

**DIFFERENT METHODS FOR EVALUATING THE PERFORMANCE OF  
BARRIERS FOR RAILWAY NOISE MITIGATION  
DIFERENTES MÉTODOS PARA AVALIAR O DESEMPENHO DE  
BARREIRAS PARA MITIGAÇÃO DE RUÍDO FERROVIÁRIO**

Lourenço De Sousa, Laura<sup>1</sup>; Godinho, Luís<sup>1</sup>; Amado Mendes, Paulo<sup>1</sup>; Montes González, David<sup>2</sup>, Barrigón Morillas, Juan Miguel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Coimbra, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, R. Luis Reis dos Santos 290, 3030-790 Coimbra, Portugal, 239 797 100, lrlidsousa@uc.pt

<sup>2</sup> Universidad de Extremadura, INTERRA, Departamento de Física Aplicada, Laboratorio de Acústica (Lambda), Avda. de la Universidad, s/n, 10003 Cáceres, Spain, 927 257 000, davidmg@unex.es

**Palavras Chave:** ruído ferroviário, simulação numérica, barreiras acústicas, perda por inserção

**ABSTRACT.**

The annoyance caused by railway traffic noise is not despicable, being the second most important noise source. Although the European Union (EU) has been applying noise maps and action plans in the last years, since 2002, the European Environmental Noise Directive has highlighted that noise pollution will continue to be a significant health problem in Europe. Noise barriers are a common solution to mitigate railway noise, which can be quite efficient. Therefore, assessing railway noise impact on the nearby rail infrastructure is essential to determine adequate noise mitigation measures (such as noise barriers), creating a healthier environment. This work contains the results and analyses from the research conducted by numerical modelling of railway traffic noise to assess the effect of low height barriers in the railway context. Different methodologies of railway noise prediction have been used and compared, namely CNOSSOS-EU and FTA (Federal Transit Administration, USA). Results concerning the efficiency of noise barriers are also assessed through a Boundary Element model (BEM) in the frequency domain, and comparison with results from CNOSSOS-EU is performed.

**RESUMO.**

O incómodo causado pelo ruído do tráfego ferroviário não é desprezável, sendo a segunda fonte de ruído mais importante. Embora a União Europeia (UE) tenha aplicado mapas de ruído e planos de ação nos últimos anos, desde 2002, a Diretiva Europeia de Ruído Ambiental destacou que a poluição sonora continuará a ser um problema de saúde significativo na Europa. As barreiras acústicas são uma solução comum para mitigar o ruído ferroviário, que pode ser bastante eficiente. Portanto, avaliar o impacto do ruído ferroviário nas proximidades da infraestrutura ferroviária é essencial para determinar medidas adequadas de mitigação de ruído (como barreiras acústicas), criando um ambiente mais saudável. Este trabalho contém os resultados e análises da pesquisa realizada através de modelação numérica do ruído do tráfego ferroviário para analisar o efeito de barreiras de baixa altura no contexto ferroviário. Foram utilizadas e comparadas diferentes metodologias de previsão de ruído ferroviário, nomeadamente CNOSSOS-EU e FTA (*Federal Transit Administration*, EUA). Os resultados relativos à eficiência das barreiras acústicas também se avaliaram por meio de um modelo de Elementos de Fronteira (BEM) no domínio da frequência, e realizou-se a comparação com os resultados do CNOSSOS-EU.

## 1. INTRODUÇÃO.

Os níveis excessivos de ruído relacionados com as infraestruturas ferroviárias, tanto na sua conceção como na sua utilização, são de grande relevância e causam preocupação ao longo de todo o ciclo de vida das infraestruturas ferroviárias. Especialmente quando próximas de áreas habitadas e de áreas de proteção ambiental, essas preocupações são da maior importância, uma vez que, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), a exposição ao ruído prejudica seriamente a saúde humana e interfere nas atividades diárias das pessoas [1] e requerem-se medidas para mitigar o problema. As medidas de mitigação podem ser feitas ao nível da fonte sonora, através do aperfeiçoamento do 'design' e fabricação de produtos com baixa vibração, baixo ruído ou sem ruído; no caminho de transmissão, principalmente com sistemas isolantes, absorventes e atenuantes, ou ainda protegendo o recetor [2]. Uma das medidas de mitigação de ruído ferroviário mais eficientes são as barreiras acústicas [3].

Assim, a caracterização do som gerado pelo tráfego ferroviário é da maior importância para a escolha de medidas de mitigação adequadas. O sistema ferroviário apresenta diversas fontes de ruído e vibração, tais como o ruído de rolamento, o ruído de impacto, o guincho, o ruído de tração e o ruído aerodinâmico [4].

