

TEATRO JORDÃO: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS VALORES DO RASTI CALCULADOS ANALITICAMENTE E OS OBTIDOS POR MEDIÇÃO

PACS: 43.55.Gx

Luís Bragança¹; Jorge Patrício²; Bárbara Yü Belo¹; José Furtado Gomes³

¹ Universidade do Minho

Departamento de Engenharia Civil. 4800-058 Guimarães, Portugal

E-mail: braganca@civil.uminho.pt; barbara.yu@civil.uminho.pt

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Av. do Brasil. 1700 Lisboa, Portugal

E-mail: jpatricio@lnec.pt

³ Instituto Politécnico da Guarda

Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Dep. Engenharia Civil

6300 Guarda, Portugal

E-mail: jafurtado@ipg.pt

ABSTRACT

The aim of the work presented on this paper is to study Jordão's Theatre Hall acoustical performance, in order to evaluate its intelligibility characteristics. The main Hall is an example of combination between earliest art deco of Portuguese architecture and several geometric influences of Italian Opera Houses. With a rectangular shape, an audience zone with a volume of 5632.00m³, 17.70m width, 29.60m length and a maximum height of 11.00m, the Hall has a capacity for 1220 spectators, distributed by two-order levels of seats. RASTI was the parameter chosen to this acoustical study, related with the intelligibility of spoken word. The reason for this choice lies on the existing correlation between this parameter and other ones commonly used in room acoustics (Rt, ALCons, etc). In this paper, the results of RASTI obtained from mathematical calculation and those got from measurement *in situ* are compared and analyzed.

RESUMO

O objectivo do presente artigo é caracterizar o comportamento do auditório do Teatro Jordão, em Guimarães, relativamente à inteligibilidade da palavra. O auditório (perfeitamente simétrico relativamente ao plano vertical longitudinal que o contém), é caracterizado por uma "linguagem" formal que o enquadra no grupo de salas de espectáculo de tradição italiana que caracterizou o panorama português durante as últimas décadas do século XIX e as primeiras do século XX. Com uma forma rectangular, uma zona de audiência com um volume de 5632.00m³, 17.70m de largura, 29.60m de comprimento e uma altura máxima de 11.00m, tem uma capacidade de 1220 lugares, distribuídos por dois níveis (1ª ordem: plateia e frisas, 2ª ordem: balcão e camarotes). O parâmetro RASTI foi o escolhido para a caracterização acústica em causa. As razões que sustentam a sua adopção inserem-se na facilidade com que este índice se relaciona com outros parâmetros correntemente utilizados na acústica de salas (Tr, ALCons, etc). Neste artigo comparam-se os resultados do cálculo analítico do RASTI com os valores obtidos em medições realizadas *in situ*, apresentando-se as respectivas conclusões, consideradas pertinentes.

1. INTRODUÇÃO

O parâmetro RASTI é uma versão simplificada do parâmetro STI (“Speech Transmission Index”) definido em 1984 por T. Houtgast e H. Steeneken, e tem por objectivo quantificar a inteligibilidade da palavra num espaço fechado.

A inteligibilidade de uma mensagem de voz é um aspecto fundamental para a qualidade acústica de uma sala de espectáculos, mesmo que o seu uso não seja exclusivamente dirigido a actividades relacionadas com o uso da palavra.

Ainda que cada indivíduo possua uma tonalidade de voz predominante, é facilmente perceptível que, ao longo de um discurso, existem ligeiras variações nas frequências associadas, as quais se traduzem em flutuações rítmicas. Deste modo, a capacidade de compreensão de uma mensagem de voz é em grande parte determinada pela correcta recepção das modulações (de baixa frequência) do sinal emitido.

O parâmetro RASTI é frequentemente utilizado para caracterizar acusticamente recintos, oscilando os seus valores entre 0 (inteligibilidade nula) e 1 (inteligibilidade perfeita). O RASTI encontra-se ainda relacionado com um outro parâmetro de avaliação da inteligibilidade da palavra, ALCons.

2. OBTENÇÃO ANALÍTICA DO VALOR DO RASTI

O cálculo do parâmetro RASTI, tal como do STI, é baseado na avaliação da “degradação” da modulação entre o ponto de emissão e o de recepção, ou seja na Função de Transferência de Modulação (FTM). A simplificação caracterizadora do cálculo do RASTI relativamente ao do STI consiste na redução do número de frequências de modulação (F_m).

