



## PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE QUALIDADE ACÚSTICA DE AUDITÓRIOS

**VECCI, M.A. (1); FERRAZ, R.M. (2); HORTA, F.C. (3)**

(1) Departamento de Engenharia de Estruturas – Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil –  
e-mail: vecci@dees.ufmg.br

(2) Departamento de Engenharia de Estruturas – Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil –  
e-mail: rafaela\_ferraz@yahoo.com.br

(3) Departamento de Engenharia de Estruturas – Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil –  
e-mail: fredericocatonehorta@yahoo.com.br

### RESUMO

O presente trabalho tem objetivo de analisar os procedimentos de avaliação da qualidade acústica de salas, comumente utilizados em projetos acústicos. Os descritores acústicos, indicadores de propriedades da sala, foram determinados numericamente e analiticamente, ainda em fase de projeto, e avaliados experimentalmente após a instalação dos sistemas acústicos projetados para o auditório da Escola de Engenharia da UFMG, com capacidade para 400 lugares. Os resultados obtidos nos ensaios experimentais identificaram o bom desempenho acústico do espaço e validaram as simulações acústicas utilizadas no desenvolvimento do projeto. Por outro lado, as expressões analíticas de Sabine, Eyring e Arau-Puchase apresentaram diferenças significativas em relação aos dados experimentais e numéricos.

Palavras-chave: qualidade acústica de salas; simulações acústicas; avaliação acústica de salas.

## **1 INTRODUÇÃO**

Para auditórios e centro de convenções são requeridos espaços que proporcionam inteligibilidade da fala adequada ao uso do espaço de forma que o orador seja facilmente entendido pelo público. A inteligibilidade da fala depende principalmente do nível de ruído de fundo, do tempo de reverberação e do nível do sinal acústico emitido no ambiente.

Durante a fase de projeto de auditórios é importante considerar uma análise de parâmetros acústicos para garantir a qualidade sonora do espaço em questão. Neste trabalho são apresentados procedimentos para avaliação de qualidade acústica de auditórios, os quais são aplicados ao estudo do auditório da Escola de Engenharia da UFMG. Nesse estudo de caso, os descritores acústicos foram determinados numericamente ainda em fase de projeto e avaliados experimentalmente após a instalação dos sistemas acústicos no ambiente.

Os resultados das medições acústicas do auditório, efetuadas após o término de suas obras civis, assim como a avaliação subjetiva da resposta acústica do seu interior demonstraram uma forte correlação com os valores dos parâmetros de qualidade acústica previstos na fase de projeto da sala.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Objeto de Estudo**

O auditório da Escola de Engenharia da UFMG, localizado em Belo Horizonte/MG, possui 400 lugares na platéia, área interna de 1400m<sup>2</sup>, volume de 3790m<sup>3</sup> e pé-direito médio de 5m.

O projeto acústico deste auditório contempla revestimento das paredes laterais em painel de madeira, revestimento do piso da platéia em carpete, poltronas estofadas, forro em gesso liso acartonado com geometria variada, revestimento das paredes e piso do palco em madeira e revestimento da parede de fundo do auditório em material fono-absorvente, o qual também compõe uma armadilha de grave.

