

DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO EM LABVIEW PARA DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS – NP ISO13472-2:2022.

Mário Mateus¹, José Barbosa¹, Manuel Gameiro da Silva²

¹ Univ Coimbra, ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Luís Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra, Portugal.

{mario.mateus@dem.uc.pt, jose.barbosa@adai.pt}

² Univ Coimbra, ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Luís Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra, Portugal.

{manuel.gameiro@dem.uc.pt}

Resumo

Os ensaios de nível de ruído exterior de veículos (pass-by) e os ensaios de veículos de transporte rodoviário silenciosos, com baixa audibilidade, definidos respetivamente pelos regulamentos nº 51 e nº 138 da UNECE, requerem a utilização de uma pista de ensaios, caracterizada de acordo com a norma ISO10884. Para além de considerar outros parâmetros, esta norma requer que a determinação dos coeficientes de absorção do pavimento seja realizada por meio de um método de ensaio não destrutivo. O procedimento de medição e análise deste ensaio é descrito na norma NPISO13472-2:2022. É sugerida a utilização de um tubo de impedância de aço com um comprimento de 480mm e diâmetro 100mm, onde são instalados dois microfones de ¼". O presente artigo aborda a implementação de uma metodologia para a realização deste tipo de ensaios. Na montagem experimental foi utilizada uma placa de aquisição NI 9233. A aquisição de dados, num intervalo de frequências de 250Hz a 1600HZ, e o processamento de sinal são efetuados por uma aplicação informática desenvolvida em LabView. Os coeficientes de absorção sonora são obtidos por cálculo a partir dos fatores de reflexão, que se obtêm pela função de transferência complexa, conforme o método descrito na norma ISO10534-2.

Palavras-chave: medição ISO13472, coeficientes de absorção de pavimentos, ruído pass-by.

Abstract

Vehicle external noise level tests (pass-by) and tests of silent road transport vehicles with low audibility, defined respectively by UNECE regulations no. 51 and no. 138, require a test track characterized following ISO10884. In addition to considering other parameters, this standard requires that the pavement absorption coefficient be determined using a non-destructive testing method. NPISO13472-2:2022 standard describes the measurement and analysis procedure for this test. It suggests using a steel impedance tube with a length of 480mm and a diameter of 100mm, with two ¼" microphones installed on it. This paper deals with the implementation of a methodology to perform this type of tests. In the developed setup, a NI 9233 acquisition board was used. A computer application developed in LabView ensures data acquisition in a frequency range from 250Hz to 1600HZ and signal processing. The sound absorption coefficients are calculated from the reflection factors obtained by the complex transfer function, according to the method described in the ISO10534-2 standard.

Keywords: ISO13472 measurements, pavements absorption coefficient, pass-by noise.

PACS no. 43.55.Ev, 43.60.-c

1 Introdução

As preocupações com o ambiente sonoro em zonas urbanas têm como consequência a busca de soluções mitigadoras do seu impacto. O facto de o tráfego rodoviário ser a componente dominante no ruído ambiental em aglomerados urbanos tem levado a fortes investimentos no desenvolvimento de soluções menos ruidosas da propulsão de veículos automóveis, abrangendo também todos os seus sistemas acessórios, como a exaustão de gases e os pneumáticos. Em paralelo também têm sido implementadas políticas a nível, local, nacional, europeia e mesmo mundial, no sentido de reformular a mobilidade urbana, incentivando os cidadãos a uma maior utilização de veículos elétricos e a optarem, cada vez mais, pela utilização de meios de transporte coletivo.

Ao longo dos anos, em consequência destas diretrizes ambientais e dos respetivos regulamentos, os fabricantes têm sido obrigados a produzir veículos cada vez menos ruidosos e menos poluentes em termos de emissão de gases e de partículas nocivas para a saúde das populações e do ambiente em geral. Relativamente ao ruído, as diretivas e regulamentos têm sucessivamente imposto níveis mais baixos de emissão sonora, e também a adoção de novas metodologias de medição, de modo a acompanhar o desenvolvimento tecnológico nas áreas da instrumentação.

Atualmente os veículos, com o conjunto total de componentes assembled e em ordem de marcha, para serem homologados e assim obterem aprovação de acordo com os regulamentos, são sujeitos a um conjunto extenso de ensaios, nomeadamente de nível sonoro.

