

AValiação Numérica da Atenuação Sonora Proporcionalada por Estruturas Periódicas

Mário Miguel Martins¹, Luís Cortesão Godinho², Luís Picado Santos³

¹I.P.C., Instituto Superior de Engenharia de Coimbra; CIEC - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

mariomm@isec.pt

² CICC, FCTUC, Departamento de Engenharia Civil

lgodinho@dec.uc.pt

³ DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

picado.santos@civil.ist.utl.pt

Resumo

A utilização de estruturas periódicas com o objectivo de atenuar o ruído tem vindo a ser estudada por diversos investigadores, procurando compreender a sua eficiência e verificar até que ponto poderão constituir uma solução interessante na mitigação de diferentes fontes de ruído. O caso específico dos cristais sónicos, constituídos por diferentes tipos de materiais, tem merecido especial atenção, procurando-se estudar o efeito de diferentes variáveis no seu desempenho acústico.

No presente trabalho, procura-se contribuir para um melhor conhecimento do desempenho destas estruturas, implementando-se uma estratégia numérica baseada no método das soluções fundamentais para modelar o comportamento acústico de cristais sónicos bidimensionais. A formulação MFS aqui proposta é aplicada para avaliar o comportamento de cristais constituídos por elementos circulares, estudando o efeito da variabilidade de dimensões e de espaçamentos entre elementos do cristal na atenuação sonora global proporcionada pela estrutura.

Palavras-chave: ruído rodoviário, cristais sónicos, modelação numérica.

Abstract

The use of periodic structures in order to mitigate noise has been studied by many researchers seeking to understand its efficiency and see to what extent they can provide an interesting solution in mitigating noise from different sources. The specific case of sonic crystals consisting of different materials, has received special attention for studying the effect of different variables on its acoustic performance.

The present work seeks to contribute to a better understanding of the performance of these structures, implementing a strategy based on the numerical method of fundamental solutions to model the acoustic behavior of two-dimensional sonic crystals. The MFS formulation proposed here is applied to evaluate the behavior of crystals composed of circular elements, studying the effect of varying dimensions and spacing of the crystal elements in the sound attenuation provided by the global structure.

Keywords: traffic noise, sonic crystals, numerical methods.

1 Introdução

Quase todas as actividades humanas, ou os diferentes equipamentos tecnológicos a elas associados, irão gerar algum tipo de “Som”. Por vezes este pode ser a finalidade dessas actividades (como a música) sendo então normalmente considerado agradável. Noutros casos, pelos benefícios inerentes que certas actividades proporcionam (como guiar um carro, cortar a relva ou ouvir um rádio), se o nível sonoro não exceder um dado limite, os sons associados poderão ser vistos como úteis, ou pelo menos toleráveis. Contudo se tais sons excederem limites aceitáveis ou não trouxerem qualquer benefício a quem está exposto a eles, sendo então indesejáveis, perturbadores ou mesmo um risco para a saúde, eles serão considerados como “Ruído” [1].

Neste contexto, os efeitos do ruído sobre um número crescente de pessoas afectadas, não apenas ao nível do seu bem estar, produtividade mas também da sua saúde, vêm sendo estudados repetidamente pela comunidade científica, mas são também cada vez mais notórios para população em geral.

1.1 Efeitos do ruído de tráfego e sua mitigação

Entre os diferentes tipos de ruído ambiente, em relação ao qual a legislação nacional e europeia em vigor estipulam objectivos quanto à exposição a que as populações devem ser sujeitas, o ruído de tráfego, com especial incidência sobre o de origem rodoviária, assume uma preponderância clara.

A título de exemplo, a Organização Mundial de Saúde [2] estima que, considerando os diferentes impactos associados ao ruído ambiente, o prejuízo expresso em termos de “Anos de Vida Ajustados por Incapacidade” (*Disability-Adjusted Life Year* - *DALY*) perfaça um valor entre 1,0 e $1,6 \times 10^6$, ou seja, pelo menos um milhão de anos de vida saudáveis são perdidos anualmente como consequência, na sua maioria, do ruído de tráfego.

Um outro estudo, sobre a situação na Holanda [3] refere que o prejuízo anual (no ano 2000) devido ao ruído de tráfego era de aproximadamente $40 \text{ DALY} \times 1000$ habitantes, sendo que tal valor, quando comparado com o total decorrente de acidentes de tráfego, já correspondia a cerca de metade deste. Por outro lado, no mesmo estudo, refere-se que a tendência do efeito do ruído de tráfego é de crescimento, enquanto a relativa a acidentes de tráfego é de diminuição.

Não restam portanto dúvidas acerca da necessidade de investir em intervenções que possam contrariar aqueles efeitos nefastos deste tipo de ruído. Genericamente pode-se distinguir entre intervenções a nível da geração, da propagação e da recepção do ruído. No caso específico do ruído rodoviário isso traduz-se na prática por intervir nos veículos/pneus/pavimento, no espaço envolvente às vias de tráfego ou sobre as qualidades das fachadas dos edificios na vizinhança daquelas vias.

Enquadrando-se no segundo dos tipos de intervenções atrás referidas o uso de barreiras acústicas tipicamente é considerado uma solução eficaz de redução dos níveis sonoros, entre 5 e 10 dB, mas cujo desempenho depende essencialmente da sua geometria bem como das características de absorção sonora da sua superfície.

Neste trabalho procura-se analisar uma abordagem diferente no uso deste tipo de barreiras, que consiste na utilização de um arranjo periódico de elementos cilíndricos verticais, dispostos com uma configuração geométrica tal que permita atenuar os níveis sonoros incidentes, com especial ênfase em determinadas frequências. Trata-se de uma solução a que se dá o nome de “cristais sónicos”.

1.2 Cristais sónicos

Os cristais sónicos são assim designados por analogia com as estruturas ordenadas dos materiais semicondutores, como por exemplo os cristais de silício, cuja característica de permitir a passagem de ondas com determinada energia e bloquear outras é transposta, nos cristais sónicos, na capacidade de impedir ou limitar a progressão de determinadas frequências sonoras. A forma das referidas estruturas

ordenadas corresponde a uma “grelha” constituída por um elemento base, que se repete, de forma regular, por uma, duas ou três dimensões.

