FIA 2018
XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

MELHORIA DO DESEMPENHO ACÚSTICO DE UMA SALA DE AULA COM MATERIAIS DE DESPERDÍCIO

PACS: 43.55

Carvalho, António P.O.; Pessoa, Ana S.M.
Laboratório de Acústica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
R. Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto
Portugal
Tel: +351 225081931
Fax: +351 225081940
E-Mail: carvalho@fe.up.pt; sofiapessoa95@gmail.com

Palavras-chave: acústica, materiais, reutilização, desperdícios, inteligibilidade, reverberação, escolas.

ABSTRACT

The acoustic improvement, using inorganic waste materials, of an elementary school classroom (previously closed due to the lack of comfort conditions) is analyzed with *in situ* measurements (*RASTI*, reverberation time-*RT* and *LAeq* background noise) performed *before* and *after* the intervention with waste materials (plastic coffee cups perforated on the base, egg trays, and mattress foam). The sound absorption coefficients of these waste materials were also determined in a reverberant chamber. The results revealed that the implemented proposals allow the *RT* to reduce and a speech intelligibility improvement.

RESUMO

Analisa-se a melhoria acústica duma sala de aula (ensino básico) com medições *in situ* na Escola de Santiago de Candoso (Guimarães), encerrada devido à falta de condições de conforto, recorrendo a materiais de desperdício não orgânico. Realizaram-se medições de: *RASTI*, tempo de reverberação (*TR*) e *LAeq* (ruído de fundo), antes e após a intervenção com materiais de desperdício (copos plásticos de café furados na base, tabuleiros para ovos e espumas de colchões). Determinaram-se também os coeficientes de absorção sonora em câmara reverberante da FEUP. Os resultados revelaram que as propostas implementadas permitem reduzir o *TR* e melhorar a inteligibilidade.

1. MATERIAIS DE DESPERDÍCIO EM ESTUDO

A acústica no contexto escolar desempenha um papel fundamental. Aliando a melhoria do desempenho acústico à reutilização de materiais este estudo propõe a utilização de materiais de desperdício não orgânico que revelem potencial neste domínio [1]. Para tal seleccionaram-se três materiais de desperdício: copos plásticos para café, tabuleiros para ovos e espuma proveniente de colchões de retomas.

Os Copos plásticos de Café (*CC*) utilizados têm 50 mm de altura, 57 mm de diâmetro superior e 37 mm de diâmetro inferior. São em poliestireno e foram colados em disposição quincôncio (fig. 1). Foram ainda furados na base (*CCf*) (diâmetro 10 mm) com o objectivo de perceber se existem vantagens ao nível da absorção sonora (fig. 2).

Os Tabuleiros para Ovos (*TO*) são em celulose moldada, com 5 cm de altura e forma quadrangular com 29 cm de lado (fig. 3). Foram ensaiados com a face inversa exposta ao som uma vez que desta forma apresentam melhores condições de absorção sonora [2].

A Espuma de colchões de retomas (*E*) é composta por 2 cm de espuma viscoelástica perfilada com 50 kg/m^3 e 4 cm de espuma de alta resiliência com 35 kg/m^3 (fig. 4).

Figura 1 - Copos plásticos de café (*CC*) em disposição quincôncio

Figura 2 - Copos plásticos de café (CC_F) em disposição quincôncio, furados na base com 10 mm de diâmetro

Figura 3 - Tabuleiros para ovos (*TO*) em celulose moldada com a face inversa exposta ao som

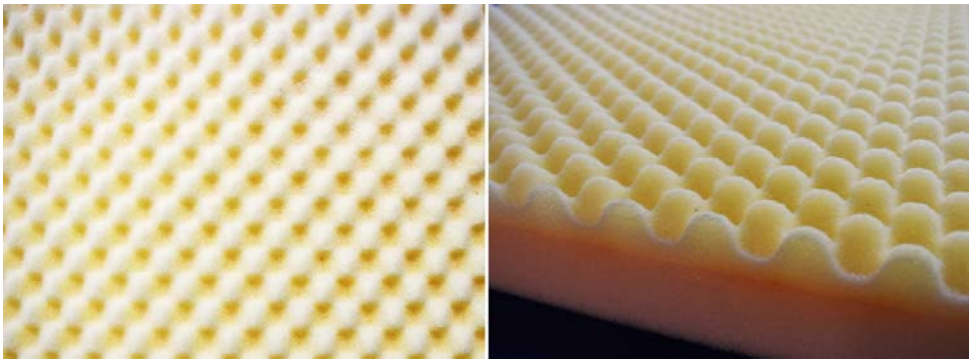

Figura 4 - Colchões de retomas (E) compostos por 2 cm de espuma viscoelástica perfilada e 4 cm de espuma de alta resiliência