### **2.2 Equipamentos**

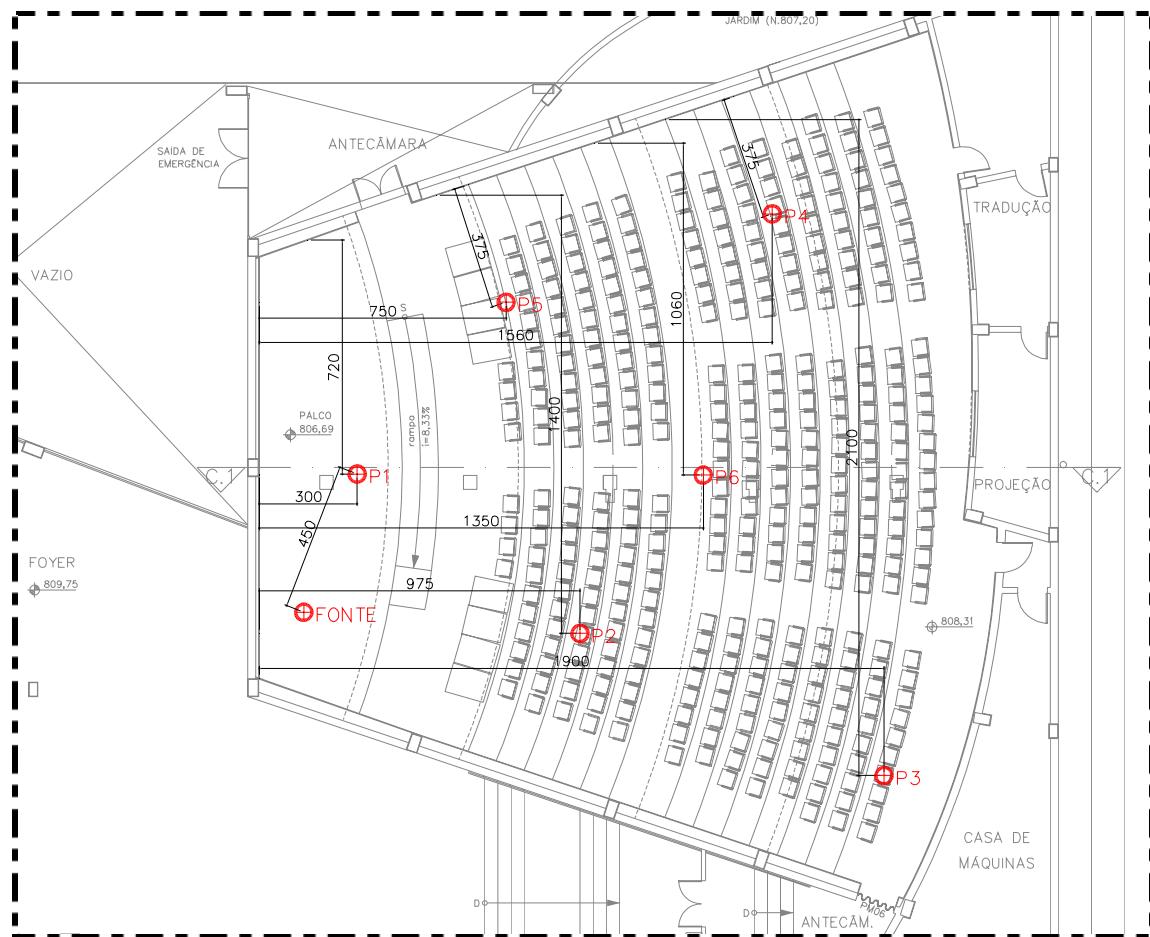
Os equipamentos utilizados para a realização das medições sonoras foram: Notebook HP; Analisador de Freqüência e Integrador Sonoro em Tempo Real, marca 01dB-Stell, modelo SOLO MVI, número de série 10034; microfone marca GRAS, modelo MCE 212, número de série 33497; pré-amplificador marca 01dB-Stell, modelo PRE21S, número de série 10116. Esses equipamentos são classificados como do tipo 1 (um), conforme padrões estabelecidos pelas normas IEC 651, IEC 804, IEC 61672-1, IEC 1260, ANSI S1.11. Também foi utilizado um calibrador de nível de pressão sonora marca 01dB, modelo CAL21, número de série 51231378, classificado como do tipo 1, conforme padrões estabelecidos pela norma IEC-60942, com precisão de +/-0,3dB e com variação de +/-2% na freqüência de emissão de 1000Hz.

### **2.3 Metodologia**

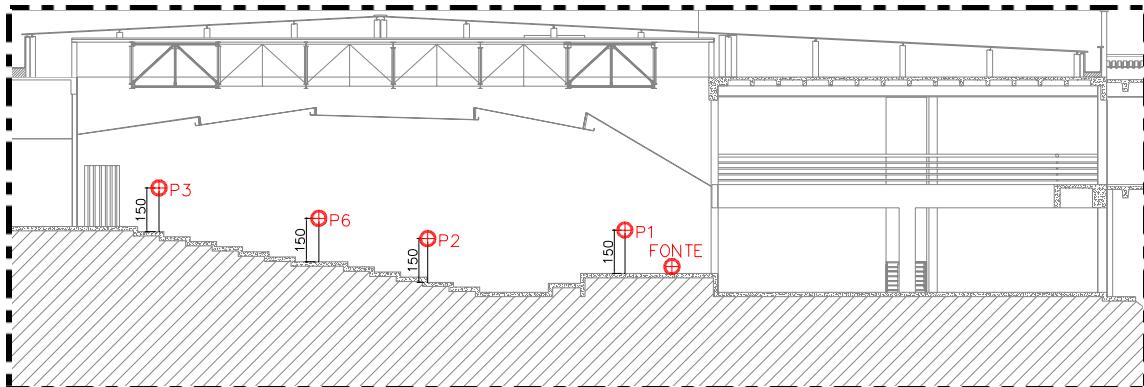
Durante as medições, utilizou-se estouro de balões como fonte de ruído impulsivo. Para cada ponto de medição foram efetuados 3 estouros de balão. Os resultados analisados em cada ponto foram obtidos por meio da média aritmética destas 3 medições. Após as medições, o software utilizado (dB BATI da empresa 01dB - Metravib) calculou os resultados dos parâmetros acústicos, os quais estão analisados no item 3 deste artigo.

A avaliação do ambiente foi efetuada em 06 pontos no interior do auditório, nos quais foram realizadas as medições acústicas – ver Figuras 01 e 02. Antes e após as medições, foram efetuadas aferições do medidor acústico com o Calibrador acústico em 94 dB (1000 Hz), não havendo diferença superior a 0,5dB entre as duas aferições.

