

TEMPOS DE REVERBERAÇÃO EM SALAS DE AULA

PACS: 43.55.Br

Cristiane, Hupalo; Duarte, Lopes

Instituição: Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP)

Endereço: Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Portugal

E-mail: cristiane.hupalo@gmail.com

E-mail: dbl@isep.ipp.pt

ABSTRACT

The reverberation time TR is important for speech understanding. The theoretical and experimental values of TR, obtained by the Sabine formula and by experimental Brüel & Kjaer equipments, respectively, were applied in seven classrooms of ISEP and compared. For a room (auditorium of 100 seats) daily variables (windows, blinds, blackouts, ducts, grids, and audience) were analyzed.

All the rooms studied did not present TR within the normative recommendation and the presence of people was the variable that most influenced the TR. Some improvements are suggested, namely the use of upholstery and perforated panels.

Keywords: Acoustics; Sabine's formula; Reverberation Time; Absorption.

RESUMO

O tempo de reverberação TR é importante para entendimento da palavra. Os valores teóricos e experimentais do TR, obtidos pela fórmula de Sabine e através dos equipamentos Brüel & Kjaer, respetivamente, foram aplicados em sete salas do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e comparados. Para uma sala (auditório de 100 lugares), variáveis cotidianas (janelas, estores, blackouts, condutas, grelhas, audiência) foram analisadas.

Todas as salas estudadas não apresentaram TR dentro da recomendação normativa e a presença de pessoas foi a variável que mais influenciou o TR. Algumas melhorias foram sugeridas, nomeadamente o uso de estofos e painéis perfurados.

Keywords: Absorção, Acústica, Fórmula de Sabine, Tempo de Reverberação.

1. INTRODUÇÃO

O tempo de reverberação TR é um parâmetro acústico, o mais importante a ser avaliado no desempenho acústico de um compartimento. O TR está diretamente associado ao entendimento das palavras / inteligibilidade. O TR deve estar de acordo com o uso do compartimento. Não

deve ser longo em demasiado para não perturbar o entendimento, mas, também, não deve ser pequeno demais, que prejudique a percepção de alguns tipos de fontes sonoras (Losso, 2003). Num recinto fechado e uma determinada banda de frequência, o tempo de reverberação pode ser definido como: [...] o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora dessa banda de frequência, após ter sido interrompida a emissão de energia sonora, decresça em 60 dB, ou, de um ponto de vista energético, ao tempo que é necessário decorrer para que a densidade média da energia sonora atinja um milionésimo do seu valor inicial (Patrício, 2002).

No que diz respeito ao TR teórico, a Fórmula é a mais comum para a estimativa do tempo de reverberação de um compartimento. Bistafa (2006) explica que esta é uma relação entre volume e absorção sonora.

$$TR = 0,161 \frac{V}{A_{recinto}} \quad (1)$$

Entretanto, a fórmula de Sabine não é válida quando há superfícies muito mais absorventes que outras, da ordem de $\Delta\alpha_n > 0,4$.

A maneira mais comum de alterar o valor do TR de um compartimento é o uso de materiais absorvedores nos revestimentos. A capacidade que uma superfície possui de absorver o som, ou a energia sonora, é chamada de coeficiente de absorção sonora (α) e é dada pela seguinte fórmula:

$$\alpha = \frac{I_{absorvida}}{I_{incidente}} = \frac{I_{incidente} - I_{refletida}}{I_{incidente}} = 1 - \frac{I_{refletida}}{I_{incidente}} \quad (2)$$

De acordo com Michalski (2017) os materiais absorventes podem ser classificados em porosos (espumas) ou fibrosos (lãs), além dos sistemas acústicos (ressonados, painel perfurado, painel flexível).

Na Tabela 1 apresentam-se quase uma dezena de normas de diferentes países (Europeus e Americanos) com sugestões para os valores do TR.

Tabela 1 – Legislação de diferentes países e sugestões para o TR.

