

# CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO TEATRO NACIONAL S. JOÃO (PORTO)

Hannah S. F. Mocarzel<sup>1</sup>, António P. O. Carvalho<sup>1</sup>, António E. B. Costa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Acústica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
{up201900143@edu.fe.up.pt, carvalho@fe.up.pt, aecosta@fe.up.pt}

## Resumo

Esta comunicação trata da caracterização acústica do Teatro Nacional S. João (Porto, Portugal) inaugurado em 1798, mas reconstruído em 1920 após incêndio. Foram medidos os parâmetros:  $L_{Aeq}$  (sem AVAC), STI (*Speech Transmission Index*), Tempo de Reverberação, Claridade ( $C_{80}$ ), Definição ( $D_{50}$ ) e Tempo Central ( $t_s$ ). São apresentados os principais resultados, as conclusões obtidas e a comparação com resultados de cinco salas de ópera internacionais e um teatro nacional (Teatro Sá de Miranda, Viana do Castelo) com o mesmo formato em *ferradura*. Para além dessas, comparou-se com mais onze salas nacionais de formatos variados.

**Palavras-chave:** Teatro, Ópera, Tempo de reverberação, Porto.

## Abstract

The goal of this paper is the acoustic characterization of the Teatro Nacional S. João (Porto, Portugal) inaugurated in 1798, but completely rebuilt in 1920 after a fire. The following parameters were measured:  $L_{Aeq}$  (without HVAC), STI (*Speech Transmission Index*), Reverberation Time, Clarity ( $C_{80}$ ), Definition ( $D_{50}$ ) and Central Time ( $t_s$ ). The main results are presented, the conclusions obtained and also the comparison with the results measured in five international opera halls and one national theater (T. Sá de Miranda, Viana do Castelo), with the same *horseshoe* shape. In addition, it was also compared with eleven other national theaters of various formats.

**Keywords:** Theater, Opera, Reverberation Time, Oporto.

**PACS no. 43.55.Gx**

## 1. Introdução

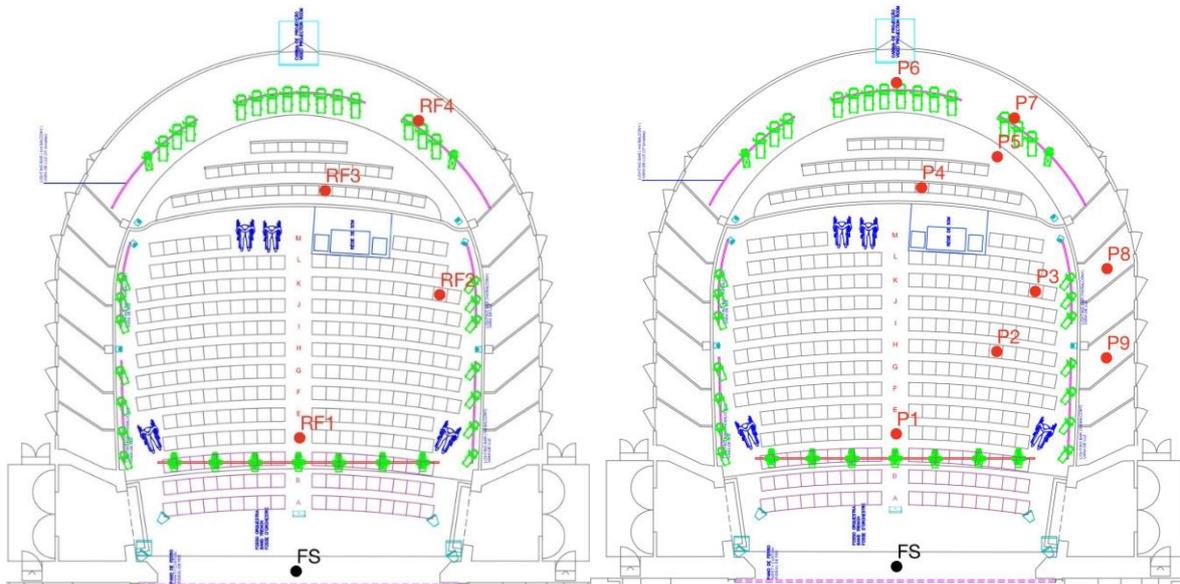
O Teatro Nacional São João (TNSJ) no Porto, Portugal (Fig. 1) foi construído em 1798, mas em 1908 foi devastado por um incêndio, levando à reconstrução. Em 1995 volta a ter regular actividade após ser de novo restaurado, essencialmente para teatros e óperas. Em 2012 foi classificado como monumento nacional. A sala principal (tipo *ferradura*) é composta por palco, plateia, tribuna, três níveis de balcões, camarotes e fosso de orquestra. Possui 614 lugares e o volume da sala é de 4.560 m<sup>3</sup> enquanto o volume do palco é de cerca de 3580 m<sup>3</sup>. O tecto apresenta uma cúpula de 13 m de diâmetro (Fig. 2).



Figuras 1 e 2 – Teatro Nacional São João (Porto); interior e cúpula no teto da sala [foto da autora].

## 2. Metodologia

Para caracterizar acusticamente o TNSJ realizaram-se (em 23/3/2024) medições *in situ*: Nível de pressão sonora do ruído de fundo ( $L$ ), Tempo de reverberação ( $TR$ ), *Speech Transmission Index* ( $STI$ ), Claridade ( $C_{80}$ ), Definição ( $D_{50}$ ) e Tempo central ( $t_s$ ) em diversos pontos (o sonómetro foi colocado a uma altura de 1,20 m). Os ensaios foram conduzidos com a sala desocupada (só com a presença de três pessoas), utilizando: fonte sonora B&K 4720 (*Echo Speech Source*), Sonómetro B&K 2260 e *software* DIRAC.



Figuras 3 e 4 – Plantas do TNSJ com a fonte sonora (FS), pontos para as medições do ruído de fundo: RF1 e RF2 na plateia, RF3 na tribuna e RF4 no balcão do 1º nível e nove pontos para as medições do  $TR$ ,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ ,  $STI$  e  $t_s$ : P1, P2 e P3 na plateia, P4 e P5 na tribuna, P6 e P7 no balcão do 1º nível e P8 e P9 nos camarotes do 1º nível).

Foi medido o ruído de fundo em quatro pontos: RF1 e RF2 na plateia, RF3 na tribuna e RF4 no balcão do primeiro nível, com o sistema AVAC desligado (Fig. 3). Foi depois medido o tempo de reverberação ( $TR$ ), tempo central ( $t_s$ ), Claridade ( $C_{80}$ ), Definição ( $D_{50}$ ) e *Speech Transmission Index* ( $STI$ ) com a fonte sonora no limite do palco de forma centrada e medido nos pontos P1, P2 e P3 na plateia, P4 e P5 na tribuna, P6 no balcão do primeiro nível e P7, P8 e P9 nos camarotes do primeiro nível (Fig. 4).