A fonte sonora dominante na ferrovia é o ruído de rolamento que é causado pelo contacto roda/carril. A rugosidade de ambas as superfícies de contacto geram vibrações no sistema roda/carril, que são transmitidas às estruturas da roda e da via, levando à radiação sonora. Este ruído é dependente da velocidade ( $V$ ) a uma taxa de  $30 \log_{10} V$ , o que significa que o nível de som aumenta com o aumento da velocidade [5].

Desde as infraestruturas existentes, ao tipo de veículos, composições, velocidades de circulação, entre outros parâmetros, torna-se bastante complexo prever um espectro sonoro de ruído ferroviário. No entanto, diferentes modelos de previsão podem ser utilizados como o sugerido pela FTA [6] ou o modelo CNOSSOS-EU [4], proposto pela Comissão Europeia, entre outros [7,8]. Alguns autores estudam e comparam diferentes métodos existentes para melhor adequar os valores teóricos aos valores reais [9, 10, 15].

Neste trabalho, procurou-se compreender melhor o efeito de medidas de minimização de ruído de tráfego ferroviário através da aplicação de barreiras acústicas, com a preocupação particular de perceber o efeito da utilização de barreiras de baixa altura localizadas muito próximo da ferrovia. Na realidade esta é uma abordagem muito promissora que tem vindo a ser desenvolvida por vários autores (veja-se, por exemplo, [17]), e que apresenta vantagens muito significativas em relação à utilização de barreiras acústicas clássicas, com 3 m ou mais de altura. Em primeiro lugar, este tipo de solução é visualmente muito menos intrusiva, sendo por isso bastante mais facilmente aceite pelas populações; por outro lado, ao ser aplicada mais próximo da via permite minimizar a faixa de terreno inutilizada, permitindo eventualmente uma diminuição da largura total do canal ferroviário. Refira-se, ainda, que esta solução é particularmente interessante para o caso da ferrovia, pois a fonte dominante em zonas críticas é muitas vezes a interação roda-carril, localizada a baixa altura e numa posição muito bem definida (o carril é fixo, pelo que a fonte se mantém numa posição constante, ao contrário do que acontece no ruído de tráfego rodoviário). Neste contexto, julga-se ser importante abordar a sua utilização prática, procurando compreender de que forma a sua eficiência é prevista por diferentes modelos de cálculo, desde os modelos habituais de cálculo de ruído ambiente até modelos baseados na resolução da equação de onda acústica.

Nesta perspetiva, compararam-se os resultados de diferentes metodologias de previsão de ruído ferroviário, nomeadamente CNOSSOS-EU e FTA (*Federal Transit Administration*, EUA), simulando casos muito simples com barreiras tradicionais e com barreiras de baixa altura. Nestas simulações procurou-se apenas compreender o efeito destes obstáculos no parâmetro  $L_{den}$  (ou  $L_{dn}$ ) usando uma simulação de uma composição ferroviária real. Procurou-se, também, efetuar um estudo mais detalhado da eficiência das barreiras acústicas por meio de um modelo de elementos de fronteira no domínio da frequência, comparando os resultados com os obtidos a partir da simulação pela metodologia do CNOSSOS-EU.

A estrutura deste trabalho é a seguinte: em primeiro lugar apresenta-se a metodologia utilizada, juntamente com uma breve explicação dos métodos; segue-se depois a apresentação e análise de resultados, relativos aos Níveis de Pressão Sonora e Perda por Inserção determinados; e apresentam-se, por último, algumas conclusões.

## 2. METODOLOGIA

Conforme referido anteriormente, o objetivo fundamental deste trabalho foi o de abordar a eficiência de barreiras acústicas no contexto ferroviário utilizando diferentes métodos de cálculo. Em particular, procurou-se perceber se os modelos de cálculo e simulação permitem ter em consideração, de forma adequada, a presença de barreiras de baixa altura, com cerca de 1.5 m. Simularam-se diferentes cenários, considerando uma configuração de referência sem barreiras acústicas, e a presença de barreiras acústicas com alturas de 1.5 m e 4 m. A distância das barreiras ao eixo da via varia consoante a altura das mesmas, sendo que, para a de menor altura, a distância é de 2.83 m e, para a de maior altura, a distância é de 7.5 m. Estas distâncias basearam-se, no primeiro caso, em uma distância mínima entre a via e a barreira salvaguardando a variável segurança, e a segunda distância baseia-se em medidas comumente adotadas em infraestruturas ferroviárias, em Portugal [12].