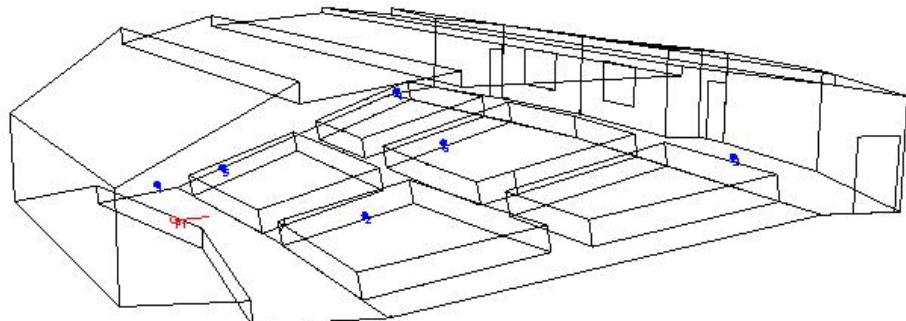
De forma semelhante, utilizando uma maquete eletrônica 3D do auditório (Figura 03), simulou-se computacionalmente, nos mesmos 06 pontos de medição, os parâmetros acústicos de interesse, com uma fonte também localizada no mesmo ponto onde se estourou os balões. Esta simulação foi realizada no software ODEON 7.0, o qual utiliza um método híbrido de simulação, composto do método de traçado de raios e o método de imagem das fontes (CHRISTENSEN, 2003). A Tabela 01 apresenta os coeficientes de absorção e áreas das superfícies do auditório.



**Figura 01** – Planta Baixa do auditório da Escola de Engenharia, com a localização dos pontos de medição.



**Figura 02** – Corte C1 do auditório da Escola de Engenharia, com a localização e altura dos pontos de medição.



**Figura 03** – Maquete eletrônica (volumetria) do auditório da Escola de Engenharia, com a localização dos pontos de medição.

**Tabela 1** – Coeficientes de Absorção e Áreas das superfícies do auditório da Escola de Engenharia da UFMG

Superfícies	Coeficientes de Absorção						Área (m <sup>2</sup> )
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	
Painéis de parede e portas em madeira	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	190
Carpete	0,02	0,04	0,08	0,20	0,35	0,40	225
Manta de lã de vidro, revestida com tecido (forro)	0,20	0,72	0,75	0,99	0,95	0,99	28
Cortina de veludo pesada	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54	3
Vidro duplo	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02	6
Cadeiras almofadadas vazias	0,35	0,40	0,41	0,38	0,33	0,27	362
Painéis de parede e piso do palco em madeira	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	100
Painel perfurado revestido com carpete	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37	79
Gesso acartonado (forro)	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	443

Fonte: Software Odeon 7.0.

## 2.4 Parâmetros Avaliados

Para análise de desempenho acústico do auditório foram considerados os seguintes parâmetros acústicos, indicadores da inteligibilidade da fala: EDT (Tempo de Decaimento Inicial), RT<sub>60</sub> (Tempo de Reverberação), BR (Razão de Graves) e TR (Razão de Agudos).

### 2.4.1 Tempo de reverberação – RT<sub>60</sub> e RT<sub>30</sub>

O tempo de reverberação RT<sub>60</sub> representa o decaimento de 60dB na energia sonora quando uma fonte sonora é interrompida no interior de um ambiente. Os valores de tempo de reverberação podem ser determinados pelas expressões analíticas, propostas por Wallace C. Sabine (eq.1) (MAEKAWA et al, 1994), Eyring (eq.2) (MAEKAWA et al, 1994) e por Arau-Puchase (eq.3) (ARAU-PUCHASE, 1988).

$$RT_{60} = \frac{0,161V}{\sum_{i=1}^n S_i \alpha_i} \quad (\text{eq. 1})$$

$$RT_{60} = \frac{0,161V}{-\sum_{i=1}^n S_i \log_e(1 - \alpha_i)} \quad (\text{eq. 2})$$

$$RT_{60} = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{0,161V}{-S_i \ln(1 - \alpha_i)} \right] \frac{S_{ix}}{S_i} \left[ \frac{0,161V}{-S_i \ln(1 - \alpha_i)} \right] \frac{S_{iy}}{S_i} \left[ \frac{0,161V}{-S_i \ln(1 - \alpha_i)} \right] \frac{S_{iz}}{S_i} \quad (\text{eq. 3})$$

onde: V é o volume da sala [m<sup>3</sup>]

S<sub>i</sub> é a área da i-ésima superfície da sala [m<sup>2</sup>]

α<sub>i</sub> é o coeficiente de absorção da i-ésima superfície sala

S<sub>ix</sub>, S<sub>iy</sub> e S<sub>iz</sub> são, respectivamente, as projeções das i-ésimas áreas nos planos perpendiculares aos eixos do sistema coordenado x, y e z

Devido a dificuldades de se obter experimentalmente o decaimento de 60dB na presença de ruídos de fundo usualmente encontrados em casos práticos, o tempo de reverberação é, em geral, medido através do decaimento de 30dB, quando também é utilizado o método de integração inversa de Shroeder (ISO 3382, 1997) para efetuar integração no intervalo de decaimento entre -5dB e -35dB.

