

INFLUENCIA DO ALARGAMENTO DA GAMA DE FREQUÊNCIAS NA DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE ISOLAMENTO SONORO E NA RESPECTIVA INCERTEZA

PACS: 43.15.+s,43.55.Rg

Diogo M. R. Mateus; Julieta M. P. António
Departamento de Engenharia Civil, FCT da Universidade de Coimbra
Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal
Tel. +351-239797196
Fax +351-239797190
diogo@dec.uc.pt ; julieta@dec.uc.pt

ABSTRACT

Sound insulation descriptors have traditionally been calculated from the sound insulation measured in 1/3 octave bands, between 100Hz and 3150Hz. During the last years the technical committee ISO/TC 43/SC 2 made efforts to develop standards to calculate sound insulation indices in 1/3 octave bands between 50Hz and 5000Hz. In order to contribute to this discussion numerous measurements of sound insulation have been performed in situ, from which the influence of including low frequency bands in the calculation of sound insulation descriptors and in the associated uncertainty has been assessed.

RESUMO

Os índices de isolamento têm sido tradicionalmente calculados a partir do isolamento sonoro, medido em bandas de 1/3 de oitava, entre 100Hz e 3150Hz. Nos últimos anos, a ISO/TC 43/SC 2, trabalhou no sentido de desenvolver normas para o cálculo dos índices de isolamento em bandas de 1/3 de oitava, entre os 50Hz e os 5000Hz. No sentido de contribuir para a discussão desse tema, foram realizadas inúmeras medições de isolamento sonoro *in situ*, a partir das quais se avaliou a influência da inclusão de bandas de baixas frequências no cálculo dos índices de isolamento sonoro e da incerteza associada.

1. INTRODUÇÃO

A regulamentação existente em vigor em Portugal, no que respeita às condições acústicas, é apresentada no Regulamento Geral do Ruído (RGR), aprovado pelo Decreto Lei nº 9/2007. Este regulamento define de uma forma global uma política de prevenção e combate ao ruído, tendo em vista a salvaguarda da saúde e o bem-estar das populações. No que se refere aos requisitos técnico-funcionais dos edifícios, encontra-se atualmente em vigor o Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE, aprovado pelo Dec. Lei nº 129/2002 de 11 de Maio, com a nova redação dada pelo Dec. Lei nº 96/2008 de 9 de Junho).

Com vista a averiguar o cumprimento do RRAE [1] são efetuadas medições acústicas, geralmente em bandas de terços de oitava, entre os 100 Hz e os 3150 Hz. A partir destas

medições são determinados os índices de isolamento, através normas ISO 717-1 [2] e ISO 717-2 [3], que são comparados com os valores dos requisitos legais em vigor.

Nos últimos anos, a ISO/TC 43/SC 2, trabalhou no sentido de desenvolver normas para o cálculo dos índices de isolamento em bandas de 1/3 de oitava, entre os 50 Hz e os 5000 Hz. A questão da integração de bandas de baixa frequência, no cálculo dos índices de isolamento, não merecia o consenso de todos os investigadores, tendo dado origem a alguns trabalhos de investigação sobre as consequências desta adoção. Entretanto, as normas que estavam em desenvolvimento foram eliminadas. Contudo, e sobretudo para elementos de compartimentação leves em edifícios, com forte tradição em muitos países e em crescimento acentuado em Portugal, a contribuição das baixas frequências pode ser muito relevante, em particular no isolamento a sons aéreos [4]. Deste modo, pretende-se com o presente trabalho avaliar a influência da inclusão de bandas de baixa frequência no valor dos índices de isolamento e na respetiva incerteza associada ao ensaio. A primeira parte do trabalho é baseada num conjunto alargado de ensaios de medições *in situ*, cujos resultados principais já foram apresentados em comunicação anterior, no Tecniacústica 2013 [5], e que agora se explora mais a vertente das incertezas associadas a esses ensaios.

