



## Avaliação do comportamento de paredes com materiais de absorção sonora eco-eficientes (tradicional e inovadores)

M. Pedroso<sup>a†</sup>, J. Brito<sup>a</sup>, J.D. Silvestre<sup>a</sup>

<sup>a</sup> CERIS, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa (UL), Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal

† Autor para correspondência: marco.pedroso@tecnico.ulisboa.pt

### RESUMO

Este artigo apresenta soluções construtivas de paredes actualmente utilizadas na construção de edifícios e que incluem os materiais de absorção sonora mais utilizados a nível Europeu.

Apresenta-se, assim, um total de 78 soluções construtivas de paredes, simples e duplas, estudadas ao nível do seu desempenho acústico, energético, bem como económico, permitindo analisar a viabilidade da inclusão de materiais naturais enquanto substitutos dos materiais considerados tradicionais.

O desempenho acústico foi estudado através de modelos de cálculo previsional, tendo em consideração as características de cada material constituinte da solução. Ao nível da energia incorporada e dos custos, os resultados apresentados correspondem ao somatório dos valores de cada constituinte.

A inclusão de materiais naturais em soluções construtivas, permitiu concluir que existem materiais alternativos que, do ponto de vista do comportamento acústico, da energia incorporada e ainda do custo, são perfeitamente viáveis para substituir os produtos de utilização corrente. Este resultado foi validado para um conjunto significativo e representativo de soluções construtivas de paredes.

### Cronologia do artigo:

Recebido a 31 julho 2017

Corrigido a 16 maio 2019

Acite a 20 maio 2019

Publicado a 27 maio 2019

### Palavras-chave:

Eco-eficiência  
Energia incorporada  
Isolamento acústico  
Materiais naturais  
Paredes

### Lista de símbolos e acrónimos:

$\beta$	Ângulo de incidência (°)	ETICS	External Thermal Insulation Composite System - Sistema compósito de isolamento térmico pelo exterior
$f$	Frequência da onda sonora (Hz)	ICB	Aglomerado de cortiça expandida
$m$	Massa superficial ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	PUR	Espuma rígida de poliuretano
C	Termo de adaptação a ruído rosa	R	Índice de redução sonora
$C_{tr}$	Termo de adaptação a ruído de tráfego	$R_w$	Valor único do índice de redução sonora
EE/EI	Embodied energy/energia incorporada	XPS	Poliestireno expandido extrudido
EPS	Poliestireno expandido moldado		

## 1. Introdução

Com a crescente diversificação de materiais tradicionais e alternativos de isolamento térmico e de absorção sonora, surgem trabalhos de investigação que comparam e sistematizam as suas características. Nesse sentido, os autores deste artigo já procuraram estabelecer uma nova abordagem ao estudo destes materiais, comparando o seu desempenho através de três vectores distintos: económico, ambiental e acústico (Pedroso *et al.*, 2017a; Pedroso *et al.*, 2017b). Nesses estudos, concluiu-se que os materiais alternativos, para qualquer um desses vectores, já se apresentam como substitutos perfeitamente viáveis aos correntemente utilizados (tradicional). Assim, dando continuidade a esse estudo, apresenta-se neste trabalho a aplicação dos mesmos materiais em soluções construtivas de paredes, estudando a influência dos mesmos no desempenho e características acústicas de tais soluções.

Por sua vez, o estudo associado à energia incorporada e ao custo dessas soluções de paredes resulta da conjugação das características de cada material que as constitui (Pedroso *et al.*, 2017a). O resultado obtido leva assim em linha de conta a contribuição individual das várias camadas para o impacte global da solução construtiva de parede, bem como dos equipamentos e da mão-de-obra necessária à sua execução.

Os materiais de absorção sonora alternativos foram devidamente caracterizados (Pedroso *et al.*, 2017a), concretizando-se neste artigo, através da utilização de modelos de comportamento acústico previsionais, o estudo das implicações que a sua utilização conjugada teria nas paredes, enquanto sistema construtivo, e como se compararam com materiais de utilização tradicional, tendo sempre em consideração os três vectores apresentados (acústico, ambiental e económico).

A aplicabilidade dos materiais de absorção sonora em soluções construtivas reais, e não apenas como unidades autónomas, foi uma lacuna identificada em trabalhos anteriores. O presente artigo é por isso inovador quanto à caracterização destes materiais na sua aplicação directa em isolamento sonoro de paredes, dado que na bibliografia consultada apenas se apresentam as características dos materiais de forma isolada, não havendo estudos comparativos da sua aplicação em elementos construtivos, como acontece nos trabalhos de Desarnaulds *et al.* (2005) e Asdrubali (2006).

Assim, este artigo acrescenta ao estado da arte actual a análise conjugada de soluções construtivas integrais de paredes através de diversos parâmetros (isolamento acústico, energia incorporada e custo), permitindo assim compreender as implicações das escolhas dos diferentes materiais no desempenho final das soluções adoptadas.

## 2. Metodologia

À semelhança da análise realizada para os materiais de absorção sonora (Pedroso *et al.*, 2017a), foram considerados três aspectos principais para estudar as paredes: desempenho em termos de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, energia incorporada e custo.