Referir-nos-emos doravante aos veículos a motor das categorias M e N, numa perspetiva de harmonização de critérios e métodos [1], encontram-se definidas um conjunto de disposições relativas à homologação de motores de veículos com pelo menos quatro rodas, relativamente aos níveis sonoros por eles emitidos. Os ensaios são de Pass-by (com circulação em pista), de nível sonoro emitido com o veículo imobilizado e de nível sonoro emitido pelos sistemas de ar comprimido associados aos sistemas de travagem. Estes ensaios destinam-se a reproduzir os níveis gerados pelo tráfego de veículos durante a condução normal em áreas urbanas.

Por outro lado, nos veículos mais silenciosos com propulsão elétrica ou híbrida, com uma penetração crescente no parque automóvel, por questões de segurança para os peões, passou a ser necessário instalar sistemas de aviso sonoro de veículo (AVAS). Surgiu assim a necessidade de caracterizar os baixos níveis de audibilidade que estas novas tecnologias vierem revelar [2]. Para as mesmas categorias de veículos (M e N), o regulamento é aplicável aos veículos elétricos que podem circular em regime normal, em marcha atrás ou, pelo menos, com uma marcha avante, sem o funcionamento do motor de combustão interna. Estão assim incluídos os «Veículos puramente elétricos» (PEV), os «Veículos híbridos elétricos» (HEV), os «Veículos a pilha de combustível» (FCV) e os «Veículos híbridos a pilha de combustível» (FCHV).

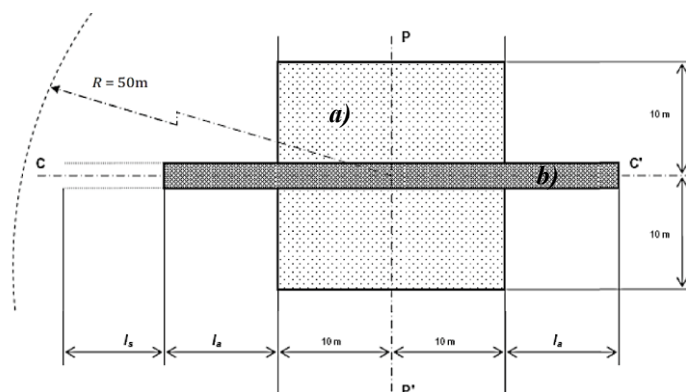


Figura 1 – Dimensões e constituição da pista de ensaios de Pass-by: a) área de propagação; b) área de condução.

Os ensaios são efetuados numa pista, que compreende duas áreas distintas: *a)* área de propagação e *b)* de condução [3]. Esta pista deve possuir determinadas características, nomeadamente relativamente ao declive máximo admissível do terreno, às irregularidades longitudinais, às irregularidades transversais, à textura, e à absorção. Para os ensaios de nível sonoro é dada particular importância à textura e às características de absorção da pista. Outras características, como a impedância mecânica e a resistência à derrapagem, podem também condicionar os níveis sonoros medidos.

2 Determinação dos coeficientes de absorção sonora - Método da função de transferência

2.1 Princípio geral - Método de ensaio

A norma anteriormente utilizada para caracterizar as pistas [4] requeria a extração de carotes da sua superfície que eram posteriormente analisados pelo método da relação de ondas de pressão estacionária [5]. Este tem em conta a relação entre os valores de pressão máxima e mínima e as suas localizações relativas no interior do tubo, que naturalmente dependem das características da impedância superficial do material colocado no tubo. O princípio do estabelecimento do campo de pressão estacionário e a sua formulação é apresentado mais adiante.

A versão mais recente da norma usada para caracterizar as pistas de ensaio [3] requer que os coeficientes de absorção acústica sejam determinados através de medições que devem seguir outra metodologia [6] sendo agora obtidos através do processamento das funções de transferência da pressão sonora [7].

A caracterização das pistas é efetuada com um conjunto de medições *in-situ* num ensaio não destrutivo. Tem por base o processamento das funções de transferência obtidas entre os sinais de dois microfones colocados transversalmente no tubo de impedância, sendo este assente no chão, perpendicularmente à superfície do pavimento. Obtêm-se assim os coeficientes de absorção acústica em bandas de terços de oitava, nas gamas de frequência entre 250Hz e 1600Hz, em condições de incidência normal.