Segundo a norma NBR 12.179, para uma sala de conferência de volume aproximado de 3790 m<sup>3</sup>, o tempo de reverberação recomendado, em 500Hz, é aproximadamente de 1,1s para o ambiente vazio.

#### *2.4.2 Tempo de Decaimento Inicial – EDT*

É o tempo, expresso em segundos, para o decaimento da energia inicial, ou seja, do decaimento de 10dB do som no ambiente. Esse valor é multiplicado por seis para ser comparado ao valor referente de decaimento de 60dB.

Alguns autores recomendam que o tempo de reverberação seja expresso pelo EDT, uma vez que este descritor representa o tempo de decaimento de 10dB, juntamente com o fato de que um som de 10dB (no instante da fala) mascara o som que está 10dB abaixo (som da fala anterior). Sendo assim, o EDT está fortemente relacionado à percepção da fala no ambiente. Além disso, o valor do EDT tende a ter menor variabilidade entre os ambientes vazios e ocupados do que o tempo de reverberação referente ao decaimento de 60dB.

#### *2.4.3 Razão de Graves – BR*

Razão de Graves representa a razão entre a soma dos tempos de reverberação das baixas freqüências e das médias freqüências (CAVANAUGH et al, 1999). Este descritor é utilizado para avaliar o timbre ou balanço tonal, especialmente a qualidade acústica de calidez (preenchimento de sons graves do ambiente). A sala tem a calidez desejável quando há o reforço da energia acústica nas baixas freqüências se comparadas às médias. Portanto, calidez é uma característica que atribui à música a vivacidade ou enchimento dos tons graves.

$$BR = \frac{T30_{125Hz} + T30_{250Hz}}{T30_{500Hz} + T30_{1000Hz}} \quad (\text{eq. 4})$$

#### *2.4.4 Razão de Agudos – TR*

Razão entre as somas dos tempos de reverberação das altas freqüências em relação às médias (CAVANAUGH et al, 1999). Este descritor acústico é utilizado para caracterizar o brilho da sala que representa a manutenção da energia acústica em altas freqüências em relação às médias, no ambiente.

$$TR = \frac{T30_{2000Hz} + T30_{4000Hz}}{T30_{500Hz} + T30_{1000Hz}} \quad (\text{eq. 5})$$

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

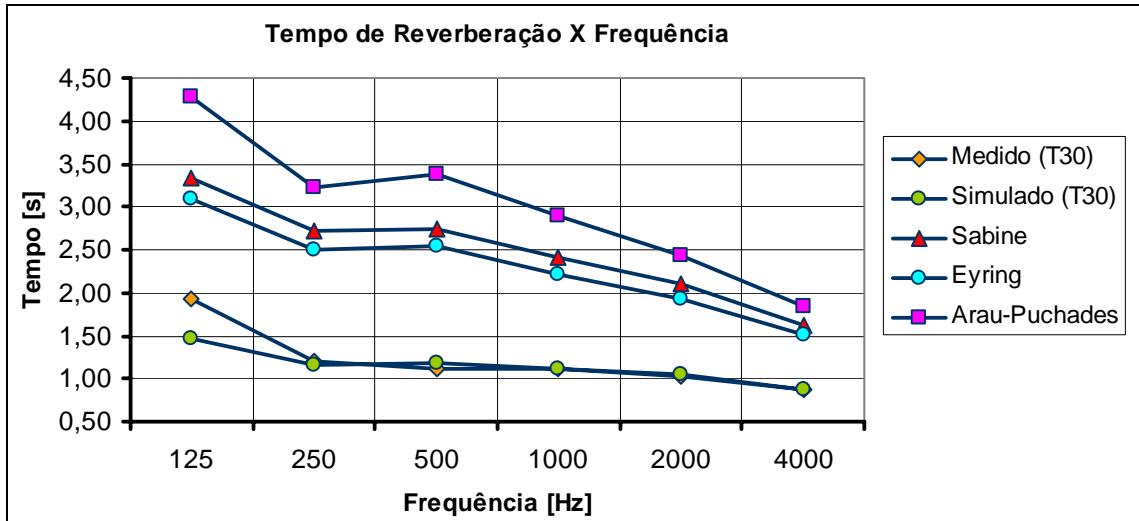
Conforme citado anteriormente, durante o desenvolvimento do Projeto Acústico do auditório da Escola de Engenharia da UFMG, foram realizadas simulações computacionais considerando os descritores acústicos, indicadores da inteligibilidade da fala e qualidade acústica para auditórios. Após a instalação do Projeto Acústico, realizaram-se medições acústicas no local para verificar a resposta da sala e compará-la com o que foi simulado, durante a fase de projeto.

Na análise do Tempo de Reverberação, observa-se que os valores medidos e simulados estão bastante próximos (Tabela 2 e Figura 4) com exceção da banda de freqüência de 125Hz, que apresenta uma diferença de cerca de 24%, mas visto as incertezas de medições e das propriedades acústicas dos materiais inseridas na simulação é aceitável este desvio.