### 3. Resultados

Em relação ao Ruído de Fundo, o nível de pressão sonora equivalente médio  $L_{eq}$  medido foi de 56 dB, enquanto que o nível sonoro equivalente global  $L_{Aeq}$  de 31 dB. Esses valores aparentam ser mais elevados em relação a outros teatros (cf. cap. 4.2.2.2), que registram valores de  $L_{Aeq}$  por volta dos 23 dB.

Em relação ao Tempo de Reverberação (TR) (quadro 1) nota-se uma dispersão maior de valores nas bandas de frequências de 125 e 2k Hz, enquanto que as restantes não apresentam grande variação. Na faixa de frequência de 2k a 4k Hz, observa-se um TR mais baixo, entre 1,04 e 1,19 s, o que representa um aspeto negativo para os cantores de ópera, que necessitam de um aumento do TR nessa faixa para se destacarem em relação aos instrumentos musicais. Nas frequências médias (maior sensibilidade auditiva) observa-se valores de TR médios comparados com as altas e baixas frequências. Por outro lado, nas baixas frequências há um aumento comparativamente com as altas, chegando a atingir 1,65 s na frequência de 100 Hz, aspeto este, que melhora qualidade dos espetáculos musicais. O TR médio [500,1k Hz] é de 1,17 s.

A partir dos cálculos de previsão para a ocupação da sala (quadro 2) a diferença no TR entre sala vazia (1,17 s) e com 50% de ocupação (1,12 s) foi de 0,05 s, enquanto para a sala totalmente ocupada (1,09 s) foi de 0,08 s. Essa diferença não é considerável, o que pode ser atribuído ao facto de que a sala já possui uma grande absorção devido às cadeiras serem muito almofadadas.

Quadro 1 – TR em bandas de 1/1 de oit. de 125 a 4k Hz para os pontos P1 a P9 do TNSJ; média e desvio padrão.

Tempo de Reverberação ( $T_{30}$ ) (s)											
Frequência (Hz)	Pontos									Média	Desvio Padrão
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9		
125	1,76	1,55	1,69	1,44	1,63	1,33	1,17	1,34	1,26	1,46	0,19
250	1,13	1,23	1,20	1,20	1,27	1,21	1,12	1,20	1,24	1,20	0,05
500	1,10	1,26	1,10	1,03	1,21	1,08	1,10	1,07	1,06	1,11	0,07
1k	1,27	1,24	1,20	1,21	1,24	1,11	1,25	1,29	1,16	1,22	0,05
2k	1,15	1,31	1,15	0,93	1,06	1,03	1,22	1,12	1,07	1,11	0,10
4k	1,04	1,10	1,06	1,07	0,93	1,05	0,93	1,09	1,16	1,05	0,07
TR [500, 1k Hz] (s)	1,18	1,25	1,15	1,12	1,23	1,10	1,18	1,18	1,11	1,17	0,05

Quadro 2 – Cálculo de TR (sala 50% e 100% ocupada) para bandas de 1/1 oitava de 250 a 4k Hz do TNSJ.

Frequência (Hz)	0% Ocupação			Previsto 50% Ocupação			Previsto 100% Ocupação		
	TR (s)	A sala (m <sup>2</sup> )	TR [500, 1k Hz] (s)	TR (s)	A sala (m <sup>2</sup> )	TR [500, 1k Hz] (s)	TR (s)	A sala (m <sup>2</sup> )	TR [500, 1k Hz] (s)
250	1,20	607	1,17	1,16	627	1,12	1,13	647	1,09
500	1,11	656		1,08	678		1,04	699	
1k	1,22	599		1,17	622		1,13	646	
2k	1,11	654		1,06	687		1,01	719	
4k	1,05	696		0,99	739		0,93	783	

Em relação ao STI (*Speech Transmission Index*) (quadro 3) os melhores valores médios estão na plateia (de 0,56 a 0,66) enquanto os valores menos favoráveis estão nos camarotes, no balcão e na tribuna (de 0,52 a 0,54). A média global do STI é de 0,55, caracterizando-se como *suficiente* representando um resultado satisfatório para o TNSJ, uma vez e uma de suas funções é o espetáculo teatral.

Em relação ao  $C_{80}$  (quadro 4) o valor médio nas frequências médias do TNSJ é de 5,1 dB, sendo o maior valor registrado no ponto P1 de 7,1 dB, localizado na plateia, e o menor na zona do camarote (P9) de 4,1 dB. Conclui-se que o TNSJ de uma forma geral, possui uma energia alta nos primeiros 80 ms sobrepondo-se à cauda reverberante.

Quadro 3 – Valores do parâmetro *STI* para os pontos P1 a P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão.

Ponto (Posição)	<i>STI</i> masculino	<i>STI</i> feminino	<i>STI</i> médio	Inteligibilidade da Palavra [16]	<i>STI</i> médio global
P1 (Plateia)	0,64	0,68	<b>0,66</b>	<i>Boa (0,60-0,75)</i>	<b>0,55</b>
P2 (Plateia)	0,56	0,59	<b>0,58</b>	<i>Suficiente (0,45-0,60)</i>	
P3 (Plateia)	0,55	0,56	<b>0,56</b>		
P4 (Tribuna)	0,51	0,53	<b>0,52</b>		
P5 (Tribuna)	0,53	0,55	<b>0,54</b>		
P6 (Balcão 1º nível)	0,51	0,53	<b>0,52</b>		
P7 (Camarote 1º nível)	0,52	0,54	<b>0,53</b>		
P8 (Camarote 1º nível)	0,52	0,54	<b>0,53</b>		
P9 (Camarote 1º nível)	0,51	0,53	<b>0,52</b>		
Desvio Padrão	0,04	0,05	0,04	-	-

Quadro 4 – Valores da *Claridade C<sub>80</sub>* para os pontos P1 a P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão.