Neste método são geradas ondas planas que se propagam desde o altifalante colocado na extremidade oposta àquela onde se irá encontrar a superfície a caracterizar. Coexistem assim dois campos de pressão no interior do tubo: um incidente, que se propaga desde o emissor (autofalante) e outro em sentido oposto e que é refletido pela superfície a caracterizar. A decomposição do campo resultante é obtida com as medições de pressão acústica efetuadas pelos dois microfones e a partir deles é obtida a função de transferência acústica complexa que permitirá obter os valores de absorção acústica, para uma incidência normal à superfície.

2.2 Dedução do campo de amplitude complexa de pressão de onda estacionária no interior do tubo

Considere-se a montagem representada na figura 2, correspondente a um tubo de ondas estacionárias, em que se gera um campo sonoro que resulta do efeito conjugado de um altifalante colocado numa das extremidades e de uma amostra do material a ensaiar colocado na extremidade oposta.

Desprezando efeitos tridimensionais e a reflexão secundária na superfície do altifalante, a amplitude da pressão do campo acústico instantâneo no interior do tubo é dada por

$$\mathbf{P}(x, t) = \mathbf{P}_i(x, t) + \mathbf{P}_r(x, t), \quad (1)$$

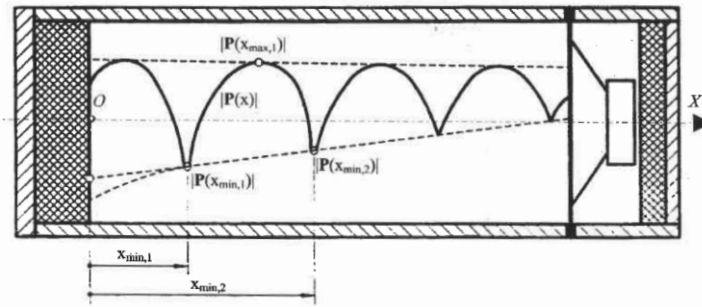


Figura 2 – Representação do campo de ondas estacionárias no interior do tubo. Adaptado de [5].

onde $P_i(x, t)$ e $P_r(x, t)$ representam, respetivamente, as amplitudes complexas de pressão do trem de ondas primário ou incidente, gerado pelo altifalante, e refletido na superfície da amostra.

$$P_i(x, t) = P_0 \cdot e^{i(\vartheta_0 + \omega t + k_0 x)} \quad (2)$$

$$P_r(x, t) = ([r] \cdot e^{i\vartheta}) P_0 \cdot e^{i(\vartheta_0 + \omega t - k_0 x)} \quad (3)$$

Nas eqs. (2) e (3) o sub-índice “0” indica que a incidência do som na superfície é normal, e $[r]$ o módulo do fator complexo de reflexão acústica da superfície (o trem refletido, eq.(3), é expresso em função da pressão incidente e do fator complexo de reflexão. Combinando as eqs, (1) a (3) resulta a primeira forma do campo espaço-temporal de amplitude complexa de pressão da onda acústica estacionária que se estabelece no interior do tubo.

$$P(x, t) = P_0 \cdot [1 + [r] \cdot e^{i(\vartheta - 2k_0 x)}] \cdot e^{i(\vartheta_0 + \omega t + k_0 x)} \quad (3)$$

Exprimindo o número de onda complexo, k_0 , na forma algébrica $k_0 = k'_0 - ik''_0$, sendo k'_0 o número de onda (parte real de k_0) e k''_0 o fator dissipativo de atenuação acústica no interior do tubo (simétrico da parte imaginária de k_0), a eq. (3) transforma-se em

$$P(x, t) = P_0 \cdot [e^{k''_0 x} + [r] \cdot e^{i(\vartheta - 2k'_0 x)} \cdot e^{-k''_0 x}] \cdot e^{i(\vartheta_0 + \omega t + k'_0 x)} \quad (4)$$

colocando em evidência que as secções do tubo onde a amplitude real do campo de pressão acústica é máxima ou mínima ocorrem nas posições, x , que tornam o termo complexo $e^{i(\vartheta - 2k'_0 x)}$ igual, respetivamente, a +1 ou -1 (reais puros).

2.3 Tubo de impedância e método da função de transferência

Considere-se agora a montagem ilustrada na figura 3, com características de construção e de funcionamento em tudo idênticas às da figura 2. Realça-se a colocação de dois microfones que se encontram colocados perpendicularmente à parede do tubo e que irão captar a pressão em duas posições distintas. O processamento dos sinais de pressão lidos nestas posições possibilitam a determinação de vários parâmetros acústicos.