O isolamento sonoro (através do índice:  $R_w$ ) é calculado através de vários modelos previsionais, sendo os mais utilizados os que consideram variações directas à lei da massa, segundo a equação (1). Neste estudo, optou-se, no entanto, por uma conjugação de métodos: nas paredes de pano simples, recorreu-se ao método apresentado no Anexo B da Norma EN 12354-1:2017 (CEN, 2017). A aplicação deste método apresentou sempre valores conservativos face à aplicação directa da lei da massa, ou suas variações, o que se revela como um elemento de segurança acrescida para o projectista; nas paredes de pano duplo, utilizou-se o cálculo conjugado da EN 12354-1:2017 (CEN, 2017) com o método proposto por Sousa (2010), sendo este método o resultado do cálculo previsional de cada um dos panos simples pelo método normalizado e da sua conjugação, enquanto sistema construtivo, com a caixa de ar e/ou o elemento absoror sonoro. Este método também é conservativo face aos actualmente utilizados para estes elementos construtivos nos programas informáticos comerciais disponíveis no mercado e largamente utilizados.

$$R \cong 20 \log(m \times f \times \cos\beta) - 43 \text{ [dB]} \quad (1)$$

$\beta = 0^\circ$  (incidência normal),  $m$  – massa superficial [ $\text{kg/m}^2$ ] e  $f$  – frequência [Hz]

Nos resultados obtidos para os sistemas estudados, são facilmente identificáveis diferenças de 1 a 2 dB a menos no isolamento sonoro relativamente aos métodos previsionais aplicados actualmente, o que explica a referência ao seu carácter conservativo. Após a execução de todos os cálculos relativos aos sistemas em estudo e às características analisadas, resume-se os resultados obtidos em tabelas comparativas, de modo a permitir a análise do desempenho em termos de isolamento sonoro, energia incorporada e custo associado.

Por sua vez, a energia incorporada (EI) foi também estudada através do somatório da contribuição de todos os materiais e processos envolvidos no fabrico de uma parede, sendo a sua unidade MJ/10 m<sup>2</sup>, pela razão indicada seguidamente para o custo. A EI pode ser definida como a energia que foi utilizada no ciclo de vida de um produto (Hammond e Jones, 2013), incluindo a extração ou produção de matéria-prima, transporte, fabrico, montagem e instalação. Neste artigo, os valores de dados genéricos de EI, de cada um dos materiais, foram obtidos de diversas referências (Asdrubali, 2006; Asdrubali, 2007; Asdrubali, 2009; Berge *et al.*, 2009; Desarnaulds *et al.* 2005; Hammond e Jones, 2013; Pedroso *et al.*, 2017a), em função do impacte por cada unidade isolada e limitando-se, posteriormente, a realizar o cálculo para a área considerada, 10 m<sup>2</sup>, somando a contribuição de todos os materiais aí utilizados.

A análise económica incluiu o custo dos materiais, da mão-de-obra e dos equipamentos envolvidos na execução da parede, apresentando-se na unidade €/10 m<sup>2</sup>. Aqui, à semelhança da EI, foi realizado um levantamento dos custos de cada um dos materiais em diversas referências (Asdrubali, 2008; Calkins, 2009; Berge *et al.*, 2009; Desarnaulds *et al.* 2005; Pedroso *et al.*, 2017a; Pedroso *et al.*, 2017b) e posteriormente feita a soma das contribuições individuais para cada 10 m<sup>2</sup>.

Já que o modelo de cálculo previsional do desempenho acústico exige a definição de uma área de

parede para prever o respectivo isolamento, considerou-se  $10\text{ m}^2$  como área de referência.

### 3. Âmbito

De modo a comparar o desempenho dos vários materiais de absorção sonora, foi necessária a sua inclusão em diversas soluções construtivas de paredes equivalentes. Essas puderam assim ser alvo de comparação, dado que todas as condições de base eram semelhantes, variando apenas o material absoror. Foi estudado um total de 78 soluções construtivas divididas em 21 paredes simples, 23 paredes duplas, 17 paredes mistas e, finalmente, 17 paredes de tabique.

Neste trabalho, não foi definida uma unidade funcional para não condicionar o projetista. Nesse sentido, apenas foi definida uma unidade declarada, parede com  $10\text{ m}^2$ , e foram comparadas soluções com gamas alargadas de  $R_w$ , permitindo ao projetista, em função dos limites de  $R_w$  que precise de cumprir em cada aplicação, a escolha da solução que minimize a espessura total e/ou o custo e/ou a energia incorporada.

Inicialmente foram escolhidas soluções que, mesmo sem o material absoror associado, apresentassem boas características de isolamento acústico. A essas foi, em seguida, adicionado cada um dos materiais de absorção estudados, de modo a poder ser realizada uma comparação do desempenho em condições semelhantes, e permitindo analisar o seu contributo efectivo.