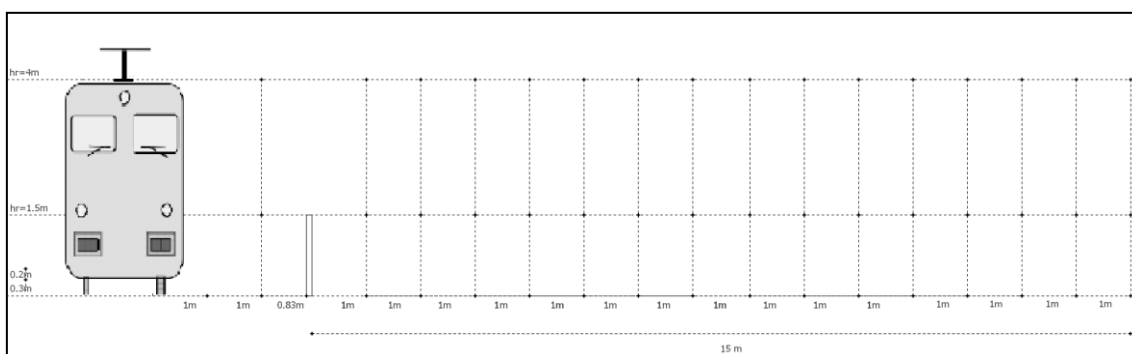


Figura 1 – Esquema exemplificativo de um cenário estudado, com uma barreira com 1.5 m de altura.

Utilizaram-se metodologias com base nas diretrizes de avaliação de ruído dos documentos CNOSSOS-EU e FTA e recorreu-se ao software CadnaA. Em ambos os casos a extensão de via que se usou é de 400 m. Para a simulação utilizaram-se as potências sonoras de um comboio do tipo BR 1016 com velocidade constante de cerca de 80.47 km/h (50 mph). Fizeram-se malhas horizontais de recetores com 1.5 m e 4 m de altura, distanciados de 1 m, e uma malha vertical transversal à via com recetores igualmente distanciados de 1 m. As fontes localizam-se a 0.5 e 0.3 m de altura, para as metodologias CNOSSOS-EU e FTA, respetivamente. Assumiu-se um coeficiente de absorção do solo igual a 0.3 [4]. As barreiras utilizadas possuem uma camada interna (i.e. na face diretamente exposta ao ruído da composição) absorvente. O coeficiente de absorção dessa camada absorvente corresponde ao de um betão poroso com adição de argila expandida estudada em outros trabalhos prévios [13, 14]. No caso da metodologia CNOSSOS-EU, determinou-se e comparou-se o parâmetro  $L_{den}$  enquanto que, na FTA, se determinou o parâmetro  $L_{dn}$ . Segundo alguns autores, estes índices são equivalentes para o caso da ferrovia [15].

Além do efeito das barreiras nos parâmetros  $L_{den}$  e  $L_{dn}$ , foi realizada uma análise mais detalhada da perda por inserção ( $IL$  - “Insertion Loss”) calculada usando não apenas os métodos de engenharia correntes (em particular o cálculo a partir de resultados do CNOSSOS-EU), mas também um modelo mais rigoroso, baseado no método dos elementos de fronteira (BEM) no domínio da frequência. Neste último caso, o cálculo é baseado na resolução da equação integral de fronteira:

$$C(\xi)p(\xi) = -i\rho\omega \int_{\Gamma} G(\xi, X)v_n(X)d\Gamma - \int_{\Gamma} \frac{G(\xi, X)}{\partial n} p(X)d\Gamma + \sum_{k=1}^{NS} Q_k G(\xi_k^f, \xi) \quad (1)$$

em que  $\Gamma$  representa a fronteira,  $\rho$  a densidade (1.22 kg/m<sup>3</sup> no caso do ar),  $G(\xi_k^f, \xi)$  o campo incidente gerado por uma fonte localizada em  $\xi_k^f$ ;  $p(X)$  e  $v_n(X)$  representam a pressão e

velocidade da partícula, respetivamente.  $C(\xi)$  depende da geometria da fronteira, e assume o valor  $\frac{1}{2}$  para uma fronteira suave. Também para esta comparação, os cenários analisados, no que respeita às suas propriedades, correspondem aos descritos anteriormente. A absorção sonora das diferentes superfícies é imposta através de uma condição de fronteira do tipo Robin, em que a impedância acústica superficial é prescrita. De modo a permitir atribuir as necessárias condições de impedância ao solo, este é também discretizado usando elementos de fronteira, numa extensão de 25 m (desde  $x=-5$  m a  $x=20$  m). Nos casos simulados, optou-se por localizar a fonte sonora a uma altura de 0.5 m, seguindo a mesma estratégia indicada no modelo CNOSSOS-EU anteriormente analisado.