O referido conjunto de resultados de ensaios reportam-se a medições de isolamento de sons aéreos e de sons de percussão. Para o isolamento a sons aéreos, selecionaram-se situações em que o elemento de separação direto é parede ou pavimento. No caso das medições de isolamento sonoro a sons de percussão, selecionaram-se situações de transmissão lateral, descendente e ascendente. Para o efeito, serão apresentados gráficos, por grupos de elementos construtivos de separação, onde se compara o valor do índice regulamentar atual, com os valores do índice regulamentar mais o fator de adaptação calculado a partir dos 100 Hz e do índice mais o fator de adaptação calculado a partir dos 50 Hz. Os descritores (índices de isolamento constituídos por um valor único) considerados foram os seguintes: $D_{nT,w}$, $D_{nT,w} + C$, $D_{nT,w} + C_{50-5000}$, $D_{nT,w} + C_{tr}$, $D_{nT,w} + C_{tr_{50-5000}}$, no caso de isolamento a sons aéreos; e de $L'_{nT,w}$; $L'_{nT,w} + CI$, $L'_{nT,w} + CI_{50-2500}$, no caso da transmissão de sons de percussão. A incerteza dos ensaios foi determinada para os anteriores descritores que incluem os termos de adaptação ($D_{nT,w} + C$, $D_{nT,w} + C_{50-5000}$, $D_{nT,w} + C_{tr}$, $D_{nT,w} + C_{tr_{50-5000}}$, $L'_{nT,w} + CI$, $L'_{nT,w} + CI_{50-2500}$).

2. METODOLOGIA

2.1 Dados de medição e determinação dos índices de isolamento

Os valores dos índices de isolamento que serão apresentados no ponto seguinte resultam de um conjunto alargado de medições *in situ*. Os resultados são agrupados em dois grandes grupos: um relativo a isolamento a sons aéreos, organizado em função do elemento construtivo de separação direta,; e outro de transmissão de sons de percussão, organizado em função do elemento percutido e do caminho de transmissão. A constituição exata, em termos de espessuras não é conhecida, sabendo-se apenas quais são os tipos de elementos/revestimentos. Nas Tabelas 1 e 2 descrevem-se os vários casos analisados.

As medições de isolamento a sons aéreos foram realizadas segundo a anterior norma NP EN ISO 140-4, que correspondia à norma em vigor aquando da realização dos ensaios (anos 2011 a 2013). Entretanto esta norma já foi anulada, encontrando-se atualmente em vigor a norma NP EN ISO 16283-1:2014. Nas medições de isolamento a sons de percussão foi utilizada como referência a norma NP EN ISO 140-7, que se encontra ainda em vigor. Os índices de isolamento e respetivos termos de adaptação foram obtidos através do procedimento indicado nas normas NP EN ISO 717-1 e NP EN ISO 717-2.

Tabela 1. Tipos de elementos de separação direta (pavimentos ou paredes) nos ensaios de isolamento a sons aéreos

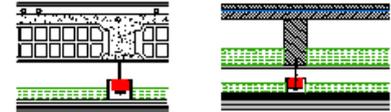
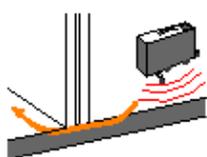
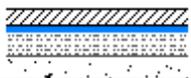
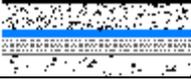
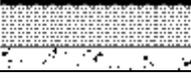
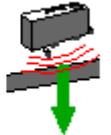
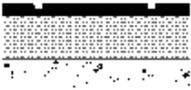
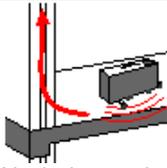
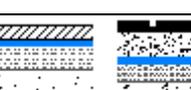
Grupo	Tipo de elemento de separação direto	Nº do ensaio	Esquema da solução
I	Lajes em betão com tetos falsos ou pavimentos aligeirados multicamadas	1-5	
II	Lajes correntes em betão armado	6-10	
III	Paredes de alvenaria pesadas (com 2 a 4 panos) de elevado desempenho (sem continuidade dos elementos marginais)	11-20	
IV	Paredes correntes de alvenaria dupla	21-29	
V	Paredes correntes de alvenaria simples	30-34	
VI	Divisórias leves à base de gesso cartonado	35-40	

Tabela 2. Tipos de pavimentos percutidos, para diferentes caminhos de transmissão, nos ensaios de isolamento a sons de percussão

Grupo	Tipo de elemento de separação direto	Direção da transmissão sonora	Nº do ensaio	Esquema da solução
VII	Lajes em betão armado revestidas com pavimentos flutuantes	 Horizontal	41-48	
VIII	Lajes em betão armado com revestimento cerâmico sobre betonilha flutuante		49-59	
IX	Lajes em betão armado e com revestimento cerâmico rigidamente ligado		60-63	
X	Lajes em betão armado com pavimento flutuante em madeira ou com betonilha flutuante e revestimento cerâmico	 Vertical descendente	64-71	
XI	Lajes em betão armado com revestimento cerâmico rigidamente ligado		72-75	
XII	Lajes em betão armado com revestimento cerâmico rigidamente ligado	 Vertical ascendente	76-80	
XIII	Lajes em betão armado com pavimento flutuante em madeira ou com betonilha flutuante e revestimento cerâmico		81-84	