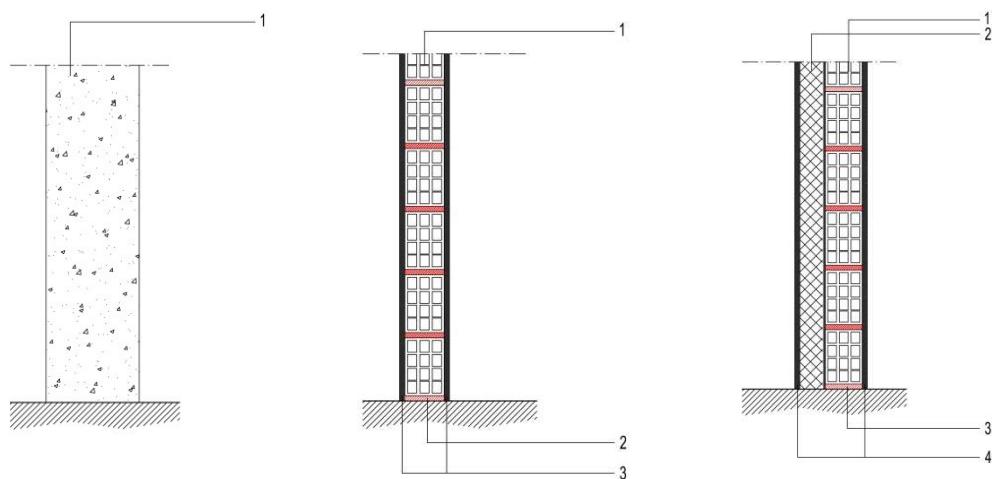
Nos materiais de utilização comum, foram incluídos (Pedroso *et al.*, 2017a; Pedroso *et al.*, 2017b): os materiais de absorção - espuma rígida de poliuretano (PUR), lã de rocha, lã de vidro, poliestirenos expandidos (moldado - EPS, e extrudido - XPS); os constituintes mais comuns de paredes - argamassa, tijolo cerâmico perfurado, blocos de betão com agregados leves, blocos de betão autoclavado, betão, e gesso laminado.

Nos materiais alternativos, foram incluídos (Pedroso *et al.*, 2017a; Pedroso *et al.*, 2017b): o aglomerado de borracha reciclada, o aglomerado de cortiça expandida, as fibras de coco, as fibras de cânhamo, as fibras de celulose, as fibras têxteis recicladas, a lã de ovelha, a lã de madeira, as mantas de linho, e a palha.

#### 3.1. Paredes simples

As soluções construtivas de paredes simples estudadas compreenderam três diferentes tipos: soluções monolíticas (ex.: paredes em betão); paredes com um material apenas, revestida nas duas faces com o mesmo material; paredes com um material apenas, revestidas com uma solução diferente em cada face. Na Figura 1, representa-se, de forma esquemática, as soluções seleccionadas.

A solução monolítica é composta por apenas um elemento construtivo (Figura 1-a). A solução de parede simples, Figura 1-b), é composta por: bloco (1), argamassa de assentamento (2) e revestimento (3). Por sua vez, a solução de parede simples com ETICS (*External Thermal Insulation Composite System* - Sistema compósito de isolamento térmico pelo exterior), Figura 1 c), é composta por bloco (1), isolante em ETICS (2), argamassa de assentamento (3) e revestimento (4). Apesar desta divisão, as soluções de paredes simples foram, todas elas, consideradas na mesma análise.



a) Solução monolítica

b) Parede simples

c) Parede simples com ETICS

**Figura 1** - Soluções construtivas de pano simples.

De todas as soluções consideradas, existem soluções que respondem a todas as exigências funcionais de uma parede para locais exteriores e outras apenas para locais interiores, não interferindo essa localização no desempenho associado à solução construtiva, por si só.

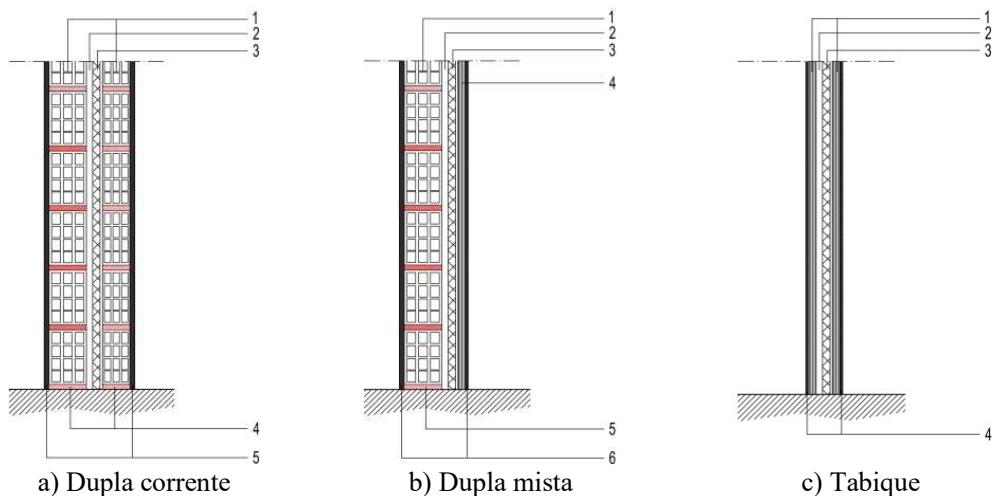
### 3.2. Paredes duplas

As paredes duplas são constituídas por dois panos, separados por uma caixa de ar, com ou sem material absorvente no seu interior. Estas foram divididas em três soluções distintas: duplas de alvenaria (Figura 2-a); duplas mistas (Figura 2-b); duplas de tabique (Figura 2-c).

A solução dupla corrente, Figura 2-a, é composta por blocos (1), caixa de ar (2), elemento absorvente (3), argamassa de assentamento (4) e revestimento (5).

As paredes mistas são constituídas por um pano de alvenaria e um outro pano leve, separados por uma caixa de ar, com ou sem elementos absorventes, Figura 2-b; esta solução é composta por blocos (1), caixa de ar (2), elemento absorvente (3), gesso laminado (4), argamassa de assentamento (5) e revestimento (6).