É comumente considerado que as primeiras evidências de que era possível obter algum efeito de obstrução acústica, recorrendo a estruturas com arranjos periódicos, advieram fortuitamente de um elemento escultórico, nos jardins da *Fundación Juan March* em Madrid, constituído por um conjunto de tubos metálicos verticais, dispostos segundo uma malha rectangular. Um conjunto de medições, realizadas em 1995, colocando uma série de microfones junto dessa peça revelou claros efeitos de atenuação de certas bandas de frequências de sons, as quais eram função da direcção das ondas sonoras incidentes [4].

Desde então diferentes facetas do comportamento dos cristais sónicos vêm sendo estudadas, algumas das quais serão essencialmente teóricas, mas também possíveis aplicações práticas. Na primeira categoria podem-se citar aspectos como sejam a influência de chamados defeitos pontuais [5] ou da existência de guias de ondas, nos quais o som se propaga com reduzida atenuação [6]. Já no campo das utilizações práticas dos cristais sónicos, porventura aquela que se pode considerar mais promissora é precisamente o seu uso para efeitos de atenuação selectiva de sons, nomeadamente como barreiras acústicas rodoviárias [7].

A principal lógica por detrás desta hipótese prende-se com o facto destas estruturas periódicas apresentarem a já referida capacidade de atenuação de determinadas bandas de frequência de sons e pela circunstância de, no ruído de tráfego (em particular o rodoviário), poderem ser encontradas frequências preponderantes, pelo que, com um ajuste adequado de umas às outras, tais estruturas poderão constituir uma forma bastante eficaz de mitigação daquele ruído.

Tal aplicação apresenta algumas vantagens, quando comparadas com as barreiras acústicas convencionais, como seja o facto de não necessitar de fundações tão importantes como as destas últimas, atendendo à sua comparativamente pequena massa e, por ser uma estrutura “aberta”, à acção relativamente pequena do vento. Também o facto de se poder adaptar as suas capacidades de atenuação às condições específicas de determinado local, através de uma “afinação” adequada da configuração geométrica da estrutura periódica de elementos, será um benefício importante.

Do lado das desvantagens, deve-se referir que para conseguir um nível de atenuação semelhante ao das barreiras rígidas clássicas pode ser necessário uma estrutura com uma espessura significativa, sendo que uma possível solução poderá passar pela combinação de diferentes efeitos, como a dispersão múltipla, ressonâncias ou capacidade de absorção acústica no mesmo cristal sónico [8]. Existem, de resto, algumas experiências neste sentido, como por exemplo o uso de revestimentos porosos nos elementos cilíndricos individuais de cristais sónicos [9] ou ainda o uso de árvores dispostas segundo diferentes configurações geométricas periódicas, com o objectivo de conseguir atenuações acústicas ao ar livre [10].

Um aspecto que parece ser relativamente consensual, da análise da informação publicada disponível, é que estas estruturas periódicas proporcionam determinados níveis de atenuação acústica em função de dois diferentes mecanismos: a geometria da estrutura em si e ainda as propriedades acústicas dos elementos dispersores, como por exemplo a sua absorção sonora. O que também resulta evidente é que o estudo do efeito combinado daqueles dois aspectos, de modo a conseguir prever correctamente os resultados a nível de atenuação sonora, não é um procedimento trivial.

Deste modo, o presente trabalho pretende constituir uma contribuição para o desenvolvimento do estudo nesta área, apresentando-se de seguida a formulação teórica na qual se baseia a metodologia de análise numérica usada.

2 Modelo

No presente trabalho, adopta-se, para a realização de simulações numéricas, o Método das Soluções Fundamentais (MFS); trata-se de uma técnica baseada em colocação na fronteira, requerendo apenas a

definição de um conjunto de pontos sobre a fronteira do problema para estabelecer uma aproximação à sua solução. Com base nesses pontos, e na combinação linear de soluções fundamentais da equação diferencial que governa o problema, o método permite obter, de uma forma simples, uma aproximação da solução. O MFS requer, por isso, e tal como o método dos elementos de fronteira, o conhecimento de soluções fundamentais, as quais nem sempre são conhecidas para o tipo de problema em causa; a obtenção dessas soluções é matematicamente complexa, e torna-se extremamente difícil no caso de problemas não lineares, com fronteiras móveis ou com dependência temporal. Ainda assim, o MFS apresenta uma abordagem matemática bem mais simples que o método dos elementos de fronteira, uma vez que a sua formulação não requer a realização de nenhum tipo de integrações, analíticas ou numéricas, nem no domínio, nem na fronteira. Este método numérico foi já abordado na literatura científica por diversos autores. Destacam-se os trabalhos de Fairweather e Karageorghis [11], de Fairweather et al [12] ou de Golberg e Chen [13]. Importa, desde já, referir que, apesar da sua simplicidade, muitos dos trabalhos já publicados indicam que este método pode proporcionar o cálculo de soluções bastante rigorosas para diferentes tipos de problemas físicos, incluindo os que se relacionam com a área da acústica [14,15,16] e propagação de ondas [17].

Nos pontos seguintes, sintetizam-se os principais aspectos do método, quando aplicado à resolução de problemas acústicos no domínio da frequência.

2.1 Equação Governante

É usual considerar-se que a propagação do som num espaço bidimensional, no domínio da frequência, pode ser representada matematicamente pela equação de Helmholtz. Esta equação apresenta a forma habitual

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (1)$$

onde $\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2}$, p é a pressão acústica, $k = \omega/\alpha$, $\omega = 2\pi f$, f é a frequência e α a velocidade de propagação do som no meio acústico considerado.