Considerando as incertezas comentadas acima se verifica que, com o tratamento acústico adotado, obtiveram-se valores de tempo de reverberação medido ( $RT_{30} = 1,13s$ ) e simulado ( $RT_{30} = 1,12s$ ), a 500 Hz, aceitáveis ao recomendado ( $RT_{30} = 1,10s$ ) pela NBR 12.179 para este Auditório.

Comparando-se o Tempo de Reverberação calculado pelas equações de Sabine, Eyring e Arau-Puchades (Tabela 2 e Figura 4) com os valores medidos, verificou-se que os Tempos de Reverberação calculados por estas equações apresentaram diferenças significativas em relação aos valores simulados pelo método dos raios e os valores medidos. No estudo de caso em questão, os resultados indicam que o uso das equações de Sabine e Eyring levam a resultados discrepantes da realidade. Como consequência deste fato, a especificação de materiais com maior coeficiente de absorção sonora implicaria em um ambiente acusticamente “seco” e desconfortável. Portanto, como prática de projeto, recomenda-se o uso destas expressões apenas como indicadores iniciais de solução do projeto

acústico. Para definição final do projeto acústico do ambiente se recomenda o uso de simulações computacionais utilizando o método dos traçados dos raios e das imagens, a exemplo do que foi efetuado no presente estudo de caso.

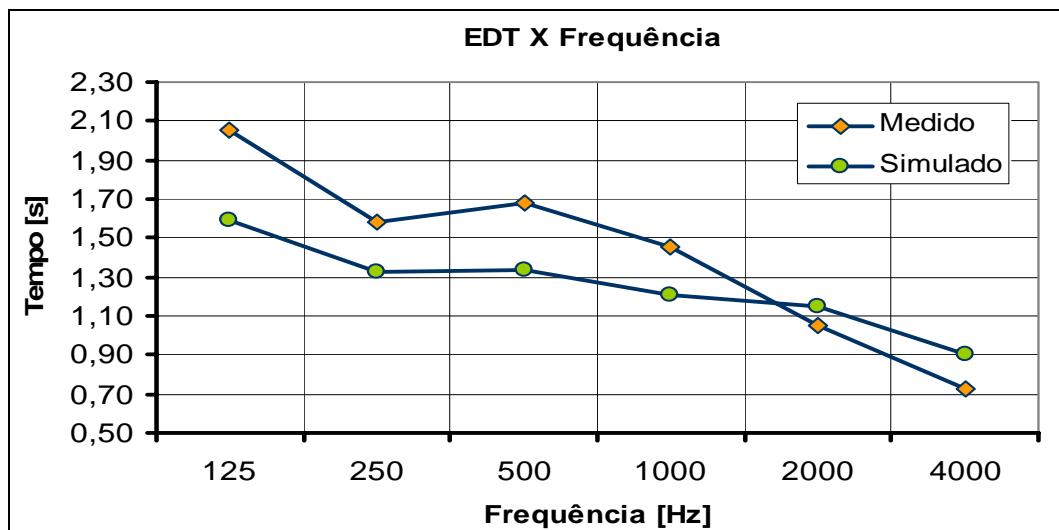


**Figura 04** – Gráfico do Tempo de Reverberação em relação à frequência.

**Tabela 2** – Análise do Tempo de Reverberação do auditório da Escola de Engenharia da UFMG

Frequência [Hz]	Tempo de Reverberação [s]				
	Medido (RT <sub>30</sub> )	Simulado (RT <sub>30</sub> )	Sabine	Eyring	Arau-Puchades
125	1,93	1,46	3,33	3,1	4,27
250	1,20	1,16	2,71	2,49	3,23
500	1,12	1,18	2,75	2,54	3,37
1000	1,13	1,12	2,41	2,21	2,89
2000	1,02	1,05	2,10	1,92	2,43
4000	0,87	0,88	1,63	1,51	1,83

Na análise do EDT, observa-se que os valores medidos e simulados pelo método híbrido (traçados de raios e imagens), apresentaram diferenças aceitáveis, visto os motivos já discutidos para o tempo de reverberação. No gráfico da Figura 05, verifica-se que as curvas dos valores medidos e simulados seguiram uma mesma tendência, similar à das curvas do tempo de reverberação (Figura 04).