2.2 Cálculo da incerteza

Para o cálculo da incerteza foram consideradas as seguintes fontes de incerteza: a dispersão de resultados, de acordo com o desvio padrão e número de repetições; a incerteza do sonómetro; e a incerteza do arredondamento. Numa primeira fase foram determinadas as

incertezas nos parâmetros D_{nT} e L'_{nT} , para cada banda de frequência de 1/3 de oitava, seguindo o procedimento indicado no Guia RELACRE 22 [6]. Posteriormente, foi determinada a incerteza global do ensaio para o valor único correspondente ao índice de isolamento somado do termo de adaptação.

No caso do isolamento a sons aéreos foi considerada a “correlação positiva” [7], acrescentando a incerteza relativa ao arredondamento final no valor único. Considerando um fator de convergência com 95% de confiança igual a 1,96, a incerteza expandida para o valor único X ($D_{nT,w} + C$, $D_{nT,w} + C_{50-5000}$, $D_{nT,w} + Ctr$ ou $D_{nT,w} + Ctr_{50-5000}$), é dada por:

$$\varepsilon(X) = 1,96 \times \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{10^{(L_i - D_{nT,i})/10}}{\sum_i 10^{(L_i - D_{nT,i})/10}} \right) u(D_{nT,i}) \right]^2 + u^2(rg)} \quad (1)$$

onde i é o número da banda de 1/3 de oitava, L é o nível do espectro de referência (ruído rosa ou ruído de tráfego urbano), D_{nT} é a curva de isolamento sonoro padronizado a sons de condução aérea e $u(rg)$ é o valor de incerteza no arredondamento à unidade (0,3 dB).

Para a determinação da incerteza nos ensaios de isolamento a sons de percussão foi seguido um procedimento semelhante, com a determinação da incerteza por banda de frequência de 1/3 de oitava para o parâmetro L'_{nT} , e posterior cálculo da incerteza global associada ao valor único Y , que corresponde a $L'_{nT,w} + CI$ ou $L'_{nT,w} + CI_{50-2500}$, através da seguinte expressão:

$$\varepsilon(Y) = 1,96 \times \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{10^{(-15 + L'_{nT,i})/10}}{\sum_i 10^{(-15 + L'_{nT,i})/10}} \right) u(L'_{nT,i}) \right]^2 + u^2(rg)} \quad (2)$$

onde i é o número da banda de 1/3 de oitava, L'_{nT} é a curva de isolamento sonoro padronizado a sons de percussão e $u(rg)$ é o valor de incerteza no arredondamento (0,3 dB).

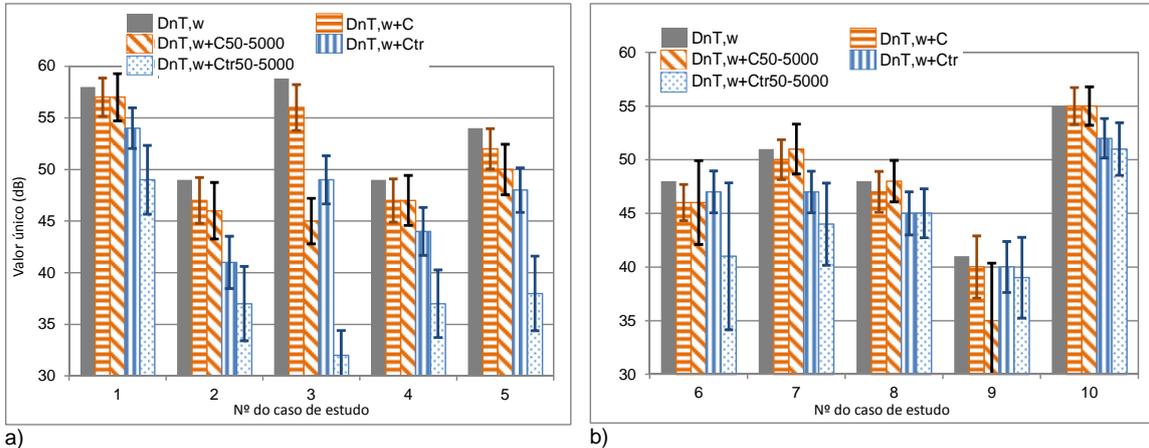
3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 Isolamento a Sons Aéreos