Assim, as frequências de cálculo de 500 e 2000 Hz, essenciais para a inteligibilidade da palavra, são moduladas pelas seguintes frequências:

| F_0 (Hz) | F_m (Hz) | | | |
|------------|------------|-----|-----|-----|
| 500 | 1.0 | 2.0 | 4.0 | 8.0 |

| F_0 (Hz) | F_m (Hz) | | | | |
|------------|------------|-----|-----|-----|------|
| 2000 | 0.7 | 1.4 | 2.8 | 5.6 | 11.2 |

A alteração da modulação de um sinal composto por uma mensagem de voz, é condicionado por dois aspectos:

- a relação sinal/ruído para cada frequência de modulação medida ou estimada na posição do receptor;
- a reverberação do recinto.

Assim, os valores do RASTI obtidos serão resultantes de uma combinação dos aspectos anteriormente descritos, os quais têm participações distintas na forma como influenciam a evolução em modulação de um sinal:

- se o factor predominante for o ruído de fundo, a FTM tende a não variar significativamente com as frequências de modulação (F_m), uma vez que este tipo de ruído afecta geralmente a modulação em todas as frequências;
- se a reverberação for o factor responsável pela degradação do sinal, verifica-se que os valores da FTM decrescem à medida que aumenta o valor da frequência de modulação.

Este método de cálculo foi definido por T. Houtgast e H. Steeneken, e permite determinar a alteração do índice de modulação (m) para cada combinação das frequências F_0 e F_m .

$$m(F_0, F_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F_m f(F_0)}{13.8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-S/N(F_0)}{10}}} \quad (1)$$

Sendo:

$f(F_0)$ = função associada à evolução das características de reverberação do recinto considerado para as frequências F_0 . O valor correspondente poderá ser o de Tr ou o EDT (*Early decay time*), estimado ou medido, do recinto para a banda de frequência de referência. De acordo com estes parâmetros, a expressão tomará a seguinte forma:

$$m(F_0, F_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi F_m \frac{T}{13.8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\left(1 + 10^{\frac{-S/N(F_0)}{10}}\right)} \quad (2)$$

$S/N(F_0)$ = relação média sinal/ruído aparente, para F_0 , calculada pela expressão:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{ap} = \frac{\sum_{F_0, F_m} \left(\frac{S}{N}\right)_{ap}(F_0, F_m)}{9} \quad (3)$$

Uma vez que, no cálculo do RASTI, existem nove índices de modulação, os valores de $m(F_0, F_m)$ serão igualmente nove.

Por sua vez, os índices de redução de modulação (m) são convertidos na relação sinal/ruído aparente para cada frequência de modulação de acordo com a seguinte expressão:

$$S/N_{ap} = 10 \log[m/1 - m] \quad (4)$$

Os valores da relação S/N_{ap} são truncados nos níveis sonoros +15dB e -15dB. Ou seja, os valores que se apresentarem inferiores a -15dB e superiores a +15dB assumirão os valores de -15dB e +15dB respectivamente. O valor do RASTI é assim determinado por:

$$RASTI = \frac{\overline{m(F_0, F_m)} + 15}{30} ; RASTI = \frac{1}{9} \sum \frac{(S/N_{ap} + 15)}{30} \quad (5,6)$$

Para além de poder ser calculado analiticamente este parâmetro pode ser quantificado *in situ* recorrendo-se a equipamento específico. Os procedimentos de medição encontram-se descritos no ponto 3. Na tabela seguinte apresenta-se uma relação qualificada dos valores de RASTI:

| RASTI | 0.00 – 0.30 | 0.30 – 0.45 | 0.45 – 0.60 | 0.60 – 0.75 | 0.75 – 1.00 |
|-------|-------------|--------------|-----------------|-------------|------------------|
| | Mau | Pobre | Razoável | Bom | Excelente |