Os tabiques são constituídos, neste caso, por dois painéis leves separados por uma caixa de ar, com ou sem elementos absorventes no seu interior, Figura 2-c: esta solução é composta por gesso laminado (1), caixa de ar (2), elemento absorvente (3) e revestimento (4).



**Figura 2 - Soluções construtivas de pano duplo.**

## 4. Resultados

Após a apresentação de todas as soluções e materiais considerados, resume-se os valores em termos de isolamento acústico, energia incorporada e de custo, obtidos para as 78 soluções estudadas. Estes resultados são apresentados em quatro tabelas, referentes às soluções construtivas apresentadas: paredes simples (Tabela 1) e paredes duplas (divididas em: paredes duplas correntes (Tabela 2), paredes mistas (Tabela 3) e tabiques (Tabela 4)).

A leitura das Tabelas 1 a 4 permite compreender a composição integral de cada solução, e a espessura de cada camada, incluindo ainda os resultados obtidos por solução.

Refira-se que a solução construtiva englobando o aglomerado de borracha reciclada não inclui os valores de energia incorporada, nem de custo, uma vez que esses dados não se encontravam ainda disponíveis. Considerou-se, no entanto, este material devido à importância futura que se julga que pode vir a alcançar para este tipo de utilização.

## 5. Comparação multicritério entre materiais nas soluções construtivas analisadas

Após a apresentação dos resultados para as várias paredes, revelou-se necessária a sua comparação multicritério, de modo a permitir efectuar escolhas quanto ao seu desempenho, nas vertentes consideradas.

Face aos dados obtidos, apresenta-se como factor de escolha principal o desempenho em termos de isolamento acústico, sendo as restantes dimensões também importantes para a análise mas não consideradas como factores de escolha principais.

**Tabela 1** - Soluções construtivas de paredes simples (Asdrubali, 2006; Asdrubali, 2007; Asdrubali, 2009; Asdrubali *et al.*, 2008; Berge, 2009; Desarnaulds *et al.*, 2005; Samagaio, 2006; Pedroso *et al.*, 2017a).

Materiais (espessuras em cm)	Paredes simples												Paredes interiores/exterioras							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Betão															15					25
Bloco autoclavado															23	29				
Tijolo cerâmico melhorado																32				38
Bloco acústico betão leve																				
Tijolo cerâmico perfurado	7	9	11	14	15				22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Reboco	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2
Aglomerado de borracha															3					
EPS															5					
ICB															5					
Lã de rocha															5					
Lã de vidro															5					
PUR															5					
XPS															5					
Rw (C, C <sub>h</sub> ) [dB]	39	41	42	46	47	49	51	52	52	52	52	52	52	53	53	54	57	60	63	64
(-1;-5)(-2;-7)(-2;-8)(-2;-6)(-1;-6)(-2;-6)(-2;-6)(-2;-6)(-2;-6)(-2;-6)(-2;-6)(-1;-6)(-2;-8)(-1;-6)(-2;-6)(-1;-6)(-2;-6)(-1;-6)(-2;-6)																				
EI [MJ/10 m <sup>2</sup> ]	289	322	338	510	415	397	573	736	748	653	776	661	594	540	728	866	1411	720	1240	900
Custo [€/10 m <sup>2</sup> ]	309,70	318,10	327,90	362,94	351,10	693,20	389,40	567,20	503,00	507,10	581,40	502,90	565,90	478,53	415,54	446,52	532,45	630,70	600,60	783,38
Espessura [cm]	11,0	13,0	15,0	18,0	19,0	24,0	26,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	15,0	27,0	33,0	36,0	20,0	42,0	25,0

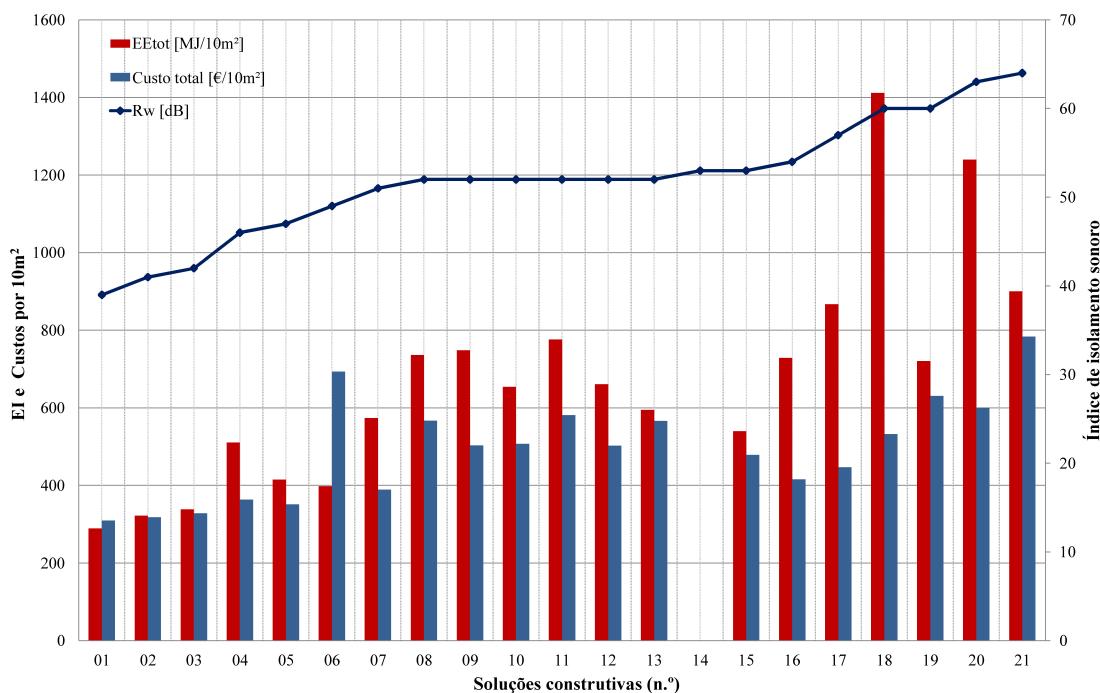
**Tabela 2** - Soluções construtivas de paredes duplas (Asdrubali, 2006; Asdrubali, 2007; Asdrubali, 2009; Asdrubali *et al.*, 2008; Berge, 2009; Desarnaulds *et al.*, 2005; Samagaio, 2006; Pedroso *et al.*, 2017a).