2. ENSAIOS EM CÂMARA REVERBERANTE

Para caracterizar acusticamente os supra referidos materiais de desperdício, realizaram-se ensaios na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da FEUP para determinar os coeficientes de absorção sonora (cf. NP EN ISO 354 [3]) com amostras de 10 m^2 colocadas em posição central da câmara, sobre o piso. Utilizaram-se duas fontes sonoras, quatro microfones e para cada posição das fontes sonoras ensaiaram-se duas posições dos microfones.

Na figura 5 observa-se que a amostra das *E* é a que apresenta o melhor desempenho acústico das amostras ensaiadas, seguida dos *TO*, dos *CCf* e, por fim, dos *CC*. Furar a base dos *CC* (diâmetro 10 mm) permitiu uma melhoria dos α_s na gama dos 315 aos 1000 Hz, que permite concluir que existem vantagens a nível de absorção sonora.

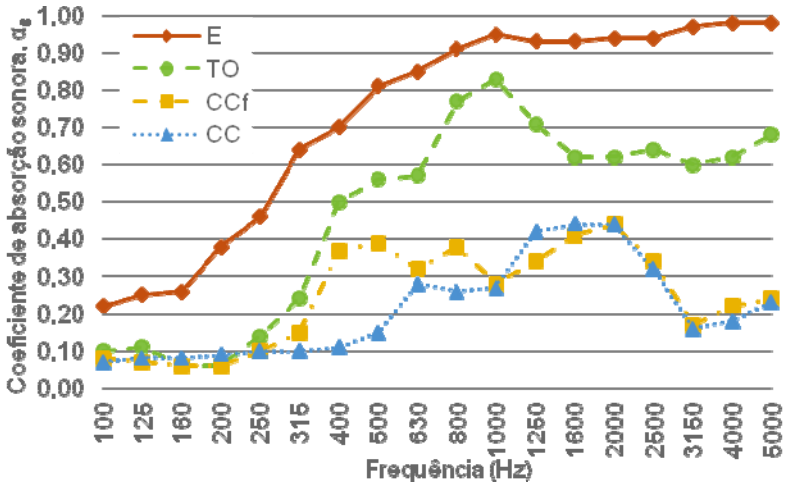

Figura 5 - Coeficientes de absorção sonora (α_s) das amostras dos materiais de desperdício (*CC* - Copos de Café, *CCf* - Copos de Café furados na base (diâmetro 10 mm), *TO* - Tabuleiros para Ovos, *E* - Espumas de colchões de retomas), em função da frequência

3. ENSAIOS REALIZADOS NA SALA DE AULA

3.1. Sala de Aula em Estudo

As medições acústicas realizaram-se numa sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães) que tem três janelas na parede Este. A caracterização acústica realizou-se por medições do *RASTI*, tempo de reverberação (*TR*) e *LAeq* (ruído de

fundo), *antes* e *após* a implementação das soluções de reabilitação acústica com recurso aos materiais de desperdício referidos. Antes de ensaiar a sala de aula com os materiais de desperdício realizaram-se medições em duas situações de referência: *SV1* (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) e *SV2* (sala de aula vazia, com um painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, ambos aplicados na face interior da parede de fachada (em 8 e 11 m^2, respectivamente).

3.2. Localização dos Materiais de Desperdício na Sala de Aula

Definiu-se que os materiais seriam ensaiados em diferentes posições para verificar se tal influencia os valores do *TR*. Num compromisso entre a estabilidade das placas de cartão (de 2,8x1,2 m) onde foram colados os materiais, a rapidez de aplicação e as melhores posições para a obtenção de resultados fiáveis, definiram-se três localizações: Posição ***a)*** (placas de cartão pregadas na vertical na parte superior das paredes do fundo), Posição ***b)*** (placas de cartão encostadas na longitudinal à base das paredes) e Posição ***c)*** (placas de cartão colocadas sobre o revestimento de piso) (figs. 6 a 8).