2.2 Solução Fundamental

Para a equação diferencial (1), torna-se possível definir soluções analíticas que satisfazem a equação em determinadas condições. Uma dessas situações corresponde a um caso em que se considera um campo infinito, bidimensional, gerado por uma fonte sonora localizada em \mathbf{x}_0 de coordenadas (x_0, y_0) . Esta solução, designada por solução fundamental, permite definir os campos de pressões e de velocidades das partículas gerados pela fonte num qualquer ponto \mathbf{x} de coordenadas (x, y) como sendo

$$G^{2D}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, k) = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(kr) \quad (2)$$

$$H^{2D}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, k, \vec{n}) = \frac{k}{-4\rho\omega} H_1^{(2)}(kr) \frac{\partial r}{\partial \vec{n}}. \quad (3)$$

onde $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, e \vec{n} representa a direcção ao longo da qual se pretende determinar a velocidade das partículas.

2.3 Método das Soluções Fundamentais

No MFS, a solução de um dado problema é aproximada através da combinação linear de soluções fundamentais do problema em estudo. Para formular o método, considere-se um problema genérico governado pela equação (1), onde existe uma fronteira $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ (Figura 1) sujeita a condições de Dirichlet e de Neumann

$$p = p_K \text{ em } \Gamma_1 \quad (4)$$

$$-\frac{1}{i\rho\omega} \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} = v_K \text{ em } \Gamma_2 \quad (5)$$

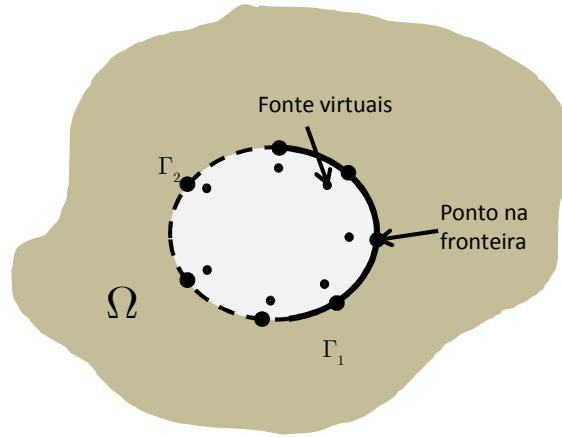


Figura 1 – Representação esquemática do problema a resolver.

Obter uma solução que respeite em simultâneo estas condições de fronteira e a equação (1) não é, no caso geral, trivial. Para esse efeito, considere-se um conjunto de NS fontes virtuais localizadas fora do domínio de análise, e assuma-se que o campo sonoro no ponto \mathbf{x} pode ser representado através de uma combinação linear dos efeitos dessas NS fontes, posicionadas em pontos \mathbf{x}_j , de modo a que

$$p(\mathbf{x}, k) = \sum_{j=1}^{NS} Q_j G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, k) \quad (6)$$

sendo Q_j um factor de amplitude de cada fonte virtual, inicialmente desconhecido.

Para o problema em estudo, e dada esta representação, defina-se um conjunto de NC pontos de colocação distribuídos sobre a fronteira (veja-se a Figura 1) Γ . Impondo as condições de fronteira pretendidas (equações (4) e (5)) em cada um dos NC pontos de colocação, podem definir-se dois conjuntos de equações como sendo

$$\sum_{j=1}^{NS} Q_j G(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j, k) = p_{K,i} \text{ para cada } \mathbf{x}_i \text{ em } \Gamma_1 \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{NS} Q_j H(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j, k, \vec{n}) = v_{K,i} \text{ para cada } \mathbf{x}_i \text{ em } \Gamma_2 \quad (8)$$

onde $p_{K,i}$ e $v_{K,i}$ são os valores da pressão sonora ou da velocidade a prescrever em cada ponto de colocação i .

Estabelecendo estas equações, um sistema de NC equações e NS incógnitas pode ser escrito, permitindo a determinação dos coeficientes de amplitude Q_j . Se $NS=NC$, então este sistema é linear, e a sua solução pode ser obtida usando técnicas correntes, como a eliminação de Gauss.

3 Estudo Numérico

Como se referiu anteriormente, os principais mecanismos através dos quais os cristais sónicos permitem obter determinados níveis de atenuação acústica são a geometria da sua estrutura periódica constituinte bem como as propriedades acústicas dos elementos dispersores individuais.

No presente estudo pretendeu-se analisar a influência de distintas configurações geométricas no uso de um cristal sónico como barreira acústica junto a um eixo rodoviário. Para o efeito utilizaram-se elementos dispersores constituídos cilindros verticais rígidos, colocados relativamente ao sentido longitudinal do eixo rodoviário, conforme se esquematiza na Figura 2.

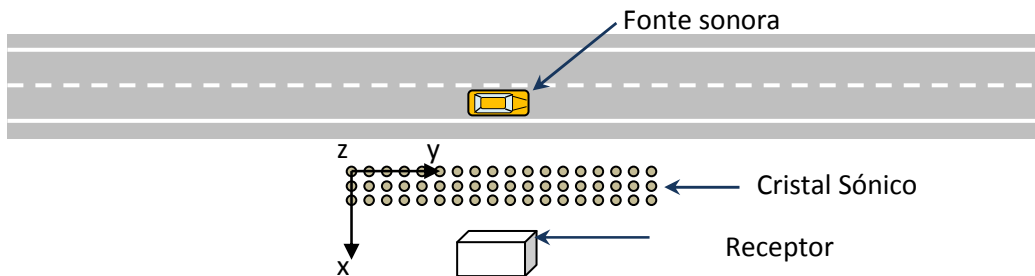


Figura 2 - Esquema genérico das situações analisadas

A análise realizada consistiu na consideração de que a situação tridimensional acima apresentada será estudada pelas respostas, no domínio da frequência, calculadas num plano horizontal, uma vez que segundo o eixo dos ZZ (vertical) se poderá considerar que a geometria do problema é constante. Para esse caso, o modelo MFS definido na secção anterior poderá ser aplicado para simular o campo de pressões em redor da estrutura do Cristal Sónico.

Procurando reproduzir uma situação real, onde o tráfego motorizado assumirá a função de fonte sonora, uma habitação próxima corresponderá ao receptor, entre estes será instalada uma barreira acústica materializada por um conjunto de cilindros verticais, formando um cristal sónico. Deste modo, em função da geometria usual de perfil transversal tipo de uma estrada, as posições da fonte e dos receptores, corresponderão a valores de $x = -6,5$ m e $x = 7,5$ m, relativamente ao sistema de eixos indicado na Figura 2. Segundo o eixo dos YY, as suas posições dependerão da extensão do cristal sónico segundo esse eixo, situando-se junto ao centro dessa dimensão.

