

# PREVISÃO DA TRANSMISSÃO MARGINAL DE SONS DE PERCUSSÃO ENTRE COMPARTIMENTOS SOBREPOSTOS

Diogo Mateus<sup>1</sup>, Paulo Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigação em Ciências da Construção  
Departamento de Engenharia Civil  
Universidade de Coimbra  
3030-788 Coimbra  
{diogo@dec.uc.pt, pfsantos@dec.uc.pt}

## Resumo

A transmissão de sons de percussão entre dois compartimentos adjacentes, de cima para baixo, depende das transmissões directas, através do próprio elemento de separação, e das transmissões marginais, através dos elementos adjacentes. No caso da transmissão de pavimentos de compartimentos inferiores para compartimentos sobrejacentes, a transmissão ocorre apenas por via marginal, de baixo para cima, sendo esta de difícil quantificação, em especial, por não existirem metodologias consagradas na normalização em vigor. Em projecto, alguns projectistas assumem, do lado da segurança, que a transmissão marginal de baixo para cima é próxima da ocorrida por via marginal de cima para baixo. Este trabalho pretende comparar estes dois tipos de transmissão sonora marginal, através de simulações realizadas utilizando o SEA (Statistical Energy Analysis), e verificar se existe algum padrão que permita prever a transmissão sonora de baixo para cima em função da transmissão de cima para baixo, deduzindo eventualmente uma expressão que permita relacionar ambas. Os resultados obtidos com base no modelo do SEA serão ainda comparados com resultados determinados a partir de fórmulas empíricas, apresentadas em estudo anterior.

**Palavras-chave:** transmissão marginal, de baixo para cima, isolamento, sons de percussão.

## Abstract

The downward transmission of impact sound between two contiguous dwellings depends on direct transmission through the partition element, and on flanking transmission through the surrounding elements. In the case of floor transmission from lower apartments to upper ones, the transmission only occurs by the flanking route, which is difficult to quantify, especially because no standard methodologies have been published. To be on the safe side, some engineers assume at the design stage that the upward flanking transmission is similar to the downward process. The main goal of this work is to compare these two kinds of flanking sound transmission by means of some simulations using Statistical Energy Analysis (SEA), to see if there is any trend on which the prediction of upward sound transmission might be based, through a relationship with the downward transmission, possibly deducting an expression that allows the two to be linked. The results of the SEA model will be compared with results calculated from empirical formulas, indicated in previous study.

**Keywords:** flanking transmission, upward transmission, insulation, impact sound.

## 1 Introdução

A transmissão sonora de sons de percussão, de um pavimento, num compartimento, para outros compartimentos do mesmo edifício, ocorre geralmente por via lateral, através dos elementos adjacentes, e por via directa, quando o pavimento percutido é sobrejacente ao compartimento receptor em análise. A quantificação da transmissão por percussão pode ser efectuada de forma relativamente simples pela via experimental, de acordo com as normas EN ISO 140-7 e ISO 717-2 [1;2], através de medições acústicas realizadas *in situ*, ou pode ser prevista através de modelos teóricos, nomeadamente através dos modelos indicados na norma EN 12354-2 [3]. No caso da avaliação experimental, a metodologia a aplicar e a sua complexidade é praticamente a mesma, quer se trate de transmissão de cima para baixo, quando o pavimento percutido corresponde ao tecto do compartimento receptor, quer se trate de transmissão lateral ou inversa, entre compartimentos do mesmo piso ou de baixo para cima. Relativamente aos modelos de previsão, a situação de transmissão de baixo para cima ainda se encontra muito pouco desenvolvida, sendo muitas vezes, na prática, tratada de forma muito grosseira ou mesmo desprezada.

Na prática, a avaliação da transmissão sonora, de sons ou ruídos de percussão de baixo para cima é geralmente relevante quando o compartimento receptor, “sensível ao ruído”, se situa sobre um espaço emissor com possibilidade de forte emissão de ruídos de percussão. Na perspectiva da legislação existente em vigor em Portugal, no que se refere a requisitos de isolamento em edifícios (Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios [4]), a transmissão por percussão de baixo para cima é sobretudo relevante quando o pavimento percutido não é térreo e quando o requisito de isolamento é elevado, como acontece por exemplo em edifícios mistos com comércio, indústria, serviços ou diversão no R/C e habitação (quartos ou zonas de estar) no andar sobrejacente. Nestes casos, de acordo com o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), o valor do índice de percussão padronizado  $L'_{nt,w}$  não poderá ser superior a 50 dB, o que muitas vezes é contrariado, em especial quando se trata de revestimentos de piso rígidos directamente ligados à laje de suporte (revestimentos cerâmicos ou em pedra sobre laje não térrea). Deste modo, para garantir o cumprimento do RRAE, muitas vezes é necessária a aplicação de soluções acústicas específicas ao nível do pavimento do espaço emissor (situado no piso inferior aos locais receptores a proteger). Estas soluções poderão ser basicamente de dois tipos: revestimento de piso flexível, por exemplo, vinílicos ou linóleos de base flexível, revestimentos à base de cortiça, de borracha ou têxteis; revestimento de piso rígido aplicado sobre camada inferior resiliente, por exemplo, com betonilha ou lajeta flutuante em betão, ou em argamassa, aplicada sobre camada resiliente, ou com pavimentos flutuantes em madeira. No caso específico de edifícios mistos, com zonas de comércio ou serviços sob zonas de habitação, e em fase de projecto, em que normalmente ainda não é conhecida a actividade que se irá instalar nesses espaços, a solução acústica mais viável para o piso é normalmente a betonilha ou a lajeta flutuante, sobre a qual se poderá aplicar o revestimento pretendido (normalmente cerâmico ou eventualmente em pedra).