Figura 6 -Esquema e fotografia da sala com a amostra de material de desperdício (A) na posição ***a)*** (na parte superior das paredes do fundo), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (*RT*)

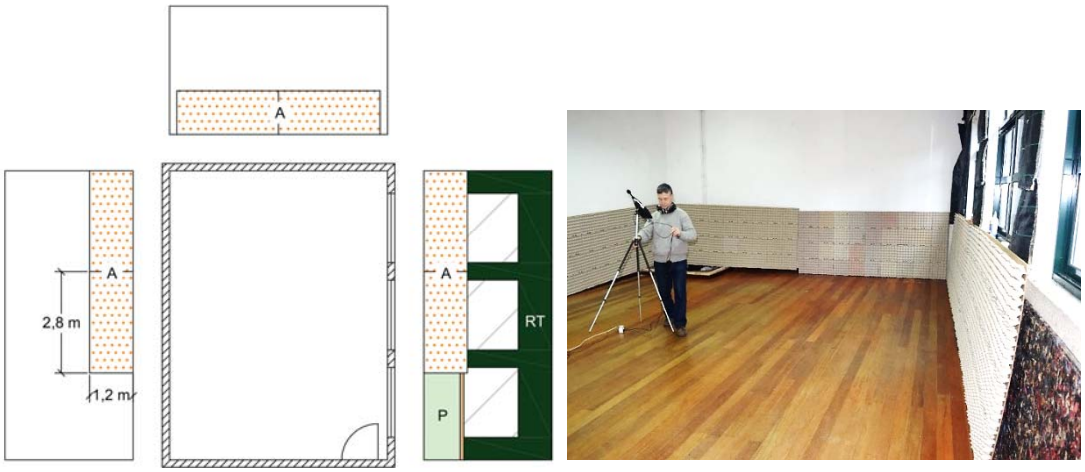

Figura 7 -Esquema e fotografia da sala com a amostra de material de desperdício (A) na posição ***b)*** (encostadas na longitudinal à base das paredes), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (RT)

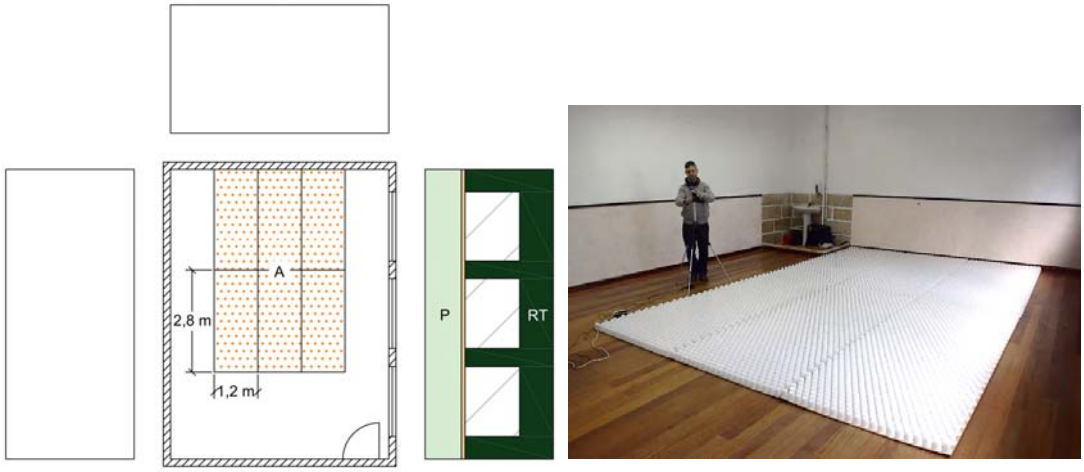

Figura 8 - Esquema e fotografia da sala de aula com a amostra de material de desperdício (A) na posição ***c)*** (sobre o revestimento de piso), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (RT)

Ensaiaram-se os *CCf*, os *TO* e as *E* nas posições a), b) e c) e para o caso que apresentava a melhor absorção sonora foi ainda medido o *TR* com 22 pessoas sentadas. Na configuração do material que apresentava o menor *TR* mediu-se também o *RASTI*.

3.3. Tempo de Reverberação

Para avaliar o TR na sala (cf. NP EN ISO 3382-1 [4]), avaliaram-se três posições e em cada efectuaram-se duas leituras. A sala de aula encontrava-se vazia e estava presente apenas o operador do sonómetro.