As análises realizadas procuraram avaliar a influência da variação de diferentes parâmetros geométricos do cristal sónico nos valores nas atenuações, para duas configurações distintas da grelha periódica, características dos cristais sónicos, designadamente a quadrangular e a triangular, conforme se mostra na Figura 3.

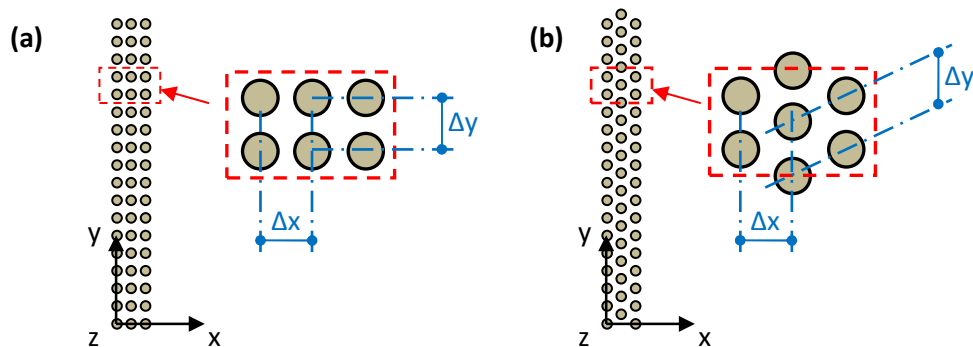


Figura 3 – Configurações quadrangular (a) e triangular (b) do cristal sónico.

Concretamente foram estudados os efeitos do número de cilindros, quer segundo o eixo dos XX bem como segundo o eixo dos YY, do diâmetro dos cilindros, do espaçamento entre os cilindros e ainda da variabilidade aleatória dos diâmetros dos cilindros.

Uma vez que se pretendem estudar as atenuações sonoras referentes a ruído de tráfego, atendendo a que este apresenta tipicamente uma curva de níveis sonoros com um máximo perto dos 1000 Hz, as análises efectuadas determinaram os valores daquelas atenuações correspondentes a cinco frequências próximas daquele máximo: 600, 800, 1000, 1200 e 1400 Hz.

3.1 Influência do número de cilindros

Neste ponto pretende-se estabelecer o número mínimo de cilindros, segundo o eixo dos YY, de modo a que fenómenos de difracção acústica, junto às extremidades do cristal sónico, deixem de ser observados. Relativamente a cada uma das duas configurações de grelha, já referidas, foram analisados os casos do cristal sónico ser constituído, segundo o eixo dos XX, por dois e por três cilindros. Assim, sendo N o número de cilindros segundo o eixo dos YY, teremos para cada uma das configurações os casos de $2 \times N$ cilindros e $3 \times N$ cilindros.

Em relação aos restantes parâmetros geométricos dos cristais sónicos que é necessário estabelecer, atendendo a que, como já foi dito, se trata de uma análise referente a ruído de tráfego, tais barreiras necessitam de ter extensões relativamente grandes e os elementos cilíndricos serem suficientemente robustos, pelo que se estabeleceram um diâmetro dos cilindros de 0,20 m e uma distância entre os centros de cilindros, quer segundo o eixo dos XX quer segundo o eixo dos YY (Δx e Δy), de 0,40 m.

Foram então avaliadas as atenuações sonoras, relativas a cada uma das cinco frequências já indicadas, tendo-se variado o número de cilindros em valores múltiplos de cinco, até ser possível detectar, nas várias frequências, uma estabilização de valores, denotando o fim da existência dos referidos fenómenos de difracção nas extremidades dos cristais sónicos. Os resultados são resumidos nas Tabelas 1 bem como nas Figuras 4 e 5.

Tabela 1 – Atenuações [dB], em função do número de cilindros.

N	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
2×N cilindros, para configuração quadrangular												
Freq. [Hz]	600	0,298	-0,339	0,111	-0,016	-0,342	-0,564	-0,827	-1,324	-1,929	-1,728	-1,688
	800	1,389	10,261	11,372	8,932	3,976	1,943	2,463	2,505	2,425	2,467	2,490
	1000	12,298	11,073	8,085	1,595	1,785	1,371	1,410	1,185	1,621	0,855	0,105
	1200	13,005	10,614	6,823	10,395	9,091	9,837	7,893	5,415	5,622	5,448	5,626
	1400	4,192	4,444	2,513	2,298	2,080	0,755	0,154	0,127	0,260	0,203	0,135
3×N cilindros, para configuração quadrangular												
Freq. [Hz]	600	0,240	0,228	-0,028	-0,529	-0,880	-0,985	-1,249	-1,784	-2,240	-2,001	-2,044
	800	1,662	12,211	14,659	9,438	4,115	2,804	2,991	3,107	3,081	3,107	3,112
	1000	9,965	10,029	9,468	1,825	2,171	1,710	1,728	1,385	1,946	1,489	0,911
	1200	12,433	11,115	4,919	7,474	5,271	5,737	5,200	4,292	4,390	4,388	4,478
	1400	4,376	6,521	4,239	3,875	2,765	-0,824	-1,106	-1,269	-1,261	-1,283	-1,305
2×N cilindros, para configuração triangular												
Freq. [Hz]	600	0,273	-0,420	0,088	-0,070	0,053	0,058	0,074	0,067	0,115	0,150	0,112
	800	0,171	3,753	3,119	3,391	3,406	3,473	3,357	3,406	3,450	3,450	3,412
	1000	4,974	5,690	4,391	5,688	4,906	4,473	4,167	3,785	4,124	3,986	3,456
	1200	5,481	4,549	5,006	4,525	4,389	4,464	3,973	3,884	3,583	3,714	3,720
	1400	6,512	5,406	4,768	3,850	3,263	0,956	0,399	0,308	0,488	0,505	0,524
3×N cilindros, para configuração triangular												
Freq. [Hz]	600	0,609	0,104	0,711	0,731	0,823	0,743	0,794	0,851	0,715	0,628	0,766
	800	-0,394	2,359	2,139	2,927	2,931	1,837	1,935	2,359	2,120	1,964	2,111
	1000	3,716	4,398	3,933	2,836	2,836	2,619	2,117	1,693	1,995	2,128	1,805
	1200	5,403	4,853	4,936	4,215	4,221	4,223	4,371	4,576	4,537	4,584	4,592
	1400	8,021	5,555	4,032	3,804	1,701	-1,169	-1,411	-1,321	-1,484	-1,540	-1,420