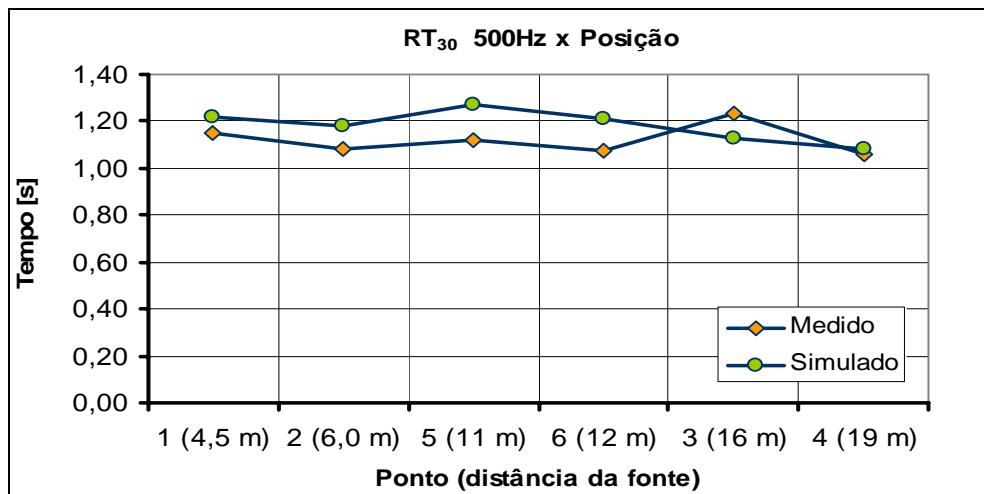
**Figura 05** – Gráfico do EDT em relação à freqüência.

**Tabela 3** – Análise do EDT do auditório da Escola de Engenharia da UFMG

Frequência [Hz]	EDT [s]	
	Medido	Simulado
125	2,05	1,59
250	1,58	1,33
500	1,68	1,34
1000	1,46	1,21
2000	1,05	1,15
4000	0,72	0,90

Analizando espacialmente, por ponto de medição, o Tempo de Reverberação ( $RT_{30}$ ) e o EDT, na banda de frequência de 500 Hz (Tabelas 4 e 5, Figuras 6 e 7), observa-se que os valores medidos e simulados do EDT tiveram variação mais acentuada do que os valores do Tempo de Reverberação no ambiente. Este fato esta de acordo com os dados apresentados nas Figuras 4 e 5, onde o EDT teve maiores variações entre os valores simulados e medidos, por banda de freqüência, do que o Tempo de Reverberação.

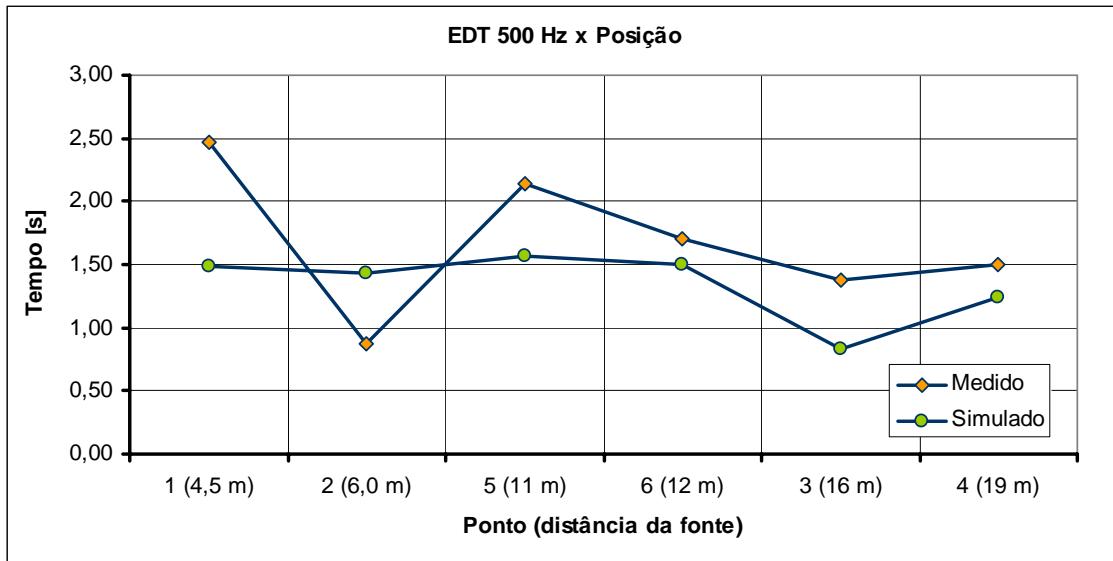
Observe que a distribuição do  $RT_{30}$  no ambiente está homogênea, indicando um comportamento acústico uniforme no interior do auditório, o que é bastante desejável neste tipo de ambiente.

**Figura 06** – Gráfico de análise do  $RT_{30}$  na banda de frequência de 500 Hz por posição de medição.**Tabela 4** – Análise do  $RT_{30}$  na banda de frequência de 500 Hz por posição de medição

Posição *	$RT_{30}$ [s]	
	Medido	Simulado
1 (4,5 m)	1,15	1,22
2 (6,0 m)	1,08	1,18
5 (11 m)	1,12	1,27
6 (12 m)	1,07	1,21
3 (16 m)	1,23	1,13
4 (19 m)	1,06	1,08

\* Número do ponto de medição e distância entre a fonte e o receptor.

Em relação à Razão de Graves (BR) e Razão de Agudos (TR), Cavanaugh (1999) recomenda que estes valores sejam superiores à unidade. Os valores das Razões de Grave permaneceram acima da unidade, demonstrando que o auditório apresenta desempenho apropriado em relação a este parâmetro (Tabela 6 e Figura 8). Embora as Razões de Agudo tenham apresentado valores inferiores à unidade (Tabela 6 e Figura 8), através de percepção subjetiva verificou-se que o auditório está apropriado, constituindo um ambiente “vivo”, mesmo com o indicativo de baixo valor de TR.

