

# FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

## Análise do EDC em um museu estilo galeria: o caso da Pinacoteca de São Paulo

Barbo, M. N.<sup>1</sup>; Brandão E.<sup>1,2</sup>; Melo, V. S. G.<sup>1,2</sup>; Maiorino, A. V.<sup>3</sup>, Fonseca, W. D'A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, marselleb@gmail.com

<sup>2</sup> Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil,  
{eric.brandao, viviane.melo, will.fonseca }@eac.ufsm.br

<sup>3</sup> Escola de Música, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, alexandre.maiorino@ufrn.br

### Resumo

A análise da Curva de Decaimento da Energia (EDC ou *Energy Decay Curve*) é uma importante ferramenta para a acústica arquitetônica. Permite, por exemplo, o aprofundamento do conhecimento em torno das reflexões iniciais da sala. Além disso, possibilita a verificação visual de duplos ou múltiplos decaimentos da curva quando se trata de salas acopladas. Este trabalho apresenta a análise das EDCs com decaimento duplo para três salas acopladas na Pinacoteca de São Paulo, SP. Trata-se de um dos museus mais importantes do Brasil, instalado no antigo edifício do Liceu de Artes e Ofícios, originalmente concebido no final do século XIX pelo arquiteto Ramos de Azevedo. As três salas estudadas são galerias de exposições permanentes, interligadas através de aberturas e um espaço no entreforro acessado por um modelo de forro em grelha. Neste espaço está a estrutura do sistema de condicionamento de ar artificial. O efeito do acoplamento entre as galerias é estudado por meio da análise da EDC, que foi obtida experimentalmente com medições de resposta ao impulso. Os resultados fornecem a compreensão em torno do comportamento do acoplamento das salas em função de seus materiais de revestimento e características geométricas. Ademais, também viabilizou coletar características arquitetônicas com maior exatidão, visto que algumas informações são de difícil obtenção por meio de levantamentos físicos do espaço em edifícios antigos. Os parâmetros acústicos estudados mostram que as curvas apresentam duplo decaimento, mas que as EDCs são dominadas por um único decaimento exponencial.

**Palavras-chave:** decaimento não exponencial de energia, duplo decaimento sonoro, acústica de museus, museus estilo galeria.

**PACS:** 43.55.-n, 43.55.Br, 43.55.Fw.

### EDC analysis in a gallery style museum: the case of the Pinacoteca of São Paulo.

#### Abstract

The Energy Decay Curve (EDC) analysis is an important aspect of architectural acoustics. It allows, for example, a deep understanding of early reflections in the room. When studying coupled rooms, it is also possible to visually check double or multiple slope decays. This work presents the analysis of multi-slope EDC for three coupled rooms at the Pinacoteca of São Paulo, SP, one of the most important museums in Brazil. The museum is built in the old Lyceum of Arts and Crafts building, originally designed at the end of the 19th century by the architect Ramos de Azevedo. The three studied rooms comprise an exhibition space interconnected through open doors and a space between the wall and the slab accessed through a gridded ceiling. At this plenum runs the air conditioning system. The effect of coupling between those rooms is studied using the analysis of the EDC, which was obtained experimentally with an impulse response measurement. Results offer an understanding of the coupling behavior of the room due to its materials and geometric characteristics. It was also possible to gather more exact architectural information, usually difficult to obtain in architectural surveys in such old buildings. The acoustic parameters studied show that the curves have double decay, but the EDCs have one dominant exponential decay.

**Keywords:** non-exponential sound decay, double slope sound decay, museum acoustics, gallery style museum.



## 1. INTRODUÇÃO

O partido arquitetônico é definido nos estudos preliminares da etapa de projeto, em que ocorre a organização formal da edificação, de modo que todos os projetos complementares relacionados influenciarão na tipologia do edifício. Trata-se de um momento importante de discussão de aspectos como estratégia de implantação e distribuição do programa de necessidades, estrutura e relações de espaço [1]. O valor histórico e arquitetônico que os museus representam para a sociedade na qual estão inseridos é verificado por diversas pesquisas a respeito da arquitetura [2–5], gestão e patrimônio histórico. Porém, esta não é a realidade quando se trata da caracterização acústica dessas edificações. Estudos que abordam a caracterização acústica de museus são relativamente raros, entretanto é possível encontrar trabalhos que abordam parâmetros acústicos objetivos [6–11] e subjetivos [12–15].

O bem-estar dos visitantes de museus é condição importante. O conforto acústico é item qualificador e imprescindível dentro desses ambientes, destacando que a experiência entregue aos frequentadores dos museus envolve atributos que vão além de questões formais, geométricas e estéticas [16]. Assim, o desempenho da função de uma edificação é alinhado à tomada de decisões, de modo que o processo de criação de um projeto passa pelo rigor e sistematização racional de todos os aspectos envolvidos no projeto [17]. Uma sala pode ser caracterizada acusticamente por meio de ensaios *in situ* e simulações acústicas. Para o estudo e proposta de diferentes cenários, obtidos a partir da simulação, os ensaios acústicos de salas são realizados para avaliação dos parâmetros e validação do modelo computacional.

Nesse contexto, a análise da curva de *decaimento da energia sonora* (EDC – *Energy Decay Curve*) fornece informações sobre o comportamento físico do campo acústico na sala (e.g., volumes interligados e distribuição não-homogênea dos materiais acústicos). As informações extraídas da EDC precisam ser aferidas em análise do espaço físico. Esse modelo pode apresentar a característica de salas acopladas, que é uma estratégia de projeto utilizada em salas de múltiplo uso para propor variabilidade acústica e assim atender às diversas necessidades [18].

O objetivo deste trabalho é analisar as curvas de decaimento obtidas por meio de medições *in situ* na Pinacoteca de São Paulo, que possui salas interligadas, semelhante a um acoplamento e identificar se o decaimento é exponencial ou não, influenciado pela área de acoplamento entre as galerias.

A estrutura do trabalho segue com uma breve fundamentação da literatura na Seção 2. A metodologia está explicada na Seção 3. Neste item, descreve-se a Pinacoteca, as medições *in situ* e os parâmetros estudados, bem como a ferramenta para a obtenção dos resultados. A Seção 4 aborda e discute os resultados dos parâmetros avaliados neste trabalho. Finalmente, na Seção 5 estão as considerações finais.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

O estudo de salas acopladas tem Eyring [19] como um dos pioneiros, ele estudou diversas configurações de pares fonte-receptor. Na mesma pesquisa Eyring observou que a relação entre os volumes, área de absorção e área de acoplamento entre as salas interligadas são as características arquitetônicas que propiciam o duplo decaimento [20].

No final da década de 1980 foram construídas salas com variabilidade acústica, por meio de câmaras reverberantes acopladas, originando três parâmetros arquitetônicos que relacionam características físicas da arquitetura espacial e a EDC:

- **Razão entre volumes** é um parâmetro proposto por Bradley e Wang [21], sendo o resultado da divisão entre o volume da sala acoplada pelo volume da sala principal, multiplicado por 100.
- **Razão de absorção entre as salas** que é a razão entre a média da absorção equivalente da sala acoplada pela média da absorção equivalente da sala principal, dado (por frequência) como

$$RA = \frac{\sum_i (S_i \alpha_i)_{\text{câmara}}}{\sum_j (S_j \alpha_j)_{\text{sala-principal}}}, \quad (1)$$

em que  $S$  é a área de uma superfície;  $\alpha$  é o coeficiente de absorção de uma superfície; e  $i$  e  $j$  representam as superfícies individuais da câmara reverberante e da sala principal, respectivamente.