País/Legislação	Bandas de Oitava	Tempo de Reverberação (s)
Alemanha DIN 18041	250 Hz a 2000 Hz (4 bandas)	$\leq 0,32 \times \log(V) - 0,17$
Brasil NBR 12179	500 Hz (1 banda)	Conforme diagrama apresentado na norma.
Espanha DB-HR	500 Hz a 2000 Hz (3 bandas)	$\leq 0,5$ se $V \leq 350 \text{ m}^3$ Sem prescrição para $V > 350 \text{ m}^3$
EUA ANSI/ASA S12.60	500 Hz a 2000 Hz (3 bandas)	$< 0,6$ se $V \leq 283 \text{ m}^3$ $< 0,7$ se $283 < V \leq 566 \text{ m}^3$ Sem prescrição para $V > 566 \text{ m}^3$
França Decreto de 25/04/2003	500 Hz a 2000 Hz (3 bandas)	$0,4 \leq TR \leq 0,8$ se $V \leq 250 \text{ m}^3$ $0,6 \leq TR \leq 1,2$ se $V > 250 \text{ m}^3$
Noruega NS 8175	125 Hz a 2000 Hz (5 bandas)	$0,2 \times$ altura média da sala $< 0,6$
Portugal RRAE	500 Hz a 2000 Hz	$\leq 0,15V^{1/3}$

	(3 bandas)	
Reino Unido BB 93	500 Hz a 2000 Hz (3 bandas)	< 0,8 para salas de aula < 1,0 para auditórios
Suécia SS 25268	250 Hz a 2000 Hz (4 bandas)	< 0,6

Em países como a Alemanha e Portugal levam em consideração o volume do compartimento para estabelecer o TR limite. Por outro lado, a Espanha, os Estados Unidos e a França têm o volume como um balizador, porém nada muito específico. Já o Reino Unido e a Suécia prescrevem limites apenas de acordo com o uso da sala de aula. No Brasil, o limite se dá em função do volume e do uso.

2. CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA

Foram analisadas 7 salas do Instituto Superior de Engenharia do Porto ISEP – Porto (Portugal), sendo duas salas em forma de auditório, uma sala de reuniões e quatro salas de aula, ver Tabela 2. Estas salas são designadas conforme a tabela abaixo, que também abrange algumas de suas características. Em Hupalo (2017) poderemos encontrar toda a informação adicional das salas ensaiadas.

Tabela 2 – Características das salas ensaiadas.

	Capacidade*	Área*	Volume*
Auditório Magno	450	334	1.802,2
Auditório E	200	240	1.014,9
Sala C301	90	82	237,5
Sala C302	90	82	237,5
Sala I201	104	103	266,4
Sala J206	50	89	305,3
Sala de Reuniões - CTC	30	72	261,2

*Capacidade em lugares / pessoas, área em m² e volume em m³.

Na realização do ensaio de determinação do TR foi seguido o procedimento da NP EN ISO 3382-2 (2011) e utilizado equipamento da *Brüel & Kjaer*: Sonómetro 2260 D, amplificador 2716, fonte sonora Omnidireccional 4296, Calibrador acústico 4231 e *Software Building Acoustics BZ 7204*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira análise compara o TR ensaiado e o teórico de cada sala (Tabela 3). A segunda estuda a influência de diferentes variáveis nas salas idênticas, C301 e C302, porém espelhadas na sua configuração arquitetónica. Já a última compara o TR de todas as salas entre elas mesmas (com sugestões de melhoria) e com a legislação da Tabela 1.

Na Tabela 3, o TR ensaiado é, em grande parte das salas ensaiadas, maior do que o TR estimado teoricamente (eq. 1). Isso se deve ao fato de que, como as áreas absorventes são relativamente grandes, a escolha dos coeficientes tem grande influência no resultado final (da equação 2), e, como o TR teórico foi baseado em valores gerais, é difícil chegar-se a uma boa precisão.

Tabela 3 – Comparação entre TR ensaiado e TR teórico em segundos.

	TR ensaiado	TR teórico	Δ TR
Auditério Magno	2,41	1,95	19%
Auditério E	2,09	1,77	15%
Sala C301	3,30	2,81	15%
Sala C302	2,41	2,46	- 2%
Sala I201	1,77	1,56	12%
Sala J206	3,47	3,47	0%
Sala de Reuniões - CTC	3,21	2,78	13%

$$\Delta TR = (TR \text{ ensaiado} - TR \text{ teórico}) / TR \text{ ensaiado}.$$

Na análise das variáveis existentes dentro das salas, capazes de interferirem nos valores do TR, foram analisadas as salas C301 e C302. Evidenciaram-se os seguintes parâmetros, capazes de interferirem com o TR: janelas, estores, *blackouts*, condutas de ar condicionado, grelhas e audiência. A Tabela 4 apresenta as variáveis utilizadas e a respetiva posição aquando da realização do ensaio.

Tabela 4 – Variáveis analisadas nas salas C301 e C302.