Neste contexto, e na sequência de trabalho anterior, onde foi proposta uma metodologia de cálculo simplificada, baseada em resultados experimentais *in situ* [5], o presente artigo pretende dar continuidade a esse trabalho, comparando a transmissão de sons de percussão de cima para baixo com o que ocorre de baixo para cima, em condições de simetria, através da utilização do método do SEA (Statistical Energy Analysis). O objectivo final, é o de verificar se existe algum padrão que permita prever a transmissão sonora de baixo para cima em função da transmissão de cima para baixo, para a qual já existem métodos consagrados na normalização em vigor [3], facilmente aplicáveis em projecto.

## 2 Metodologia de cálculo simplificada para transmissão de sons de percussão

De acordo com estudo efectuado anteriormente, pelos autores do presente artigo, foi proposta uma metodologia de cálculo simplificada [5], através de fórmulas empíricas, determinadas com base nos modelos propostos pela norma EN 12354-2 [3] (para transmissão de cima para baixo) e um conjunto alargado de resultados de ensaios in situ, efectuados entre espaços comerciais localizados no R/C de edifícios e quartos ou salas sobrejacentes (a partir de um total de 60 ensaios, realizados em 48 edifícios diferentes). Nesse estudo, e para a situação de lajes de piso não térreas em betão armado, com betonilha ou lajeta flutuante, foi proposta a seguinte fórmula simplificada de previsão:

$$\left\{ \begin{array}{l} L'_{n,w} = 76 - 10\text{Log}(m') + 5\text{Log}\left(\frac{L_{ER}}{S_E}\right) + 10\text{Log}(S_R) - \Delta L_w + K_{inv} \\ \text{com } K_{inv} = 2 \text{ a } 4 \text{ se } 63 \geq L'_{n,w} \text{ (sem lajeta flutuante)} \geq 57\text{dB}; \\ \quad K_{inv} = 4 \text{ a } 6 \text{ se } 56 \geq L'_{n,w} \text{ (sem lajeta flutuante)} \geq 52\text{dB}; \\ \quad K_{inv} = 7 \text{ a } 9 \text{ se } 51 \geq L'_{n,w} \text{ (sem lajeta flutuante)} \geq 48\text{dB}. \end{array} \right. \quad (1)$$

onde  $L'_{n,w}$  é o índice de percussão normalizado;  $m'$  é a massa da laje de piso percutida (em  $\text{kg/m}^2$ );  $L_{ER}$  é o comprimento total de junções com continuidade do piso inferior para o piso superior (ver Figura 1);  $S_E$  e  $S_R$  são as áreas dos compartimentos emissor e receptor, respectivamente;  $\Delta L_w$  é o índice de redução da transmissão de sons de percussão de revestimentos de piso (avaliado em laboratório, de cima para baixo),  $K_{inv}$  é a correcção a aplicar a  $\Delta L_w$ , pelo facto de se tratar de transmissão de baixo para cima;  $L'_{n,w}$  (sem lajeta flutuante) é o valor de  $L'_{n,w}$  obtido para a situação sem lajeta flutuante, determinado a partir da fórmula anterior, com  $\Delta L_w$  e  $K_{inv}$  iguais a zero.

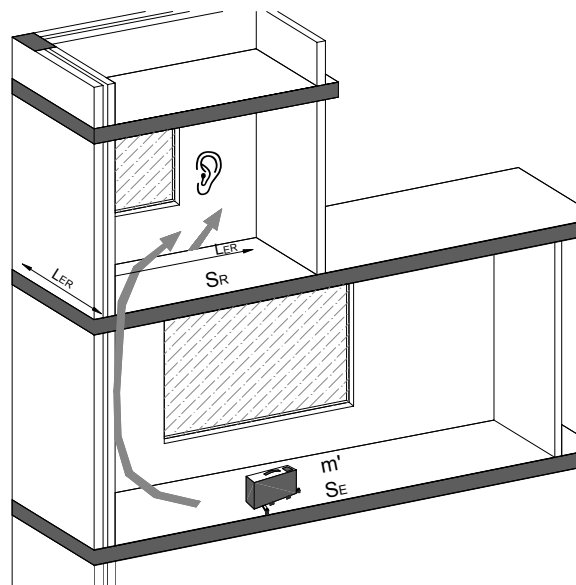


Figura 1 – Esquema exemplificativo da transmissão sonora marginal inversa de sons de percussão (entre um compartimento num piso inferior e um compartimento sobrejacente).

Na fórmula anterior, o comprimento de junções com continuidade  $L_{ER}$  não deve ser considerado inferior a 1 m, visto que, no limite, se não existir continuidade de paredes, do local emissor para o compartimento receptor, existe sempre transmissão marginal através de outros elementos, em especial dos pilares (no caso de estrutura porticada). Por outro lado, se existirem vãos de grande dimensão nas paredes com continuidade, ao nível do piso do emissor, poderá eventualmente descontar-se a largura de uma faixa, de alto a baixo, de área equivalente à área do(s) vão(s). Para locais emissores com área muito elevada, se a percussão considerada não for distribuída por todo o piso, mas sobretudo na zona sob o local receptor, conforme recomendação da norma ISO 140-14, sugere-se a consideração de um valor máximo para  $S_E$  de 100 m<sup>2</sup>.