**Tabela 3** - Soluções construtivas de paredes duplas mistas (Asdrubali, 2006; Asdrubali, 2007; Asdrubali, 2009; Asdrubali *et al.*, 2008; Berge, 2009; Desarnaulds *et al.*, 2005; Samagaio, 2006; Pedroso *et al.*, 2017a).

**Tabela 4** - Soluções construtivas de paredes duplas de tijolo (Asdrubali, 2006; Asdrubali, 2007; Asdrubali, 2009; Asdrubali *et al.*, 2008; Berge, 2009; Desarnaulds *et al.*, 2005; Samagaio, 2006; Pedroso *et al.*, 2017a).

### 5.1. Paredes simples

O trabalho realizado para obtenção dos valores presentes na Tabela 1 permitiu traçar a Figura 3. Refira-se que a solução 14 não apresenta valores uma vez que não se encontrou valores de referência para a energia incorporada, nem para o custo, da borracha. Optou-se, no entanto, pela inclusão desta alternativa face ao seu crescente interesse, e potencial futuro, da sua utilização.



**Figura 3 - Soluções construtivas de paredes simples.**

Pela análise da Figura 3, verifica-se que a parede cujo índice de isolamento é maior é constituída por betão com uma espessura de 0,25 m (21), dada a sua elevada massa. Segue-se o bloco de betão leve com desempenho acústico melhorado (20), que apresenta características entre as das paredes em betão de densidade normal de 0,20 m (19) e 0,25 m (21). Por sua vez, a alvenaria de tijolo cerâmico furado de 7 cm (1) apresenta o pior desempenho em termos de isolamento, dadas as suas características de rigidez e pouca massa. Verifica-se ainda que a aplicação de isolamento pelo exterior não provoca acréscimo significativo do isolamento acústico das paredes consideradas, quando comparados os valores de isolamento entre um tijolo cerâmico furado de 22 cm (7) e o mesmo tijolo revestido numa das faces com o isolante (diferença de aproximadamente 1 dB - soluções 8 a 14).

Quanto à energia incorporada, verificou-se que as paredes com blocos de betão com agregados leves (argila expandida) (soluções 18 e 20) apresentam valores elevados. As soluções com isolamento pelo exterior apresentam, regra geral, um acréscimo de 1 dB, o que do ponto de vista de isolamento acústico é irrelevante. A vantagem destas soluções será mais significativa em termos de comportamento térmico, mas essa dimensão do desempenho está fora do âmbito deste artigo. Assim, conclui-se que o acréscimo de energia incorporada, ligado às soluções de isolamento pelo exterior, é exagerado face ao isolamento acústico resultante. As soluções mais conservativas energeticamente são as de tijolo cerâmico perfurado (1, 2 e 3).