	Janelas	Estores	<i>Blackout</i>	Pessoas
TR1	Fechadas	Erguidos	Erguidos	0
TR2	Abertas	Erguidos	Erguidos	0
TR3	Fechadas	Abaixados	Erguidos	0
TR4	Fechadas	Erguidos	Abaixados	0
TR5	Fechadas	Erguidos	Erguidos	20

A Figura 1, para a sala C301, mostra que não há diferença significativa com a alteração dos parâmetros da Tabela 4. Nas frequências mais baixas, as janelas abertas resultam em um TR menor. Em contrapartida, nas frequências mais altas são os estores abaixados que trazem esse efeito.

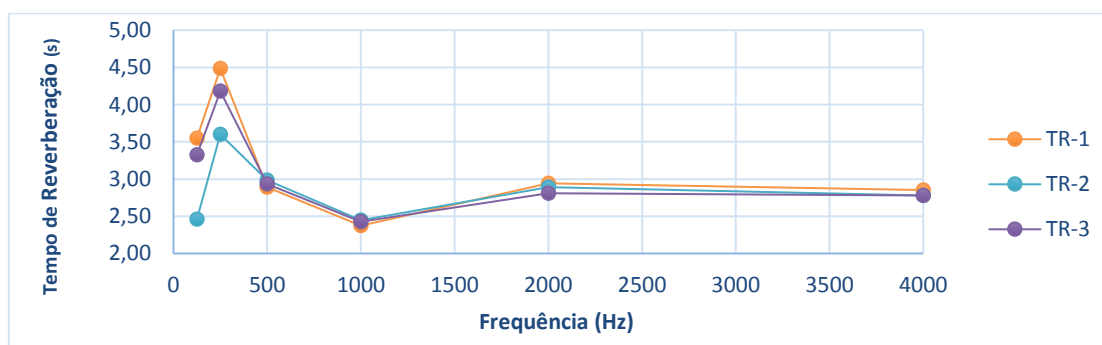


Figura 1 – TR₆₀ da sala C301.

A Figura 2, traz que, para a sala C302, o TR-1 é o que tem, no geral, o maior tempo de reverberação. O TR-3 e o TR-4 quase coincidem, já o TR-2 é ligeiramente menor que estes. Entretanto, o TR-5 é o que apresenta o menor tempo de reverberação. Em outras palavras, ao abaixar os estores ou os *blackouts*, há uma ligeira diminuição dos tempos de reverberação. Isto

porque os materiais constituintes destas estruturas não apresentam coeficientes de absorção sonora consideráveis.

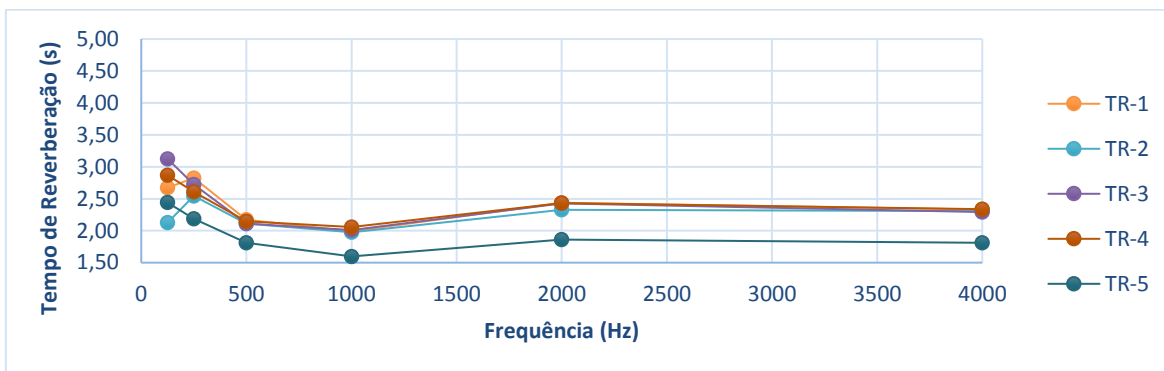


Figura 2 – TR₆₀ da sala C302.

O que mais influência e o que mais se aproxima da realidade de um ambiente de sala de aula é a presença de pessoas. Mesmo tendo uma lotação de 90 pessoas e o ensaio contar com 20, o resultado foi muito expressivo. Dessa forma, a melhor maneira de diminuir o tempo de reverberação, levando-o a um valor mais próximo do adequado, foi trabalhar mais próximo da lotação total da sala.