Tabela 1: Qualificação dos valores de RASTI

O cálculo do valor do RASTI foi efectuado em função do valor de Tr medido em dez pontos da sala (estes pontos foram utilizados para as medições de todos os parâmetros). O ponto 1 localiza-se na plateia, perto do palco e o ponto 10 (o mais afastado), encontra-se no balcão, junto à parede de fundo da sala. Os valores do Tempo de reverberação obtidos foram os seguintes:

| Tr (s) | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 500 Hz | 1.48 | 1.70 | 1.49 | 1.40 | 1.50 | 1.85 | 1.57 | 1.70 | 1.80 | 1.47 |
| 2000 Hz | 1.65 | 1.63 | 1.52 | 1.58 | 1.48 | 1.46 | 1.55 | 1.64 | 1.70 | 1.55 |

Tabela 2: Valores médios obtidos com a medição in situ do valor do Tr

Da mesma forma foi medido ruído de fundo estabelecido na sala, apresentando-se, na tabela 3, os respectivos valores.

| Freq. (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
| R_f (dB) | 40.0 | 34.0 | 28.2 | 24.4 | 23.1 | 16.6 |

Tabela 3: Valores médios obtidos para o ruído de fundo

Para efeitos de cálculo, considerou-se que o nível sonoro do sinal emitido seria de 59dB para a frequência de 500Hz e de 50dB para a 2000Hz.

Em seguida apresenta-se, a título de exemplo, a expressão que calcula a redução do índice de modulação (m), no ponto 1, com o sinal a 500Hz modulado, sendo a frequência de modulação 1Hz:

$$m(F_{500}, F_1) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi \cdot 1 \cdot \frac{1.48}{13.8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\left(1 + 10^{\frac{-59/28.2}{10}}\right)} = -1.32 \quad (7)$$

Os resultados correspondentes apresentam-se seguidamente, nas tabelas seguintes:

| | | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 |
|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 500 Hz | 1 Hz | -1.32 | -1.01 | -1.32 | -1.32 | -1.32 |
| | 2 Hz | -0.95 | -0.89 | -0.95 | -0.95 | -0.95 |
| | 4 Hz | -0.55 | -0.51 | -0.55 | -0.55 | -0.55 |
| | 8 Hz | -0.29 | -0.26 | -0.29 | -0.29 | -0.29 |
| 2000 Hz | 0.7 Hz | -0.49 | -0.49 | -0.49 | -0.49 | -0.49 |
| | 1.4 Hz | -0.44 | -0.44 | -0.44 | -0.44 | -0.44 |
| | 2.8 Hz | -0.28 | -0.28 | -0.28 | -0.28 | -0.28 |
| | 5.6 Hz | -0.15 | -0.15 | -0.15 | -0.15 | -0.15 |
| | 11.2 Hz | -0.08 | -0.08 | -0.08 | -0.08 | -0.08 |
| RASTI | | <i>0.48</i> | <i>0.48</i> | <i>0.48</i> | <i>0.48</i> | <i>0.48</i> |

| | | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 500 Hz | 1 Hz | -1.23 | -1.32 | -1.01 | -1.23 | -1.32 |
| | 2 Hz | -0.84 | -0.95 | -0.89 | -0.84 | -0.95 |
| | 4 Hz | -0.47 | -0.55 | -0.51 | -0.47 | -0.55 |
| | 8 Hz | -0.24 | -0.29 | -0.26 | -0.24 | -0.29 |
| 2000 Hz | 0.7 Hz | -0.49 | -0.49 | -0.49 | -0.49 | -0.49 |
| | 1.4 Hz | -0.44 | -0.44 | -0.49 | -0.44 | -0.44 |
| | 2.8 Hz | -0.28 | -0.28 | -0.44 | -0.28 | -0.28 |
| | 5.6 Hz | -0.15 | -0.15 | -0.28 | -0.15 | -0.15 |
| | 11.2 Hz | -0.08 | -0.08 | -0.15 | -0.08 | -0.08 |
| RASTI | | <i>0.48</i> | <i>0.48</i> | <i>0.48</i> | <i>0.48</i> | <i>0.48</i> |

Tabelas 4 e 5: Valores do parâmetro RASTI obtidos com base em cálculo analítico

Como se verifica, o valor de RASTI obtido através do cálculo analítico é em média, para todos os dez pontos considerados, 0,45, o que corresponde a um valor de inteligibilidade razoável.