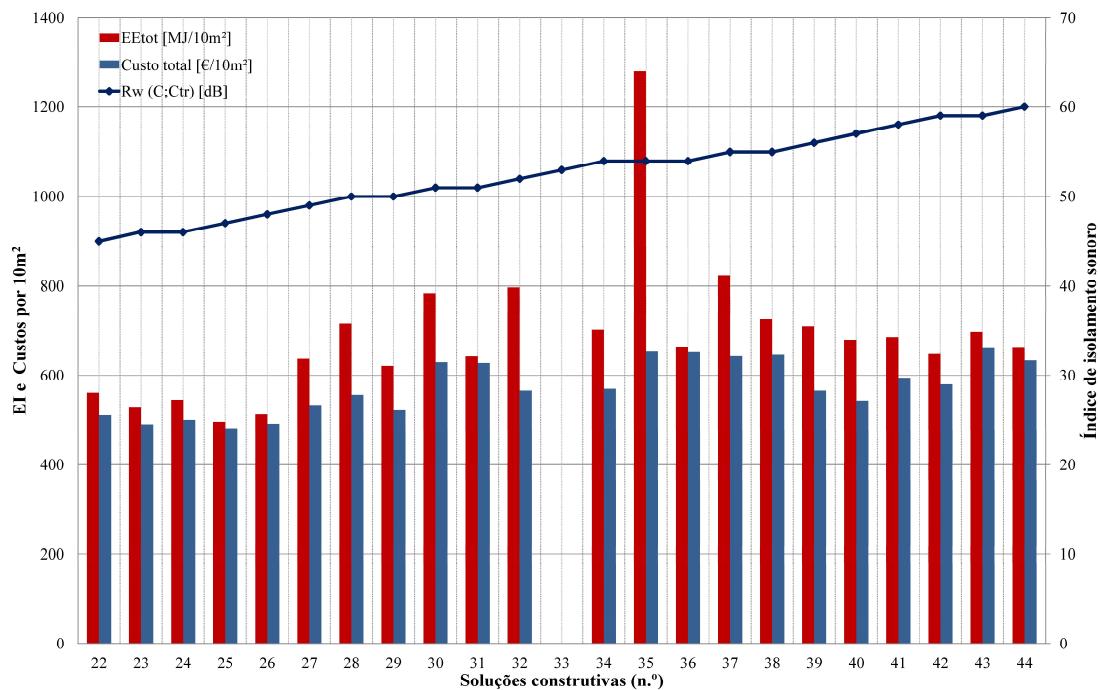
As paredes de tijolo cerâmico perfurado (1, 2 e 3) são as mais baratas, mas verificou-se que existem blocos do mesmo material (16 e 17) com desempenho térmico e acústico melhorado que representam um ligeiro acréscimo de custo e de carga ambiental, mas que permitem acréscimos de isolamento na ordem de 10 dB.

### 5.2. Paredes duplas

Dado o número de soluções de paredes duplas estudadas, esta secção encontra-se dividida em três partes distintas, de forma a permitir a apresentação e discussão dos resultados obtidos para cada tipo de paredes duplas.

### 5.2.1. Paredes duplas tradicionais

Apresenta-se na Figura 4 o conjunto de resultados obtidos traduzidos numa escala de crescente desempenho de isolamento acústico. À semelhança das paredes simples, a solução contendo o aglomerado de borracha não foi incluída, pela falta de dados de energia incorporada e de custos.



**Figura 4 - Soluções construtivas de paredes duplas tradicionais.**

As paredes duplas são boas soluções para isolamento sonoro ( $R_w > 40$  dB), verificando-se que os materiais alternativos constituem bons elementos a incluir. Estes, quando comparados, para a mesma solução construtiva, com materiais absorsores correntes, apresentam acréscimos de isolamento de até 4 dB. Os materiais alternativos ocupam os cinco primeiros lugares no que respeita às soluções com maior índice de isolamento a ruídos de condução aérea, sendo que a lã de vidro ocupa a 6<sup>a</sup> posição. Os materiais com pior desempenho de isolamento, quando presentes no interior da caixa-de-ar, são o XPS, o EPS e o ICB.

Quanto à energia total, verifica-se que as soluções com menor consumo energético (primeiras nove posições) não podem ser contabilizadas pois a caixa-de-ar foi considerada vazia para que se pudesse verificar efectivamente as características do material absorisor. As seguintes são ocupadas pelos materiais alternativos, que apresentam uma menor energia incorporada na sua produção. A exceção a esta regra corresponde à lã de madeira que, devido à inclusão de cimento, apresenta valores bastante elevados.

Da análise de custos, conclui-se que os materiais alternativos são ligeiramente mais caros do que a lã de vidro; no entanto, se estes materiais forem comparados com o XPS, por exemplo, apresentam preços perfeitamente competitivos.

