemente. Certamente outros parâmetros devem estar influenciando a Clareza.

Como já mencionamos, a referência temporal para o cálculo de C80 é 80 ms. Considerando um decaimento linear em dB, já observado nos resultados das salas, e utilizando uma regra de três simples, podemos calcular

que em 80 ms o decaimento de energia é de 3,2 dB, para o caso de um RT60 de 1,5 s. Seria grosseiro demais tentar estimar o que acontece nos primeiros 3,2 dB a partir de um resultado válido para o decaimento de 60 dB. É mais razoável esperar uma correlação melhor entre C80 e um valor referente ao intervalo de tempo relacionado aos primeiros instantes de decaimento da energia.

Já conhecemos um parâmetro relacionado ao decaimento de energia nos primeiros instantes da reverberação. Este parâmetro é o EDT (*early decay time*), que é calculado tomando-se a inclinação de decaimento apenas para os primeiros 10 dB. Na análise dos gráficos de decaimento notamos como é possível que haja valores de EDT muito diferentes para valores de RT60 bastante semelhantes.

Seguindo o raciocínio anterior, podemos esperar que seja mais provável uma relação entre EDT e C80, de tal forma que olhando para o gráfico de um poderíamos estimar o comportamento do outro, algo que como já vimos é mais difícil entre C80 e RT60. O próximo passo é comparar os três parâmetros (RT60, C80 e EDT) nas mesmas posições de captação.

Dentro de cada setor os valores de RT60 são praticamente os mesmos. Os valores de C80 assumem valores diferentes entre as posições de cada setor. Os valores de C80 na posição centro-meio do São Pedro são menores que os da posição centro-trás. Para o mesmo setor o comportamento de EDT é inverso: a posição centro-meio apresenta maiores valores de EDT do que a posição centro-trás. No setor dos balcões e galeria do Municipal esse fato se repete: a posição que estava em cima no gráfico de C80 está em baixo no gráfico de EDT.

O que esses gráficos querem expressar vai de encontro à hipótese inicial segundo a qual quanto maior a clareza menor a reverberação e vice-versa. O detalhe importante é que essa relação diz respeito aos primeiros instantes da reverberação (EDT) e não à reverberação total (RT60). No caso em que o EDT sofre pouca variação entre as posições de captação observamos que o C80 também apresenta variações menores.

Em alguns casos, a relação de proporcionalidade inversa entre EDT e C80 não se verificou para todas as frequências. Apesar desse fato, a conclusão mais importante a ser tomada, e que permanece válida para todos os casos observados, é que Clareza musical é muito mais sensível ao decaimento nos primeiros instantes de reverberação do que na reverberação total.

Essa conclusão aparece em trabalhos mais recentes Beranek [4] e é importante para compreendermos alguns resultados acústicos observados. Por exemplo, o Teatro Sérgio Cardoso apresenta excessivos valores de RT60. Antes da conclusão a que chegamos, poderíamos ficar temerosos quanto à Clareza percebida naquele teatro. Entretanto, observamos que seus valores de EDT são bem menores que os de RT60, principalmente nas baixas frequências. Os valores de EDT no Sérgio Cardoso estão dentro da média com relação aos outros teatros, isso explica a posição intermediária ocupada pelo Teatro Sérgio Cardoso no gráfico geral de C80, que também pode ser verificada nas amostras gravadas.