Na Figura 1 apresentam-se os resultados de isolamento a sons aéreos, para os cinco descritores considerados, e o valor previsto para a incerteza, representado por “barras de erro”, para os quatro descritores que incluem os termos de adaptação, para o grupo das lajes em betão com tetos falsos ou pavimentos aligeirados multicamadas (ensaos 1 a 5) e para o grupo das lajes correntes em betão armado (ensaos 6 a 10). De uma forma geral, a inclusão dos termos de adaptação conduz a uma redução no valor único de isolamento, em particular quando se considera o termo de adaptação obtido a partir do espectro de ruído de tráfego urbano, quer na situação sem inclusão da gama de baixas frequência (Ctr), quer sobretudo quando se inclui as baixas frequências ($Ctr_{50-5000}$). Tal como seria de esperar a penalização decorrente da inclusão das baixas frequências é mais penalizante no grupo das lajes com tetos falsos e dos pavimentos aligeirados com multicamadas (com maior índice $D_{nT,w}$, face à massa superficial desse pavimento). Verifica-se ainda um aumento do valor da incerteza com a inclusão das baixas frequências, em particular para estes últimos casos, com valores de $Ctr_{50-5000}$ mais penalizantes.

Na Figura 2 apresentam-se os resultados de isolamento a sons aéreos para os elementos do grupo III, correspondente às paredes de alvenaria pesadas de elevado desempenho. Na maior parte dos exemplos verifica-se que os valores apresentados são mais baixos quando se inclui a

contribuição das bandas de baixa frequência, em particular quando se trata da transmissão de ruído do tipo “tráfego” (exceto nos casos 12 e 16). Também se verifica um aumento da incerteza, tendencialmente acentuado no caso do espectro de ruído de tráfego, quando se inclui o alargamento às baixas frequências.



a) b)
 Figura 1 – Índices de isolamento a sons aéreos e valores de incerteza obtidos entre compartimentos separados por lajes: a) do grupo I; b) do grupo II.

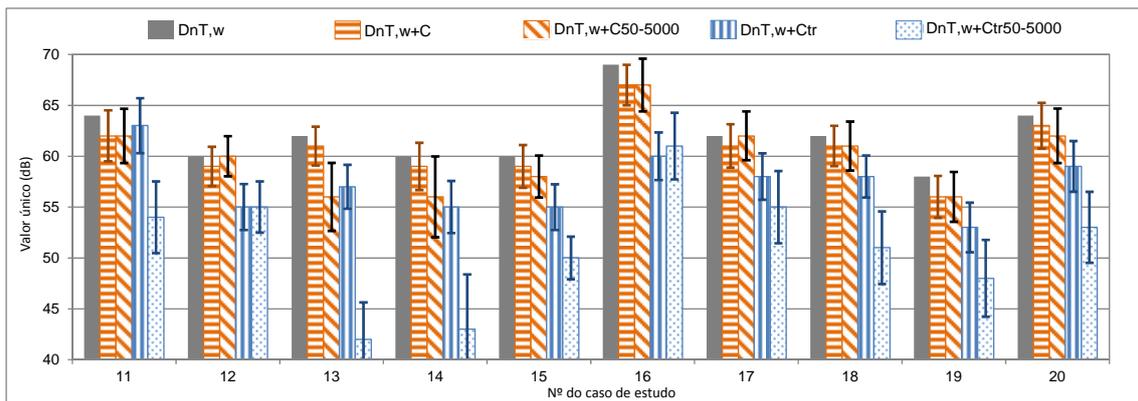


Figura 2 – Índices de isolamento a sons aéreos e valores de incerteza obtidos entre compartimentos separados por paredes de alvenaria pesadas (grupo III).

As Figuras 3 e 4a contêm o mesmo tipo de resultados respetivamente para os elementos dos grupos IV e V (paredes correntes de alvenaria dupla e alvenaria simples). Nestes casos, a inclusão das baixas frequências tem também maior influência no que respeita à transmissão de ruído do tipo “tráfego”, mas ainda assim menos relevante que nos grupos I e III.