A perda por inserção é um parâmetro que pode caracterizar o desempenho de uma barreira colocada no caminho das ondas sonoras; mais especificamente, permite avaliar o nível de atenuação sonora proporcionado por uma barreira acústica. Quanto maior o valor deste parâmetro, melhor é o comportamento em termos de isolamento sonoro da barreira. Pode ser obtido através da equação:

$$IL = NPS_{sb} - NPS_{cb} = 20 \log \left( \frac{P_{sb}}{P_{cb}} \right), \quad (2)$$

onde  $NPS_{sb}$  é o nível de pressão sonora sem barreira sonora,  $NPS_{cb}$  é o nível de pressão sonora com barreira sonora,  $P_{cb}$  é a pressão sonora com barreira sonora,  $P_{sb}$  é a pressão sonora sem barreira sonora. A perda por inserção de uma barreira depende da perda em termos de transmissão de todos os elementos e da razão das áreas dos diferentes elementos [16].

As barreiras acústicas que se estudaram caracterizam-se por terem alturas de 1.5 e 4 m e por terem a adição de uma camada porosa fonoabsorvente na face interna, isto é, na face exposta à ferrovia. A propagação das ondas sonoras nessa camada porosa faz com que se criem variações de pressão dentro do material poroso que determinam movimentos de ar através de aberturas, permitindo assim a ocorrência de perdas de energia por viscosidade e atrito, com libertação de calor, que é captado pela estrutura sólida. O coeficiente de absorção sonora do material poroso apresenta-se na Tabela 1, em bandas de frequência de uma oitava.

Tabela 1 – Coeficiente de absorção do material poroso

Freq. (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$ mat.poroso	0.02	0.41	0.88	0.84	0.78	0.72

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Avaliação de $L_{den}$ e $L_{dn}$ através dos métodos CNOSSOS-EU e FTA

Utilizaram-se as metodologias sugeridas pelos documentos CNOSSOS-EU e FTA, para a determinação dos valores únicos  $L_{den}$  e  $L_{dn}$ . Nas Figuras 2 e 3 pode-se observar os níveis de pressão sonora obtidos com ambos os métodos, e para configurações idênticas (uma barreira acústica com 1.5 m da altura, com incorporação de material poroso pelo interior da mesma, de um dos lados da via). Observando os resultados obtidos, verifica-se, conforme esperado, uma diferença significativa entre os dois métodos, desde logo na forma como simulam o veículo. De facto, a metodologia CNOSSOS-EU apresenta uma estratégia bastante mais complexa e detalhada para modelar a fonte emissora, resultando num sistema com emissão claramente direcional em que na direção vertical a energia emitida é reduzida. Pelo contrário, a abordagem FTA é bastante mais simplificada, correspondendo a apenas uma fonte com emissão igual em todas as direções, resultando num padrão de propagação simplificado e semelhante a uma fonte linear, mas sempre tendo em consideração a potência emitida pelo veículo.

Observa-se, em ambas as metodologias, a influência da presença da barreira acústica, nestas simulações com barreira com altura de 1.5 m e a uma distância de 2.83 m da fonte. Apesar de

ter uma altura inferior às alturas comumente utilizadas (de 3 a 7 m de altura), as simulações sugerem um claro efeito atenuador deste tipo de barreira, reduzindo os níveis de pressão sonora na zona protegida. É também visível o efeito do material poroso existente na face da barreira, originando uma diminuição da pressão sonora junto à face interior da barreira em relação ao caso de uma barreira refletora (não apresentado).

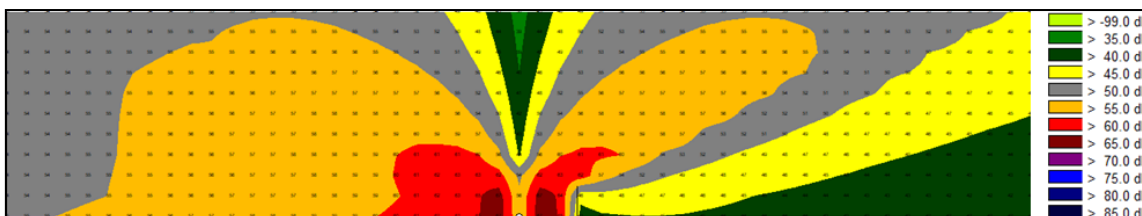


Figura 2 – Níveis de pressão sonora obtidos com a metodologia CNOSSOS-EU, num corte transversal à via. Configuração com barreira acústica de um lado da via com 1.5 m de altura.

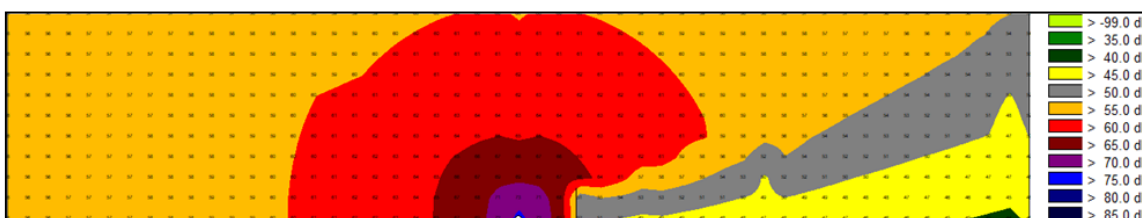


Figura 3 – Níveis de pressão sonora obtidos com a metodologia FTA, num corte transversal à via. Configuração com barreira acústica de um lado da via com 1.5 m de altura.