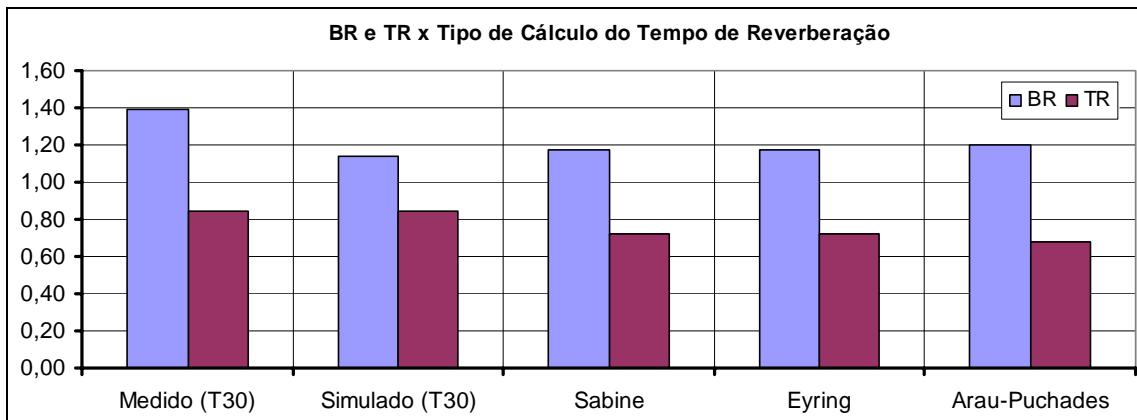


**Figura 07** – Gráfico de análise do EDT na banda de frequência de 500 Hz por posição de medição.

**Tabela 5** – Análise do EDT na banda de frequência de 500 Hz por posição de medição

Posição *	EDT [s]	
	Medido	Simulado
1 (4,5 m)	2,47	1,48
2 (6,0 m)	0,87	1,43
5 (11 m)	2,14	1,57
6 (12 m)	1,70	1,50
3 (16 m)	1,38	0,83
4 (19 m)	1,49	1,24

\* número do ponto de medição e distância entre a fonte e o receptor.

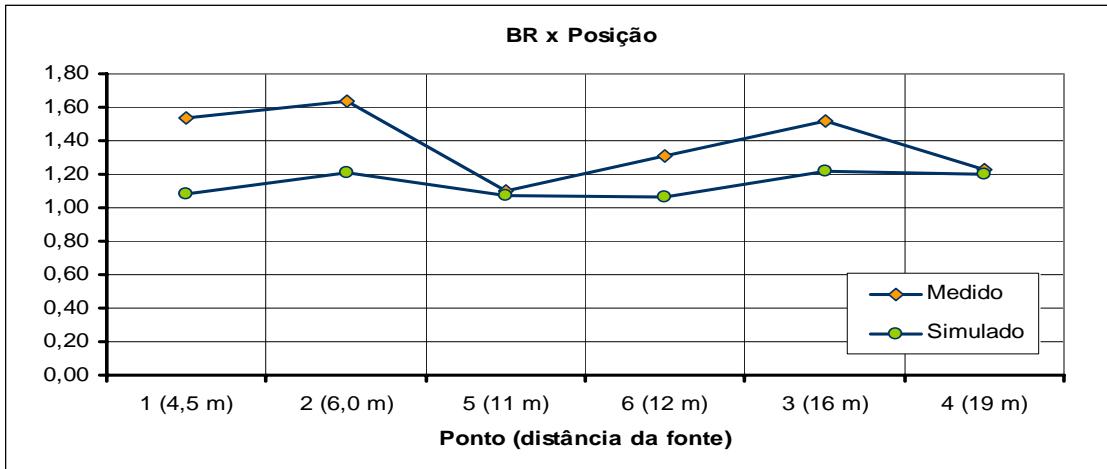


**Figura 08** – Gráfico de comparação do BR e TR.

**Tabela 6** – Análise da Razão de Graves e Razão de Agudos do auditório da Escola de Engenharia da UFMG

Descriptor	BR e TR				
	Medido	Simulado	Sabine	Eyring	Arau-Puchades
BR	1,39	1,14	1,17	1,18	1,20
TR	0,84	0,84	0,72	0,72	0,68

Analizando espacialmente, por ponto de medição, observa-se que os valores de BR permaneceram superiores à unidade em todas as posições avaliadas, assim como os valores de TR permaneceram abaixo da unidade, entre 0,8 e 0,9 (Tabelas 7 e 8, Figuras 9 e 10). Tal fato reforça a condição de comportamento acústico uniforme do ambiente.