Verifica-se que os valores de *TR* na situação referência *SV1* são superiores aos obtidos na situação de referência *SV2* em todas as gamas de frequência. A análise do quadro 1 comprova a melhoria substancial do *TR* na situação de referência *SV2* (1,5 s) quando comparada com a *SV1* (2,5 s). No entanto, mesmo aplicando os 25% de *Incerteza* permitidos pelo *RRAE* [5], o valor do $TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ na situação de referência *SV2* encontra-se bastante acima do limite máximo regulamentar português de 0,83 s.

Após as medições acústicas na sala com os materiais de desperdício colocados nas diferentes posições, verifica-se que a evolução dos valores do *TR* com a frequência para cada uma das posições ensaiadas é muito semelhante nos três materiais. O *TR* na posição ***a)*** apresenta os melhores resultados. No entanto, não se pode concluir com certeza, dada a imprecisão dos diversos elementos do estudo e algoritmos de cálculo, que o posicionamento das amostras influencia o *TR*, uma vez que os valores medidos nas diferentes posições variam menos de 0,1 s. Salienta-se que a colocação dos materiais de correcção acústica próximos do tecto permite uma maior preservação dos mesmos.

Os *CCf* correspondem ao material ensaiado na sala que apresentou a menor diminuição do *TR* e as *E* a maior diminuição do *TR* (quadro 2). A diminuição do *TR* é um aspecto positivo pois influencia favoravelmente a inteligibilidade da palavra. Nesse sentido a melhor solução encontrada corresponde à amostra das *E* (espumas) na posição ***a)*** (na parte superior das paredes do fundo).

Quadro 1 - Valores do $TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ para as situações de referência *SV1* (sala de aula vazia, sem intervenção) e *SV2* (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) e limite regulamentar em Portugal

Sala de aula	Volume (m^3)	$TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ medido (s)	Limite regulamentar $TR \leq 0{,}15\ V^{1/3}$ (s)	TR-I (s)	Valor limite RRAE [5]
SV1	168	2,51	0,83	2,30	KO
SV2		1,53		1,32	KO

I = *Incerteza*, corresponde a 25% do limite regulamentar (cf. RRAE [5]).

Quadro 2 - Valores do $TR_{médio\ (500\ -\ 2k\ Hz)}$ para todos os ensaios realizados na sala de aula

Amostra	Posição da amostra	$TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ Obtido (s)	Limite regulamentar $TR \leq 0{,}15\ V^{1/3}$ (s)	TR-I (s)	Valor limite RRAE [5] (*)
CCf	a)	1,21	0,83	1,00	KO
	b)	1,22		1,01	KO
	c)	1,22		1,01	KO
TO	a)	1,04		0,83	OK
	b)	1,11		0,90	KO
	c)	1,07		0,86	KO
E	a)	0,94		0,73	OK
	b)	1,05		0,84	KO
	c)	1,02		0,81	OK
	a) c/ 22 pessoas sentadas	0,70		-	OK

CCf - Copos de Café furados na base (diâmetro 10 mm); TO - Tabuleiros para Ovos; E - Espumas; posição a) - na parte superior das paredes do fundo; posição b) - encostadas na longitudinal à base das paredes; posição c) - sobre o revestimento de piso; I - Incerteza, que corresponde a 25% do limite regulamentar (cf. RRAE [5]);
(*) caso se utilizasse apenas 20,16 m^2 de material de desperdício na reabilitação.