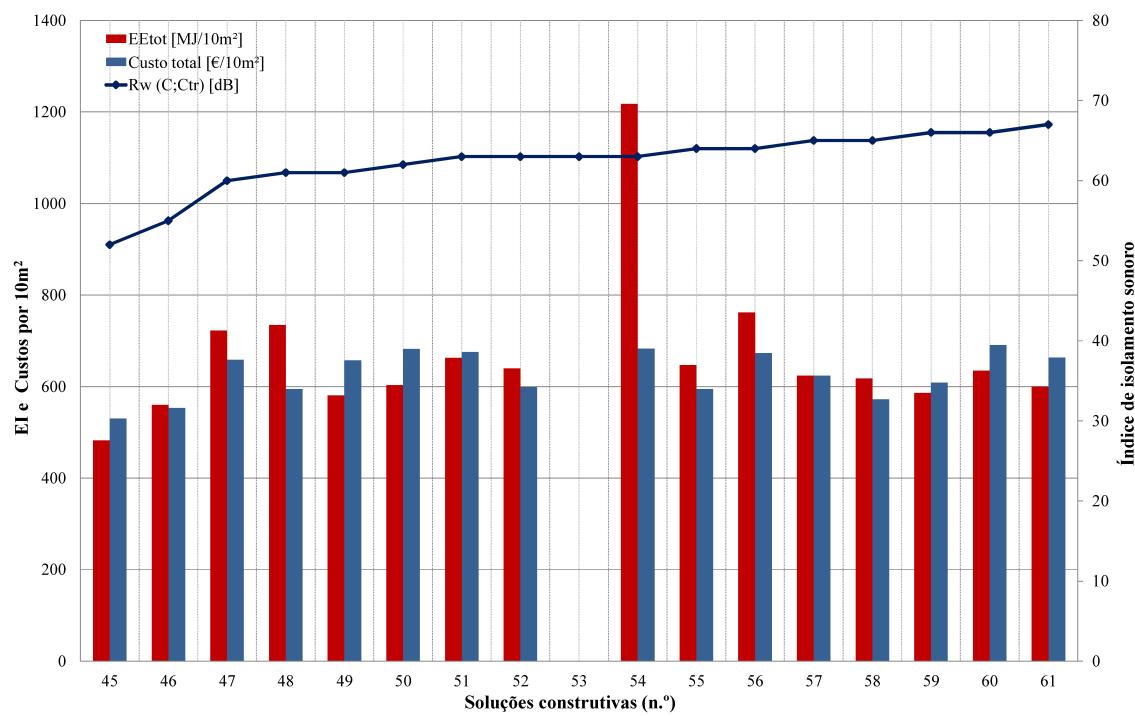
### 5.2.2. Paredes duplas mistas

A partir da Figura 5, é possível verificar o desempenho das soluções construtivas analisadas, continuando a não se apresentar valores para a solução contendo o aglomerado de borracha reciclada, pelas razões já expostas.

À semelhança do que se verificou nas paredes duplas, os valores mais elevados de isolamento nas paredes mistas são obtidos através dos materiais alternativos (cinco primeiros lugares). O PUR encontra-se na 6<sup>a</sup> posição, sendo que os materiais que apresentam pior desempenho no isolamento são novamente o XPS, EPS e ICB.

Quanto aos consumos energéticos, os absorsores alternativos têm, na sua maioria, menores impactes face aos elementos correntes.

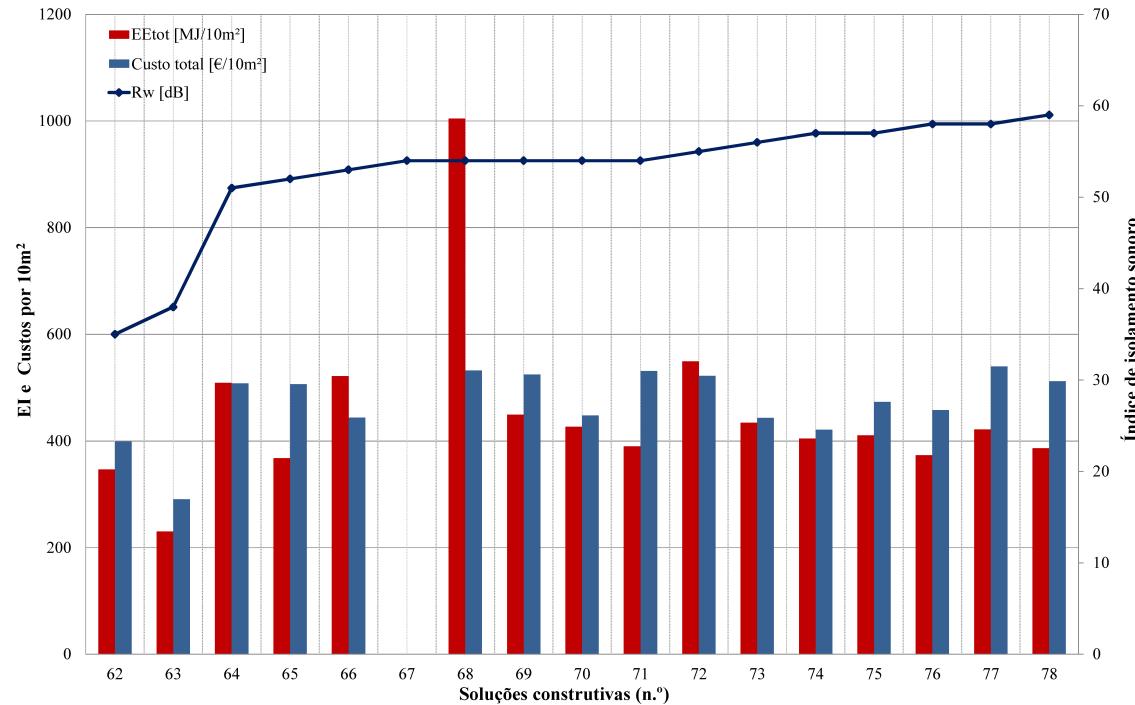
Os materiais alternativos, quando comparados com o EPS ou o XPS, não representam acréscimos de preço, ou, por vezes, são até soluções mais baratas.



**Figura 5** - Soluções construtivas de paredes duplas mistas.

### 5.2.3. Paredes duplas de tabique

Tal como para as soluções anteriores, apresenta-se na Figura 6 o resumo dos resultados obtidos, com a condicionante já referida sobre a solução contendo o aglomerado de borracha reciclada.



**Figura 6** - Soluções construtivas de paredes duplas de tabique.

Enquanto soluções construtivas para divisão de espaços interiores, as paredes duplas de tabique competem com as soluções de pano simples de alvenaria de tijolo perfurado, uma vez que essa é das soluções mais adoptadas na construção em Portugal. Assim, quando comparadas as duas soluções, percebe-se que as paredes duplas de tabique ocupam um menor espaço para um melhor desempenho ao

nível do isolamento a sons de condução aérea e mesmo de desempenho energético, ainda que economicamente sejam mais desvantajosas. Em locais onde a área útil seja de grande relevância, este tipo de soluções poderá ser uma grande mais-valia. Quanto à comparação das diversas soluções entre si (62 a 78), as diferenças de isolamento acústico, energéticas e económicas devem-se apenas aos materiais introduzidos na caixa-de-ar, já que a construção de base considerada foi sempre igual para todas as soluções. Da análise efectuada, não resultam conclusões distintas das já referidas para as paredes duplas e mistas.