**Figura 09** – Gráfico de análise do BR por posição de medição.

**Tabela 7** – Análise do BR por posição de medição

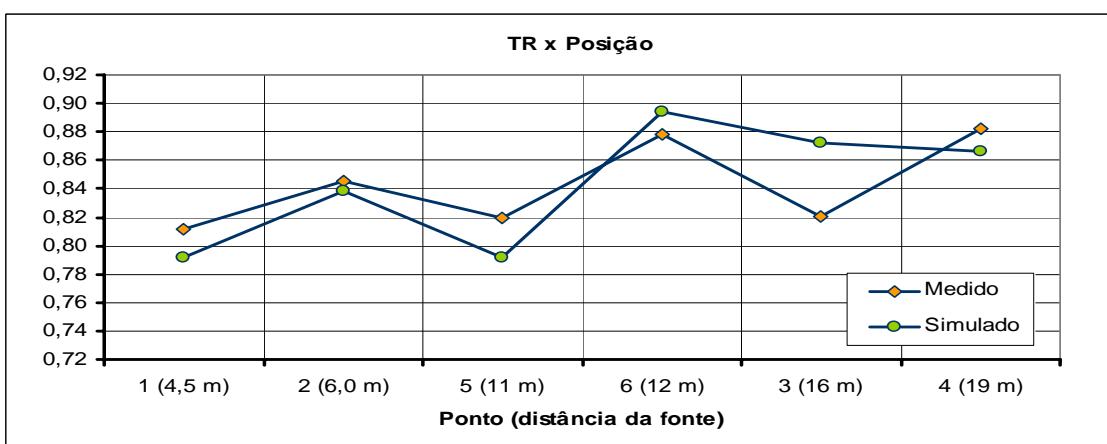
BR	Posição *	Medido	Simulado
	1 (4,5 m)	1,54	1,08
	2 (6,0 m)	1,64	1,21
	5 (11 m)	1,10	1,08
	6 (12 m)	1,31	1,07
	3 (16 m)	1,52	1,22
	4 (19 m)	1,23	1,20

\* número do ponto de medição e distância entre a fonte e o receptor.

**Tabela 8** – Análise do TR por posição de medição

TR	Posição *	Medido	Simulado
	1 (4,5 m)	0,81	0,79
	2 (6,0 m)	0,85	0,84
	5 (11 m)	0,82	0,79
	6 (12 m)	0,88	0,89
	3 (16 m)	0,82	0,87
	4 (19 m)	0,88	0,87

\* número do ponto de medição e distância entre a fonte e o receptor.



**Figura 10** – Gráfico de análise do TR por posição de medição.

## **4      CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste trabalho foram apresentados os resultados da aplicação de alguns procedimentos de avaliação do comportamento acústico de salas, os quais foram utilizados para avaliar um auditório de 400 lugares. Os descritores de qualidade acústica foram determinados numericamente, através de simulação computacional pelo método híbrido, composto por traçado de raios e o método de imagem das fontes, ainda em fase de projeto, e validados experimentalmente após a construção do auditório.

Os valores simulados pelo método híbrido mostraram forte concordância com os dados medidos enquanto os obtidos pelas expressões de Sabine, Eyring e Arau-Puchase apresentaram diferenças significativas em relação a esses dados. Tal fato indica que os usos dessas expressões podem levar a resultados discrepantes da realidade comprometendo o resultado esperado. Sendo assim, como prática de projeto, recomenda-se o uso destas equações apenas como indicadores iniciais para o projeto acústico adotando-se simulações computacionais, na solução final, como exemplificado no estudo de caso apresentado neste trabalho.

## **5      REFERÊNCIAS**

- [1] ARAU-PUCHADES, H. ¿Es el criterio acustico el paradigma de la excelencia acústica en el diseño de salas? In: Acustica 2008, Coimbra. **Anais...**Coimbra, Portugal: Universidade de Coimbra, 2008.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12.179** - Tratamento Acústico em Recintos Fechados. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- [3] BRÜEL & KJAER. **Measurements in Building Acoustics**. Naerum (DK): Brüel & Kjaer, 1988. 44p.
- [4] CAVANAUGH, W.J.; WILKES, J.A. **Architectural Acoustics: Principles and Practices**. 1.ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1999. 332p.
- [5] CHRISTENSEN, C.L. **Odeon Room Acoustics Program, version 7.0, User Manual**. Denamark: Tecnical University of Denamark, 2003. 86p.
- [6] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 3382**. Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustics parameters. 1997.
- [7] MAEKAWA, Z.; LORD, P. **Environmental and Architectural Acoustics**. London, UK: E and FN Spon, 1994. 371p.
- [8] VECCI, M.A.M.; MOREIRA, R.A.S; PORTUGAL, A.A.B. Determinação experimental e análise de descritores acústicos de salas. In: XX Encontro de Sociedade Brasileira da Acústica – SOBRAC, 2002, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: 2002. 6p.
- [9] ARAU-PUCHADES, H. **An improved reverberation formula**. Acustica (65), 163-180, 1988.

## **6      AGRADECIMENTOS**

Os autores gostariam de agradecer à Escola de Engenharia da UFMG pelo apoio na realização deste trabalho.