Ponto (Posição)	Frequência (Hz)							<i>C<sub>80</sub></i> [500, 1k Hz] (dB)
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
P1 (Plateia)	4,4	5,9	7,5	6,8	8,3	10,2	15,1	<b>7,1</b>
P2 (Plateia)	0,8	3,9	6,4	4,1	5,9	7,7	11,4	<b>5,3</b>
P3 (Plateia)	3,6	4,9	4,8	5,5	6,4	6,5	8,9	<b>5,1</b>
P4 (Tribuna)	0,7	4,1	3,4	4,6	7,0	8,3	11,7	<b>4,0</b>
P5 (Tribuna)	10,2	8,2	5,4	6,2	5,6	7,7	10,5	<b>5,8</b>
P6 (Balcão 1º nível)	1,5	3,1	4,6	5,3	6,4	6,1	9,0	<b>4,9</b>
P7 (Camarote 1º nível)	13,1	5,5	4,4	5,2	5,7	7,6	10,5	<b>4,8</b>
P8 (Camarote 1º nível)	2,8	2,8	3,9	5,1	5,5	7,4	10,8	<b>4,5</b>
P9 (Camarote 1º nível)	0,8	3,9	3,9	4,4	5,2	6,4	6,4	<b>4,1</b>
Média P1 a P9	4,2	4,7	4,9	5,2	6,2	7,5	10,5	<b>5,1</b>
Desvio Padrão	4,2	1,6	1,3	0,8	0,9	1,2	2,3	1,0

Quadro 5 – Valores da Definição *D<sub>50</sub>* para os pontos P1 a P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão.

Ponto (Posição)	Frequência (Hz)							<i>D<sub>50</sub></i> [500, 1k Hz]	Definição do discurso [48]
	125	250	500	1k	2k	4k	8k		
P1 (Plateia)	0,35	0,64	0,61	0,71	0,80	0,87	0,95	<b>0,66</b>	<i>Suficiente (0,39 a 0,67)</i>
P2 (Plateia)	0,39	0,58	0,74	0,59	0,70	0,77	0,86	<b>0,67</b>	
P3 (Plateia)	0,59	0,62	0,67	0,71	0,74	0,72	0,80	<b>0,69</b>	
P4 (Tribuna)	0,50	0,65	0,40	0,52	0,66	0,74	0,81	<b>0,46</b>	
P5 (Tribuna)	0,62	0,70	0,58	0,59	0,66	0,77	0,85	<b>0,59</b>	
P6 (Balcão 1º nível)	0,46	0,51	0,55	0,64	0,74	0,71	0,83	<b>0,60</b>	
P7 (Camarote 1º nível)	0,68	0,62	0,63	0,61	0,68	0,78	0,87	<b>0,62</b>	
P8 (Camarote 1º nível)	0,63	0,44	0,56	0,61	0,66	0,73	0,83	<b>0,59</b>	
P9 (Camarote 1º nível)	0,39	0,63	0,60	0,63	0,66	0,71	0,71	<b>0,62</b>	
Média P1 a P9	0,51	0,60	0,59	0,62	0,70	0,76	0,83	<b>0,61</b>	
Desvio Padrão	0,11	0,07	0,09	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07	

Em relação ao  $D_{50}$  (quadro 5), os valores médios revelam que a *Definição* no TNSJ, de uma forma global, é considerada *suficiente* (0,61) em todos os pontos medidos. Sendo o maior valor de 0,69 na plateia (P3) e o menor valor de 0,46 na tribuna (P4). Conclui-se que a energia proveniente das primeiras reflexões é considerada média em comparação com a energia total recebida, o que torna o TNSJ um local com uma percepção da palavra considerada *suficiente*.

Em relação ao Tempo Central ( $t_s$ ) (quadro 6) o valor médio nas frequências médias é de 60 ms, sendo o maior valor registrado no ponto P4 (73 ms) localizado na tribuna, e o menor na plateia (P1) de 48 ms. Conclui-se que o TNSJ mostra ser um ambiente ideal para palavra pois possui um som mais claro e pouco reverberante.

Quadro 6 – Valores do Tempo central ( $t_s$ ) para os pontos (P1 a P9) medidos do TNSJ, média e desvio padrão.

Ponto (Posição)	Frequência (Hz)							$t_s$ [500, 1k Hz] (ms)
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
P1 (Plateia)	108	56	50	46	31	20	10	<b>48</b>
P2 (Plateia)	120	70	47	65	49	36	19	<b>56</b>
P3 (Plateia)	78	76	57	53	48	45	29	<b>55</b>
P4 (Tribuna)	105	81	79	68	54	41	26	<b>73</b>
P5 (Tribuna)	46	49	66	57	53	38	24	<b>62</b>
P6 (Balcão 1º nível)	74	82	67	60	47	48	29	<b>64</b>
P7 (Camarote 1º nível)	53	60	63	60	51	37	22	<b>61</b>
P8 (Camarote 1º nível)	82	79	66	60	52	39	23	<b>63</b>
P9 (Camarote 1º nível)	92	69	66	58	50	39	31	<b>62</b>
Média	84	69	62	59	48	38	24	<b>60</b>
Desvio Padrão	23	11	9	6	6	7	6	<b>7</b>

#### 4. Comparação com outras salas

Foi feita uma comparação entre o TNSJ e cinco salas internacionais todas do tipo *ferradura*. No quadro 7 estão os Volumes, Número de assentos e valores de TR médio (500 e 1k Hz) com as salas desocupadas e ocupadas. De acordo com a fórmula de Sabine, existe uma relação entre o TR e o Volume, em que se espera uma linha de tendência próxima de uma tendência crescente com um elevado coeficiente de correlação ( $R^2$ ). A figura 5 apresenta comparação dos valores de TR médios desocupado em função do volume, acompanhadas por uma linha de regressão exponencial (o tipo que obteve o melhor valor de  $R^2$ ). O valor de  $R^2$  obtido foi de 0,39 para TR desocupado, representando pouca propensão (de 39%) para essa equação justificar com rigor o efeito do volume nos valores de TR.

Quadro 7 – TR médio [500, 1.000 Hz], ocupado e desocupado, de salas internacionais tipo *ferradura* e TNSJ, com volume e número de assentos (adaptado de [1]) \*valor previsto.

Salas de Ópera	Nº de lugares	Volume (m³)	TR desocupado [500, 1k Hz] (s)	TR ocupado [500, 1k Hz] (s)	$\Delta$ TR (s)
Royal Opera House, Londres	2.120	12.250	<b>1,21</b>	<b>1,10</b>	0,11
Teatro Alla Scala, Milão	2.289	11.252	1,36	1,20	0,16
Opera Garnier, Paris	2.131	<b>10.000</b>	1,22	1,15	0,07
Academy of Music, Filadélfia	<b>2.827</b>	15.100	<b>1,55</b>	<b>1,40</b>	0,15
Staatsoper, Viena	<b>1.709</b>	10.665	<b>1,55</b>	1,30	0,25
<b>Teatro São João, Porto</b>	<b>614</b>	<b>4.560</b>	<b>1,17</b>	<b>1,09*</b>	<b>0,08</b>

A figura 6, é uma comparação dessas salas com os valores de TR médios desocupado em função do número de assentos com uma curva de regressão. Ao contrário do que acontecia com o volume e o TR é esperado que um maior número de lugares equivalha a uma maior absorção e conseqüentemente a um menor TR, ou seja, uma linha de tendência próxima de uma tendência decrescente com alto valor de  $R^2$ . Os valores de  $R^2$  obtidos foram de 0,26, o que também sugere uma relação muito fraca entre o número de lugares e o TR.

