

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 numa 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.

FIA 2018

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

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 (CC_f) (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/m³ e 4 cm de espuma de alta resiliência com 35 kg/m³ (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

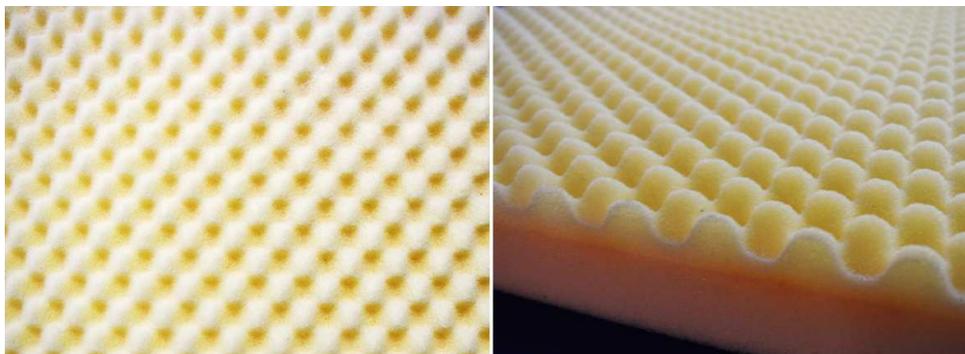


Figura 4 - Colchões de retomas (E) compostos por 2 cm de espuma viscoelástica perfilada e 4 cm de espuma de alta resiliência

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 m² 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.

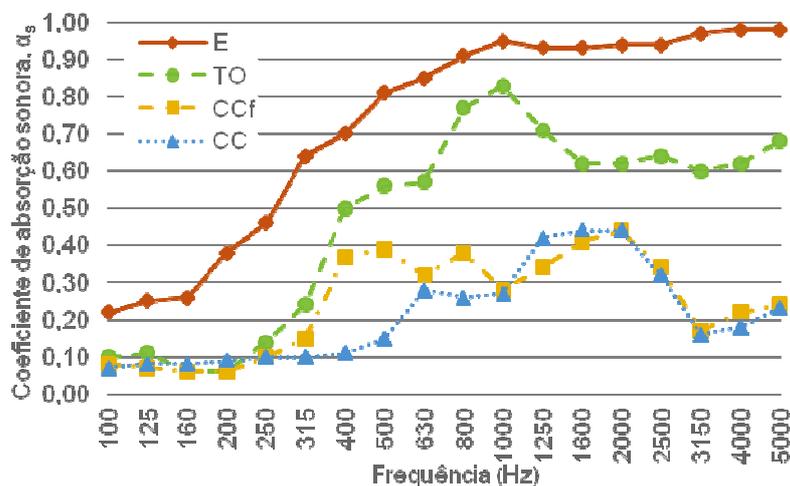


Figura 5 - Coeficientes de absorção sonora (α_s) das amostras dos materiais de desperdício (CC - Copos de Café, CCf - Copos de Café furados na base (diâmetro 10 mm), TO - Tabuleiros para Ovos, E - Espumas de colchões de retomas), em função da frequência

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 m², 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).