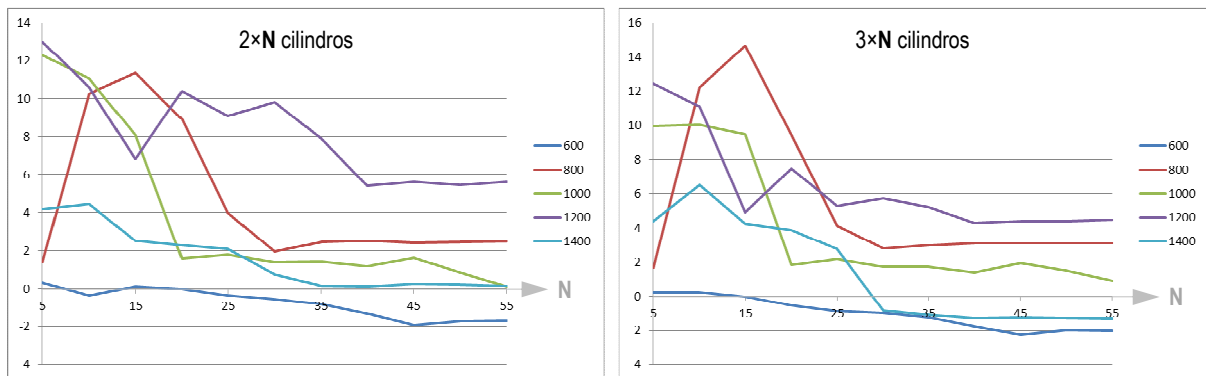


Figura 4 - Atenuações [dB], em função do número de cilindros (configuração quadrangular).

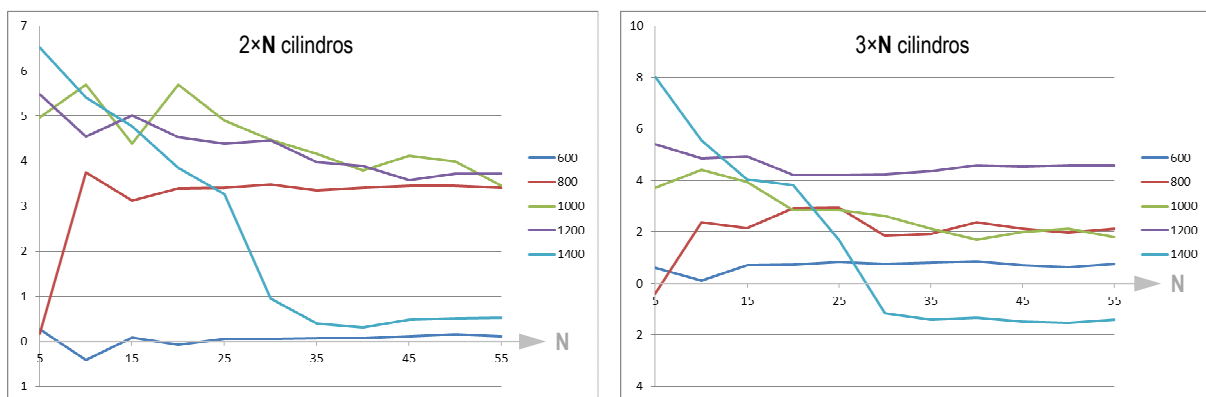


Figura 5 – Atenuações [dB], em função do número de cilindros (configuração triangular).

Da análise destes resultados fixaram-se os números mínimos de cilindros, segundo o eixo dos YY, para as diversas situações em estudo, nos seguintes valores:

- Configuração quadrangular: 2×N cilindros - 40 cilindros / 3×N cilindros - 40 cilindros
- Configuração triangular: 2×N cilindros - 35 cilindros / 3×N cilindros - 30 cilindros

3.2 Influência do diâmetro dos cilindros.

Para este caso, adoptando cristais sónicos com os números de cilindros determinados no ponto anterior, e mantendo a distância entre os centros de cilindros, quer segundo o eixo dos XX (Δx) quer segundo o eixo dos YY (Δy), iguais a 0,40m, compararam-se as atenuações correspondentes a cilindros com diâmetros de 0,20, 0,15 e 0,10 m, para as várias configurações. Os resultados encontram-se indicados na Tabela 2 e nas Figuras 6 e 7, para as mesmas frequências.

Tabela 2 – Atenuações [dB], em função do diâmetro dos cilindros.

Freq \ ϕ	Configuração quadrangular						Configuração triangular					
	2×40 cilindros			3×40 cilindros			2×35 cilindros			3×30 cilindros		
	0,20	0,15	0,05	0,20	0,15	0,05	0,20	0,15	0,05	0,20	0,15	0,05
600	-1,324	-0,514	-0,170	-1,784	-0,419	-0,348	0,074	0,338	0,474	0,743	0,932	0,418
800	2,505	1,598	2,340	3,107	-0,633	3,380	3,357	3,639	1,840	1,837	1,403	1,320
1000	1,185	1,896	1,381	1,385	0,260	0,514	4,167	3,513	2,144	2,619	2,240	2,501
1200	5,415	-0,248	-0,734	4,292	-2,896	-0,469	3,973	2,942	1,934	4,223	3,660	3,253
1400	0,127	-1,672	-0,656	-1,269	-1,988	-0,745	0,399	0,217	-1,759	-1,169	-0,706	-2,046