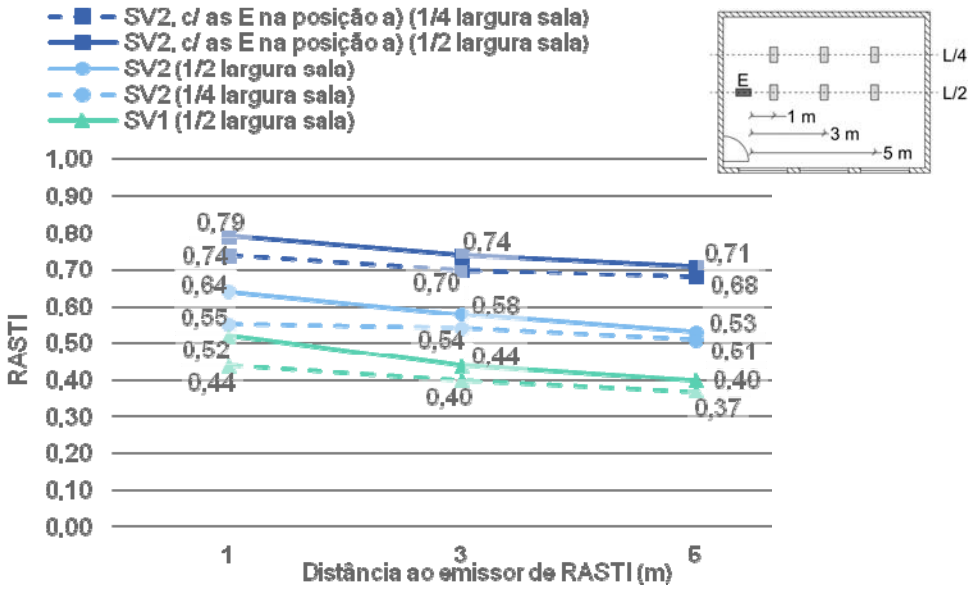

Figura 9 - *RASTI* (*RApid Speech Transmission Index*) dos ensaios realizados na sala de aula, em função da distância ao emissor (E) de *RASTI* (Situação de referência *SV1* - sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção; Situação de referência *SV2* - sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada e posição a) - placas de cartão pregadas na vertical na parte superior das paredes do fundo)

3.4. RASTI

A inteligibilidade da palavra pode ser objectivamente avaliada através do parâmetro *RASTI*. A metodologia seguiu a norma IEC 60268-16 [6] e mediram-se seis posições diferentes ao longo da sala de aula (figura 9).

Em conformidade com a diminuição verificada nos valores obtidos para o *TR*, verifica-se um aumento do *RASTI* da situação de referência *SV1* para a *SV2* e da *SV2* para a *SV2* com as *E* na posição ***a)***. O aumento do *RASTI* na sala de aula da situação de referência SV2 para a SV2 com as E na posição ***a)*** corresponde, na escala subjectiva de inteligibilidade da palavra, a uma melhoria de classificação de *Suficiente* para *Boa*.

3.5. Ruído de Fundo

A medição do ruído de fundo na sala de aula efectuou-se em período diurno, apenas com a presença do operador do sonómetro durante as medições. A sala não possui qualquer tipo de equipamento de aquecimento, ventilação e ar condicionado. Realizaram-se medições em duas posições, uma no interior da sala de aula e outra no exterior. É possível observar uma redução de cerca de 20 dB pela parede de fachada dos níveis de pressão sonora nas baixas frequências. A parede de fachada, em particular as três janelas de correr existentes, não é adequada para uma sala de aula, uma vez que o ruído no exterior é significativo.

3.6. Área Mínima a Reabilitar em *SV2* e *SV1* com Materiais de Desperdício

Calculou-se a área mínima a reabilitar nas situações de referência *SV2* e *SV1* para diminuir o *TR* da sala de aula para o limite do *RRAE* ($TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ = 0,83 s) e para o valor óptimo aqui recomendado ($TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ = 0,6 s). Os valores apresentados no quadro 3 foram calculados para os materiais de desperdício ensaiados na posição ***a)***, uma vez que o posicionamento dos materiais de correcção acústica próximos do tecto tem a vantagem de ser menos acessível e também porque esta posição foi a que apresentou os menores valores do TR em todos os materiais.

Quadro 3 - Área mínima a reabilitar nas situações de referência *SV2* (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) e *SV1* (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção), para diminuir o *TR* da sala de aula para o limite do RRAE ($TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ = 0,83 s) e para o valor óptimo recomendado por este estudo ($TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ = 0,6 s)

Material	Área mínima a reabilitar em SV2 (m^2)				Área mínima a reabilitar em SV1(m^2)			
	$TR_{médio}$ RRAE	% (*)	$TR_{médio}$ Óptimo	% (*)	$TR_{médio}$ RRAE	% (*)	$TR_{médio}$ Óptimo	% (*)
CCf posição *a)*	61	45	113	83	90	67	142	Imp. (**)
TO posição *a)*	34	25	62	46	50	37	78	58
E posição *a)*	26	19	48	36	39	28	61	45

CCf - Copos de Café furados na base (diâmetro 10 mm); TO - Tabuleiros para Ovos; E - Espumas; posição a) - na parte superior das paredes do fundo;
(*) Área mínima necessária a reabilitar, da área total de paredes e tecto da sala, sem contabilizar área de vãos, envidraçados e opacos;
(**) Área necessária a reabilitar para diminuir o TR na sit. de refª SV1 para o valor aqui recomendado ($TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ = 0,6 s) é superior à área total de paredes/tecto, sem contabilizar área dos vãos, envidraçados e opacos. Impossível reabilitar a SV1 com CCf na posição a) para $TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ de 0,6 s.