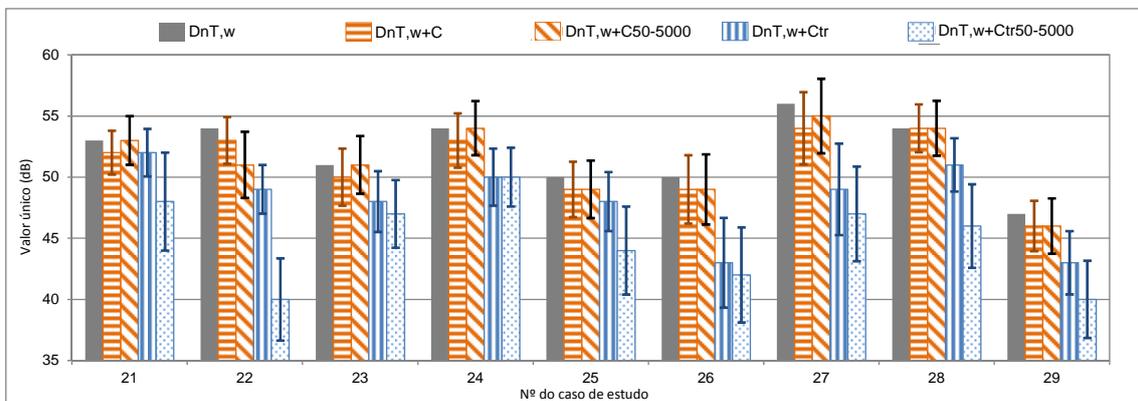


Figura 3 – Índices de isolamento a sons aéreos e valores de incerteza obtidos entre compartimentos separados por paredes de alvenaria duplas correntes (grupo IV).

Na Figura 4b são apresentados os resultados de isolamento a sons aéreos e de incerteza para o grupo VI (divisórias leves). Neste caso, verifica-se uma tendência semelhante aos grupos I e III. Para este caso e anteriores é apresentado na Tabela 3 um resumo dos resultados médios.

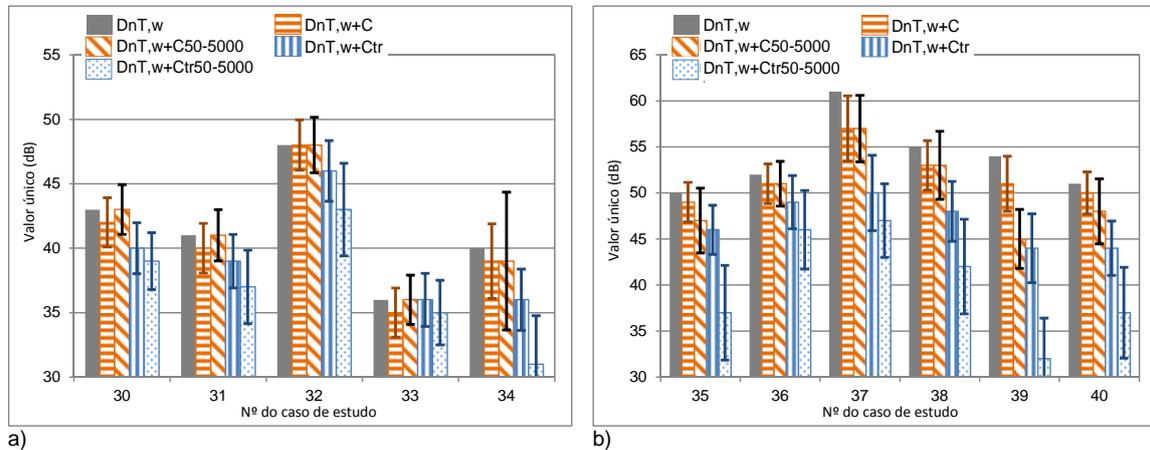


Figura 4 – Índices de isolamento a sons aéreos e valores de incerteza obtidos entre compartimentos separados por paredes: a) do grupo V (simples de alvenaria); b) grupo VI (aligeiradas).

Tabela 3. Valores médios dos descritores de isolamento a sons aéreos e da respetiva incerteza

Nº do caso de estudo	Média		Incerteza		Média		Incerteza	
	$D_{nT,w} + C$	$D_{nT,w} + C_{50-5000}$	$D_{nT,w} + C$	$D_{nT,w} + C_{50-5000}$	$D_{nT,w} + Ctr$	$D_{nT,w} + Ctr_{50-5000}$	$D_{nT,w} + Ctr$	$D_{nT,w} + Ctr_{50-5000}$
1-5	51.8	49.0	2.07	2.43	47.2	38.6	2.26	3.25
6-10	47.6	47.0	2.02	3.06	46.2	44.0	2.03	3.83
11-20	60.8	60.0	2.12	2.66	57.3	51.2	2.35	3.48
21-29	51.1	51.3	2.25	2.45	48.1	44.9	2.60	3.39
30-34	40.8	41.4	2.12	2.67	39.4	37.0	2.17	2.98
35-40	51.8	50.2	2.64	3.33	46.8	40.2	3.26	4.65