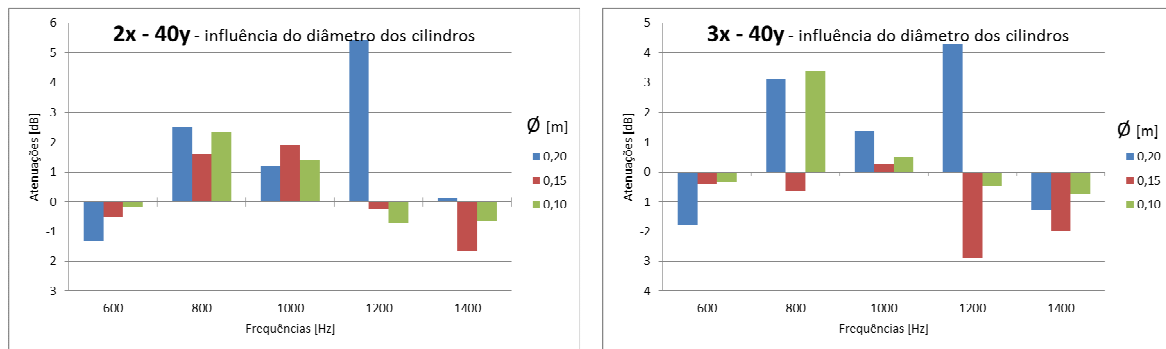


Figura 6 – Atenuações [dB], em função do diâmetro dos cilindros (configuração quadrangular).

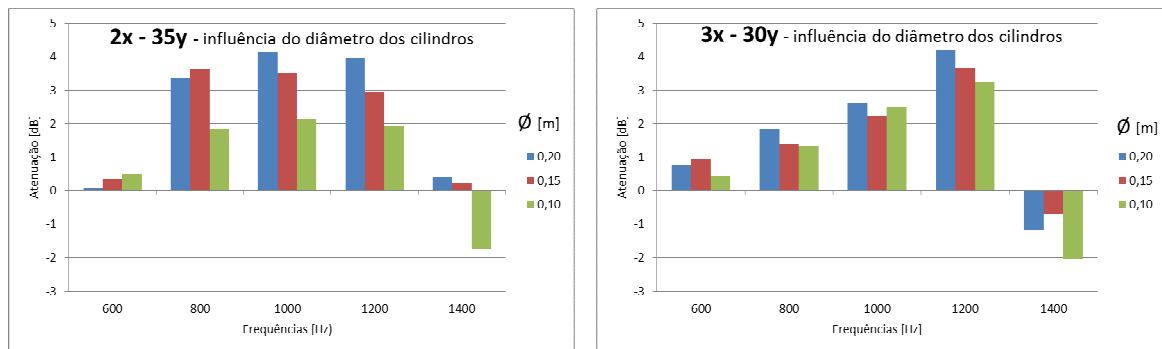


Figura 7 - Atenuações [dB], em função do diâmetro dos cilindros (configuração triangular).

Da observação dos resultados referentes aos diferentes diâmetros dos cilindros, o de 0,20 m aparece como aquele que, especialmente em torno dos 1000 Hz, apresenta maiores atenuações sonoras. Será assim essa a dimensão a considerar nos pontos seguintes.

3.3 Influência do espaçamento entre os cilindros

Adoptando, uma vez mais, cristais sónicos com os números de cilindros utilizados no ponto anterior, e com cilindros de 0,20 m de diâmetro, variou-se a distância entre os centros de cilindros, quer segundo o eixo dos XX (Δx) quer segundo o eixo dos YY (Δy). Determinaram-se as atenuações sonoras correspondentes a valores de 0,50, 0,40 e 0,30 m para aqueles espaçamentos, relativamente às várias configurações. Os resultados são apresentados na Tabela 3 e nas Figuras 8 e 9.

Tabela 3 – Atenuações [dB], em função do espaçamento entre os cilindros.

Freq \ $\Delta_{x,y}$	Configuração quadrangular						Configuração triangular					
	2x40 cilindros			3x40 cilindros			2x35 cilindros			3x30 cilindros		
	0,50	0,40	0,30	0,50	0,40	0,30	0,50	0,40	0,30	0,50	0,40	0,30
600	-0,869	-1,324	8,543	-1,627	-1,784	15,032	-0,293	0,074	7,572	0,454	0,743	12,928
800	2,813	2,505	-0,058	1,541	3,107	-0,322	3,766	3,357	-0,423	2,805	1,837	-0,183
1000	0,230	1,185	1,383	0,063	1,385	4,803	2,737	4,167	-0,428	2,187	2,619	-0,234
1200	-2,259	5,415	4,002	-2,128	4,292	4,704	1,753	3,973	6,132	-1,879	4,223	6,910
1400	-0,893	0,127	3,441	0,068	-1,269	4,043	2,003	0,399	5,766	2,909	-1,169	5,359

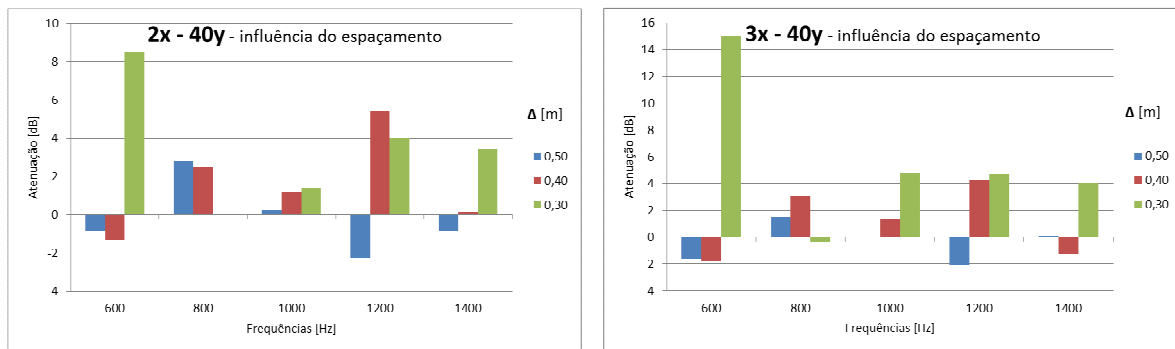


Figura 8 - Atenuações [dB], em função do espaçamento dos cilindros (config. quadrangular).