- **Área de acoplamento** trata-se da relação entre a área de abertura que interliga os espaços acoplados e a área do somatório das áreas das super-

fícies da sala principal, em porcentagem [22], sendo calculada por

$$AA = \frac{S_{abertura}}{\sum_i (S_i)_{sala\ principal}} \cdot 100, \quad (2)$$

em que  $S_{abertura}$  é a área da abertura de acoplamento e  $S_i$  a área das superfícies da sala principal.

Maiorino (2018) em sua pesquisa de doutorado fez uma revisão dos descritores de duplo decaimento disponíveis na literatura para propor um novo parâmetro [23]. Entre os parâmetros estudados na pesquisa, as razões de EDT/ $T_{30}$  [24],  $T_{30}/T_{15}$  [25] e  $T_{60}/T_{15}$  [26] apud [27] não se apresentaram satisfatórias para caracterizar o duplo decaimento de energia, devido ao fato de que os intervalos de decaimentos abordados nos cálculos dos respectivos parâmetros se sobrepõem [27].

O parâmetro DSE (*Double Slope Effect*) [21], é a razão entre o tempo final do decaimento (*Late Decay Time* – LDT) compreendido entre e o intervalo de -25 dB e -35 dB e o  $T_{10}$  (intervalo de energia entre -5 dB e -15 dB). Esse índice é consequência do desenvolvimento dos estudos para melhorar as análises de duplo decaimento, mas apresenta limitações pois se a região de deflexão da curva de decaimento estiver dentro das faixas de cálculo do parâmetro, acontece uma caracterização errada do duplo decaimento de energia [27].

Além destes, dois outros parâmetros também foram apresentados, o *Decay Rate* (Taxa de Decaimento), dado por

$$\text{Taxa de decaimento} = \frac{\text{Decaimento}_2}{\text{Decaimento}_1} = \frac{T_{60_2}}{T_{60_1}}, \quad (3)$$

representando a razão entre o decaimento final e inicial da energia. Ainda, existe o termo  $\Delta dB$  que trata da diferença dos coeficientes lineares das regressões dos decaimentos final e inicial de energia. Assim, tem-se

$$\Delta dB = 10 \log \left( \frac{A_{1S} A_{2S}}{S^2} \right), \quad (4)$$

em que  $A_{iS}$  é a área de absorção do espaço ( $i$ ). Esse termo é calculado por  $A_{iS} = A_i \alpha_i + S$ , ou seja, a área total do espaço ( $i$ ) multiplicado pelo coeficiente de absorção médio do espaço ( $i$ ) mais a área  $S$  de acoplamento entre o espaço  $A_{iS}$  e

$A_{(i+1)S}$  — sendo que  $i = \{1, 2\}$ . Logo,

$$\Delta dB = 10 \log \left( \frac{(A_1 \alpha_1 + S)(A_2 \alpha_2 + S)}{S^2} \right). \quad (5)$$

Esses parâmetros analisados em conjunto apresentaram resultados interessantes. O tempo inicial ( $T_i$ ) e tempo final ( $T_f$ ) de decaimento são calculados fazendo-se

$$T(\cdot) = \frac{-60 - Bt}{At}, \quad (6)$$

em que  $T(\cdot)$  representa *Tempo inicial* (i) ou *final* (f) em segundos, ou seja,  $T_i$  ou  $T_f$ ;  $Bt$  é coeficiente linear da regressão linear do decaimento sonoro (para i ou f) e  $At$  é coeficiente angular da regressão linear do decaimento sonoro (para i ou f).

Diante das fragilidades encontradas nos parâmetros para curva de duplo decaimento, Maiorino [23] propôs em seu estudo um novo parâmetro, denominado Métrica de Duplo Decaimento (*Double Decay Metric* – DDM), relacionando matematicamente os parâmetros *Decay Rate* e  $\Delta dB$ , conforme

$$DDM = \Delta dB \cdot 10 \log \left( \frac{T_f}{T_i} \right), \quad (7)$$

em que  $\Delta dB$  é a diferença entre os coeficientes lineares das regressões,  $T_f$  é o valor do decaimento final de energia e  $T_i$  é o valor do decaimento inicial de energia — como supracitado.

O conhecimento completo de um recinto, não somente em relação aos parâmetros acústicos já conhecidos como tempo de reverberação (TR), mas sim de como o som se propaga e se comporta em um espaço, é essencial para o desenvolvimento de projeto. As questões acústicas devem ser levadas em consideração ainda na etapa de definição de partido arquitetônico, colaborando com as tomadas de decisões no processo projetual. Em museus com a tipologia de salas interligadas é uma ferramenta que possibilita decisões, por exemplo, na modelagem tridimensional. Modelos tridimensionais complexos com salas interligadas são custosos computacionalmente, por isso a opção de simplificar a geometria, contanto que se mantenham as características da sala, é fundamental. Por outro lado, se a decisão numa proposta de modelagem para intervenções é a de modelar as salas fechadas, a análise pode contribuir



com a decisão de qual coeficiente de absorção atribuir na região onde se encontram as aberturas de interligação entre as salas, por exemplo, não se recomenda  $\alpha = 1$  [19].

Salas com decaimento exponencial ou ainda quase exponencial — quando a deflexão da curva não interfere na percepção dos ouvintes — podem apresentar um  $\alpha$  de absorção de 0,99; por exemplo, na área das aberturas, onde também deve-se atribuir coeficiente de espalhamento apropriado, decorrente das reflexões oriundas das bordas da abertura, como é o caso da Pinacoteca. Além das características para decisões de projeto, propostas de intervenções acústicas podem utilizar este tipo de análise para manter, por exemplo, a razão de absorção entre as salas.

### 3. MÉTODOS

Esta seção apresenta o museu estudado, Pinacoteca de São Paulo, a metodologia das medições *in situ* e explica o parâmetro DDM — bem como a rotina de cálculo desenvolvida como ferramenta por Maiorino [23].

#### 3.1 Pinacoteca de São Paulo

A Pinacoteca de São Paulo é o museu de arte mais antigo da cidade, fundado em 1905. O edifício de arquitetura neoclássica, está instalado no antigo Liceu de Artes e Ofícios, projetado no final do século XIX originalmente pelo escritório do arquiteto Ramos de Azevedo. Na década 1990 passou por uma ampla reforma com projeto de intervenção, elaborado pelo arquiteto Paulo Mendes da Rocha juntamente com os arquitetos Eduardo Colonelli e Welliton Torres. A edificação possui 10.815,00 m<sup>2</sup> de área, distribuída em três pavimentos. É no segundo pavimento que ocorrem as exposições permanentes (ou de longa duração), que podem permanecer vários anos em cartaz, e é onde se encontram as galerias<sup>1</sup> analisadas neste trabalho. A Figura 1 apresenta uma imagem exterior do edifício [28].