Nas Tabelas 2 e 3 apresentam-se os valores de  $L_{den}$  e  $L_{dn}$  obtidos, respetivamente, com as metodologias CNOSSOS-EU e FTA. Os recetores apresentados aqui têm alturas de 1.5 e 4 m. Os valores de  $L_{den}$  obtidos com a metodologia CNOSSOS-EU são cerca de 2 a 5 dB inferiores aos de  $L_{dn}$  obtidos com a metodologia FTA para configurações idênticas, situação que deverá estar relacionada com a direccionalidade da fonte considerada no primeiro caso. A zona protegida pela existência de barreira apresenta valores de nível de pressão sonora inferiores aos de quando não existe barreira, como de resto seria de esperar. Quando se compara a influência da existência de 1 ou 2 barreiras (uma de cada lado da via), os valores com 2 barreiras são ligeiramente superiores, devido ao facto de haver reflexões entre as barreiras. Esta situação deverá ser objeto de estudos posteriores com maior detalhe.

Tabela 2 –  $L_{den}$  e  $L_{dn}$  obtidos, respetivamente, com as metodologias CNOSSOS-EU e FTA, sem barreira e com barreira com altura de 1.5 m

$h_{receptor}$ (m)	Metodologia	$D_{fonte}^{(1)}$ (m)	$L_{den}$ dB(A)		
			Sem Barreira	1xBarreira h=1.5m	2xBarreira h=1.5m
1.5	CNOSSOS-EU	2	64.0	64.0	64.3
		15	55.5	44.5	45.8
	FTA	2	67.8	67.8	68.0
		15	57.9	49.8	50.9
4	CNOSSOS-EU	2	56.8	56.8	56.8
		15	55.6	48.4	50.8
	FTA	2	64.6	64.6	64.6
		15	57.8	54.5	55.8

(1) Distância à fonte.

Tabela 3 –  $L_{den}$  e  $L_{dn}$  obtidos, respetivamente, com as metodologias CNOSSOS-EU e FTA, sem barreira e com barreira com altura de 4 m

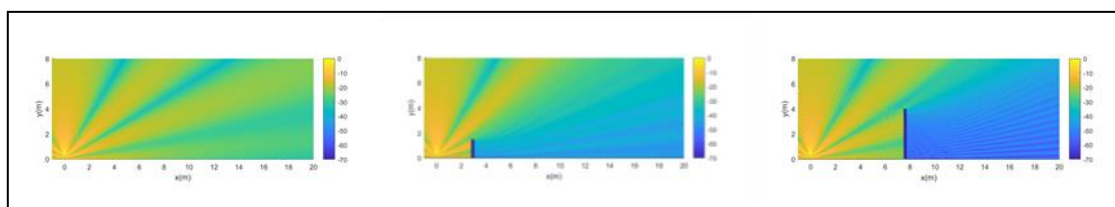
$h_{receptor}$ (m)	Metodologia	$D_{fonte}^{(1)}$ (m)	$L_{den}$ dB(A)		
			Sem Barreira	1xBarreira h=4m	2xBarreira h=4m
1.5	CNOSSOS-EU	7	64.0	58.8	60.0
		15	55.5	37.1	37.9
	FTA	7	67.8	61.9	62.1
		15	57.9	42.9	43.3
4	CNOSSOS-EU	7	56.8	58.6	59.7
		15	55.6	40.6	42.1
	FTA	7	64.6	61.3	61.6
		15	57.8	43.5	45.4

(1) Distância à fonte.

### 3.2. Avaliação da perda por inserção

Nesta secção apresentam-se os valores de perda por inserção obtidos com a metodologia CNOSSOS-EU e com um modelo BEM (Figura 4). Procura-se, desta forma, perceber quais as diferenças que ocorrem quando o cálculo é realizado usando os métodos normalizados correntemente na elaboração de mapas de ruído, e o cálculo mais detalhado, resolvendo a equação de onda no domínio da frequência, com recurso ao BEM.