3.2 Isolamento a Sons de Percussão

Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos para os casos de estudo incluídos no grupo VII (entre compartimentos do mesmo piso, com lajes revestidas com pavimentos flutuantes). Neste caso, a inclusão das baixas frequências não conduz a penalização nos resultados nem agrava a incerteza. A mesma conclusão pode ser estabelecida para os exemplos apresentados na Figura 6, referentes ao grupo VIII (compartimentos do mesmo piso e betonilha flutuante).

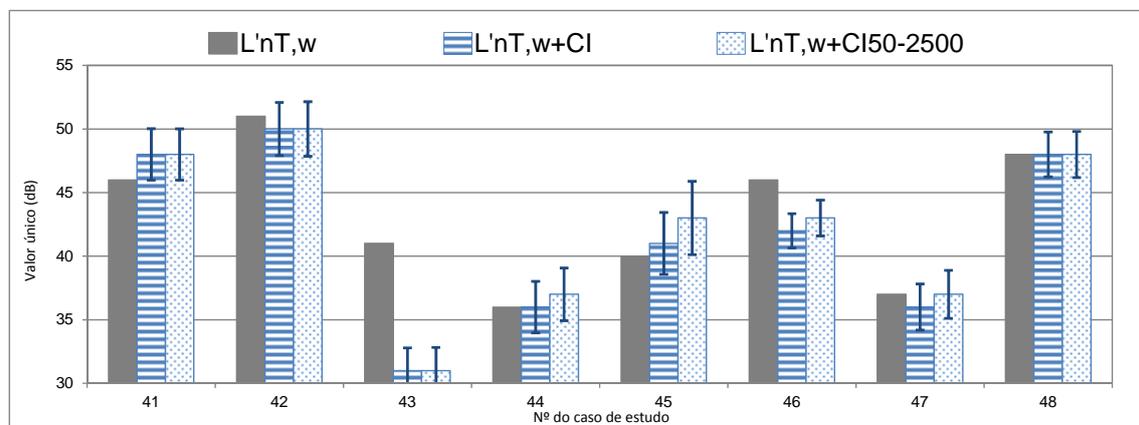


Figura 5 – Índices do nível sonoro de percussão padronizado e valores de incerteza obtidos entre compartimentos do mesmo piso, com lajes de piso em betão armado e pavimento flutuante.

Na Figura 7 são apresentados os resultados obtidos quando a laje de piso é em betão armado com revestimento cerâmico rigidamente ligado e a transmissão é lateral (grupo IX - Figura 7a)) e descendente (grupo XI - Figura 7b)). Nestes casos, de fraco desempenho, os termos de

adaptação são sempre muito negativos (entre -6 e -13 dB). Contudo, a inclusão das baixas frequências não conduz a alterações nos resultados finais nem na incerteza.

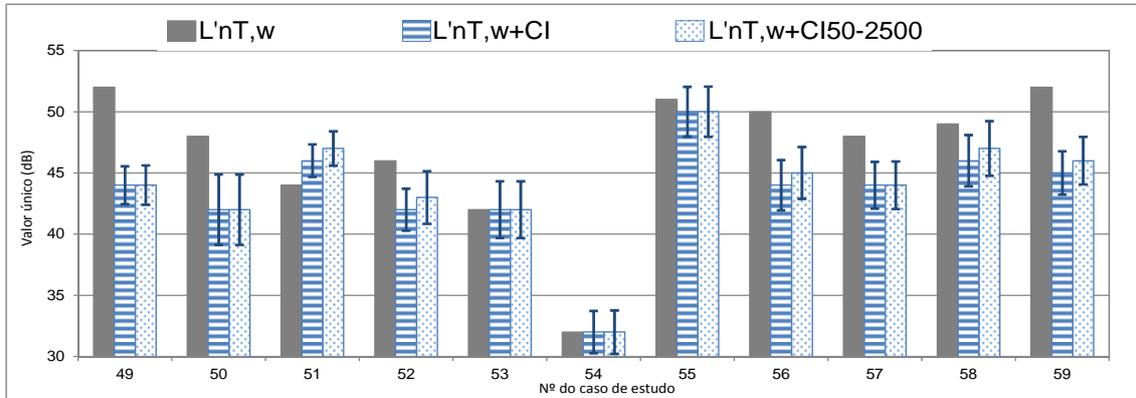


Figura 6 – Índices do nível sonoro de percussão padronizado e valores de incerteza, obtidos entre compartimentos do mesmo piso, com lajes de piso em betão armado e betonilha flutuante.