#### 3.2 Medições

As medições foram realizadas nas Galerias 5, 6 e 7. A Figura 2 apresenta uma parte da planta do segundo pavimento com imagens das



**Figura 1:** Pinacoteca – vista externa.  
(Fonte: Barbo, 2020)

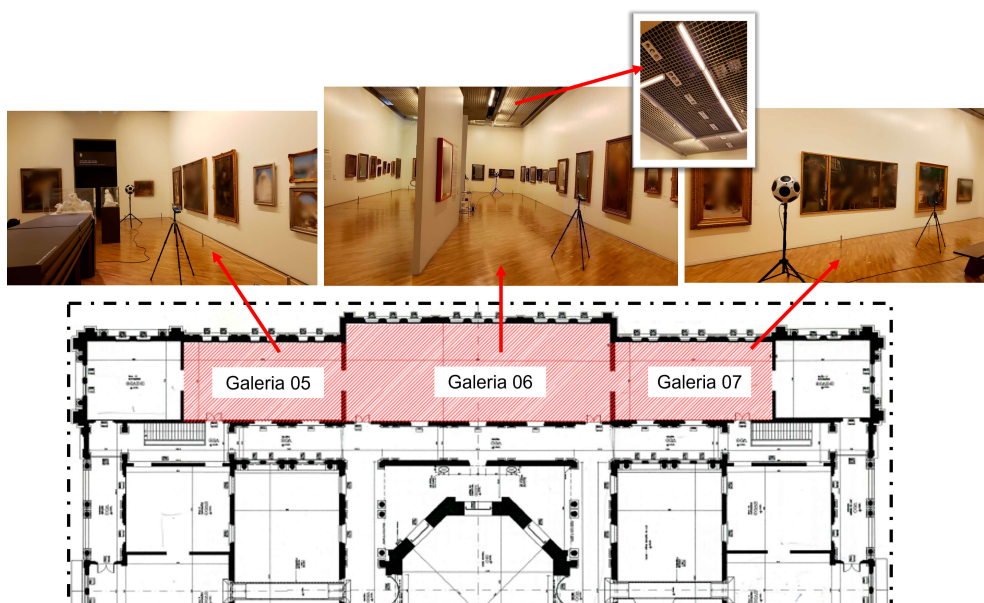
medições realizadas nas três galerias. Os ensaios foram realizados sempre com fonte e receptor na mesma sala. Essa configuração foi decidida devido à relação acústica dos ouvintes em um museu, em que as pessoas se comunicam em curtas distâncias e em pequenos grupos. Portanto, não foram executadas medições com pares de fonte-receptor em salas diferentes.

Os volumes das Salas 5, 6 e 7 são de 661,08 m<sup>3</sup>, 1384,93 m<sup>3</sup> e 659,33 m<sup>3</sup>, respectivamente. Observa-se que a Galeria 6 tem um pouco mais que o dobro do volume das Galerias 5 e 7. Nas imagens (Figura 2) é possível observar que os materiais comuns às salas são: piso em taco de madeira e paredes em alvenaria. O forro, que é possível ver no detalhe da mesma figura é constituído por uma grelha metálica (que permite a interligação entre as salas pelo entreferro), onde está localizado o sistema de condicionamento de ar e sua tubulação. Não foi possível dimensionar com exatidão essa área de ligação. Na Galeria 5 há alguns móveis em madeira e vidro ao centro, para abrigar esculturas. Na Galeria 6 há uma divisória em *drywall* no centro para possibilitar a instalação de telas de arte. Na Galeria 7 há um banco de madeira.

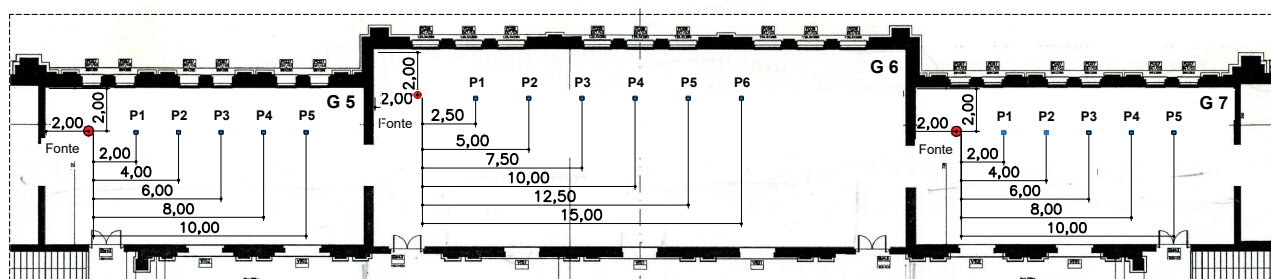
Os resultados apresentados são oriundos das medições com a Fonte 1, como se observa na Figura 3, que apresenta a posição da fonte e as distâncias entre os pares fonte-microfone. O modelo expositivo sugere um percurso de visitação linear, influenciado pela forma retangular da sala, o que justifica a escolha por posições de microfone com distância constante entre os receptores, bem como posição em linha. Essa disposição também foi sugerida para a análise de parâmetros relacionados à privacidade da fala, indicados na norma NBR 3382-3:2017 [29] — que não são

<sup>1</sup>Elas também são chamadas de “salas”, neste artigo.





**Figura 2:** Parte do segundo pavimento e Galerias 5, 6 e 7 (as obras de arte estão borradas propositalmente respeitando o direito de imagem dos responsáveis).



**GALERIAS 5, 6 e 7**

Áreas: 110,18 m<sup>2</sup> (Galeria 5), 231,82 m<sup>2</sup> (Galeria 6) e 109,88 m<sup>2</sup> (Galeria 7)

Volumes ≈ 661,08 m<sup>3</sup> (Galeria 5), 1384,93 m<sup>3</sup> (Galeria 6) e 659,33 m<sup>3</sup> (Galeria 7)

**Figura 3:** Plantas com a distribuição de fonte e receptor das Galerias 5, 6 e 7.

abordados neste artigo mas são uma das premissas das análises das medições nos museus como parte da tese de doutorado sobre acústica de museus, da qual este trabalho é parte dos estudos. O ruído residual médio,  $L_{Aeq}$ , registrado nas salas na ocasião dos ensaios foi 53,2 dB para a Galeria 5, 61,0 dB para a Galeria 6 e 52,1 dB para a Galeria 7. Os equipamentos utilizados originaram da colaboração da empresa HBK – Hottinger, Brüel & Kjær, que fez o empréstimo da fonte, microfone e *software*. Para a pesquisa utilizou-se os equipamentos: *notebook*, *software* Dirac 6.0 Tipo 7841, interface de áudio ZE – 0948, amplificador de potência Tipo 2734, fonte sonora omnidirecional *OmniPower* Tipo 4292-L, sonômetro B&K Tipo 2250 Classe 1 e pré-amplificador ZC-0032. O sinal utilizado para excitação da sala foi o *sweep* exponencial (22,4 Hz – 22,4 kHz, padrão do Dirac 6.0).