Na Figura 4 ilustram-se resultados sem barreira, com barreira de 1.5 m de altura ou com barreira de 4 m de altura, para uma frequência de 1000 Hz. Os recetores que se apresentam têm alturas de 1.5 e 4 m e distam da fonte 15 m. Observando a Figura 4 torna-se evidente o carácter ondulatório da solução, resultante da resolução da equação de onda, e tendo por isso em conta de forma detalhada a interferência das várias reflexões em termos de amplitude e de fase em cada ponto. Ainda assim, verifica-se claramente o efeito da presença do obstáculo sendo visível o efeito de difração gerado pela presença da barreira acústica no caminho de propagação. Para ambas as alturas de barreira, é gerada uma zona de sombra atrás do obstáculo, com níveis sonoros mais baixos. Na frequência aqui analisada, apesar de se registar um desempenho superior da barreira de maior altura, verifica-se que, a aplicação de uma pequena barreira, com apenas 1.5 m de altura e por isso muito menos intrusiva do ponto de vista estético, permite também uma atenuação dos níveis sonoros significativa, podendo por isso ser uma solução potencialmente interessante.



(a)

(b)

(c)

Figura 4 – Níveis de pressão sonora (normalizados para um máximo de 0 dB) obtidos com o BEM, para a frequência de 1000 Hz, para as configurações: (a) sem barreira, (b) com uma barreira de 1.5 m de altura e (c) com uma barreira de 4 m de altura.

Analisa-se, de seguida, a atenuação sonora ao longo do domínio da frequência para estas duas barreiras. Note-se que o cálculo usando o BEM, em frequências específicas, conduz a uma enorme variação dos resultados ao longo da frequência, devido às várias interações entre ondas

incidentes, refletidas e difratadas; também no espaço, e pela mesma razão, se verifica uma variação significativa de ponto para ponto da resposta do sistema. A Figura 5 ilustra uma curva de perda por inserção calculada para barreira com 1.5 m e 4 m de altura, e para um recetor localizado a 1.5 m de altura. Neste cálculo, em lugar de considerar apenas um ponto específico, considera-se uma área alargada com 1 m x 1 m em redor do ponto recetor, onde se efetua uma média energética para 25 pontos individuais. O cálculo é efetuado para cada frequência, e os valores em bandas de oitava são calculados considerando 15 frequências distribuídas dentro da banda de oitava em análise. Como se pode observar, existe uma variação muito significativa da  $IL$  de frequência para frequência, em particular nas frequências mais elevadas. Na mesma figura apresenta-se a curva de  $IL$  calculada considerando a média energética de 15 frequências em cada banda de oitava. Esta última apresenta um comportamento mais suave, uma vez que a realização de médias energéticas em cada banda elimina os picos registados e, por isso, será usada nas análises que se seguem.

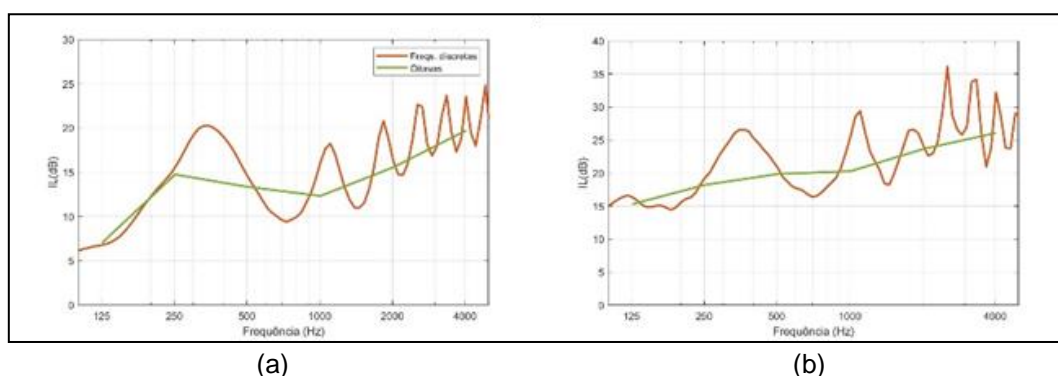


Figura 5 – Exemplo de curvas de  $IL$  calculadas em frequências específicas e em bandas de oitava, para barreira com 1.5m (a) e 4.0m (b), e num recetor a uma altura de 1.5m.

Na Figura 6 apresentam-se as curvas de perda por inserção calculadas usando o BEM e resultados da aplicação do método CNOSSOS-EU no software CadnaA.