Pela observação dos valores apresentados no quadro 3, verifica-se que a área mínima a reabilitar, tanto na situação de referência *SV1* como na *SV2*, é superior para diminuir o *TR* para

o valor óptimo ($TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ = 0,6 s) em comparação com o limite regulamentar presente no *RRAE* ($TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ = 0,83 s), que é menos exigente. A amostra das *E*, seguida dos *TO* e dos *CCf* apresenta as menores percentagens de área de paredes e tecto (sem contabilizar os vãos envidraçados e opacos) necessária para reduzir os *TR* para os valores indicados. Por fim, a área necessária a reabilitar com *CCf* para diminuir o *TR* na situação de referência *SV1* para o valor óptimo é superior à área total de paredes e tecto da sala de aula, sem contabilizar a área dos vãos, envidraçados e opacos. Como tal, conclui-se que é impossível reabilitar a situação de referência *SV1* com *CCf* na posição a), para um $TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ de 0,6 s.

4. CONCLUSÕES

Entre os materiais de desperdício ensaiados, as Espumas (*E*) foram as que apresentaram melhores resultados e os Copos de Café (*CC*) os piores, o que era expectável devido à significativa porosidade da espuma em contraste com o plástico.

Verificou-se uma melhoria nos coeficientes de absorção sonora dos copos plásticos de café para os copos plásticos de café mas furados na base.

Da situação de referência *SV2* para a melhor solução ensaiada que corresponde à amostra das espumas (*E*) na posição ***a)***, verificou-se uma diminuição do *TR* de cerca de 0,6 s que resultou num aumento da inteligibilidade da palavra de *suficiente* para *boa.*

Para reabilitar a sala de aula estudada na situação de referência *SV1* para o valor óptimo aqui recomendado ($TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ = 0,6 s) verificou-se a necessidade de utilizar cerca de 78 e 61 m^2 de *TO* e *E*, respectivamente, o que corresponde a uma percentagem da área de paredes e tecto da sala (sem contabilizar vãos envidraçados e opacos) de 58% e 45%, respectivamente. Relativamente aos *CCf*, a área necessária a reabilitar para diminuir o *TR* na situação de referência *SV1* para o valor óptimo aqui aconselhado, é superior à área total de paredes e tecto da sala de aula (sem contabilizar vãos envidraçados e opacos). É pois impossível reabilitar a situação de referência *SV1* com *CCf* na posição ***a)*** para um $TR_{médio\ (500\text{-}2k\ Hz)}$ de 0,6 s.

O *TR* na posição ***a)*** apresenta os melhores resultados. No entanto, a sala ensaiada com os materiais de desperdício corresponde à situação de referência *SV2*, que já continha materiais absorventes, o que não permitiu o alcance desejado nesta análise, uma vez que esta sala não se encontrava tão reverberante como a sala vazia sem qualquer intervenção. Assim, não se pode concluir com total certeza, dada a imprecisão dos diversos elementos do estudo e algoritmos de cálculo, que o posicionamento das amostras influencia o *TR*, uma vez que os valores medidos nas três posições variam menos de 0,1 s. Salienta-se porém que a colocação dos materiais próximos do tecto permitiria uma maior preservação dos mesmos.

Desta forma, comprovou-se a possibilidade de realizar a correcção acústica económica de uma sala de aula do 1.º ciclo do ensino básico apenas com recurso a materiais de desperdício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ana S. M. Pessoa, *Melhoria do Desempenho Acústico de uma Sala de Aula com Materiais de Desperdício*, Dissertação de Mestrado, Eng.ª Civil, FEUP, 2018.
[2] Sónia C. P. Vieira, *Caracterização Acústica de Suportes Alveolares de Armazenamento e Transporte de Géneros Alimentares*, Dissertação de Mestrado Eng.ª Civil, FEUP, 2014.
[3] *NP EN ISO 354 Acústica. Medição da Absorção Sonora em Câmara Reverberante, Comité Europeu de Normalização,* 2007.
[4] *NP EN ISO 3382-1 Acústica. Medição dos Parâmetros Acústicos de uma Sala. Parte 1: Performance de Espaços, Comité Europeu de Normalização,* 2009.
[5] *DL 96/08 (9/6/2008), Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Diário da República.*
[6] *IEC 60268-16 Equipamento do Sistema de Som. Parte 16: Classificação Objectiva da Inteligibilidade da Palavra pelo STI,* 2011.