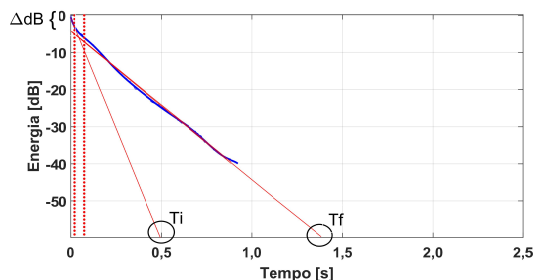
### 3.3 O parâmetro proposto – DDM

O parâmetro proposto por Maiorino [23] desenvolve-se a partir de uma rotina de cálculo que encontra os decaimentos inicial e final de curvas com decaimento de energia não exponencial, sem a dependência de um intervalo fixo de decaimento de energia. O método é baseado na proposta de múltiplas regressões lineares realizadas passo a passo com incremento de 1 dB, originando uma varredura na curva de decaimento analisada [20].

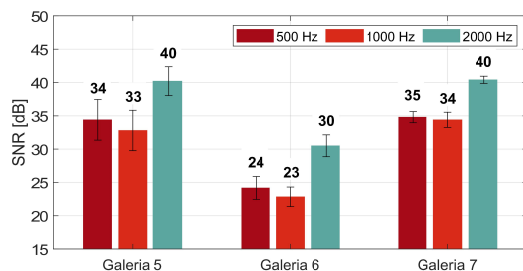
A partir das regressões, a rotina identifica três regiões distintas da curva de decaimento a partir do cálculo da curva de Schroeder de uma resposta impulsiva determinada. Os coeficientes angulares das regressões são agrupados pela função estatística de agrupamento *k-means* em três grupos distintos que representam a região do decaimento inicial da curva, a região de deflexão da curva e a região do decaimento final da curva. A partir



destas regiões é possível traçar duas retas que representam o duplo decaimento de energia a partir das regressões lineares da região do decaimento inicial e final e, assim, calcular os tempos inicial ( $T_i$ ) e final ( $T_f$ ) do decaimento de energia — como se observa na Figura 4. A partir da obtenção de  $T_i$  e  $T_f$  é possível extrair os parâmetros de *Decay Rate* (DR) e  $\Delta$ dB. A análise combinada desses dois parâmetros se apresentou eficiente na literatura [23]. O parâmetro DR não depende de um intervalo de cálculo para o tempo final, se apresentando como um parâmetro adequado para salas com ruído residual elevado.



**Figura 4:** Regressão linear com a obtenção de  $T_i$ ,  $T_f$  e  $\Delta$ dB.



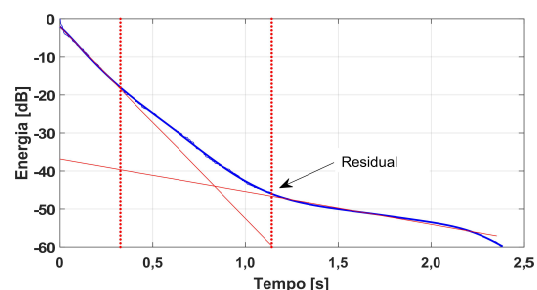
**Figura 5:** SNR médio e desvio padrão para as Galerias 5, 6 e 7 nas frequências 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz.

O método, proposto por Maiorino [23] relaciona matematicamente os parâmetros DR e  $\Delta$ dB. As pequenas variações do parâmetro DR foram evidenciadas transformando sua escala em uma escala logarítmica, que serviu para ponderar o parâmetro  $\Delta$ dB. Nas conclusões de seu trabalho, o parâmetro se mostrou adequado para curvas com decaimento exponencial duplo em que o tempo inicial de decaimento é menor que o tempo final (de decaimento de energia). Este tipo de curva é produzida por dois ambientes acoplados acusticamente onde uma das salas possui reverberação maior que a outra, de modo que fonte e receptor se encontram na sala de menor reverberação [23].

A rotina de cálculos para obtenção dos parâmetros foi desenvolvida em Matlab [23]. Primeiramente, lançam-se os valores de entrada, introduzindo-se

o sinal impulsivo registrado na sala, que pode ser originado de simulações ou medições *in situ*. Em consequência, define-se a faixa dinâmica de decaimento (FD), que no princípio está estabelecida como -60 dB, a janela de tempo ( $T_sT$ , em segundos) e o tamanho da regressão linear do *Marching Line* (Llen), que está determinado em primeiro momento em 10 dB. Esses valores podem ser modificados especialmente em salas sob a forte influência de ruído residual, que é o caso da Pinacoteca. A relação sinal-ruído (SNR) não atinge 30 dB em algumas frequências na Galeria 6, que é a mais ruidosa, como se observa na Figura 5. Esse ruído é proveniente do funcionamento do sistema de ar condicionado. Outras fontes de ruído como o de tráfego de veículos não foram detectadas nas salas estudadas. É importante ressaltar que o condicionamento de ar não é desligado em nenhum momento dentro dos museus, nem mesmo quando estão fechados para o público. Isso acontece para garantir a preservação das obras de arte.

Os cálculos citados foram testados até então somente para salas de concertos, com baixo ruído residual. Porém, existe a flexibilidade de uso para outras salas. Para isso, foi necessário modificar os dados de entrada FD,  $T_sT$  e Llen. A faixa dinâmica foi analisada caso a caso, em função do ruído residual. É importante que a definição de FD extraia a influência do ruído residual com exatidão, pois ele tem a tendência a distorcer a regressão. A Figura 6 apresenta um conteúdo similar ao da Figura 4, na qual o ruído residual foi removido — gerando valores corretos de  $T_i$  e  $T_f$  — diferentemente da Figura 6 em que manteve-se a FD-60.



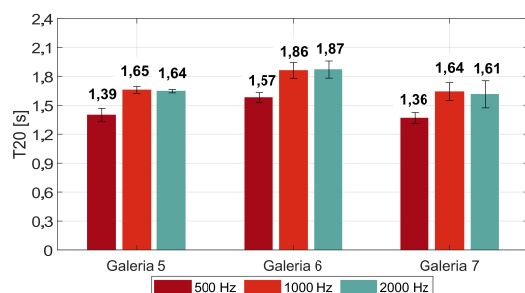
**Figura 6:** Decaimento FD-60 na curva (ruído residual mantido).

Uma análise de cada frequência em cada ponto (incluindo o SNR) foi realizada, de modo que a FD fique dentro da SNR aceitável. O Llen foi definido conforme as características da curva, sendo

que quando o decaimento apresenta irregularidades, deve-se testar o Llen com valores menores que 10 dB, para possibilitar um passo a passo de regressões com maior minuciosidade. No caso avaliado, o Llen variou entre 3 dB e 10 dB, variando por ponto de medição e frequência. É preciso sempre avaliar os resultados e modificar o Llen caso a inspeção visual da curva mostre que as regressões não estão corretas, em alguns casos, um Llen muito pequeno pode detectar pontos de deflexão da curva erroneamente. O Tst deve ser estabelecido também com a finalidade de gerar um decaimento livre de influência de ruído residual.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute os resultados. Inicia-se com a apresentação do tempo de reverberação, conforme o gráfico da Figura 7, nas frequências 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, com resultados da média com seus respectivos desvios-padrões entre os pontos de cada sala.



**Figura 7:**  $T_{20}$  médio e desvio padrão para as Galerias 5, 6 e 7 nas frequências 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz.