Esta fórmula empírica foi proposta quando se encontrava em vigor ainda a versão anterior do RRAE, onde o parâmetro previsto para caracterização da transmissão de sons de percussão era o  $L'_{n,w}$ . Para a situação actual, em vez do índice  $L'_{n,w}$ , a nova versão do RRAE prevê a utilização do índice de percussão padronizado  $L'_{nT,w}$ , que pode ser relacionado com o anterior através da seguinte expressão:

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10 \text{Log}(0,032V) \quad (2)$$

onde  $V$  é o volume do espaço receptor.

Nestas condições, a Eq. (1) pode ser transformada na seguinte expressão:

$$L'_{nT,w} (\text{com lajeta flutuante}) = L'_{n,w} (\text{sem lajeta flutuante}) - 10 \text{Log}(0,032V) - \Delta L_w + K_{inv} \quad (3)$$

com,

$$\left\{ \begin{array}{l} L'_{n,w} (\text{sem lajeta flutuante}) = 76 - 10 \text{Log}(m') + 5 \text{Log}\left(\frac{L_{ER}}{S_E}\right) + 10 \text{Log}(S_R) \\ e \quad K_{inv} = 2 \quad a \quad 4 \quad \text{se} \quad 63 \geq L'_{n,w} (\text{sem lajeta flutuante}) \geq 57 \text{dB}; \\ \quad \quad K_{inv} = 4 \quad a \quad 6 \quad \text{se} \quad 56 \geq L'_{n,w} (\text{sem lajeta flutuante}) \geq 52 \text{dB}; \\ \quad \quad K_{inv} = 7 \quad a \quad 9 \quad \text{se} \quad 51 \geq L'_{n,w} (\text{sem lajeta flutuante}) \geq 48 \text{dB}. \end{array} \right.$$

Refira-se que, nas fórmulas empíricas anteriores apenas são consideradas as variáveis consideradas mais relevantes e de mais fácil caracterização. Contudo, caso se pretenda uma avaliação mais detalhada, existem outras variáveis não desprezáveis, nomeadamente a massa das paredes, o tipo de junção Parede\_Laje, o pé direito do espaço emissor, a localização de pilares e de vigas, e respectivas secções, as características de elasticidade do enchimento sobre a laje de piso e a geometria e localização de vãos. Num modelo mais detalhado, como o SEA, que se apresenta no ponto seguinte, para além das variáveis consideradas nas fórmulas anteriores podem também ser facilmente consideradas as variáveis massa das paredes, o tipo de junção e o pé direito do espaço emissor. As restantes variáveis, dificilmente se poderão considerar sem aumentar muito a complexidade do modelo.

Na transmissão de cima para baixo, a norma EN 12354-2 [3] propõe dois modelos de cálculo: um modelo detalhado, que foi utilizado no presente trabalho, mas recorrendo à utilização de um programa de cálculo automático (ACOUBAT [6]), e um método simplificado, dado pela expressão:

$$L'_{n,w} = 164 - 35 \text{Log}(m') - \Delta L_w + K \quad (4)$$

ou, em relação ao índice padronizado  $L'_{nT,w}$ ,

$$L'_{nT,w} = 164 - 35\text{Log}(m') - 10\text{Log}(0,032V) - \Delta L_w + K \quad (5)$$

onde  $K$  é a correcção devido à ocorrência de transmissão marginal, em dB, que pode ser obtida directamente da consulta da tabela 1 da norma EN 12354-2 [3].

A constante 164, das Equações 4 e 5, que é apresentada pela norma EN 12354-2, para os pavimentos mais usuais no nosso país, conduz a resultados de  $L'_{n,w}$ , ou de  $L'_{nT,w}$  cerca de 5 dB mais favoráveis do que os habitualmente obtidos na avaliação experimental. Deste modo, considera-se aconselhável que o valor de 164 seja substituído por 169 [7].

### 3 Aplicação do modelo do SEA à transmissão de sons de percussão

O método SEA (“Statistical Energy Analysis”) é hoje em dia bastante utilizado no estudo de problemas dinâmicos complexos, tais como, a transmissão sonora e análise de vibrações, especialmente em médias e altas frequências. Neste modelo o comportamento do sistema dinâmico global é obtido utilizando as respostas em cada um dos diversos subsistemas, sendo a resposta global calculada a partir da interacção entre estes subsistemas. O sistema dinâmico é excitado a partir de um determinado “input power”, o estado de vibração é expresso em função da energia de vibração de cada subsistema e a interacção entre cada um dos subsistemas é expresso em função do fluxo de energia.

A grande vantagem do SEA reside no pequeno número de variáveis, quando comparado com outras técnicas (Método dos Elementos de Fronteira ou Método dos Elementos Finitos), permitindo assim, uma rápida construção do modelo e análise de resultados, utilizando recursos computacionais modestos. Contudo, este método não permite estimar a resposta em qualquer ponto específico do sistema porque os resultados são baseados na energia total de cada subsistema. Uma outra limitação deste método reside na dificuldade em prever o comportamento real do sistema dinâmico em baixas frequências, devido ao elevado grau de incerteza estatística que ocorre quando existe um pequeno número de modos próprios em cada subsistema.

Neste trabalho foi utilizado o software FreeSEA v0.91 [8] para obtenção dos resultados previstos pelo SEA. O modelo utilizado é bastante simples e baseou-se em apenas dois tipos de elementos: “rooms” e “plates”, onde no primeiro tipo apenas se considera a existência de ondas longitudinais, enquanto que no segundo tipo considera-se a existência de ondas longitudinais, transversais e de flexão. Os resultados do SEA são comparados, na Secção 4 deste artigo, com os resultados obtidos através das fórmulas empíricas indicadas na Secção 2.