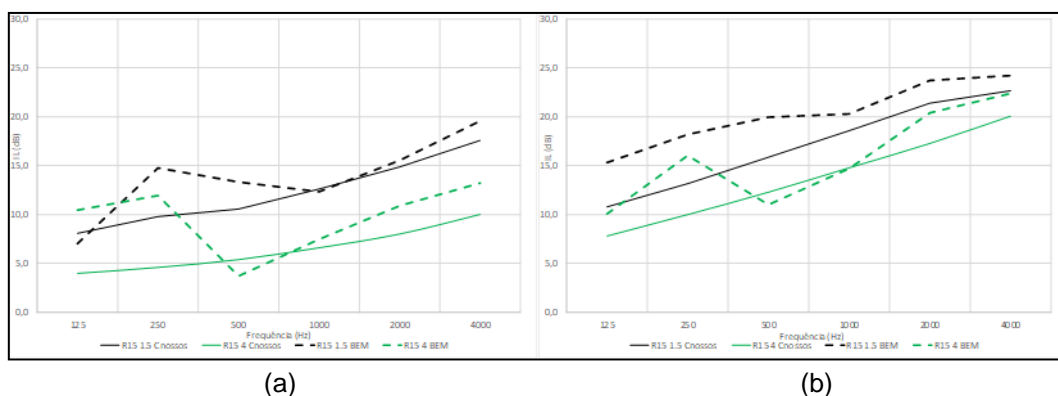


Figura 6 – Perda por inserção a 15 m da fonte, para alturas de barreira de 1.5 (a) e 4 m (b) e para alturas de recetor iguais a 1.5 e 4 m (R15 1.5, R15 4), obtidas com CNOSSOS-EU e BEM.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os valores obtidos em cada banda de frequência pelos dois métodos, permitindo uma melhor quantificação das diferenças registadas. Observando os gráficos e tabelas, verifica-se, antes de mais, a existência de valores de  $IL$  muito significativos para todos os casos testados, mas, em particular, para os recetores a cotas mais baixas e, por isso, mais protegidos pelas barreiras. Apesar de a barreira de maior altura apresentar uma maior eficiência, regista-se que a barreira de 1.5 m, colocada junto da fonte, apresenta também valores de  $IL$  bastante significativos, com atenuações nos 1000 Hz superiores a 10 dB. Mesmo

considerando o recetor mais elevado, verifica-se que a atenuação proporcionada é significativa, permitindo uma efetiva redução dos níveis sonoros ao longo de toda a gama de frequência. Comparando os resultados obtidos pelo BEM com os do CNOSSOS-EU, verifica-se que, no geral, os valores obtidos são mais próximos nas altas frequências, enquanto nas frequências mais baixas ocorrem diferenças significativas. De facto, o modelo BEM, ao resolver a equação de onda no domínio da frequência (por oposição ao modelo mais simples do CNOSSOS-EU), tem em consideração as múltiplas interações e mudanças de fase das ondas que se propagam no sistema, permitindo por isso captar de forma detalhada o carácter ondulatório da resposta. Nas baixas frequências este efeito é, como esperado, muito significativo, levando a diferenças consideráveis.

Tabela 4 – Perda por inserção (dB) obtida com CNOSSOS-EU e BEM, com introdução de uma barreira acústica com 1.5 m de altura.

Freq. (Hz)	Recetor a 1.5m de altura		Recetor a 4.0m de altura	
	CNOSSOS-EU	BEM	CNOSSOS-EU	BEM
125	8.1	7.0	4.0	10.5
250	9.8	14.8	4.6	12.0
500	10.6	13.4	5.4	3.7
1000	12.6	12.3	6.6	7.5
2000	14.9	15.5	8.0	10.9
4000	17.6	19.6	10.0	13.2

Tabela 5 – Perda por inserção (dB) obtida com CNOSSOS-EU e BEM, com introdução de uma barreira acústica com 4 m de altura.

Freq. (Hz)	Recetor a 1.5m de altura		Recetor a 4.0m de altura	
	CNOSSOS-EU	BEM	CNOSSOS-EU	BEM
125	10.8	15.3	7.8	10.1
250	13.2	18.2	10.0	16.0
500	15.9	19.9	12.3	11.0
1000	18.6	20.3	14.8	14.7
2000	21.4	23.7	17.3	20.4
4000	22.7	24.2	20.1	22.4

#### 4. CONCLUSÕES

Existem diversas metodologias de simulação de ruído que permitem uma maior facilidade e rapidez na obtenção de mapas de ruído. Estas são essenciais para uma escolha adequada de medidas de mitigação que propiciam um ambiente sonoro mais saudável. O objetivo principal deste trabalho foi o de abordar a eficiência de barreiras acústicas no contexto ferroviário, utilizando diferentes metodologias de cálculo. Em particular, procurou-se compreender se os modelos de cálculo e simulação permitem ter em consideração, de forma adequada, a presença de barreiras de baixa altura, com cerca de 1.5 m.

Utilizaram-se as metodologias sugeridas pelos documentos CNOSSOS-EU e FTA, para a determinação dos valores únicos  $L_{den}$  e  $L_{dn}$ . As simulações sugerem um claro efeito atenuador devido à presença de barreiras de baixa altura, reduzindo os níveis de pressão sonora na zona protegida. A incorporação de material poroso na face da barreira origina uma diminuição da pressão sonora junto à face interior da mesma, em relação ao caso de uma barreira refletora. Os valores de  $L_{den}$  obtidos com a metodologia CNOSSOS-EU são cerca de 2 a 5 dB inferiores aos de  $L_{dn}$  obtidos com a metodologia FTA para configurações idênticas.