Observa-se que a Galeria 6 tem o  $T_{20}$  superior em relação às outras salas, o que é esperado, visto que seu volume é aproximadamente o dobro das demais (sendo que os materiais internos empregados são basicamente os mesmos). As Galerias 5 e 7 apresentam  $T_{20}$  médios similares, e (em todos os recintos) se observa valores menores  $T_{20}$  em 500 Hz e semelhantes em 1 kHz e 2 kHz.

A partir dos resultados de  $T_{20}$  foram definidas as relações entre salas para os cálculos de Razão de Absorção (RA), Área de Acoplamento (AA) e Razão entre volumes (RV). Diferentemente de espaços com volumes acoplados (estratégia típica em salas de espetáculos onde apenas uma delas é ocupada), em museus as pessoas frequentarão todos os ambientes acusticamente acoplados. Em estudos sobre a RA foi detectado que a tendência

é que a sala menos reverberante acoplada a uma sala mais reverberante apresente uma EDC não exponencial [23, 30]. Desse modo, os resultados dos parâmetros arquitetônicos foram calculados como se a Sala 6 fosse uma câmara acoplada.

As RVs entre as Galerias 6 e 5 e Galerias 6 e 7 têm média de  $\approx 209,4\%$ . O valor é semelhante para as duas galerias visto que possuem volumes quase idênticos. Nas diversas salas estudadas por Bradley e Wang (2010) [31], projetadas com câmara reverberante acoplada, a razão de volumes variou entre 28% a 50%, sendo que os maiores valores obtiveram maior tendência à deflexão da EDC [21].

A Área de Acoplamento (AA) entre as Salas 5 e 6 e Salas 6 e 7 são de  $\approx 2,0\%$ . Como referência, tem-se que uma área de acoplamento até 1% denota o caso em que se encontra a maior deflexão da EDC; e entre 1% a 10% a deflexão da curva gradativamente diminui chegando próxima ao decaimento exponencial [25, 31, 32]. No caso deste trabalho, a AA entre as Galerias 5 e 6 é a razão entre a área de abertura entre as salas e a somatória das áreas de superfície da sala principal, no caso, a Galeria 5. A AA entre as Galerias 6 e 7 é a razão entre a área de abertura entre as salas e a somatória das áreas de superfície da sala principal, neste caso, a Galeria 7.

As Razões de Absorção (RA) estão apresentadas na Tabela 1. Quanto maior o resultado de RA, menor é a tendência de haver um duplo decaimento detectável, sendo que valores menores que 0,04% se mostraram eficazes para a detecção do duplo decaimento de energia [21] na EDC. Os resultados da Pinacoteca fogem de valores da literatura utilizada como referência, pois não se trata de uma relação de sala de espetáculos acoplada a uma câmara reverberante. Vale ressaltar que em salas de apresentações, em geral, a câmara reverberante tem volume menor que a sala principal bem como uma absorção média consideravelmente menor. Estas características justificam os pequenos valores de RA encontrados nestas tipologias de salas [31]. No caso da Pinacoteca a galeria que foi utilizada como reverberante (Galeria 6), tem o dobro do volume das adjacentes, ou seja, maior área e absorção média similar, justificando o alto valor de RA.





É válido mencionar que edificações antigas e históricas são de difícil acesso a todos os detalhes construtivos. Por isso, é comum que algumas características do espaço possam ser de conhecimento posterior às análises de resultados obtidos em medições *in situ*, quando o decaimento da energia e os parâmetros acústicos fornecem dados fundamentais sobre a sala. Para a definição da Área de Acoplamento da Pinacoteca se considerou a área de abertura onde passam as pessoas entre as salas (que não se tem dúvida, pois foram conferidas no local) e a área de interligação através do entreferro. Esta última teve uma definição de área estipulada, pois não foi possível o acesso para a aferição das medidas.

**Tabela 1:** Razão de Absorção (RA).

| Sala      | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz |
|-----------|--------|---------|---------|
| Galeria 5 | 1,53%  | 1,41%   | 1,45%   |
| Galeria 7 | 1,43%  | 1,32%   | 1,34%   |

#### 4.1 Resultados dos descritores de duplo decaimento

A Figura 8 apresenta os resultados de DSE (vide Figura 8 (a)),  $\Delta dB$  (vide Figura 8 (b)) e DR (vide Figura 8 (c)), nas bandas de frequências 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, para as Galerias 5, 6 e 7. Os valores de DSE (que são caracterizados pela proximidade de 1) mostram que quanto mais próximo de 1 maior é a tendência de uma curva exponencial, de forma análoga quanto mais distante de 1 maior é o duplo decaimento da curva [21]. Para possibilitar um paralelo de valores, utilizou-se a Configuração G apresentada na tese de Maiorino [23], que apresenta uma Área de Acoplamento de 2%, ou seja, semelhante à área encontrada na Pinacoteca. Vale ressaltar que a área da Pinacoteca pode ter alteração visto que as medidas do vão de interligação através do entreferro não são conhecidas com exatidão.

Observando os resultados de DSE, nenhum valor ultrapassa 1,5 em todas as salas, pontos e frequências. A única situação que atinge 1,5 é na Sala 6, P2 (1000 Hz). É também na Sala 6 que se registram os menores valores, abaixo de 1, em P4 (1000 Hz) e P5 (500 Hz). Nas Galerias 5 e 7 os resultados não chegaram a 1,4 em nenhuma das situações. Ao se comparar com a Configuração G, os valores apresentados na Pinacoteca são mais

próximos do domínio de um único decaimento exponencial que em Maiorino [23], em que na Configuração G os valores oscilam entre 2 e 6. A ausência de valores na Galeria 6, em 500 Hz (P4) e 1000 Hz (P1, P3 e P6) se deu em função do alto ruído residual que foi extraído do decaimento, o que impossibilitou o cálculo nessa faixa de valores. Em geral, a banda de frequência de 500 Hz apresenta os menores valores de DSE. As Galerias 5 e 7 apresentam DSE semelhantes, o que é atribuído à semelhança arquitetônica entre as duas.

Os parâmetros  $\Delta dB$  e DR (*Decay Rate*) devem ser analisados em conjunto [31]. Os resultados de  $\Delta dB$  mostram a diferença dos coeficientes lineares das regressões das Regiões 1 e 3 que calculam  $T_i$  e  $T_f$  respectivamente — quanto mais próximo de zero, mais a EDC se aproxima de uma curva que contém apenas um decaimento exponencial, de maneira que  $\Delta dB \geq 0$  [23]. Vale destacar que valores de DR maiores que 1 significam que  $T_i$  é menor que  $T_f$  e valores de DR menores que 1 significam que  $T_f$  é menor que  $T_i$ . Além disso, se  $DR \approx 1$  a EDC tende a ser uma curva regida por um único decaimento exponencial.

Analisando os gráficos (Figura 8 (b)), se observa que os valores de  $\Delta dB$  são variáveis, mostrando que aconteceu inconstância nos resultados de  $T_i$  e  $T_f$  de um modo geral, especialmente em 2000 Hz. Estes resultados foram um pouco inesperados visto que conforme o ruído residual é menor nesta frequência, se acreditaria que os resultados apresentassem maior estabilidade, o que não ocorreu.