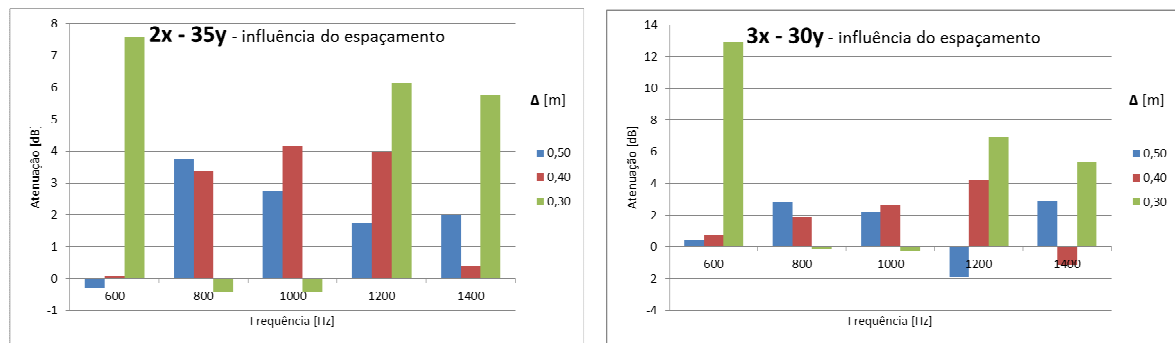


Figura 9 - Atenuações [dB], em função do espaçamento dos cilindros (config. triangular).

Uma análise conjunta dos resultados sugere que será para um espaçamento de 0,40 m que se conseguirão obter os melhores resultados, sendo esse valor o adoptado no próximo ponto.

3.4 Influência da variabilidade aleatória dos diâmetros dos cilindros

Este efeito pretende representar a possibilidade dos cilindros serem realizados com componentes cujo diâmetro possa não ser sempre igual, como, por exemplo, o uso de toros de madeira ou troncos de árvores, cujas dimensões poderão apresentar ligeiras oscilações, umas em relação a outras.

Assim, para as mesmas estruturas de cristais sónicos nas duas configurações, cilindros com 0,20 m de diâmetro, espaçamentos Δx e Δy iguais a 0,40 m, considerar-se-á, neste ponto, que os cilindros podem apresentar variações nos seus diâmetros, as quais ocorrerão de forma aleatória e estarão compreendidas, no máximo, entre $\pm 10\%$, 15% , 20% e 25% do valor previsto.

Deste modo, para cada um destes intervalos de variabilidade, determinaram-se as atenuações sonoras, nas cinco frequências em estudo, a partir da média de cinco cálculos, de forma a ter em consideração a aleatoriedade da situação. Esses resultados médios são exibidos na Tabela 4 e nas Figuras 10 e 11. Nestas apresentam-se também, para melhor entendimento, as atenuações (já atrás indicadas) para uma variabilidade de 0% dos diâmetros dos cilindros.

Tabela 4 – Atenuações [dB], em função da aleatoriedade do diâmetro dos cilindros.

Freq \ $\Delta \phi$	Configuração quadrangular								Configuração triangular							
	2x40 cilindros				3x40 cilindros				2x35 cilindros				3x30 cilindros			
	10%	15%	20%	25%	10%	15%	20%	25%	10%	15%	20%	25%	10%	15%	20%	25%
600	-1,277	-1,238	-1,313	-1,322	-1,688	-1,412	-1,847	-1,830	0,026	0,059	0,144	0,137	0,767	0,766	0,682	0,662
800	2,499	2,536	2,595	2,469	3,045	3,393	2,922	3,437	3,267	3,546	3,505	3,438	1,860	2,061	1,740	1,794
1000	1,245	1,212	1,318	1,365	1,418	1,463	1,596	1,232	4,153	4,049	3,569	3,444	2,611	2,748	3,068	2,745
1200	5,485	5,716	5,324	5,949	4,971	4,388	5,239	4,628	3,850	3,839	3,791	4,086	4,022	4,047	4,068	3,940
1400	0,088	0,248	-0,091	0,271	-1,064	-1,173	-1,203	-0,816	0,436	0,833	0,451	0,622	-0,971	-0,579	-0,954	0,521

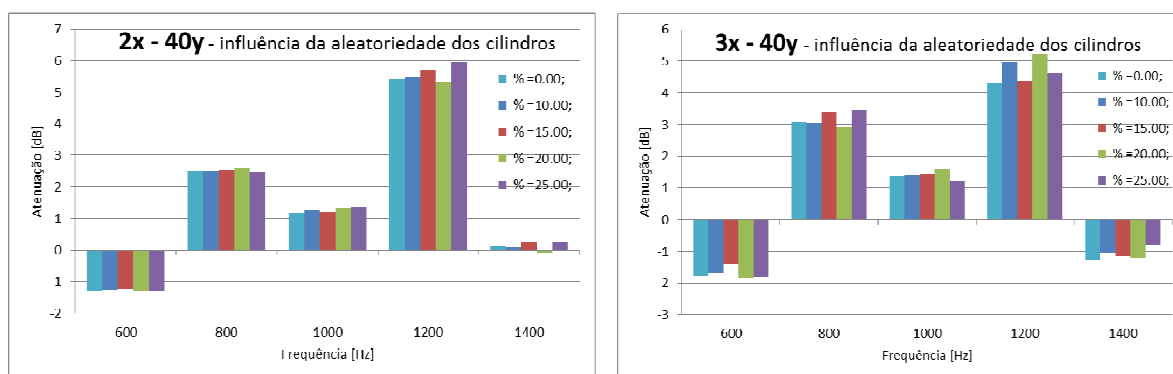


Figura 10 – Atenuações [dB], em função da aleatoriedade dos cilindros (config. quadrangular).