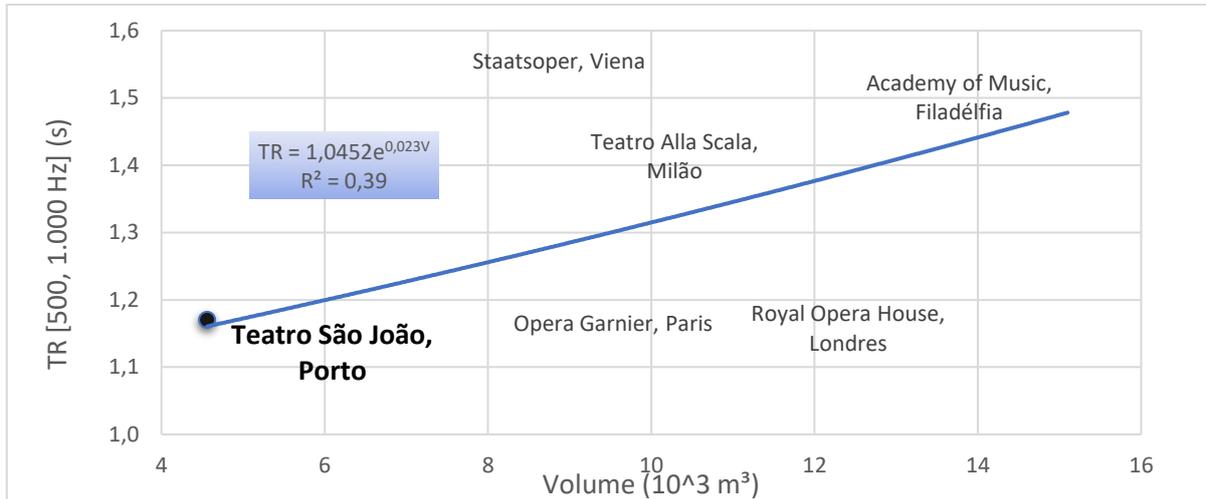


Figura 5– TR [500, 1k Hz] desocupado em função do volume das cinco salas internacionais tipo *ferradura* e do TNSJ com linha de tendência.

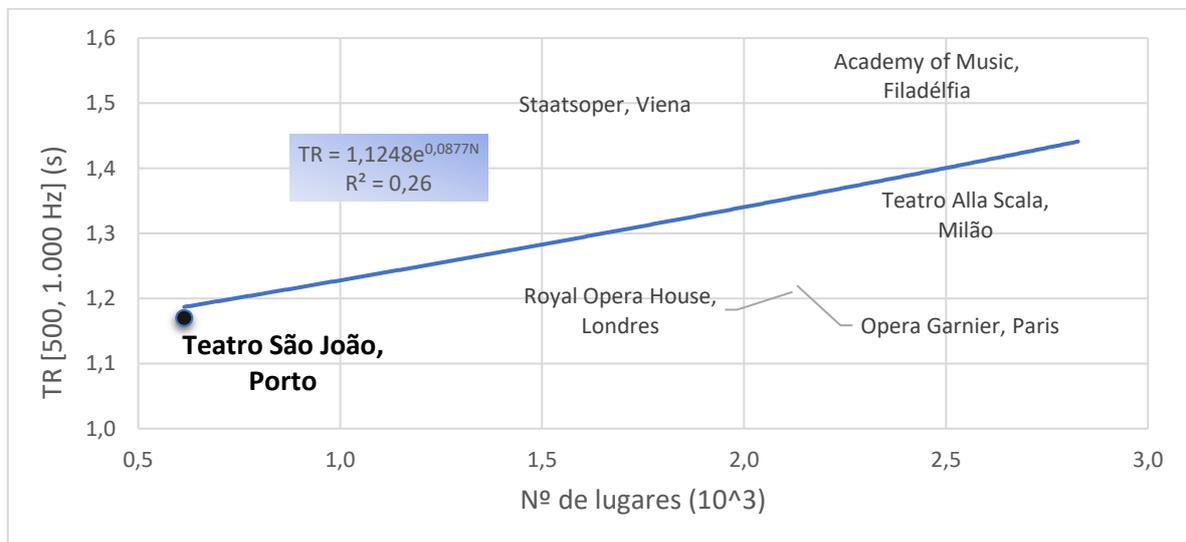


Figura 6 – TR [500, 1k Hz] desocupado em função do número de lugares das cinco salas internacionais e do TNSJ com linha de tendência.

Em relação ao  $C_{80}$  no quadro 8 são apresentadas as cinco salas internacionais tipo *ferradura* e o TNSJ, exibindo seus respectivos volumes, números de assentos e os valores da *Clareza* média para as frequências de 500 e 1k Hz. A figura 7 apresenta uma comparação de  $C_{80}$  [média 500, 1k Hz], em função do Volume, acompanhadas por uma linha de regressão com um  $R^2$  de 0,51, que comparativamente com os outros coeficientes anteriormente obtidos, tem uma maior fiabilidade. Portanto, à medida que o volume aumenta, a *Clareza* diminui, tendo assim uma relação inversamente proporcional com uma dependência de aproximadamente 51%. Na figura 8 é apresentada uma comparação do  $C_{80}$  [média 500,

1k Hz], em função do número de assentos, acompanhadas por uma linha de regressão com uma correlação de 0,44. De forma semelhante que ocorre com o volume, à medida que o número de assentos aumenta, a *Claridade* diminui, uma relação inversamente proporcional com uma dependência de 44%.

Quadro 8 – Valores de  $C_{80}$  [média 500, 1.000 Hz] de cinco salas internacionais e do Teatro São João com o respectivo volume e número de assentos (adaptado de [1]).