A Figura 8 apresenta os casos de estudo do grupo X (transmissão descendente, com pavimento flutuante ou betonilha flutuante). Na Figura 9 apresentam-se os resultados obtidos para os casos de estudo dos grupos XII e XIII, correspondentes à transmissão ascendente com lajes de piso em betão armado: a) com revestimento cerâmico rigidamente ligado; b) com e pavimento flutuante em madeira ou de betonilha flutuante. Nestes casos a inclusão de baixas frequências também não é relevante.

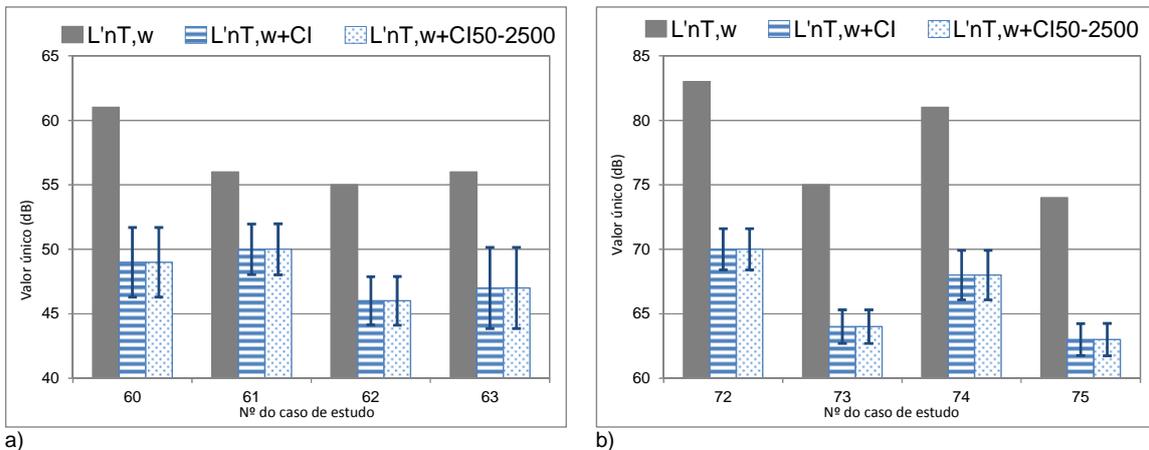


Figura 7 – Índices do nível sonoro de percussão padronizado e valores de incerteza, obtidos com laje de piso em betão armado e revestimento rígido, na transmissão: a) lateral (G. IX); b) descendente (G. XI).

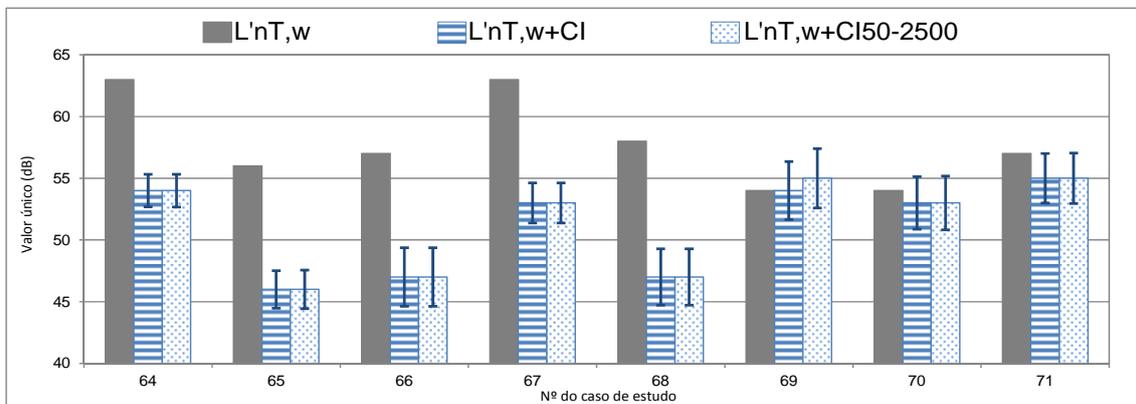


Figura 8 – Índices do nível sonoro de percussão padronizado e valores de incerteza, obtidos na transmissão descendente, com lajes de piso e pavimento flutuante ou de betonilha flutuante (grupo X).