Os resultados do SEA foram obtidos para uma gama em frequência, por bandas de 1/3 de oitava, desde a frequência central de 100 Hz até à frequência central de 3150Hz. As propriedades mecânicas dos materiais utilizados no cálculo estão indicadas na Tabela 1. Os valores dos factores de perdas, utilizados na modelação dos materiais sólidos (betão e tijolo), são maiores que os indicados na literatura especializada. Pretende-se com isto ter em consideração outras perdas, para além das perdas internas no material, nomeadamente perdas nas ligações ou junções, como por exemplo entre a parte superior da parede de tijolo e a laje em betão sobrejacente. O factor de perdas do ar foi considerado variável em função da frequência de acordo com a seguinte expressão,

$$\eta = \frac{2,2}{Tf} \quad (6)$$

sendo  $T$  o tempo de reverberação do espaço acústico (2,5 s) e  $f$  a frequência central da banda de 1/3 de oitava correspondente.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos materiais:  $\alpha$  - velocidade das ondas de compressão;  $\beta$  - velocidade das ondas de corte;  $\rho$  - densidade;  $\eta$  - factor de perdas.

| Meio                        | Sólido |                                    |                                 | Fluido   |
|-----------------------------|--------|------------------------------------|---------------------------------|----------|
| Material                    | Tijolo | Betão Leve<br>(p/ laje aligeirada) | Betão Denso<br>(p/ laje maciça) | Ar       |
| $\alpha$ [m/s]              | 2360   | 2980                               | 3590                            | 340      |
| $\beta$ [m/s]               | 1445   | 1825                               | 2195                            | -----    |
| $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | 1200   | 1500                               | 2500                            | 1,22     |
| $\eta$                      | 0,10   | 0,07                               | 0,05                            | Variável |

Através do modelo do SEA, com base nas propriedades dos materiais indicadas anteriormente, e considerando a geometria e ligações esquematizadas na Figura 2, foi determinada a transmissão de sons de percussão do piso do compartimento superior para o compartimento adjacente inferior (transmissão de cima para baixo) e a transmissão para o compartimento superior, resultante da percussão do piso do compartimento inferior (transmissão de baixo para cima). Tal como se apresenta na secção seguinte, foram considerados neste estudo nove casos diferentes, fazendo variar alguns dos parâmetros consideradas mais relevantes. Em relação ao tipo de junção Parede\_Laje, foi apenas considerada a junção em T. Para a ligação em Cruz a transmissão sonora seria diferente (inferior), mas o diferencial entre a transmissão marginal de cima para baixo e a transmissão de baixo para cima, para o qual é focalizado este estudo, não depende significativamente do tipo de junção.

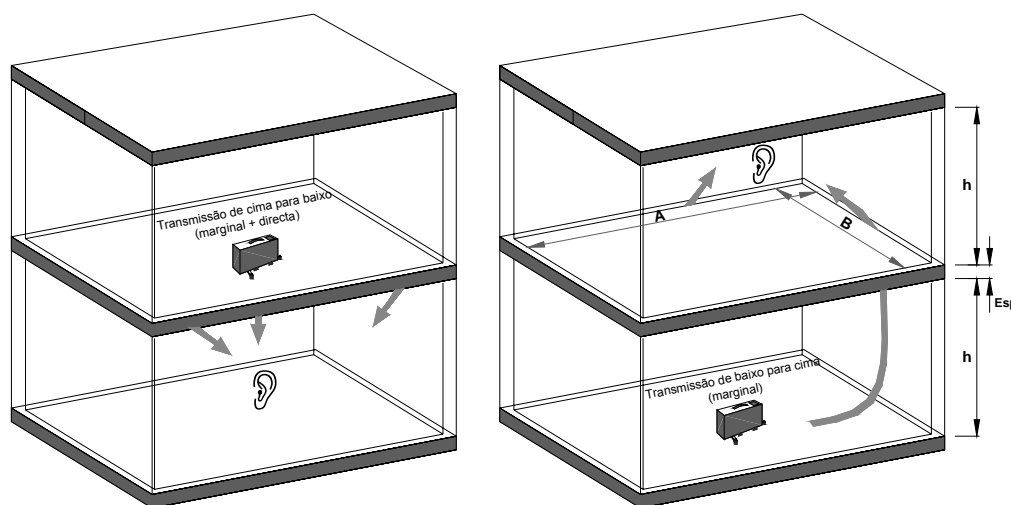


Figura 2 – Esquema exemplificativo das situações modeladas no SEA (transmissão de cima para baixo e transmissão de baixo para cima).