Salas de Ópera	Nº de lugares	Volume (m <sup>3</sup> )	$C_{80}$ [500, 1k Hz] (dB)
Royal Opera House, Londres	2.120	12.250	4,75
Teatro Alla Scala, Milão	2.289	11.252	2,90
Opera Garnier, Paris	2.131	10.000	4,35
Academy of Music, Filadélfia	2.827	15.100	1,65
Staatsoper, Viena	1.709	10.665	2,65
<b>Teatro São João, Porto</b>	<b>614</b>	<b>4.560</b>	<b>5,10</b>

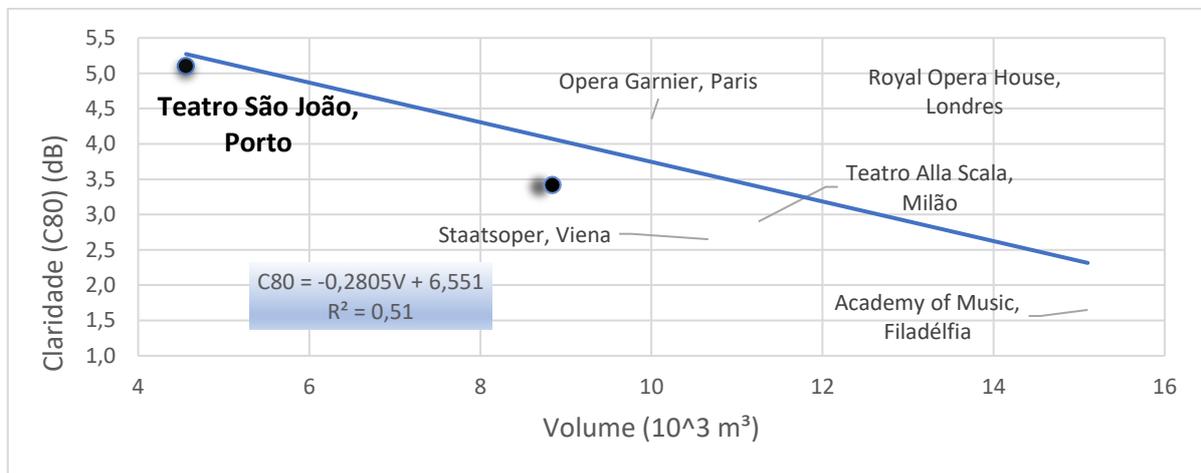


Figura 7 –  $C_{80}$  [média 500, 1k Hz] em função do volume com linha de tendência das salas internacionais e TNSJ.

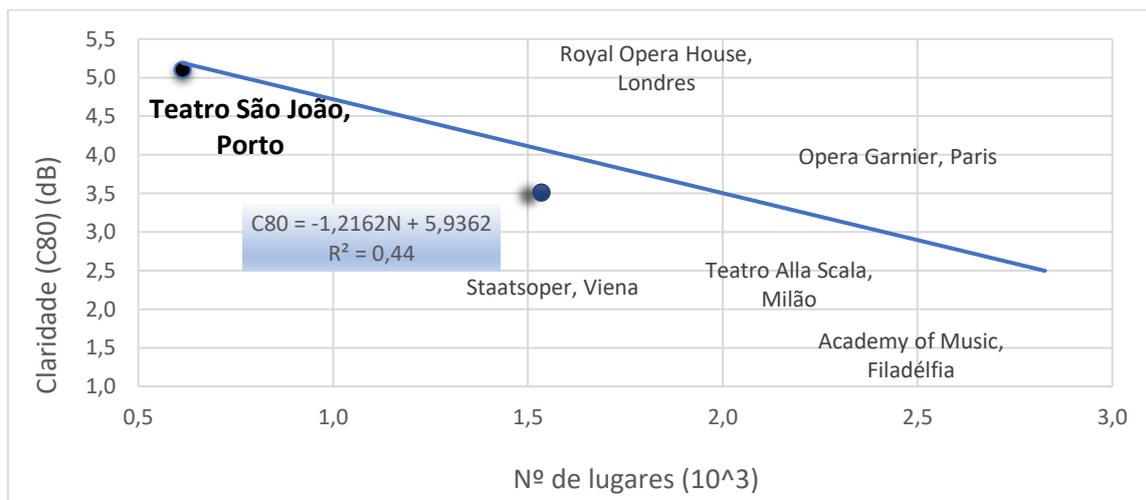


Figura 8 –  $C_{80}$  [média 500, 1k Hz] em função do número de lugares com linha de tendência das cinco salas internacionais e do Teatro São João.

Foi também feita a análise dos resultados no TNSJ com outra sala nacional de formato ferradura, o Teatro Sá de Miranda em Viana do Castelo (TSM). O quadro 9 exibe os valores do tempo de reverberação (TR) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4k Hz para o TNSJ e TSM. Segundo a fórmula de Sabine, espera-se que quanto maior o volume, maior seja o TR. No entanto, mesmo o TNSJ possuindo uma volumetria maior, observa-se um TR inferior, de 1,17 s, sugerindo uma capacidade de absorção sonora das componentes significativamente maior em comparação com o TSM. O quadro 10 apresenta os valores do  $C_{80}$  [média 500, 1k Hz], em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8k Hz para o TNSJ e para o TSM. Nota-se que o TNSJ obteve um valor de 5,1, superior ao TSM de 4,3 dB. Conclui-se que o TSM possui uma energia menor nos primeiros 80 ms do que o TSNJ, levando a ser mais adequado para espectáculos de ópera que o TNSJ.

Quadro 9 – TR (salas desocupadas) em bandas de 1/1 oit. (125-4k Hz) dos TSM e TNSJ e o valor médio [2].

Salas	Tempo de Reverberação (s)						TR [500, 1k Hz] (s)
	Frequência (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	
Teatro Sá de Miranda, V. do Castelo	1,51	1,35	1,20	1,21	1,14	0,95	1,21
Teatro Nacional São João, Porto	1,46	1,20	1,11	1,22	1,11	1,05	1,17
$\Delta$ TR (TNSJ - TSM)	-0,05	-0,14	-0,09	0,01	-0,03	0,10	-0,04

Quadro 10 – Valores da Claridade ( $C_{80}$ ) em bandas de 1/1 oit. (125-8k Hz) dos TSM e TNSJ e o valor médio [2].

Salas	Claridade $C_{80}$ (dB)							$C_{80}$ [500, 1k Hz] (dB)
	Frequência (Hz)							
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
Teatro Sá de Miranda, Viana do Castelo	2,0	3,5	4,1	2,8	4,0	6,5	9,8	3,4
Teatro Nac. São João, Porto	4,2	4,7	4,9	5,2	6,2	7,5	10,5	5,1
$\Delta C_{80}$ (TNSJ - TSM)	2,2	1,3	0,9	2,4	2,2	1,0	0,7	1,7

Quadro 11 – Tempo central ( $t_s$ ) em bandas de 1/1 oit. (125 a 8k Hz) dos TSM e TNSJ e valor médio [2].