3. OBTENÇÃO DO VALOR DO RASTI COM BASE EM MEDIÇÕES

As medições que levaram à obtenção dos valores do RASTI no auditório foram realizadas no dia 12 de Julho de 2003. Nesse dia, a temperatura da sala era de 26°C e a humidade relativa rondava os 45%. O equipamento utilizado para efectuar os ensaios é composto por um equipamento Brüel & Kjaer, ref. 3361, constituído por um transmissor ref. 44225 e um receptor ref. 4419.

As medições, efectuadas com a sala vazia, consistiram na transmissão aos dez pontos do auditório, de um sinal de ruído filtrado nas bandas de oitava de 500 e 2000 Hz, essenciais para cálculo da inteligibilidade da palavra, e modulado, em cada banda, com sinais de baixa frequência que tentam reproduzir as modulações da voz humana (1.0; 2.0; 4.0 e 8.0 Hz na banda de 500 Hz e 0.7; 1.4; 2.8; 5.6 e 11.2 na banda de oitava de 2000 Hz).

O transmissor foi colocado na área do *proscenium*, no eixo da sala, a 1.50 m de altura. O sinal foi emitido durante 16 segundos, não tendo sido utilizados sistemas de amplificação sonora.

Por sua vez, o sinal em cada ponto foi captado por um microfone e enviado para o receptor, onde foi analisada a “degradação” da modulação entre o ponto de emissão e o de recepção, obtendo-se assim a Função de Transferência de Modulação (FTM) entre todos os pontos em causa. Seguidamente, a partir do conhecimento da FTM determinou-se o valor do parâmetro RASTI.

Nas tabelas seguintes apresentam-se os resultados obtidos.

| | | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 |
|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 500 Hz | 1 Hz | 0.88 | 0.83 | 0.84 | 0.84 | 0.82 |
| | 2 Hz | 0.64 | 0.61 | 0.62 | 0.62 | 0.58 |
| | 4 Hz | 0.36 | 0.35 | 0.28 | 0.40 | 0.32 |
| | 8 Hz | 0.26 | 0.24 | 0.32 | 0.17 | 0.20 |
| 2000 Hz | 0.7 Hz | 0.94 | 0.89 | 0.90 | 0.89 | 0.92 |
| | 1.4 Hz | 0.84 | 0.81 | 0.74 | 0.72 | 0.77 |
| | 2.8 Hz | 0.54 | 0.64 | 0.54 | 0.56 | 0.49 |
| | 5.6 Hz | 0.43 | 0.36 | 0.30 | 0.30 | 0.47 |
| | 11.2 Hz | 0.30 | 0.27 | 0.19 | 0.20 | 0.19 |
| RASTI | | 0.58 | 0.55 | 0.53 | 0.52 | 0.53 |

| | | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 500 Hz | 1 Hz | 0.82 | 0.82 | 0.89 | 0.82 | 0.82 |
| | 2 Hz | 0.59 | 0.67 | 0.69 | 0.59 | 0.64 |
| | 4 Hz | 0.39 | 0.47 | 0.47 | 0.43 | 0.51 |
| | 8 Hz | 0.36 | 0.24 | 0.18 | 0.18 | 0.30 |
| 2000 Hz | 0.7 Hz | 0.87 | 0.94 | 0.91 | 0.89 | 0.90 |
| | 1.4 Hz | 0.75 | 0.75 | 0.77 | 0.73 | 0.78 |
| | 2.8 Hz | 0.54 | 0.57 | 0.52 | 0.58 | 0.60 |
| | 5.6 Hz | 0.39 | 0.51 | 0.37 | 0.39 | 0.57 |
| | 11.2 Hz | 0.24 | 0.46 | 0.26 | 0.24 | 0.41 |
| RASTI | | 0.54 | 0.58 | 0.56 | 0.53 | 0.59 |

Tabelas 6 e 7: Valores do RASTI obtidos através de medições in situ

Como as tabelas 6 e 7 indicam, o valor do RASTI obtido com base em medições varia um pouco de ponto para ponto, sendo o seu valor médio 0.55 correspondendo qualitativamente a uma inteligibilidade razoável. Do mesmo modo, não se verifica perda de inteligibilidade à medida que o receptor se afasta do transmissor.

4. CONCLUSÕES

Relativamente às conclusões formuladas apresenta-se na figura seguinte a comparação global dos resultados obtidos.