## 4 Resultados obtidos

O cálculo do modelo do SEA, e a posterior comparação com os resultados obtidos através das fórmulas empíricas indicadas na Secção 2, foi aplicado a nove casos de estudo, alterando-se algumas das variáveis consideradas mais relevantes, conforme se indica na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis consideradas nos 9 casos de estudo (de acordo com o esquema indicado na Figura 2).

| Casos de estudo | Tipo de laje | Espessura da laje (m) | Paredes de tijolo | Área do piso (AxB) | Pé direito (h) |
|-----------------|--------------|-----------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| C1              | Maciça       | 0,20                  | 11+11             | 4x3 m <sup>2</sup> | 2,8 m          |
| C2              | Aligeirada   | 0,25                  | 11+11             | 4x3 m <sup>2</sup> | 2,8 m          |
| C3              | Aligeirada   | 0,35                  | 11+11             | 4x3 m <sup>2</sup> | 2,8 m          |
| C1              | Maciça       | 0,15                  | 11+11             | 4x3 m <sup>2</sup> | 2,8 m          |
| C5              | Maciça       | 0,20                  | 11+11             | 7x5 m <sup>2</sup> | 2,8 m          |
| C6              | Maciça       | 0,20                  | 11+11             | 4x3 m <sup>2</sup> | 2,5 m          |
| C7              | Maciça       | 0,20                  | 11+11             | 4x3 m <sup>2</sup> | 3,0 m          |
| C8              | Maciça       | 0,20                  | 11+11             | 4x3 m <sup>2</sup> | 4,0 m          |
| C9              | Maciça       | 0,20                  | simples de 11     | 4x3 m <sup>2</sup> | 2,8 m          |

Na Figura 3 são apresentados os resultados obtidos, por bandas de 1/3 de oitava, da diferença entre a transmissão de cima para baixo (por via directa e marginal) e a transmissão de baixo para cima, utilizando o modelo do SEA aos nove casos de estudo, anteriormente indicados. Tendo em conta que o crescimento destas diferenças com o aumento de frequência se pode aproximar de uma variação linear, por bandas de frequência, é ainda representada nesta figura uma recta com 1,5 dB por oitava (ou 0,5 dB por terço de oitava), que representa aproximadamente (apesar dos desvios para frequências acima de 2000 Hz) o diferencial médio, em frequência, entre a transmissão de cima para baixo e a transmissão de baixo para cima, aos 9 casos estudados.

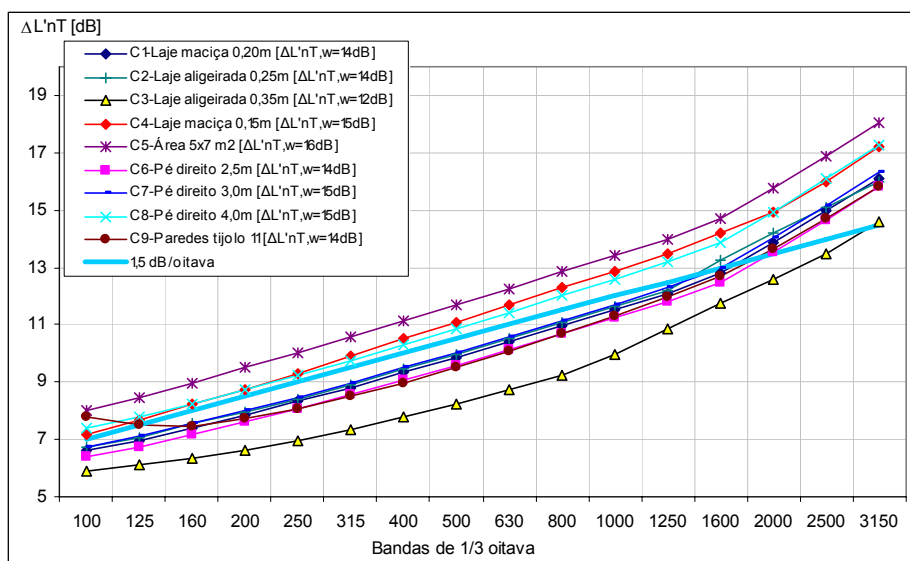


Figura 3 – Diferenças entre a transmissão total descendente (marginal + directa) e a transmissão de ascendente, utilizando o modelo do SEA.

Com base nas diferenças apresentadas na Figura 3, e no modelo detalhado apresentado na EN 12354-2 [3], recorrendo à utilização do programa de cálculo automático *ACOUBAT* [6], para determinar a transmissão global de cima para baixo (transmissão descendente por via directa + marginal), foram determinados os níveis de percussão padronizados correspondentes à transmissão de baixo para cima (ascendente). Estes resultados são apresentados na Figura 4. A partir da diferença entre os resultados

apenas da componente de transmissão marginal dos níveis de percussão padronizados, obtidos de cima para baixo, e os resultados apresentados na Figura 4, foram determinadas as diferenças entre a transmissão marginal descendente e a transmissão ascendente. Estes resultados são apresentados na Figura 5. À semelhança com a Figura 3, é apresentada na Figura 5 uma recta, mas neste caso com variação de 2,7 dB por oitava, que pretende representar aproximadamente a média dos resultados obtidos, excluindo, neste caso, os dois casos de estudo com laje aligeira, por se afastarem significativamente dos restantes.