Salas	Tempo Central (ms)							$t_s$ [500, 1k Hz] (ms)
	Frequência (Hz)							
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
Teatro Sá de Miranda, Viana do Castelo	97	73	70	75	63	43	26	72
Teatro Nacional São João, Porto	84	69	62	59	48	38	24	60
$\Delta t_s$ (TNSJ - TSM)	-13	-4	-8	-16	-15	-5	-2	-12

O quadro 11 apresenta os valores do *tempo central* para o TNSJ e para o TSM. Os dois teatros demonstram resultados bastante próximos, com médias de 72 ms para o TSM e 60 ms para o TNSJ. Isso indica que em ambos os casos, a energia sonora se concentra nas primeiras reflexões, resultando em uma qualidade sonora mais clara para a palavra e nem tanto para a qualidade musical.

O quadro 12 apresenta os valores do  $D_{50}$  e pode-se notar a proximidade de valores dos teatros em toda a gama de frequência, obtendo um resultado médio de 0,53 para o TSM e 0,61 para o TNSJ, ambos com valores considerados *satisfatórios*. Pode-se concluir que ambos os teatros mostram ter uma definição satisfatória do discurso para a prática de artes teatrais, sendo o TNSJ com melhor desempenho.

O quadro 13 mostra os valores de  $STI$  médio, máximo e mínimo do TNSJ e do TSM. O TSM apresentou o maior (melhor)  $STI$  máximo de 0,71 e o menor (pior)  $STI$  mínimo de 0,46, enquanto que o TSNJ obteve o menor (pior)  $STI$  máximo e o maior (melhor)  $STI$  mínimo. Vale ressaltar que ambas as salas possuem um  $STI$  máximo considerado *bom* e um  $STI$  mínimo *suficiente*. Em relação a valores médios, o TNSJ apresentou a melhor inteligibilidade da palavra com 0,55 e o TSM com 0,53, uma pequena diferença de

0,02. Conclui-se que ambos os teatros apresentam valores médios considerados *suficientes* para a palavra, sendo mais uma vez positivo para espectáculos teatrais.

Quadro 12 – Valores de  $D_{50}$  em bandas de 1/1 oit. (125 a 8k Hz) dos TSM e TNSJ e valor médio [2].

Salas	Definição ( $D_{50}$ )							$D_{50}$ [500, 1k Hz]
	Frequência (Hz)							
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
Teatro Sá de Miranda, Viana do Castelo	0,48	0,54	0,56	0,51	0,58	0,70	0,82	0,53
Teatro Nacional São João, Porto	0,51	0,60	0,59	0,62	0,70	0,76	0,83	0,61
$\Delta D_{50}$ (TNSJ - TSM)	0,03	0,06	0,03	0,11	0,12	0,06	0,01	0,08

Quadro 13 – Valor do  $STI$  máximo, mínimo e médio do TSM e do TNSJ [2].

Salas	$STI$ máximo	$STI$ mínimo	Amplitude	$STI$ médio
Teatro Sá de Miranda, Viana do Castelo	0,71	0,46	0,25	0,53
Teatro Nacional São João, Porto	0,66	0,52	0,14	0,55
$\Delta STI$ (TNSJ - TSM)	-0,05	0,06	-0,11	0,02

Quadro 14 – Valores do Volume, Número de lugares, Volume por assento e TR médio (500, 1k Hz) das doze salas nacionais incluindo o TNSJ.

Salas	Volume (m <sup>3</sup> )	Nº de lugares	Volume por assento	TR [500, 1k Hz] (s)
Cineteatro de Amarante [3]	2700	386	7,0	1,20
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [4]	2111	275	7,7	1,00
Grande Aud. Convento S. Francisco (Coimbra) [5]	12000	1093	11,0	1,50
Casa da Cultura de Ílhavo [6]	3779	491	7,7	1,00
Auditório FEUP [7]	3317	500	6,6	1,50
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [8]	3219	330	9,8	0,80
Centro de Artes de Águeda [9]	5066	398	12,7	0,80
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [10]	9150	998	9,2	1,00
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [10]	1320	254	5,2	0,50
Teatro Municipal de Ourém [11]	3915	441	8,9	1,00
Teatro Municipal da Covilhã [12]	4258	600	7,1	1,40
<b>Teatro Nacional São João</b>	<b>4560</b>	<b>614</b>	<b>7,4</b>	<b>1,20</b>
Média	4616	532	8,4	1,08

Outra análise foi feita, agora entre doze salas nacionais de diversos formatos. O quadro 14 mostra o resumo dos valores do volume, número de lugares e TR médio [500, 1k Hz] dessas salas. Numa análise geral, fica evidente que o TNSJ se destaca pelo volume, classificando-se como o quarto maior nesse aspecto. Da mesma forma, em relação ao número de assentos, destaca-se como o terceiro maior. Quanto ao TR médio, encontra-se em quarto lugar, juntamente com o Cineteatro de Amarante, demonstrando uma reverberação um pouco acima da média dessas salas. Como se pode observar na figura 9, o TR médio em função do volume gera uma linha de tendência com  $R^2$  de 0,26. Como visto anteriormente, a fórmula de Sabine indica que essas duas variáveis são directamente proporcionais, mas com se sabe, a fórmula também inclui a absorção sonora, a qual é inversamente proporcional ao TR, além disso, também não faz intervir a geometria da sala (por exemplo as reflexões). Isto faz com que a correlação directamente proporcional do TR e Volume não apresente um  $R^2$  tão alto. Ou seja, as salas com maiores Volumes e baixos TR, indicam altos valores de absorção sonora (ou um bom tratamento acústico), como

por exemplo, o Grande Auditório do Altice Fórum Braga, com um grande volume de 9150 m<sup>3</sup> apresenta um TR baixo de 1,0 s. No gráfico, as salas mais afastadas da linha de tendência representam maiores valores de absorção sonora (possivelmente a existência de um tratamento acústico) enquanto que as mais próximas, uma menor absorção.

Na figura 10, o TR médio está em função do número de lugares, em que apresenta uma tendência com um R<sup>2</sup> de 0,40. Este gráfico segue o mesmo raciocínio que o anterior, quanto mais lugares, maior é o volume do espaço e consequentemente uma linha de tendência crescente, em que o número de lugares cresce com o TR médio, porém com uma dependência fraca entre essas duas variáveis.