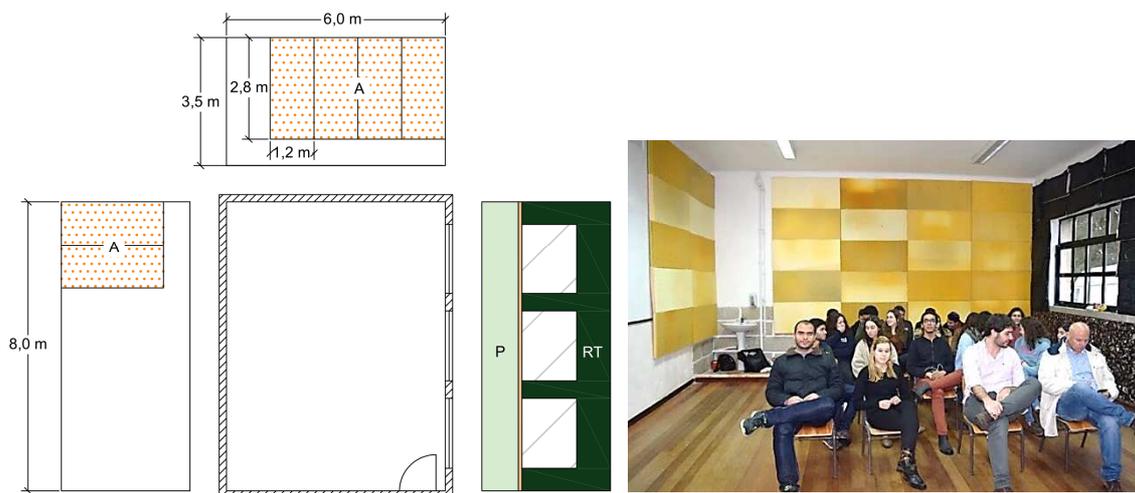


Figura 6 -Esquema e fotografia da sala com a amostra de material de desperdício (A) na posição **a**) (na parte superior das paredes do fundo), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (RT)

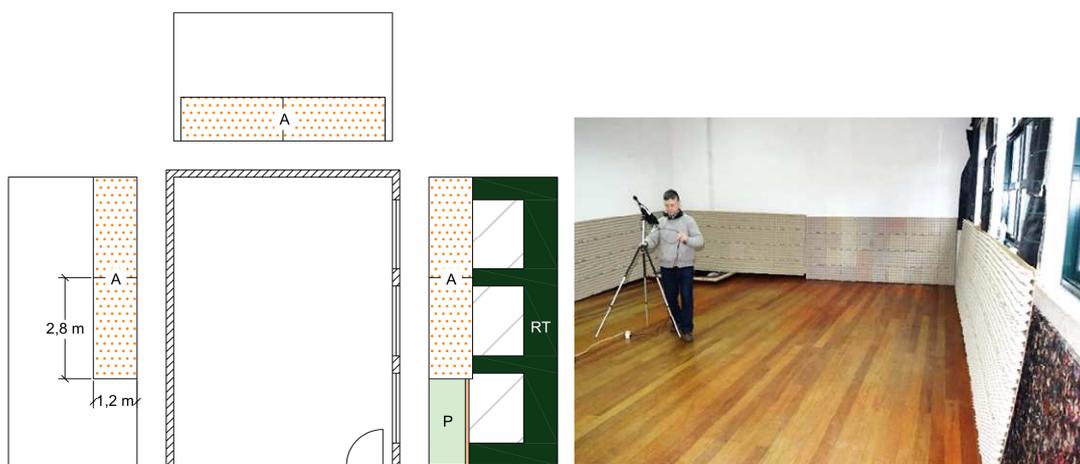


Figura 7 -Esquema e fotografia da sala com a amostra de material de desperdício (A) na posição **b**) (encostadas na longitudinal à base das paredes), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (RT)

FIA 2018

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

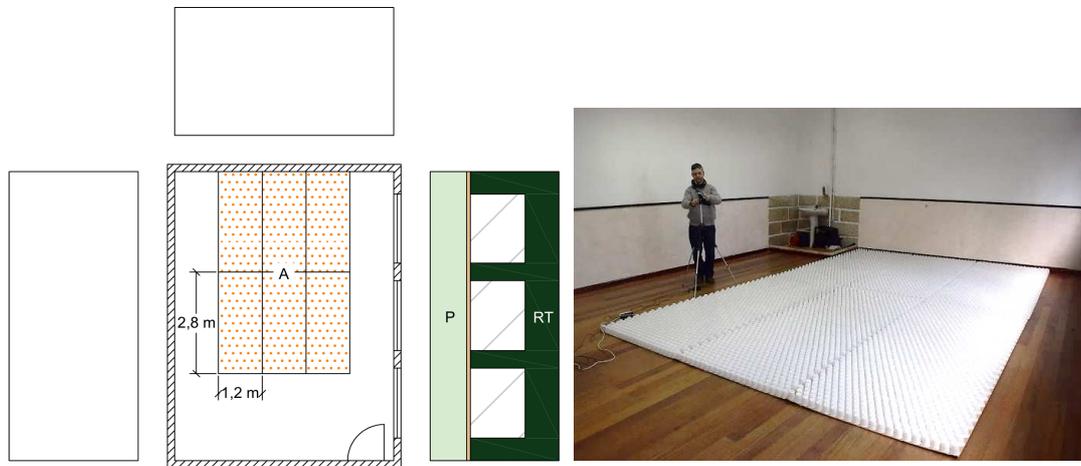


Figura 8 - Esquema e fotografia da sala de aula com a amostra de material de desperdício (A) na posição c) (sobre o revestimento de piso), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (RT)

Ensaíram-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 $TR_{médio}$ (500-2k 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).