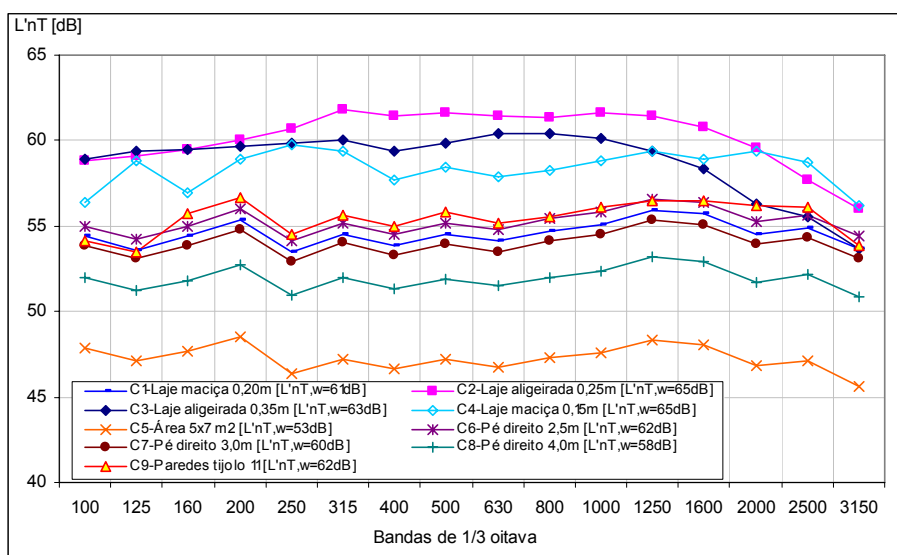


Figura 4 – Níveis de percussão padronizados, correspondentes à transmissão ascendente, para os nove casos de estudo.

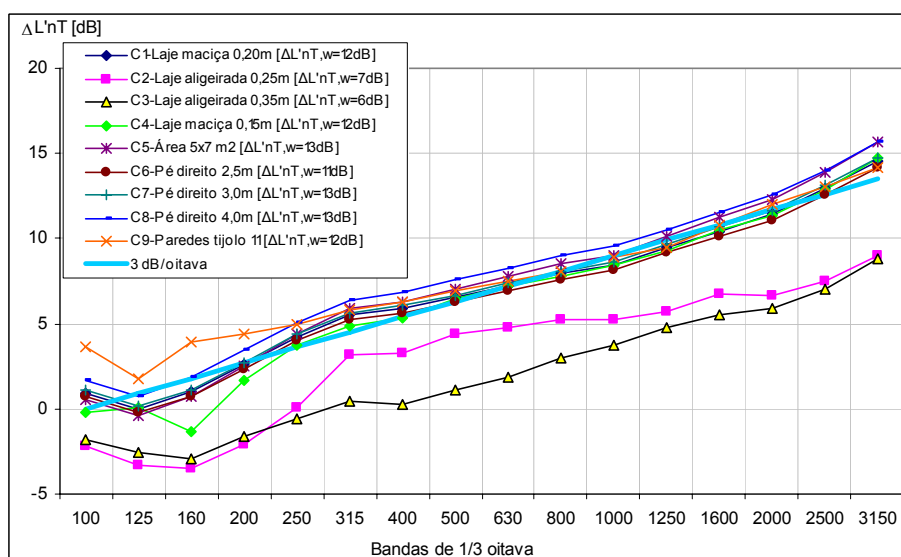
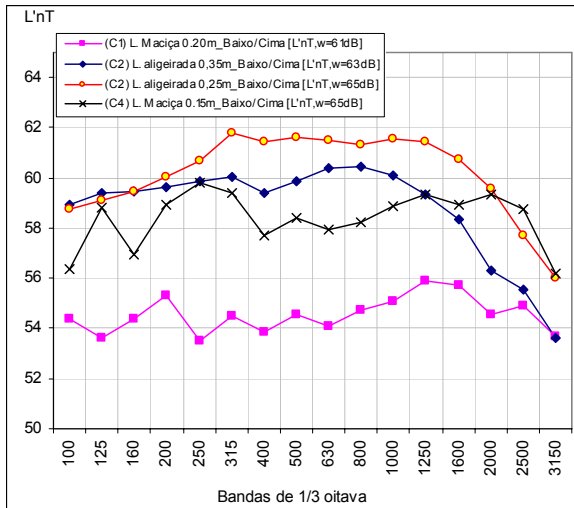


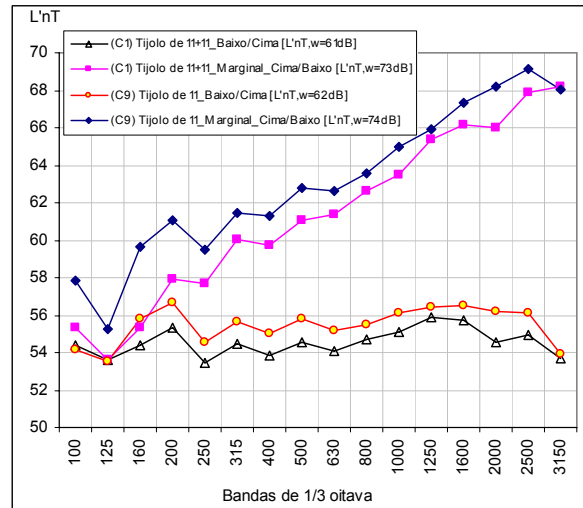
Figura 5 – Diferenças entre a transmissão marginal descendente e a transmissão ascendente.



Para melhor identificar a contribuição das várias variáveis consideradas, são apresentadas nas Figuras 6 e 7 os resultados dos níveis de percussão padronizados, correspondentes à transmissão de baixo para cima, de forma separada. Nas Figuras 5 b) e 6a) são ainda apresentados os resultados das componentes de transmissão marginal de cima para baixo.