Por outro lado, vale destacar que não somente o ruído residual interfere na configuração da EDC mas também os materiais e composição das salas. Como comparação, em salas com variedade acústica projetadas propositalmente, como salas de espetáculos, os valores de  $\Delta dB$  podem chegar a 40 dB [23]. O valor mais alto apresentado na Pinacoteca é de 7,2 dB na Galeria 5, P3, 2000 Hz. Observa-se que os valores mais baixos estão na Galeria 6, Pontos 4, 5 e 6, sendo que P4 não ultrapassou 2,4 dB em todas as frequências, P5 e P6 não ultrapassaram 1,6 dB em 500 Hz e 1000 Hz, sendo que estes dois últimos receptores mostraram um pico em 2000 Hz de 3,2 dB e 2,4 dB respectivamente.



Na Galeria 5, os pontos com maiores  $\Delta$ dB (P3, P4 e P5) são os pontos mais próximos da Sala 6, e, portanto, mais sujeitos à influência do acoplamento. A situação da Galeria 6 apresentar os menores valores de  $\Delta$ dB corrobora com o fato de que a sala mais reverberante tem a tendência a apresentar uma EDC que pode ser modelada por uma curva com um único decaimento exponencial. Isto porque a energia reverberante contida na sala de maior volume mascara a energia reverberante tardia oriunda das salas adjacentes. Para efeito de comparação, a Configuração G apresentou  $\Delta$ dB que oscilou em torno de 8 dB a 18 dB em todos os pontos, conforme mediana e valor absoluto da mediana apresentados por Maiorino [23].

Ao se analisar o DR, diferentemente de  $\Delta$ dB, se observa homogeneidade nos resultados a partir de P3 em todas as salas, para as três frequências analisadas, com valores menores que 1,5. Ou seja, as EDCs tendem a ser curvas dominadas por um único decaimento exponencial. O ponto P1 apresenta os maiores resultados de DR em todas as salas, com a diferença mais acentuada, em relação aos demais pontos, nas Galerias 6 e 7, que ultrapassa 3,0 em 2000 Hz na Sala 6 e atinge 3,0 em 1000 Hz na Sala 7. Na Sala 5, P2 apresenta um DR maior que nas outras galerias, especialmente em 500 Hz que chega próximo a 2,0 e 1000 Hz que ultrapassa 2,5.

Os pontos P1 e P2 são os mais próximos da fonte sonora em todas as salas (2,0 e 4,0 metros nas Galerias 5 e 7 e 2,5 e 5,0 metros na Galeria 6). Além disso, também estão mais próximos das aberturas que conectam os espaços. No caso da Galeria 5, existe outra sala, menor, acoplada à ela, que não entrou no estudo por ser uma galeria de exposições temporárias, mas com as mesmas características físicas das demais. O ponto P1 da Galeria 6, tem proximidade da área de interligação com a Galeria 5 e o microfone P1 da Galeria 7 é vizinho da área de abertura com a Galeria 6. Ainda na Galeria 5 também ocorre a presença de aparatos próximos ao microfone, como um suporte para abrigar uma escultura em madeira e vidro, e uma mesa, tanto para P1 quanto para P2. Embora as distâncias mínimas exigidas na norma [29] tenham sido respeitadas, essas particularidades físicas do espaço podem causar fortes reflexões iniciais, influenciando na EDC dos mi-

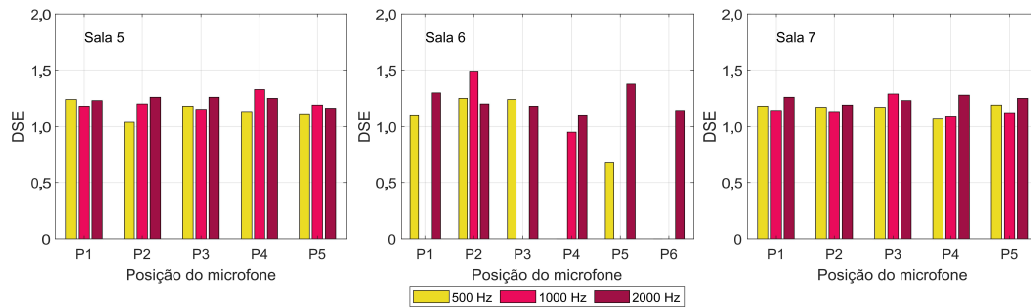
crofones próximos ao som direto.

A mediana e valor absoluto da mediana do DR apresentado na Configuração G oscilou em torno de 2,5 dB a 4,0 dB [23]. As análises de  $\Delta$ dB e DR mostram que ao contrário da relação entre a diferença dos coeficientes lineares das regressões de  $T_i$  e  $T_f$ , que são bastante heterogêneas, a razão entre a taxa de decaimento final e inicial da energia apresenta uniformidade.

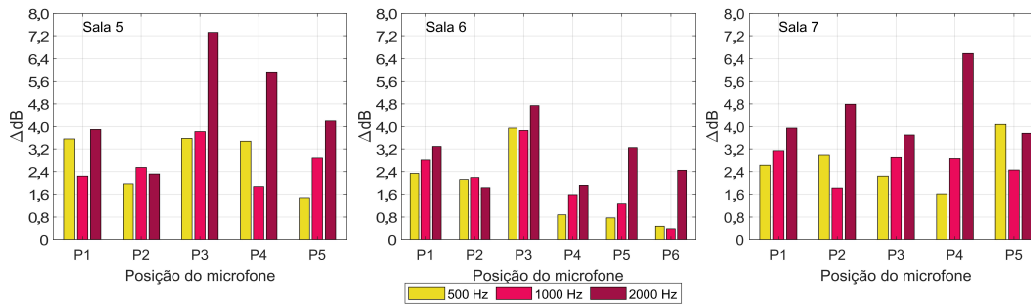
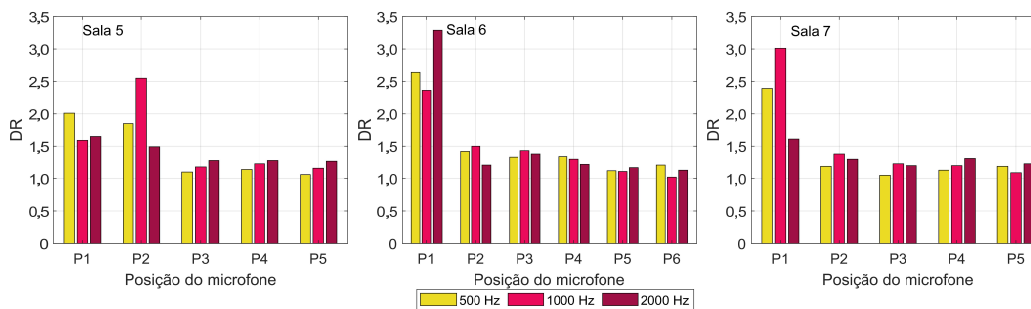
A Figura 9 apresenta os resultados de *Double Decay Metric* (DDM). O *Just Noticeable Difference* (JND) do DDM é 40 dB [23]. Quanto mais próximo de zero maior a tendência da EDC ser dominada por um único decaimento exponencial. Portanto, para valores de até 40 dB, mesmo apresentando uma deflexão de curva, a diferença de decaimento não será percebida pelo ouvinte [23]. A partir de 40 dB a sensação na diferença de decaimento e da reverberância começa a se fazer presente, embora valores muito próximos deste limite verifiquem que há a existência de decaimento duplo, apesar de não serem evidentemente perceptíveis.