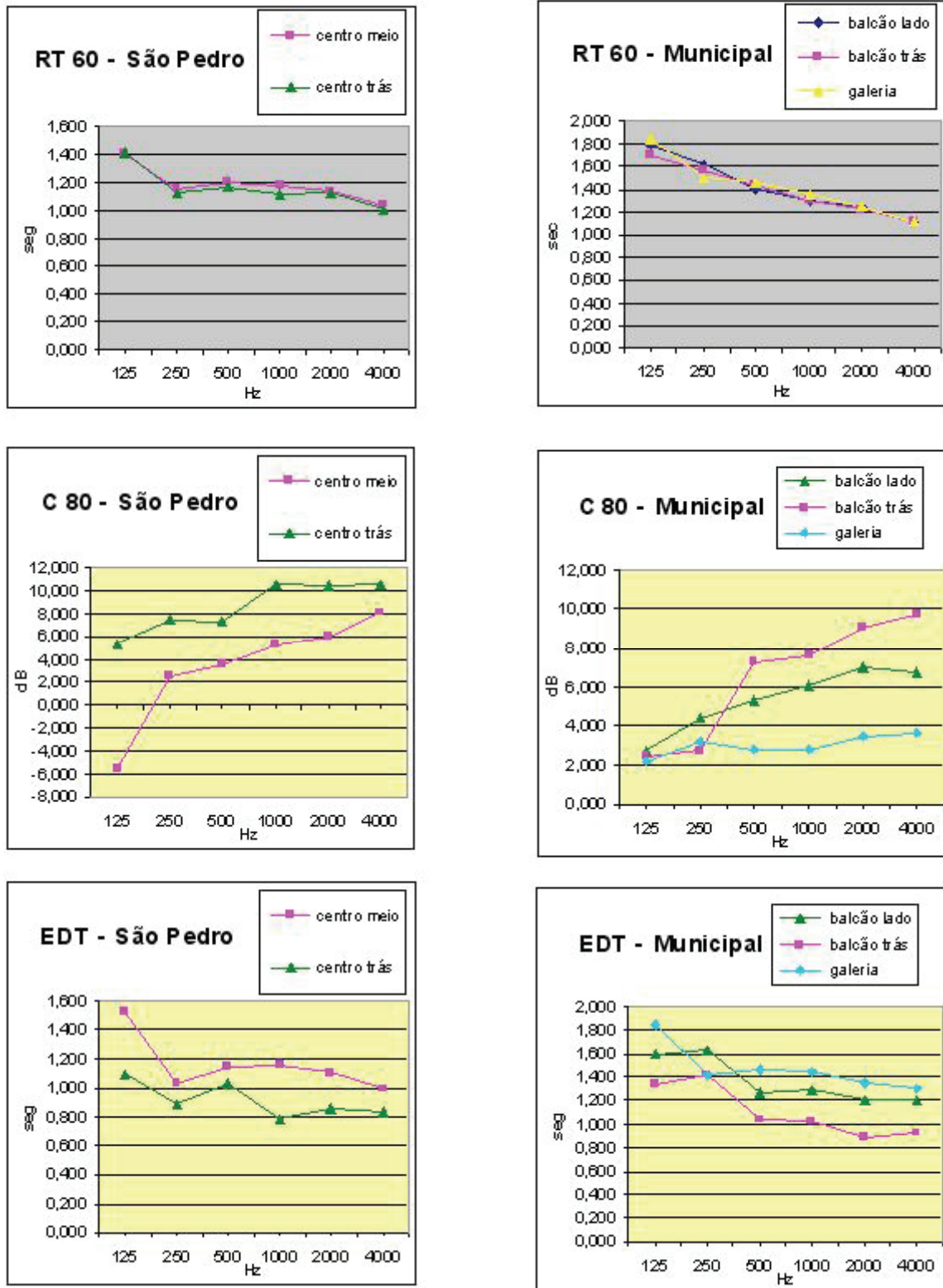


Fig. 4: Comparações entre RT60, C80 e EDT

### Razão Direto / Reverberante (RDR):

O parâmetro RDR é a razão entre a energia direta e a energia reverberante captadas em determinado ponto. O valor do parâmetro RDR é obtido tomando-se como referência o instante de chegada da primeira reflexão. A energia compreendida entre a captação do som direto e da primeira reflexão é a energia direta, e após o instante da primeira reflexão é a energia reverberante.

O gráfico a seguir mostra os valores de RDR calculados em três setores diferentes para cada teatro, conforme o que foi obtido na seção de resultados :

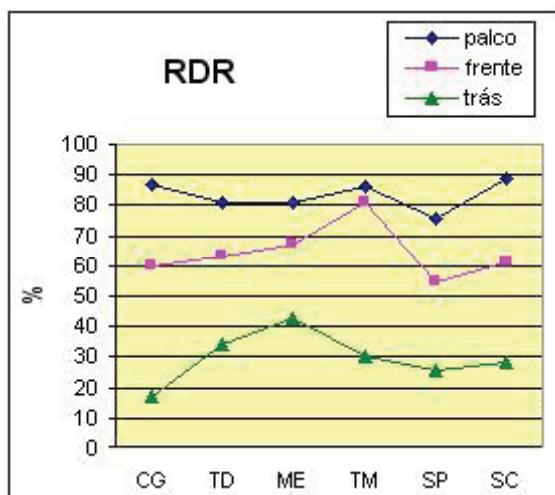


Fig. 5: Valores de RDR

Observamos um interessante padrão no qual as posições de palco apresentam altos valores de RDR, as posições do fundo da platéia apresentam RDR baixo e as posições centrais, valores intermediários. Isso mostra que o RDR é um bom parâmetro para indicar a distância entre fonte sonora e local de captação, grandezas referentes à impressão de intimismo.

Através da análise auditiva das amostras gravadas, percebemos que a sensação de intimismo e mesmo a de reverberação muda bastante conforme a posição de captação, embora o parâmetro RT60 se mantenha constante. Isso indica que ao lado do parâmetro RT60, o parâmetro RDR também é determinante para a impressão subjetiva de reverberação.

Quanto às suas aplicações, o parâmetro RDR pode ser útil como ferramenta auxiliar em simulações acústicas ou como monitoração do ponto de mixagem nos estúdios de gravação.

### RESUMO DAS CONCLUSÕES

- RT60 se mantém razoavelmente constante para as várias posições de captação dentro de uma sala.
- A impressão de reverberação muda conforme a posição de audição dentro de uma sala, embora os valores de RT60 muitas vezes não acompanhem tal mudança.
- Além do RT60, o parâmetro razão de som direto / reverberante tem forte influência sobre a impressão de reverberação.

- O parâmetro BR não se mostrou bem correlacionado com a presença dos graves. Tal impressão é melhor correlacionada ao parâmetro G (strength) tomado nas baixas frequências.
- O parâmetro TR nem sempre foi um bom indicador de brilho.
- A utilidade dos parâmetros BR e TR se restringe à importância que eles apresentaram como critérios eficientes para a avaliação do equilíbrio entre frequências dentro de uma sala.
- O parâmetro razão direto / reverberante se mostrou mais estável e coerente do que o ITDG, no que diz respeito à impressão de intimismo.
- Ao contrário do RT60, o parâmetro C80 sofre forte variação conforme o local de captação na sala.
- O parâmetro C80 é muito melhor correlacionado ao EDT (early decay time) do que ao RT60.

### REFERÊNCIAS

- [1] Iazzetta, F., Kon, F. and Silva, F. S. C. *AcMus: Design and Simulation of Music Listening Environments*, Anais do XXI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, Fortaleza, Brazil, 2001.
- [2] ISO 3382 *Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*, 1997.
- [3] Figueiredo, F. L. *Parâmetros Acústicos Subjetivos: Critérios para Avaliação da Qualidade Acústica de Salas de Música*. 2005. 258p. Dissertação de Mestrado. Escola de Comunicações e Artes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [4] Beranek, L. *Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture*, Springer-Verlag, New York, 2004

### AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa é financiada pela FAPESP (processo n.º 02/02678-0) e apoiada pela Roland Brasil.