A partir das Figuras 1 e 2, pode-se extrair que as maiores diferenças entre os TRs estão nas frequências de 250 Hz e 500 Hz, o que, de acordo com a análise dos resultados feita para a sala C302, implica que são nestas frequências que as grelhas em baixo dos degraus, com área maior na C302, atuam melhor no que diz respeito à absorção sonora.

Como última análise, tem-se uma análise geral de todas as salas estudadas, considerando apenas os TRs ensaiados. Sendo que, a partir da Figura 3, pode-se concluir que a sala que possui o pior TR é a J206 e a que possui o melhor TR é a I201.

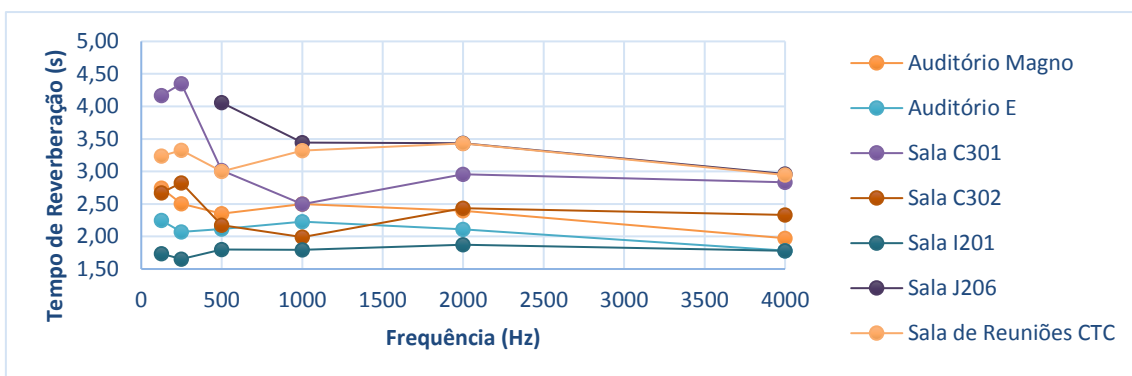


Figura 3 – TR₆₀ de todas as salas analisadas.

Como possíveis sugestões de melhoria, poderiam ser inseridas cadeiras com assento estofado (TR_i), colocado teto com painel perfurado (TR_{ii}) ou essas duas recomendações associadas

(TR_{III}). As salas em que estas soluções foram inseridas foram: C301, J206 e Sala de Reuniões – CTC. Começando com a sala C301, tem-se os seguintes resultados:

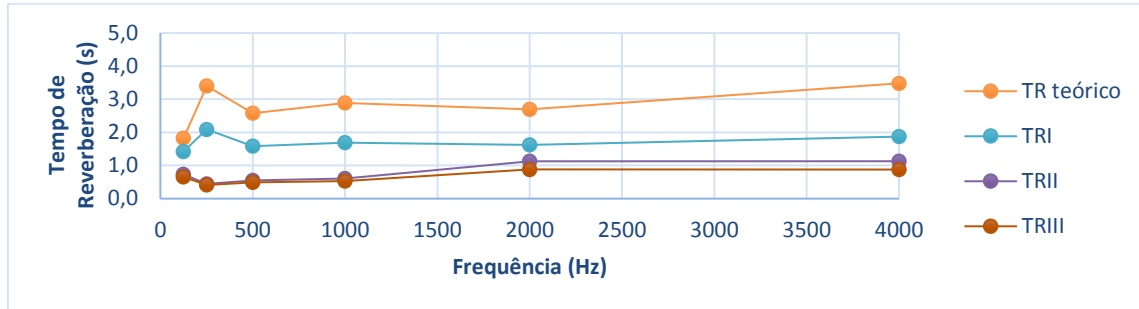


Figura 4 – Sala C301, sugestões de melhoria (TR_I - cadeiras estofadas, TR_{II} - painel perfurado no teto, TR_{III} - recomendações anteriores associadas).

A partir da Figura 4, pode-se concluir que, no âmbito do leque de frequências, a utilização destas propostas altera mais significativamente as frequências iniciais e finais. Além disso, só a aplicação do painel perfurado já fica próximo do TR do conjunto, ou seja, o resultado da mudança do teto tem um impacto maior. Entretanto, é possível afirmar que as soluções apresentadas contribuem consideravelmente para a melhoria do TR da sala.

Na sala J206, a Figura 5 mostra que as propostas de melhoria atuam mais nas frequências baixas e altas, também apresenta que o acréscimo das cadeiras não tem uma importância muito grande para o TR, comparado ao uso do painel perfurado no teto. Ainda assim, a associação das soluções potencializa o resultado.