Os resultados de DDM constatarem os maiores valores na frequência de 2000 Hz, com maior valor próximo de 18 dB, registrado em P1 na Galeria 6. Abaixo deste, está o valor de 15 dB em 1000 Hz em P1 na Galeria 7. Seguindo as análises, os receptores P3 a P5 (Galerias 5 e 7) e P3 a P6 (Galeria 6) apresentam valores abaixo de 10 dB. Se observa uma homogeneidade de resultados dos Pontos 4 a 6 na Galeria 6, em todas as frequências, com números que não chegam a 3 dB de DDM, reforçando também que essa sala tem a tendência a mascarar a energia proveniente das outras salas. O Ponto 1 das Galerias 6 e 7, assim como no parâmetro DR, apresentou valores que desviam em relação aos demais pontos da mesma sala, especialmente em 2000 Hz na Galeria 6 e 1000 Hz na Galeria 7. Os resultados da mediana e valor absoluto da mediana de DDM da Configuração G, oscilaram entre 25 dB a próximo de 100 dB [23].

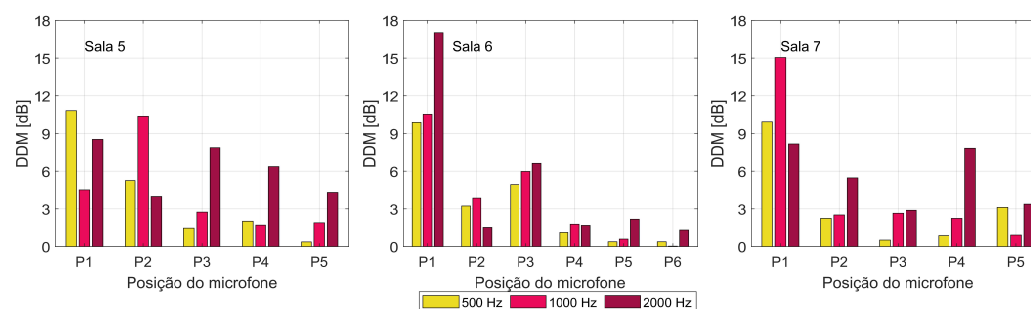
A variabilidade dos resultados de DDM mostra que estes estão de acordo com as respostas observadas em  $\Delta$ dB. Embora esses parâmetros não apresentem a premissa de serem analisados em conjunto, como acontece com  $\Delta$ dB e DR, é possível detectar um comportamento que se repete.



(a) Resultados de DSE

(b) Resultados de  $\Delta dB$ 

(c) Resultados de DR

**Figura 8:** Resultados dos parâmetros DSE,  $\Delta dB$  e Decay Rate.**Figura 9:** Resultados de DDM.

As análises feitas até aqui demonstram que as EDCs tendem a ter um comportamento que pode ser modelado por uma curva contendo apenas um decaimento exponencial. Isto se mostra válido em praticamente todos os pontos e frequências, nas três salas. Em nenhum dos casos os efeitos das mudanças de curvatura da EDC está dentro de uma faixa auditivamente perceptível pelos fre-

quentadores das Salas 5, 6 e 7 da Pinacoteca.

As diferenças encontradas com a comparação da Configuração G [23] são justificadas pelo fato de que apenas a Área de Acoplamento é semelhante — que foi utilizada como base de comparação — de modo que a Razão entre Volumes e Razão de Absorção se diferem por completo. É importante observar que todas essas propriedades

colaboram com a EDC dominada por um único decaimento exponencial encontrado nas galerias da Pinacoteca, onde as características arquitetônicas apresentam especificidades distintas das salas de espetáculos.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do trabalho reforça a primeira questão importante, negligenciada em grande parte dos museus brasileiros, que é o cuidado com o ruído residual. Constatou-se que, em algumas situações, o ruído residual elevado interferiu no reconhecimento das regressões propostas pela rotina usada, portanto, este item, quando existente, deve ser criteriosamente avaliado para se atribuir as corretas entradas de dados na rotina de cálculo programada.

A relação entre os resultados do parâmetro arquitetônico Área de Acoplamento (AA) com os parâmetros acústicos verifica que a área de forro contribui expressivamente ao acoplamento das salas. Isto porque todos os resultados de parâmetros acústicos como o DSE,  $\Delta$ dB, DR e DDM mostram que as curvas, embora apresentem duplo decaimento, são muito próximas de serem dominadas por único decaimento exponencial. Portanto, essa reverberação típica de salas com variabilidade acústica (projetadas propositalmente, o que não é o caso da Pinacoteca) não será percebida pelos frequentadores. Pode-se pressupor que a área aberta na região do entreforro entre as galerias seja maior que o estipulado. Além disso, a Razão de Absorção (RA) corrobora com a tendência de curvas quase exponenciais, indicando que essa também pode ser uma estratégia de projeto considerável quando se quer evitar deflexão na EDC em museus estilo galeria, como no caso da Pinacoteca — ou mesmo outras tipologias de edificações que apresentem configuração espacial equivalente.

A análise das curvas de decaimento de energia é uma importante ferramenta para subsidiar decisões de projeto que levem em consideração o conforto acústico. Estas podem ser relacionadas às decisões espaciais no partido arquitetônico, na definição dos materiais de revestimento e intervenções em edificações existentes, respaldadas por modelagem computacional apropriada.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos profissionais Fernando Diaz e Denison de Oliveira da empresa HBK – Hottinger Brüel & Kjær pela colaboração nos ensaios, empréstimo dos equipamentos e permissão de uso do *software* Dirac 6.0. Os autores também agradecem à equipe de arquitetura da Pinacoteca do Estado de São Paulo, Eric Braga Lester, Flávio Pires e Julia Martinelli.

Ademais, os autores também gostariam de agradecer todo o apoio e infraestrutura fornecido pelo curso de Engenharia Acústica (EAC) e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

## REFERÊNCIAS

- [1] Biselli, Mario. *Teoria e prática do partido arquitetônico*. Tese de doutorado, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, 2014. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/handle/10899/25838>.
- [2] Assoni, Aline Dias e Ornstein, Sheila Walbe. Museus interativos sob a ótica dos usuários. avaliação pós-ocupação aplicada no caso do museu cata-vento, sp. *Cadernos do PROARQ*, 33:111–132, 2019. doi: 10.37180/2675-0392-n33-6.
- [3] Castillo, Sonia Salcedo del. *Cenário da arquitetura da arte: montagens e espaços de exposições*. São Paulo: Martins Fontes, 2008. ISBN 978-8599102824.
- [4] Guimaraens, Cêça; Iwata, Nara; Polly, Vânia e Kessel, Carlos. *Museografia e arquitetura de museus*. Rio de Janeiro: Proarq, 2005.
- [5] Veiga, Ana Cecília Rocha. *Gestão de projetos de museus e exposições*. Belo Horizonte: C/Arte, 2013. ISBN 978-8576541622.
- [6] Jónsdóttir, Guðrún. *Museum Acoustics*. Dissertação de mestrado, Universidade Técnica da Dinamarca (DTU), Lyngby, Dinamarca, 2006. Disponível em: <https://findit.dtu.dk/en/catalog/5a02e3575010df4c820fec41>.
- [7] Garcia, Luisa Maia Mota. *A acústica de museus tradicionais: Estudo de Caso, O Museu Nacional Soares dos Reis*. Dissertação de mestrado, Mestrado em Engenharia. Universidade do Porto, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10216/68287>.
- [8] Gonçalves, Helder José Silveira. *A acústica de museus modernos: Estudo de caso, O Museu de Serralves*. Dissertação de mestrado, Universidade do Porto, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10216/68269>.
- [9] D’Orazio, Dario; Montoschi, Federico e Garai, Massimo. Acoustic comfort in highly attended museums: A dynamical model. *Building and Environment*, 183:107176(1–10), 2020. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107176.