FIA 2018

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

Quadro 1 - Valores do $TR_{\text{médio}}$ (500-2k 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)	$TR_{\text{médio}}$ (500-2k Hz) medido (s)	Limite regulamentar $TR \leq 0,15 V^{1/3}$ (s)	TR-l (s)	Valor limite RRAE [5]
SV1	168	2,51	0,83	2,30	KO
SV2		1,53			

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

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

Amostra	Posição da amostra	$TR_{\text{médio}}$ (500-2k Hz) Obtido (s)	Limite regulamentar $TR \leq 0,15 V^{1/3}$ (s)	TR-l (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; l - Incerteza, que corresponde a 25% do limite regulamentar (cf. RRAE [5]);

(*) caso se utilizasse apenas 20,16 m² de material de desperdício na reabilitação.

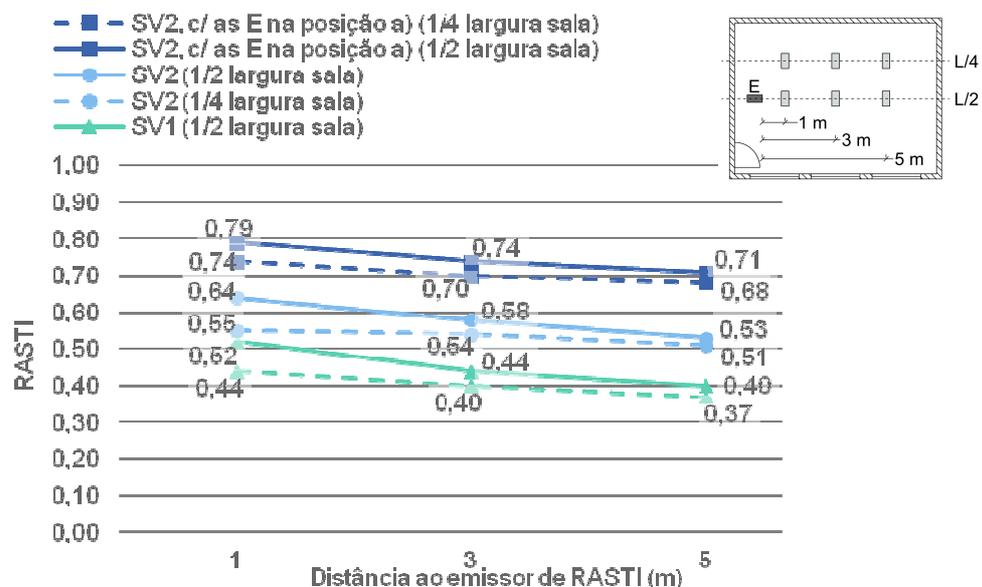


Figura 9 - RASTI (RAPID Speech Transmission Index) dos ensaios realizados na sala de aula, em função da distância ao emissor (E) de RASTI (Situação de referência SV1 - sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção; Situação de referência SV2 - sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um 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* ($TR_{\text{médio}}(500-2k \text{ Hz}) = 0,83 \text{ s}$) e para o valor óptimo aqui recomendado ($TR_{\text{médio}}(500-2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$). 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* ($TR_{\text{médio}}(500-2k \text{ Hz}) = 0,83 \text{ s}$) e para o valor óptimo recomendado por este estudo ($TR_{\text{médio}}(500-2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$)

Material	Área mínima a reabilitar em <i>SV2</i> (m ²)				Área mínima a reabilitar em <i>SV1</i> (m ²)			
	$TR_{\text{médio}}$ RRAE	% (*)	$TR_{\text{médio}}$ Óptimo	% (*)	$TR_{\text{médio}}$ RRAE	% (*)	$TR_{\text{médio}}$ 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 ref^a *SV1* para o valor aqui recomendado ($TR_{\text{médio}}(500-2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$) 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 $TR_{\text{médio}}(500-2k \text{ Hz})$ 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 ($TR_{\text{medio}}(500-2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$) em comparação com o limite regulamentar presente no RRAE ($TR_{\text{medio}}(500-2k \text{ Hz}) = 0,83 \text{ s}$), 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 $TR_{\text{medio}}(500-2k \text{ Hz})$ 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 ($TR_{\text{medio}}(500-2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$) verificou-se a necessidade de utilizar cerca de 78 e 61 m² 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 $TR_{\text{medio}}(500-2k \text{ Hz})$ 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.