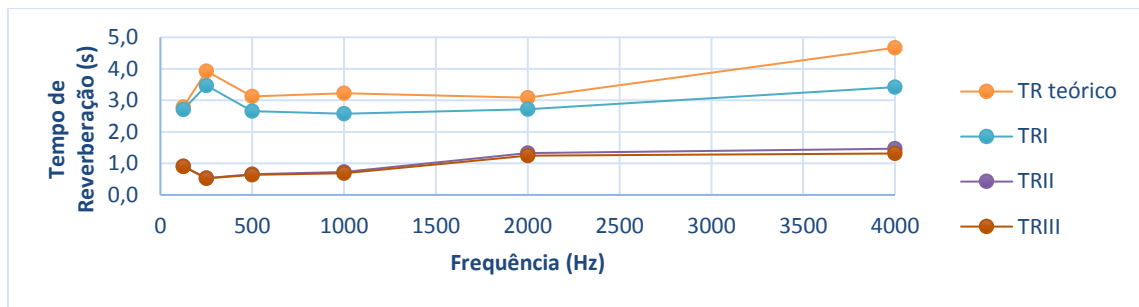


Figura 5 – Sala J206, sugestões de melhoria (TR_I - cadeiras estofadas, TR_{II} - painel perfurado no teto, TR_{III} - recomendações anteriores associadas).

As sugestões de melhoria para a Sala de Reuniões – CTC, com cadeiras com assento estofado (TR_I), conduz ao resultado apresentado seguidamente.

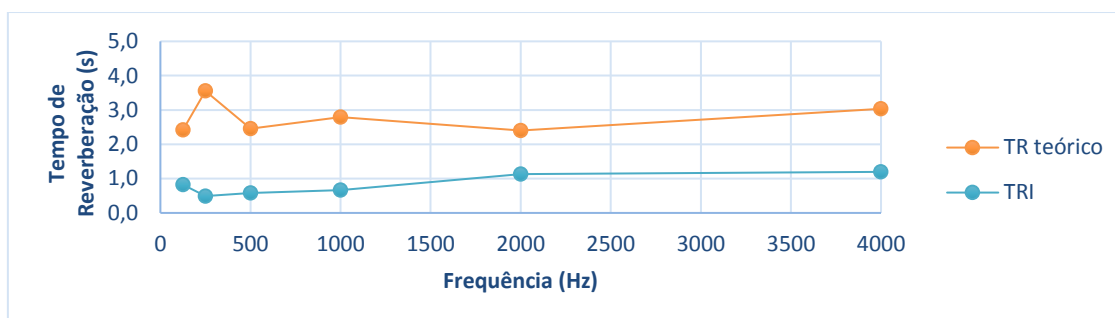


Figura 6 – Sala de Reuniões – CTC, sugestões de melhoria (TR_i - cadeiras estofadas).

A Figura 6 mostra as maiores diferenças nas frequências das extremidades e um resultado satisfatório.

As salas também foram analisadas de acordo com os valores de TR recomendados pela legislação, Tabela 1. Os resultados obtidos se encontram na tabela abaixo, Tabela 5.

Comparando os valores obtidos nos ensaios e aqueles sugeridos pela legislação dos diferentes países abordados neste trabalho, de acordo com a Tabela 5, constatou-se que nenhuma das salas cumpre com a legislação (Tabela 1), com exceção daquelas que não possuem prescrição (demarcadas com “ - “).

Portanto, pode-se afirmar que as salas precisam de uma reestruturação acústica para chegarem ao TR ideal. Para isso, pode-se utilizar das soluções propostas para as salas C301, J206 e Sala de Reuniões – CTC.

Tabela 5 – Comparação entre os TRs ensaiados e TRs na legislação.