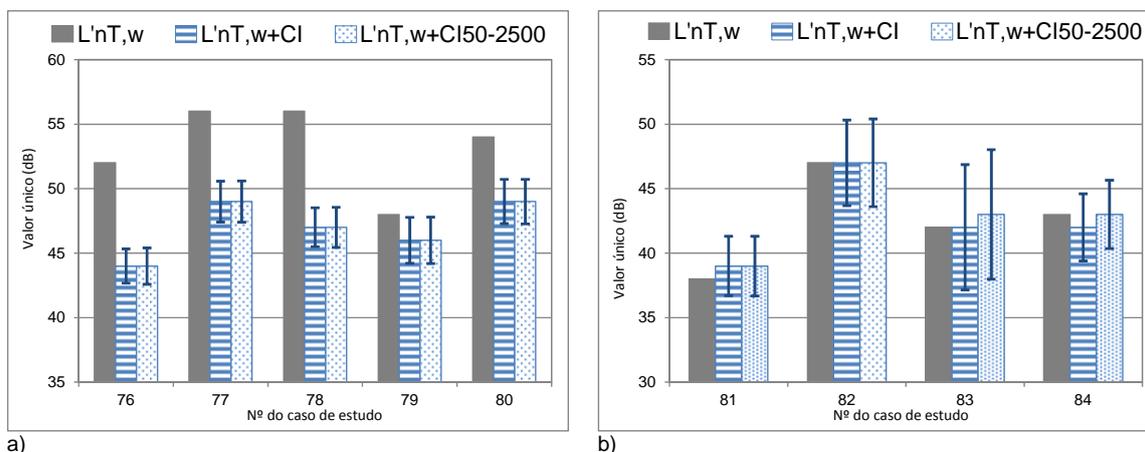


Figura 9 – Índices do nível sonoro de percussão padronizado e valores de incerteza, obtidos na transmissão ascendente: a) com laje e revestimento rígido; b) com pavimento ou betonilha flutuantes.

4. CONCLUSÕES

Dos vários exemplos analisados, e de uma forma geral, a inclusão de baixas frequências (abaixo de 100Hz) conduz a um agravamento no valor do índice somado ao termo de adaptação, no caso do isolamento a sons aéreos, em particular quando o espectro de ruído é do tipo “tráfego”. De uma forma geral, para situações de elementos de separação pesados, o valor médio de C aproxima-se de -1 dB, passando para cerca de -2 dB, com inclusão das baixas frequências. No caso do termo $C_{tr_{50-5000}}$, para elementos pesados (sem reforços leves), o valor situa-se na maioria das situações entre -3 e -5, e sofre um agravamento, em média, para as situações avaliadas, da ordem de 4 dB. Para elementos leves, para além deste termo ser tendencialmente ainda mais penalizante, sofre um agravamento ainda maior com a inclusão das baixas frequências. Em relação à incerteza, de uma forma geral, verifica-se um aumento também significativo com a inclusão das baixas frequências quando se considera o espectro de ruído de “tráfego”, em particular para os elementos de separação leves (entre 4 a 5 dB).

Nos exemplos relativos aos sons de percussão, verificou-se que a introdução das medições nas baixas frequências praticamente não alterava os índices nem as incertezas associadas. Refira-se que as soluções analisadas dizem respeito sobretudo a pavimentos pesados. No caso de pavimentos leves, a importância das baixas frequências seria mais perceptível, o que tornaria mais relevante a sua inclusão nos cálculos de índices de isolamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05 com a nova redacção dada pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06.
- [2] ISO 717-1, Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation (1996 + AM1:2006).
- [3] ISO 717-2, Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation (1996 + AM1:2006).
- [4] Julieta António and Diogo Mateus, Influence of low frequency bands on airborne and impact sound insulation single numbers for typical Portuguese buildings, Applied Acoustics, Vol. 89 (2015) Pages 141-151
- [5] Julieta António e Diogo Mateus, Influência da inclusão de medições em baixa frequência na determinação dos índices de isolamento sonoro, TECNIACUSTICA2013, AED2003, p. 789-796, Valladolid, 02 a 04 de Outubro 2013
- [6] RELACRE, Guia RELACRE 22 – Cálculo de Incertezas – Acústica, ISBN: 978-972-8574-14-7, abril 2012.
- [7] Mahn J, Pearse J. The uncertainty of the proposed single number ratings for airborne sound insulation. Journal of Building Acoustics 2012;19:145-72.