- [10] Yang, Tingting e Kang, Jian. Correlations between sound level and loudness, intimacy, reverberation, clarity, spaciousness in sequential spaces. Em *Proceedings of the International Congress on Acoustics*, págs. 4158–4163. International Congress on Acoustics, 2019. Disponível em: <http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/000369.pdf>.
- [11] Yang, Tingting e Kang, Jian. Acoustic modeling of sequential spaces: A parametric study. *Building and Environment*, 212:108733(1–12), 2022. doi: [10.1016/j.buildenv.2021.108733](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108733).
- [12] Yilmazer, Semiha e Orhan, Cemre. Auditory Environment in the Museums: The Case of Erimtan Archaeology and Arts Museum. Em *48th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering – Internoise 2019*, Madri, Espanha, 2019. Disponível em: [http://www.sea-acustica.es/fileadmin/INTERNOISE\\_2019/Fchrs/Proceedings/1473.pdf](http://www.sea-acustica.es/fileadmin/INTERNOISE_2019/Fchrs/Proceedings/1473.pdf).
- [13] Yilmazer, Semiha; Yilmazer, Cengiz e Acun, Volkan. A Comparative Study on Prediction of the Indoor Soundscape in Museums via Machine Learning. Em *48th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering – Internoise 2019*, Madri, Espanha, 2019. Disponível em: [http://www.sea-acustica.es/fileadmin/INTERNOISE\\_2019/Fchrs/Proceedings/2024.pdf](http://www.sea-acustica.es/fileadmin/INTERNOISE_2019/Fchrs/Proceedings/2024.pdf).
- [14] Orhan, Cemre e Yilmazer, Semiha. Harmony of context and the built environment: Soundscapes in museum environments via gt. *Applied Acoustics*, 173: 107709, 2021. doi: [10.1016/j.apacoust.2020.107709](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107709).
- [15] Yang, Tingting e Kang, Jerry. Subjective evaluation of sequential spaces. *Applied Acoustics*, 161, 2020. doi: [10.1016/j.apacoust.2019.107139](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107139).
- [16] Kiefer, F. *MAM Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro e MASP Museu de Arte de São Paulo : Paradigmas brasileiros na arquitetura de museus*. Tese de doutorado, Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Arquitetura - UFRGS, 1998. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/1313>.
- [17] Kowaltowski, Doris K; Carvalho Moreira, Daniel; Petreche, João RD e Fabrício, Márcio M. *O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia*. Oficina de Textos, 2011. ISBN 978-8579750335.
- [18] Long, Marshall. *Architectural acoustics*. Elsevier, 2005. ISBN 978-0124555518.
- [19] Eyring, Carl F. Reverberation time measurements in coupled rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 3(2A):181–206, 1931. doi: [10.1121/1.1915555](https://doi.org/10.1121/1.1915555).
- [20] Luizard, Paul e Katz, Brian F. G. Coupled volume multi-slope room impulse responses: a quantitative analysis method. *8th International Conference on Auditorium Acoustics*, 33:1–8, 2011. Disponível em: <https://bit.ly/coupled-volume-2011>.
- [21] Bradley, David T. e Wang, Lily M. Optimum absorption and aperture parameters for realistic coupled volume spaces determined from computational analysis and subjective testing results. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(1):223–232, 2010. doi: [10.1121/1.3268604](https://doi.org/10.1121/1.3268604).
- [22] Maiorino, Alexandre Virginelli e Bertoli, Stelamaris Rolla. Características arquitetônicas e o decaimento sonoro de salas acopladas: uma revisão da literatura. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, 8(3):194–204, 2017. ISSN 980-6809. doi: [10.20396/parc.v#n#9999999](https://doi.org/10.20396/parc.v#n#9999999).
- [23] Maiorino, Alexandre Virginelli. *Parâmetro acústico para caracterização objetiva e subjetiva de curvas de energia com decaimento não exponencial em salas de múltiplo uso com espaços acoplados*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura Tecnologia e Cidade - Unicamp, 2018. doi: [10.47749/T/UNICAMP.2018.1035484](https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2018.1035484).
- [24] Barron, Michael. Interpretation of early decay times in concert auditoria. *Acta Acustica united with Acustica*, 81(4):320–331, 1995. Disponível em: <https://bit.ly/EDT-1995>.
- [25] Ermann, M. Coupled volumes: Aperture size and the double-sloped decay of concert halls. *Building Acoustics*, 12(1):1–13, 2005. doi: [10.1260/1351010053499252](https://doi.org/10.1260/1351010053499252).
- [26] Harrison, Byron W.; Madaras, Gary e Celmer, Robert D. Computer modeling and prediction in the design of coupled volumes for a 1000-seat concert hall at goshen college, indiana. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(5):2388–2388, 2001. doi: [10.1121/1.4744419](https://doi.org/10.1121/1.4744419).
- [27] Maiorino, Alexandre e Rolla Bertoli, Stelamaris. Proposta de melhoria de parâmetro acústico para caracterização de curvas com decaimento de energia não exponencial. Em *XXVIII Encontro da Sobrac*. Sociedade Brasileira de Acústica, 2018. doi: [10.17648/sobrac-87054](https://doi.org/10.17648/sobrac-87054).
- [28] Pinacoteca de São Paulo. About pinacoteca. Disponível em: <http://pinacoteca.org.br>.
- [29] *NBR 3382-1 Acústica - Medição de Parâmetros de Acústica de salas. Parte 3: escritórios de planta livre*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, jun. 2017.
- [30] Harris, Cyril M e Feshbach, Herman. On the acoustics of coupled rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22(5):572–578, 1950. Disponível em: [10.1121/1.1906653](https://doi.org/10.1121/1.1906653).
- [31] Bradley, David T. e Wang, Lily M. The effects of simple coupled volume geometry on the objective and subjective results from nonexponential decay. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(3): 1480–1490, 2005. doi: [10.1121/1.1984892](https://doi.org/10.1121/1.1984892).
- [32] Ermann, Michael. Five sensitivities of the coupled volume/double sloped system. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(4):2552–2552, 2004. Disponível em: <http://michael-ermann.squarespace.com/s/Coupled-volume-research-compendium.pdf>.