País Legislação	Auditório Magno	Auditório E	C301	C302	I201	J206	Sala - CTC
Alemanha DIN 18041	2,44 > 0,87	2,13 > 0,79	3,20 > 0,59	2,36 > 0,59	1,78 > 0,61	3,65 > 0,63	3,27 > 0,60
Brasil NBR 12179	2,35 > 1,23	2,12 > 1,10	3,02 > 0,60	2,17 > 0,60	1,80 > 0,60	4,06 > 0,60	3,00 > 0,60
Espanha DB-HR	-	-	2,82 > 0,50	2,20 > 0,50	1,82 > 0,50	3,65 > 0,50	3,25 > 0,50
EUA ANSI/ASA S12.60	-	-	2,82 > 0,60	2,20 > 0,60	1,82 > 0,60	3,65 > 0,70	3,25 > 0,60
França Decreto de 25/04/2003	2,42 > 1,20	2,15 >1,20	2,82 > 0,80	2,20 > 0,80	1,82 > 0,80	3,65 > 1,20	3,25 > 1,20
Noruega NS 8175	-	-	3,40 > 0,58	2,42 > 0,58	1,77 > 0,52	-	-
Portugal RRAE	2,42 > 1,82	2,15 > 1,52	2,82 > 0,93	2,20 > 0,93	1,82 > 0,96	3,65 > 1,01	3,25 > 0,96
Reino Unido BB 93	2,42 > 1,00	2,15 > 1,00	2,82 > 0,80	2,20 > 0,80	1,82 > 0,80	3,65 > 0,80	3,25 > 0,80
Suécia SS 25268	2,44 > 0,60	2,13 > 0,60	3,20 > 0,60	2,36 > 0,60	1,78 > 0,60	3,65 > 0,60	3,27 > 0,60

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostraram que é de grande valia a caracterização de revestimentos, materiais – juntamente com suas técnicas – e móveis para constar em seus catálogos técnicos e nos memoriais descritivos. Também foi observado o quanto as grelhas de ventilação, em baixo dos degraus, se mostram positivas para a redução do tempo de reverberação TR, tendo dado uma diferença final de 0,89 segundos e, neste caso, atuando principalmente nas frequências de 250 Hz e 500 Hz. Entretanto, tais grelhas são simples, implicando que fosse colocado um material absorvente dentro dos degraus a efetividade e o TR seria melhorado.

Desse modo, foi possível concluir que, das sete salas estudadas, a que apresentou a melhor qualidade acústica – baseada no TR – foi a sala I201 (1,77 s) que possui um tratamento acústico e a de pior desempenho foi a sala J206 (3,47 s). Contudo, nenhuma destas salas se enquadrou dentro dos parâmetros estabelecidos pela legislação portuguesa ou daquelas utilizadas pelos demais países presentes neste estudo. Sendo assim, todas as salas necessitariam de uma revisão no que diz respeito a materiais de revestimento e sistemas acústicos.

5. BIBLIOGRAFIA

ANSI S12.60-2002 – *American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools*, 2002.

BB 93, *Acoustic Design of Schools: Building Bulletin 93*, 2003.

BISTAFÁ, Sylvio R. – *Acústica Aplicada ao Controle do Ruído*. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. ISBN 85-212-0376-4.

DIN 18041:2004-05 – *Hörsamkeit von kleinen und mittleren Räumen*, Beuth Verlag GmbH, 2004.

DOCUMENTO BÁSICO HR. 2009, *Acústica – Protección frente al ruido*. Ministérios de Vivienda, Espanha, Update of Septiembre.

HUPALO, C. - *Reverberação nas Salas do ISEP*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Ramo de Construções Instituto Superior de Engenharia Do Porto, Portugal, 109 páginas, julho, 2017.

LOSSO, Marco A. F. *Qualidade acústica de edificações escolares em Santa Catarina: avaliação e elaboração de diretrizes para projeto e implantação*. Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - PGCC, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

MICHALSKI, Ranny L. X. N. – *Absorção sonora* [Em linha]. [Consult. 13 Mar. 2017]. Disponível na <http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0135/05%20-%20Absor%C3%A7%C3%A3o.pdf>

NBR 12179: *Tratamento Acústico em Recintos Fechados – Procedimento*. Rio de Janeiro, 1992. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

NP EN ISO 3382 – *Acústica: Medição de parâmetros de acústica de salas – Parte 2: Tempo de reverberação em salas correntes*, INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE, 2011, 26 p.

NS 8175:2012, *Lydforhold i bygninger – Lydklasser for ulike bygningstyper*, 2012.



**48º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON UNDERWATER ACOUSTICS
APPLICATIONS
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE BUILDING
ACOUSTICS**

PATRÍCIO, Jorge V. – Isolamento Sonoro a Sons Aéreos e de Percussão: metodologias de caracterização. Lisboa: ICT, 2002.

PATRÍCIO, Jorge V. – Acústica nos Edifícios. 5ª ed. Lisboa: Verlarg Dashöfer, 2008. ISBN 978-972-8906-55-9.

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios – Decreto-lei no 96/2008, de 9 de Junho, 2008.

SS 25268 – *Byggakustik: Ljudklassning av utrymmen i byggnader – Vårdlokaler, undervisningslokaler, dag- och fritidshem, kontor och hotel, 20*