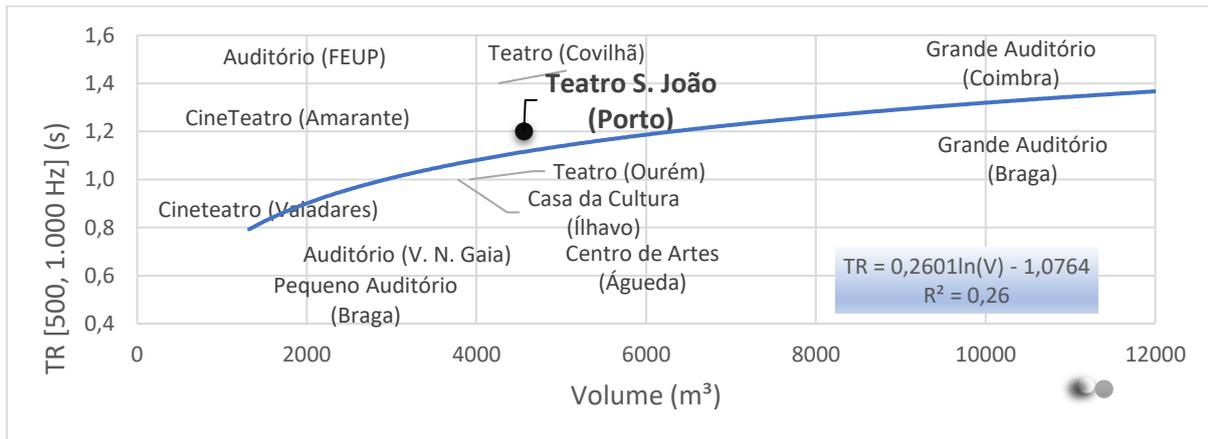


Figura 9 – TR [500, 1k Hz] em função do Volume das onze salas nacionais e do TNSJ com linha de tendência.

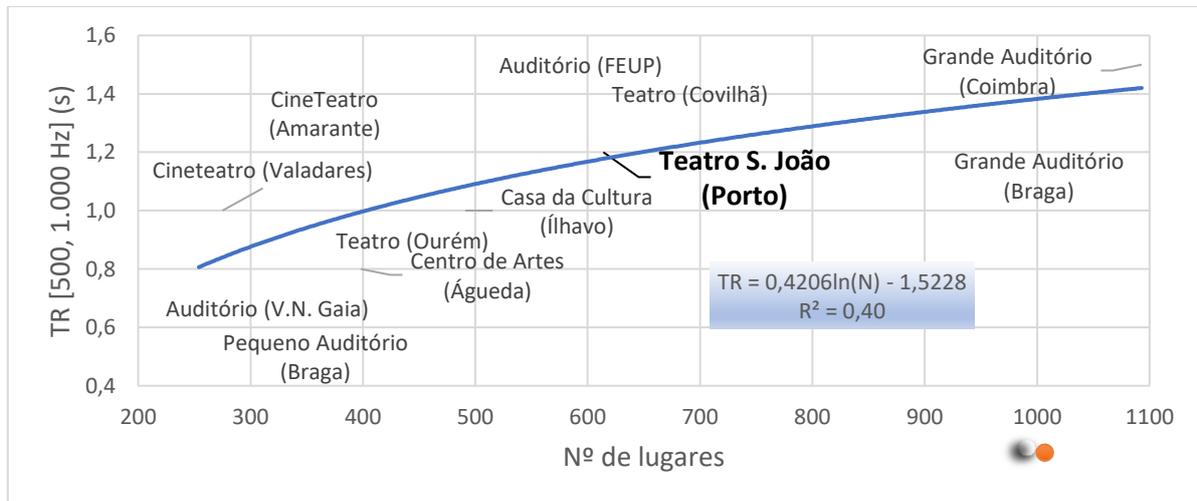


Figura 10 – TR [500, 1k Hz] em função do Número de lugares das salas nacionais com linha de tendência.

O quadro 15 mostra os resultados do *Speech Transmission Index* (STI) (ou *raSTI*) médios e o nível sonoro equivalente do ruído de fundo (*L<sub>Aeq</sub>*) das doze salas. O TNSJ apresentou o desempenho mais fraco indicando uma menor clareza na inteligibilidade da palavra e regista-se um nível de pressão sonora do ruído de fundo relativamente alto, superado apenas pelo Cineteatro E. Braço. A figura 11 apresenta uma comparação desses valores médios em função do TR médio e uma linha de tendência com um R<sup>2</sup> de 0,67, um valor alto comparado com as restantes analisadas. Isso sugere que, à medida que o TR médio aumenta, o *raSTI/STI* diminui, demonstrando uma relação inversamente proporcional com uma dependência de 67%. Essa correlação é coerente, uma vez que o aumento do TR no ambiente faz com que a cauda reverberante se sobreponha às primeiras reflexões, tornado o ambiente mais reverberante e a compreensão da palavra mais desafiadora.

Quadro 15 – Volume, Número de lugares, *raSTI/STI* médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (*L<sub>Aeq</sub>*) sem AVAC de salas nacionais incl. TNSJ.

Salas	Volume (m <sup>3</sup> )	Nº de lugares	<i>raSTI/STI</i> médio	<i>L<sub>Aeq</sub></i> (sem AVAC) (dB)
Cineteatro de Amarante [3]	2700	386	0,62	23
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [4]	2111	275	0,60	32
Grande Aud. Convento S. Francisco (Coimbra) [5]	12000	1093	0,61	27
Casa da Cultura de Ílhavo [6]	3779	491	0,68	25
Auditório FEUP [7]	3317	500	0,61	27
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [8]	3219	330	0,68	24
Centro de Artes de Águeda [9]	5066	398	0,67	26
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [10]	9150	998	0,67	24
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [11]	1320	254	0,80	24
Teatro Municipal de Ourém [12]	3915	441	0,69	24
Teatro Municipal da Covilhã [13]	4258	600	0,64	23
<b>Teatro Nacional São João</b>	<b>4560</b>	<b>614</b>	<b>0,55</b>	<b>31</b>

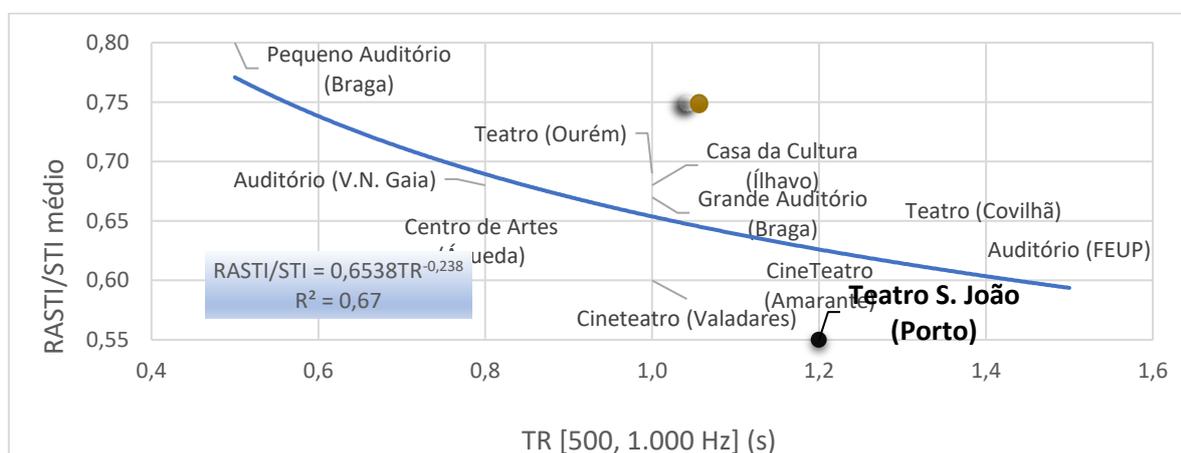


Figura 11 – *raSTI/STI* médio em função de TR médio [500, 1k Hz] das salas nacionais com linha de tendência.