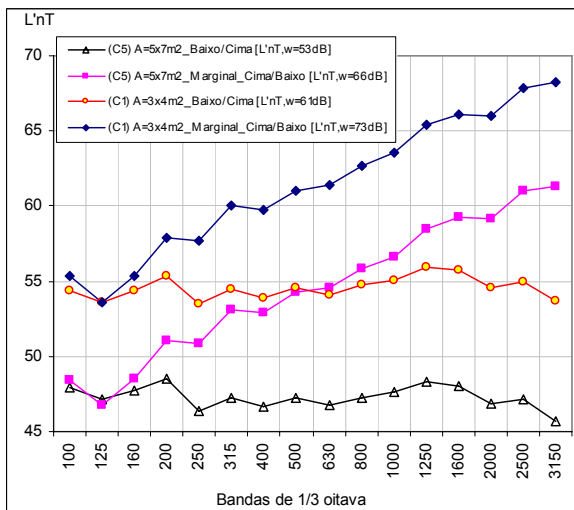


a)

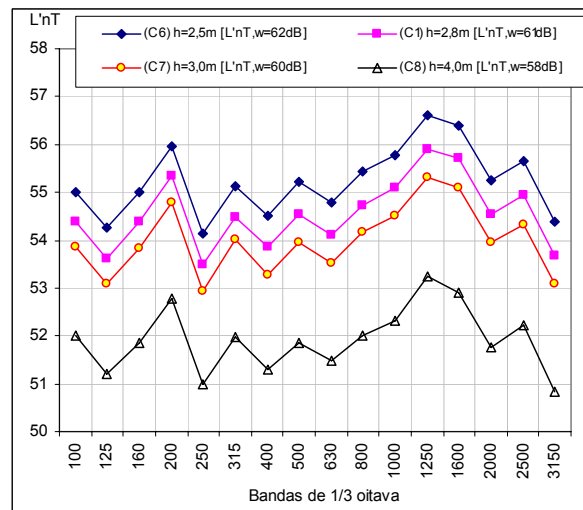


b)

Figura 6 – Efeito da variação do tipo de laje de piso (a) e da variação do tipo de parede (b).



a)



b)

Figura 7 – Efeito do aumento da área de piso (a) e da variação do pé direito (b).

Na Tabela 3 são apresentados os valores de  $L'_{nT,w}$  obtidos através da aplicação das equações 5 e 3 aos nove casos de estudo, respectivamente para a transmissão de cima para baixo e para a transmissão de baixo para cima. São ainda apresentados nesta tabela as diferenças entre as transmissões de cima para baixo e de baixo para cima, resultantes das equações 5 e 3 e do modelo do SEA (diferenças apresentadas na Figura 3).

Tabela 3 – Valores de  $L'_{nT,w}$  obtidos através da aplicação das equações 5 e 3 e diferenças de valores de  $L'_{nT,w}$  entre a transmissão de cima para baixo e a transmissão de baixo para cima.

| Casos de estudo                         | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $L'_{nT,w}$ eq(5)<br>cima/baixo         | 76 | 82 | 78 | 80 | 72 | 77 | 76 | 75 | 77 |
| $L'_{nT,w}$ eq(3)<br>baixo/cima         | 60 | 61 | 60 | 61 | 59 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| $L'_{nT,w}$ (eq5)-<br>$L'_{nT,w}$ (eq3) | 16 | 21 | 18 | 18 | 13 | 17 | 16 | 15 | 17 |
| Dif. SEA<br>(Fig. 3)                    | 14 | 14 | 12 | 15 | 16 | 14 | 15 | 15 | 14 |

## 5 Análise de resultados

Da análise da Figura 5, verifica-se que a diferença entre a transmissão marginal descendente e a transmissão ascendente é pouco variável (quase constante se forem excluídos os dois casos de lajes aligeiradas, cujo comportamento difere significativamente do restante), quer por banda de frequência, quer em termos globais (excluindo os dois casos de lajes aligeiradas, as diferenças entre valores de  $L'_{nT,w}$  situam-se entre 11 e 13 dB). O crescimento destas diferenças com o aumento de frequência é próximo de linear, com 0,9 dB por cada terço de oitava e com um valor próximo de 0 na banda de 1/3 de oitava centrada em 100 dB. Ou seja, em frequência, é possível estabelecer uma diferença entre a transmissão marginal de cima para baixo e a transmissão de baixo para cima dada por  $9\text{Log}(f/100)$ , onde  $f$  representa a frequência central da banda de oitava em análise.

Se não forem excluídas as duas situações de laje aligeirada, a aproximação entre diferenças de transmissão acaba por ser maior se for considerada a transmissão total descendente (directa + marginal), em vez de considerar apenas a componente marginal desta transmissão (ver Figura 3). Neste caso, o crescimento das diferenças, em frequência, também se aproxima de uma recta (apesar de apresentar maiores desvios), mas com cerca de 0,5 dB por terço de oitava, situando-se a diferença global de  $L'_{nT,w}$  entre 12 e 16 dB. Da aplicação dos métodos simplificados apresentados na Secção 2 (Eq. 3 e Eq. 5), aos nove casos de estudo, verifica-se que a diferença global, entre transmissão total descendente e transmissão ascendente se situa entre 13 e 21, ou entre 13 e 18 se forem excluídas as duas situações de laje aligeirada. Ou seja, a aplicação do modelo do SEA conduz a diferenças globais médias um pouco inferiores (da ordem de 2 dB). Estas diferenças poderão eventualmente ser devidas ao facto de se terem considerado ligações perfeitas (encastramentos) entre as paredes e a laje, no modelo do SEA, e, na construção corrente, que serviu de base à proposta das fórmulas empíricas, existe normalmente alguma descontinuidade na ligação, em especial entre a zona superior da parede de alvenaria e a laje de betão.