Determinaram-se os valores de perda por inserção obtidos com a metodologia CNOSSOS-EU e com um modelo BEM. Verificaram-se valores de  $IL$  muito significativos para todos os casos testados, mais particularmente para os recetores a cotas mais baixas, sendo estes mais



protegidos pelas barreiras. A barreira de maior altura apresenta uma maior eficiência, no entanto a barreira de 1.5 m colocada junto da fonte apresenta também valores de  $IL$  bastante significativos, com atenuações nos 1000 Hz superiores a 10 dB. Comparando os resultados obtidos pelo BEM com os do CNOSSOS-EU, verificou-se que, de modo geral, os valores obtidos são mais próximos nas altas frequências.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito da unidade de investigação “Instituto de sustentabilidade e inovação em engenharia estrutural - ISISE” (UIDP/04029/2020), e pelos fundos FEDER através do COMPETE 2020, Portugal 2020, no âmbito dos projetos POCI-01-0247-FEDER-033990 (iNBrail) e POCI-01-0247-FEDER-046111 (FERROVIA 4.0).

## REFERÊNCIAS

- [1] WHO. *Health Topics. Environment and health. Noise*, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen (Denmark), 2021 [Available from: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/noise>].
- [2] Ibrahim, R.A. Recent advances in nonlinear passive vibration isolators, *Journal of sound vibration*, Vol 314 (3-5), 2008, pp 371-452.
- [3] Zhang, X.; Liu, R.; Cao, Z.; Wang, X.; Li, X. Acoustic performance of a semi-closed noise barrier installed on a high-speed railway bridge: Measurement and analysis considering actual service conditions, *Measurement*, Vol 138, 2019, pp 386-399.
- [4] Kephelopoulos, S.; Paviotti, M.; Anfosso-Lédée, F. *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*, EUR 25379 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.
- [5] Thompson, D. *Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control*, Elsevier, Amsterdam (The Netherlands), 1st Edition, 2009.
- [6] Quagliata, A.; Ahearn, M.; Boeker, E.; Roof, C.; Meister, L.; Singleton, H. *Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual*, U.S. Department of Transportation, FTA Report No. 0123, Washington (United States of America), 2018.
- [7] Volkshuisvesting, Van. *Reken-en Meetvoorschrift Railverkeerslawaa*i, Nederland Ministerie, Nederland, 1996.
- [8] Zhang, X. *Three Typical Noise Assessment Methods in EU*, SP Technical Research Institute of Sweden, Borås (Sweden), 2014.
- [9] Reiter, M.; Kostek, B. Comparing railway noise prediction results for passenger trains using various models, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 123 (5), 2008, pp 3266.
- [10] Vergoed, T.; Van Leeuwen, H. J., editors. Evaluation and validation of the CNOSSOS calculation method in the Netherlands, *Proceedings of the EuroNoise 2018*, Crete, Greece, May 27-31, 2018, pp 1231-1236.
- [11] Alarcão, D.; Coelho, J. L. B. Modelação de ruído de tráfego ferroviário, *Acústica 2008*, Coimbra, Portugal, Outubro 20-22, 2008.

- [12] IP. Plano de investimentos em infraestruturas Ferrovia 2020 - Modernização Da Linha Do Norte, Infraestruturas de Portugal, 2017.
- [13] Lourenço de Sousa, L.; Pereira, L.; Godinho, L.; Mendes, P. A., editors. Acoustic properties of porous concrete-Experiments and modelling, *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings 2020*, Seoul, Korea, August 23-26, 2020, Vol 261 No 6, pp 127-137, Institute of Noise Control Engineering.
- [14] Lourenço de Sousa, L.; Pereira, L.; Ramos, D.; Godinho, L.; Mendes, P. A. Acoustic absorption of porous concrete – normal incidence vs diffuse field conditions, *Euronoise Congress and Conference Proceedings 2021*, Madeira, Portugal, October 25-27, 2021, pp 239-248.
- [15] Miedema, H. M., & Oudshoorn, C. G. Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environmental health perspectives*, Vol 109 (4), 2001, 409-416.
- [16] Kotzen, B.; English, C. *Environmental Noise Barriers - A Guide to their Acoustic and Visual Design*, Spon Press, London (United Kingdom), 2nd Edition, 2009.
- [17] Lázaro, J., Pereira, M., Costa, P. A., & Godinho, L. Performance of Low-Height Railway Noise Barriers with Porous Materials. *Applied Sciences*, 12(6), 2022, 2960.