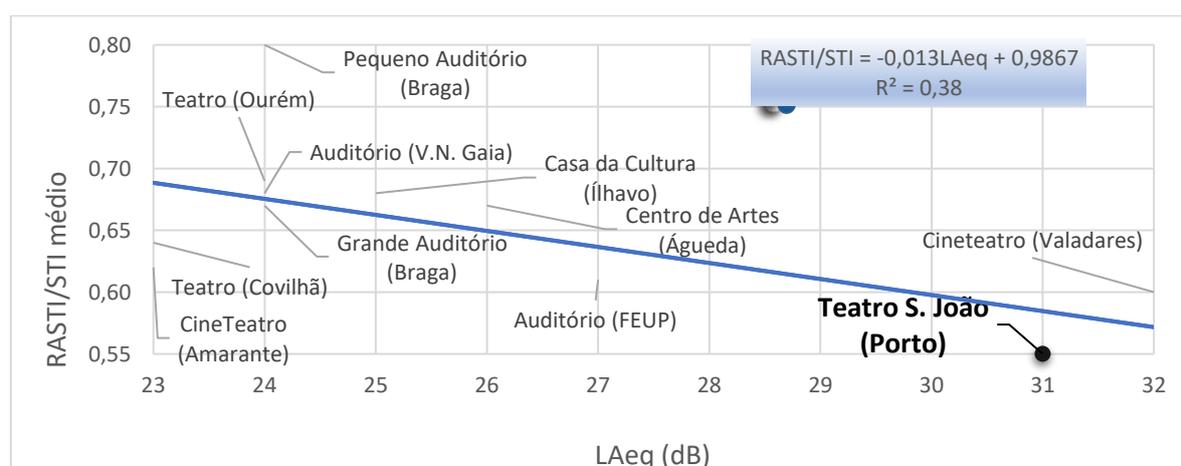


Figura 12 – *raSTI/STI* médios em função do *L<sub>Aeq</sub>* (ruído de fundo) das salas nacionais com linha de tendência.

A figura 12 representa a comparação dos valores de *raSTI/STI* médio em função do *L<sub>Aeq</sub>* com uma linha de tendência para doze salas nacionais. O mesmo raciocínio se aplica ao ruído de fundo. É razoável

esperar que o gráfico do *raSTI/STI* médio em função do *L<sub>Aeq</sub>* seja inversamente proporcional. De facto, isso ocorre, mas com uma correlação consideravelmente mais fraca, apresentando um  $R^2$  de 0,38. Para uma análise mais completa, era interessante realizar a mesma comparação com o sistema AVAC em funcionamento.

## 5. Conclusão

Conclui-se que para os parâmetros que avaliam a qualidade da palavra (*STI*), o TNSJ demonstrou ser *suficiente* para a inteligibilidade da palavra, com um valor médio de 0,55 (máximo de 0,66 e mínimo de 0,52). Da mesma forma para o  $D_{50}$  [média 500, 1k Hz], o teatro alcançou um valor de 0,61, também considerado *suficiente* para a definição do discurso. No entanto, no que diz respeito ao  $C_{80}$  [média 500, 1k Hz], o TNSJ obteve um resultado de 5,1 dB, o que não atende, por pouco, aos limites recomendados para ópera (1 a 4 dB) e teatro (>6 dB). Por fim, o *tempo central* médio ( $t_s$  [500, 1k Hz]), revelou-se adequado para a função teatral, com um valor de 60 ms (<80 ms) mas não totalmente adequado para ópera (>80 ms).

Na análise comparativa com as salas internacionais de formato *ferradura*, o TNSJ apresentou o menor TR. É relevante notar que seu volume é inferior à metade em comparação com as demais salas, pelo que seria de esperar um TR inferior. Além disso, registou o pior valor de  $C_{80}$  para salas de ópera. Por outro lado, na comparação com a sala nacional do tipo *ferradura*, Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo), o TNSJ revelou ter maior valor de  $C_{80}$ , *tempo central*,  $D_{50}$  e *STI*, apesar de apresentar o menor TR. Em suma, ambos os teatros se mostraram mais adequados para funções teatrais (palavra) do que para música em geral.

Na análise com onze salas nacionais com diferentes formatos, o TNSJ apresentou um dos maiores volumes, TR médios e níveis sonoros equivalentes do ruído de fundo (*L<sub>Aeq</sub>*), e constatou o pior (menor) valor do *STI* médio.

## Referências

- [1] Beranek, L., *Concert and Opera Halls - How they Sound*. Acoustical Society of America, 1996.
- [2] Forte, A., *Caracterização acústica do Teatro Sá de Miranda (V. Castelo)*. Tese MEC, FEUP, 2024.
- [3] Prada, P., *Caracterização acústica do Renovado Cineteatro de Amarante*. Tese MEC, FEUP, 2023.
- [4] Silva, D., *Caracterização acústica do CineTeatro Eduardo Brazão*. Tese de MEC, FEUP, 2023.
- [5] Miranda, T., *Caracterização Acústica do Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra)*. Tese MEC, FEUP, 2023.
- [6] Ribas, M., *Caraterização acústica da Casa da Cultura de Ílhavo*. Tese de MEC, FEUP, 2023.
- [7] Barbosa, S., *Caracterização Acústica de Grandes Auditórios. O caso do auditório da FEUP*. Tese MEIC, FEUP, 2012.
- [8] Hirayama, A., *Caracterização acústica do Auditório Munic. de VNGaia*. Tese MEC, FEUP, 2023.
- [9] Abelha, H., *Caracterização Acústica do Centro de Artes de Águeda*. Tese de MEA, FEUP, 2022.
- [10] Rocha, G., *Caraterização acústica do centro de congressos do Altice Fórum Braga*. Tese MEC, FEUP, 2022.
- [11] Vieira, F., *Caracterização acústica do Teatro Municipal de Ourém*. Tese MEC, FEUP, 2023.
- [12] Tavares, P., *Caracterização acústica do Teatro Municipal da Covilhã*. Tese MEC, FEUP, 2023.