## 6. Conclusão

Este artigo apresenta o estudo de um conjunto alargado de soluções construtivas de paredes simples e duplas ao nível do comportamento acústico, energia incorporada e custo associado. Nestas soluções, foram considerados materiais de uso corrente e alternativos para absorção sonora e sua inclusão em elementos construtivos para isolamento sonoro. Os resultados apresentados são inovadores e consideram-se elementos de consulta fundamental nesta área, demonstrando que, efectivamente, os materiais de origem natural podem afirmar-se como alternativas válidas aos materiais ditos tradicionais para incorporação em paredes de edifícios, por análise dos três vectores referidos.

Os cálculos basearam-se em métodos publicados mas que padecem da devida validação experimental, muito embora, ao serem conservativos, permitirem que os valores obtidos sirvam para este estudo aqui desenvolvido.

Nas paredes simples, verificou-se que a inclusão do material absorvente representou um acréscimo de isolamento desprezável, sendo as opções mais vantajosas as compostas por tijolos cerâmicos melhorados (paredes 16 e 17), com índices de redução sonora acima dos 53 dB e com custos e energia incorporada inferiores aos das restantes soluções.

As paredes duplas tradicionais com melhor desempenho global incluíram na sua caixa-de-ar materiais alternativos, e a parede com isolamento sonoro mais elevado (parede 44) face à solução mais utilizada usualmente (parede 30) apresentou +18% de isolamento sonoro, -20% de energia incorporada e apenas +0,7% de custo. Ainda assim existem paredes com materiais alternativos (ex.: parede 40) que apresentam todos os indicadores superiores às soluções tradicionalmente adoptadas (paredes 30 e 34).

Quanto às paredes duplas mistas, a utilização de materiais alternativos demonstrou, uma vez mais, ser vantajosa quando comparada com as referências tradicionalmente aplicadas na construção (paredes 47 e 52), sendo disso exemplo a parede 58, incluindo uma manta com origem em palha e apresentando melhores indicadores de isolamento acústico, energia incorporada e custo.

Relativamente ao estudo das paredes duplas de tabique, e à semelhança das paredes anteriores, verificou-se que as paredes tradicionalmente utilizadas (paredes 64 e 70) podem ser facilmente substituídas por paredes incluindo materiais alternativos, como por exemplo a parede 74, dada a sua superioridade em todos os vectores de análise utilizados.

Como tal, a análise dos diversos resultados obtidos permite concluir que alguns dos materiais alternativos apresentados podem ser, desde já, substitutos viáveis e competitivos, com desempenhos superiores em termos acústicos, de energia incorporada e económicos, face aos materiais regularmente aplicados na construção de paredes de edifícios. Uma vez que o factor económico é, muitas das vezes, o único vector desvantajoso dos três e que, ao se generalizar a aplicação destes materiais alternativos, o seu custo poderá descer (por meio de economias de escala), a sua utilização será, ainda mais, potenciada.

## 7. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio proporcionado pelo Centro de Investigação CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa e pela FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia) a este trabalho de investigação. O autor Marco Pedroso agradece, ainda, à FCT pela bolsa de doutoramento com a referência FCT SFRH/BD/132239/2017.

## Referências

- Asdrubali, F., "Green and sustainable materials for noise control in buildings", *ICA 2007*, Madrid, Spain (2007).
- Asdrubali, F., "Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control", in *Euronoise 2006*, p. 10 (2006).
- Asdrubali, F., "The role of LCA in the design of sustainable buildings: thermal and sound insulating

- materials”, *Euronoise 2009*, Edinburgh, Scotland (2009).
- Asdrubali, F., D’Alessandro, F. and Schiavoni, S., “Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs”, *Acoustics ’08-SFA*, Paris, France (2008).
- Berge, B., The ecology of building materials (2nd edition). Oxford, United Kingdom: Architectural press, Elsevier (2009).
- Calkins, M., Materials for sustainable sites. New Jersey, USA: John Wiley and Sons (2009)
- CEN, EN 12354-1: Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms, p. 64 (2017).
- Desarnaulds, V., Costanzo, E., Carvalho, A., and Arlaud, B., “Sustainability of acoustic materials and acoustic characterization of sustainable materials”, in *12th International Congress on Sound and Vibration*, p.8 (2005).
- Hammond, G. P., Jones, C. I., “Embodied energy and carbon in construction materials”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 161 (2) 87-98 (2013).
- Pedroso, M., de Brito, J., Silvestre, J. D., “Caracterização de materiais de absorção sonora eco-eficientes (tradicionais e inovadores)”, *Revista Internacional techITT*. 15 (2017) 4–16.
- Pedroso, M., de Brito, J., Silvestre, J. D., “Characterization of eco-efficient acoustic insulation materials (traditional and innovative)”, *Construction and Building Materials* 140 (2017) 221–228. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.132.
- Samagaio, A., “AveiroDomus Associação para o Desenvolvimento da Casa do Futuro - subprojeto de Acústica”, *2º Relatório*. Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro (2006).
- Sousa, A. N., “Previsão da transmissão de ruído aéreo - Parte 2”, *Disciplina de Comportamento térmico e acústico de edifícios* (2010).