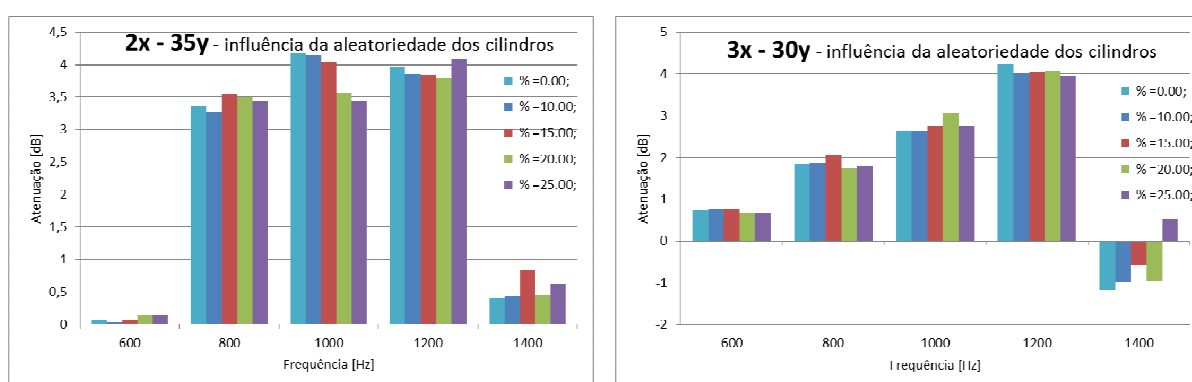


Figura 11 – Atenuações [dB], em função da aleatoriedade dos cilindros (config. triangular).

4 Considerações finais

No presente trabalho pretendeu-se avaliar a aplicabilidade do modelo de cálculo apresentado, baseado no Método das Soluções Fundamentais (MFS), ao cálculo das atenuações sonoras resultantes do uso de uma estrutura constituída por cilindros rígidos verticais, dispostos segundo determinadas configurações de malha periódica. Dada a forma dos elementos, sem descontinuidades na sua fronteira, a formulação do problema por aquele Método revelou-se bastante adequada, quer em termos de discretização quer de tempo de cálculo computacional.

Foram realizadas análises a diferentes configurações da malha da estrutura, fazendo variar alguns dos seus parâmetros geométricos definidores, tendo sido possível avaliar a sua influência nas atenuações sonoras, para as frequências mais significativas no espectro de ruído de tráfego em estudo.

Próximos trabalhos deverão permitir analisar a influência de outros factores, como seja o ângulo de incidência ou características de absorção sonora dos elementos dispersores usados.

Referências

- [1] CALM II Network - Comissão Europeia, *Research for a quieter Europe in 2020*, 2007
- [2] WHO Regional Office for Europe. *Burden of disease from environmental noise*, editado por Frank Theakston, ISBN: 978 92 890 0229 5, 2011

- [3] den Boer, L.C., Schrotten, A., *Traffic noise reduction in Europe - Health effects, social costs and technical and policy options to reduce road and rail traffic noise*, 2007
- [4] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J. V. Sánchez, V. Gómez, J. Llinares, and F. Meseguer. *Sound attenuation by sculpture*. *Nature*, 378:241, 1995.
- [5] Liang-Yu Wu, Lien-Wen Chen, and Chia-Ming Liu. *Acoustic pressure in cavity of variously sized two-dimensional sonic crystal with various filling fraction*. *Phys. Lett. A*, 373:1189–1195, 2009
- [6] J. O. Vasseur, P. A. Deymier, B. Djafari-Rouhani, Y. Pennec, and A-C. Hladky-Hennion. *Absolute forbidden bands and waveguiding in two-dimensional phononic crystal plates*. *Phys. Rev.B*, 77:085415, 2008.
- [7] J.V. Sánchez-Pérez, C. Rubio, R. Martínez-Sala, R. Sánchez-Grandia, and V. Gómez. *Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers*. *Appl. Phys. Lett.*, 81:5240, 2002.
- [8] Romero García, D. Vicent. *On the control of propagating acoustic waves in sonic crystals: analytical, numerical and optimization techniques*, Tesis Doctoral, 2010.
- [9] O. Umnova, K. Attenborough, and C. M. Linton. *Effects of porous covering on sound attenuation by periodic arrays of cylinders*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 119(1), 2006
- [10] R. Martinez-Sala, C. Rubio, L.M. Garcia-Raffi, J.V. Sanchez-Perez, E.A. Sanchez-Perez, and J. Llinares. *Control of noise by trees arranged like sonic crystals*. *Jour. Sound Vib.*, 291:100, 2006
- [11] G. Fairweather, A. Karageorghis, *The method of fundamental solutions for elliptic boundary value problems*, *Adv. Comput. Math.*, 9, 69–95, 1998
- [12] G. Fairweather, A. Karageorghis, P. Martin, *The method of fundamental solutions for scattering and radiation problems*, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 27, 759–69, 2003
- [13] M Golberg, C.S. Chen, *The method of fundamental solutions for potential, Helmholtz and diffusion problems*. *Boundary Integral Methods: Numerical and Mathematical Aspects, Computational Engineering*, vol. 1. Boston, MA: WIT Press/Computational Mechanics Publications, p. 103–176, 1999
- [14] C.J.S. Alves, S. S. Valtchev, *Numerical comparison of two meshfree methods for acoustic wave scattering*, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Volume 29, Issue 4, April 2005, Pages 371-382
- [15] L. Godinho, A. Tadeu, P. Amado Mendes, *Wave propagation around thin structures using the MFS*. *Computers Materials, Continua (CMC)*, 5(2), p. 117-127, 2007
- [16] J. António, A. Tadeu, L. Godinho, *A three-dimensional acoustics model using the method of fundamental solutions*. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 32, p. 525–531, 2008
- [17] L. Godinho, P. Amado Mendes, A. Tadeu, A. Cadena-Isaza, C. Smerzini, F. Sánchez Sesma, R. Madec, D. Komatitsch, *Numerical Simulation of Ground Rotations along 2D Topographical Profiles under the Incidence of Elastic Plane Waves*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99 (2B), p. 1147-1161, 2009