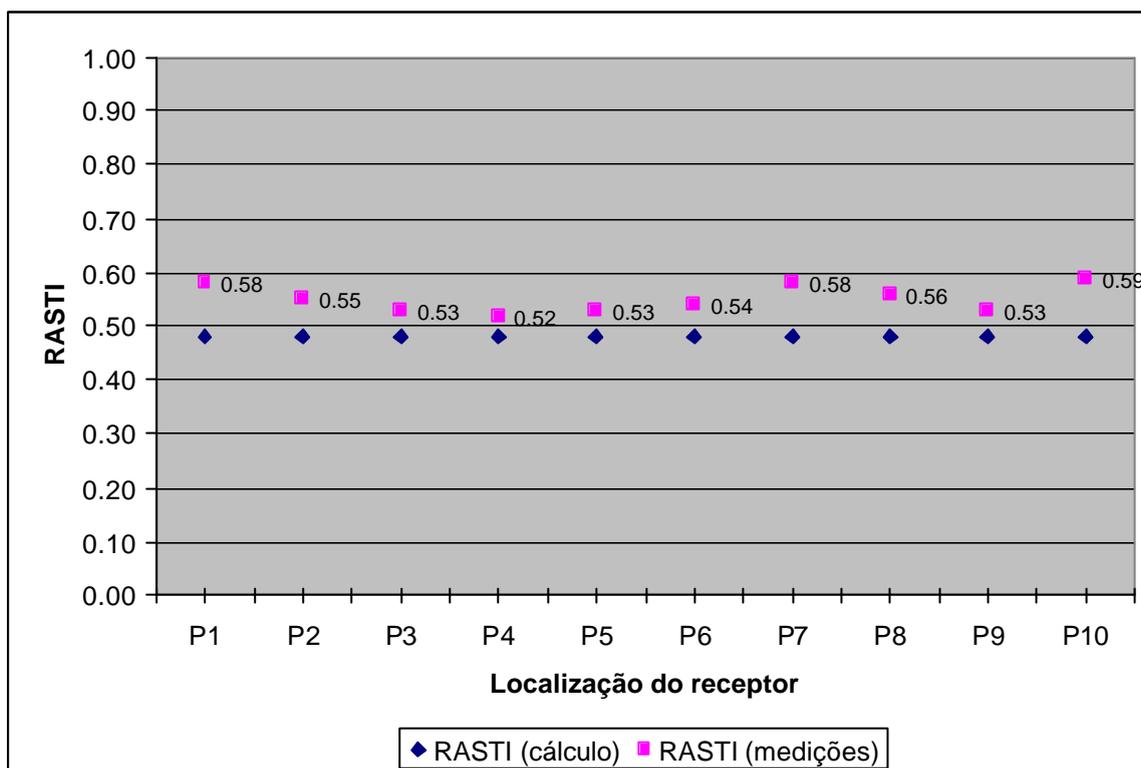


Gráfico 1: Comparação entre os valores do RASTI obtidos através do cálculo e de medições

Como é possível observar, o cálculo analítico do RASTI conduziu a valores mais desfavoráveis do que os obtidos através das medições *in situ*, embora se conclua em ambos os métodos que a inteligibilidade da sala se enquadra num nível razoável.

O facto das medições do valor de T_r e do ruído de fundo (R_f) terem sido efectuadas no mesmo dia que as usadas para determinação do RASTI poderá justificar a ligeira discrepância de valores: considera-se provável que aquando das primeiras medições o ruído de fundo fosse mais intenso, conduzindo a valores de RASTI inferiores.

REFERÊNCIAS

1. Houtgast, T. e Steeneken, H., - "A Multi-language evaluation of the RASTI method for estimating speech intelligibility in auditoria." *Acustica* 54. Pp. 185-199. 1994.
2. Daumal Domenèch, F. - "Acústica arquitectónica en grans sales", Barcelona 1986.
3. Isbert, A. C. - "Diseño acústico de espacios arquitectónicos", Barcelona 1998.
4. Kuttruff, H. - "Room acoustics", 1991.
5. Sendra, J. J.; Zamarreño, T.; Navarro, J. - "La acústica de las iglesias gótico-mudejares de Sevilla", Sevilla 1999, pp. 23-32.
6. Patricio, J. - "Acústica nos Edifícios", Ed. do autor, Lisboa 2003.