Da análise da Figura 4, ou com maior pormenor da Figura 6a), verifica-se um comportamento distinto entre a laje maciça de 0,20 m de espessura e os restantes três tipos de laje, em especial em relação à laje aligeirada de 0,25 m de espessura total, existindo, no entanto, alguma aproximação em altas frequências. Contudo, se for analisado apenas o valor de  $L'_{nT,w}$ , correspondente à transmissão ascendente (que depende fortemente da componente de altas frequências), as diferenças são encurtadas. Refira-se que, uma parte da divergência de resultados entre lajes é devida à consideração

de curvas do nível de percussão normalizado  $L_n$ , correspondentes apenas à transmissão directa (obtida em laboratório), significativamente diferentes. Da análise da Figura 6b), verifica-se que o efeito de aumento de massa da parede envolvente conduz a reduções de transmissão marginal, mas estas são praticamente iguais na transmissão de cima para baixo e na transmissão de baixo para cima. Situação análoga se verifica em relação ao aumento da área de piso (ver Figura 7a)). Da análise da Figura 7b), verifica-se que o aumento do pé direito conduz a uma redução da transmissão de baixo para cima, tal como seria de esperar, mas uma parte deste aumento é devido à correcção do volume do espaço receptor, pelo facto de se estar também a aumentar o pé direito do compartimento receptor (neste estudo, existe simetria em todos os casos analisados). Por exemplo, no aumento do pé direito de 3 para 4 m a redução no valor de  $L'_{nT,w}$  é próxima de 2 dB, sendo cerca de 1 dB devido à correcção do volume. Ou seja, o aumento do percurso da transmissão marginal em 1 m corresponde aproximadamente a uma diminuição no valor de  $L'_{nT,w}$  próxima de 1 dB (em média verifica-se uma variação no valor de  $L'_{nT,w}$  próxima de 1 dB/m). Em edifícios habitacionais ou mistos correntes, onde o pé direito se situa normalmente entre os 2,5 m e os 3 m, no interior dos fogos, e entre 3 a 3,5 m, nas zonas destinadas a comércio (se existirem), esta contribuição da variação do pé direito acaba por não ser muito relevante. Refira-se, no entanto, que este cálculo da transmissão de ruídos de percussão de baixo para cima é normalmente importante na separação entre zonas de comércio e/ou serviços localizadas sob zonas de habitação e o interior destas zonas (nestes casos a ocupação sensível situa-se sobre o espaço emissor e o requisito regulamentar a cumprir é substancialmente mais exigente que o exigido para a separação entre fogos).

## 6 Conclusões

De acordo com o exposto anteriormente, é possível concluir que a diferença entre a componente marginal do nível de percussão padronizado, de cima para baixo (descendente), e o nível de percussão padronizado ( $L'_{nT}$ ), de baixo para cima (ascendente), se aproxima de uma recta, e em termos médios, essa recta segue aproximadamente o traçado  $9\text{Log}(f/100)$ . Nestas condições, e como alternativa à metodologia simplificada apresentada na Secção 2 deste estudo, em especial para situações em que se pretenda um maior detalhe, com o cálculo em frequência, em vez da determinação apenas do valor único  $L'_{nT,w}$ , a transmissão de sons de percussão ascendente pode ser efectuada a partir do cálculo da transmissão marginal descendente, através do modelo detalhado indicado na norma EN 12354-2 (recorrendo eventualmente a um programa de cálculo automático), ao qual é subtraído o valor dado por  $-1+10\text{Log}(f/100)$ , em cada banda de frequência. Determinada a curva  $L'_{nT}$ , da transmissão ascendente, sem “tratamento acústico” de piso, poderá ser obtida a correspondente curva final  $L'_{nT}$  prevista com a aplicação de um pavimento flutuante ou de um revestimento de piso flexível, através da subtracção dos valores de  $\Delta L$  correspondentes a essa solução (obtidos em laboratório e/ou indicados pelo fabricante).

Refira-se, no entanto, que este estudo deve ser encarado ainda como uma primeira abordagem, devendo ser aprofundado, estendendo-se a outras espessuras de lajes, quer maciças, quer especialmente a lajes aligeiradas, e incluir a comparação com resultados de medições acústicas *in situ*. Convém, no entanto realçar, e como ficou demonstrado em anterior estudo [5], que é frequente obter resultados de  $L'_{nT,w}$  *in situ* significativamente diferentes para situações aparentemente análogas, não sendo, desta forma possível, chegar a um modelo de previsão que conduza sempre a resultados próximos dos reais.

## Referências

- [1] EN ISO 140-7: 1998. Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors.
- [2] EN ISO 717-2: 1996. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation.
- [3] EN 12354-2: 2000. Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms.
- [4] PORTUGAL. Leis, Decretos. Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, *aprovado pelo Dec. Lei n.º 129/2002 de 11 de Maio, com a nova redacção dada pelo Dec. Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho*.
- [5] Mateus, D.; Santos, P. Proposta de Metodologia Simplificada para Previsão da Transmissão Marginal Inversa de Sons de Percussão. *V Congresso Iberoamericano de Acústica*, Santiago de Chile, 25-28 Outubro 2006, paper ID: A061 /pp. 1-10.
- [6] CSTB *Modelo de previsão ACOUBAT* – Programa de cálculo desenvolvido no Centre Scientifique e Technique du Bâtiment (CSTB), Paris, V3.1, 1998-2001.
- [7] Patrício, J. Viçoso. *Acústica nos Edifícios*, LNEC, Lisboa, 2004.
- [8] Sarradj, E. *Software FreeSEA v0.91*, 2000.