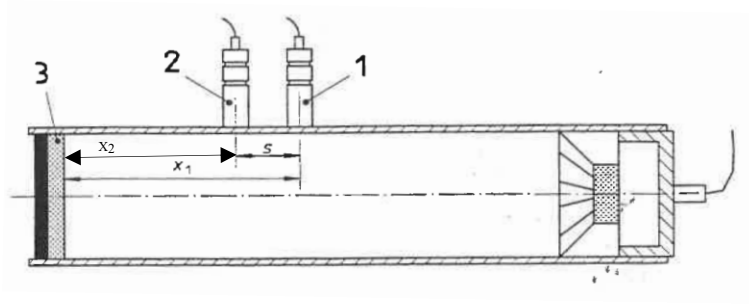


Figura 3 – Posição dos microfones: 1 e 2 microfones, 3 amostra a ensaiar. Adaptado de [7].

Com base nas formulações genéricas apresentadas nas eqs. (1) e (2), as pressões complexas incidente e refletida, podem ser agora escritas de forma simplificada sendo P_i e P_r as correspondentes amplitudes da pressão incidente eq.(5) e refletida eq.(6), no plano de referência de origem (superfície da amostra) e k_0 o número de onda complexo.

$$P_i = P_i \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot x} \quad (5)$$

$$P_r = P_r \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x} \quad (6)$$

As eqs. (5) e (6) permitem escrever as pressões complexas nas posições x_1 e x_2 de cada microfone (cfr. Figura 3)

$$P_1 = P_i \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot x_1} + P_r \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x_1} \quad (7)$$

$$P_2 = P_i \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot x_2} + P_r \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x_2} \quad (8)$$

A função de transferência para a onda incidente, entre as posições x_1 e x_2 dos microfones vem dada por

$$H_i = \frac{P_i \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot x_2}}{P_i \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot x_1}} = e^{-i \cdot k_0 \cdot (x_1 - x_2)} = e^{-i \cdot k_0 \cdot s} \quad (9)$$

Em que $s = x_1 - x_2$ é a distância entre o microfone 1 e o microfone 2 (cfr. Figura 3).

De modo idêntico, a função de transferência para a onda refletida, nas mesmas posições dos microfones, vem dada por

$$H_r = \frac{P_r \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x_2}}{P_r \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x_1}} = e^{i \cdot k_0 \cdot (x_1 - x_2)} = e^{i \cdot k_0 \cdot s} \quad (10)$$

Conjugando as eqs. (7) e (8) obtêm-se a função de transferência, H_{12} , para o campo sonoro. Considerando $P_r = r \cdot P_i$ virá

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{e^{i \cdot k_0 \cdot x_2} + r \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x_2}}{e^{i \cdot k_0 \cdot x_1} + r \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x_1}} \quad (11)$$

Finalmente com base na eq.(11), e fazendo uso das eqs. (9) e (10) obtêm-se o fator de reflexão r , no plano de referência na origem

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} = e^{2i \cdot k_0 \cdot x_1} \quad (12)$$

2.4 Correção dos erros de fase

O método usado faz uso de dois microfones o que, pelas suas características intrínsecas e configuração da montagem no tubo, dá origem a erros de fase, que devem ser corrigidos [7]. Esta correção deve ser efetuada determinando a função de transferência \mathbf{H}_c , sendo H_{12}^I a função de transferência obtida com os microfones na posições referenciadas na Figura 3, e H_{12}^{II} a mesma função mas tendo alternado a posição dos microfones relativamente à referência inicial. Para a obtenção da função de transferência de correção, \mathbf{H}_c , o tubo deve conter uma amostra “absorvente”, sem que no entanto seja dada qualquer especificação mais detalhada.[7].

$$\mathbf{H}_c = \sqrt{\frac{H_{12}^I}{H_{12}^{II}}} \quad (13)$$

Nos ensaios de caracterização das pistas, cujos resultados se apresentarão mais adiante, a metodologia documentada na norma [7] não foi seguida, e em alternativa foi utilizado um tampo rígido, metálico, onde foram colocados os dois microfones [8]. Nesse plano os dois microfones ficam sujeitos ao mesmo nível de pressão sonora e de desfasamento devido a qualquer diferença de geometria do trem de ondas sonora propagado no interior do tubo.

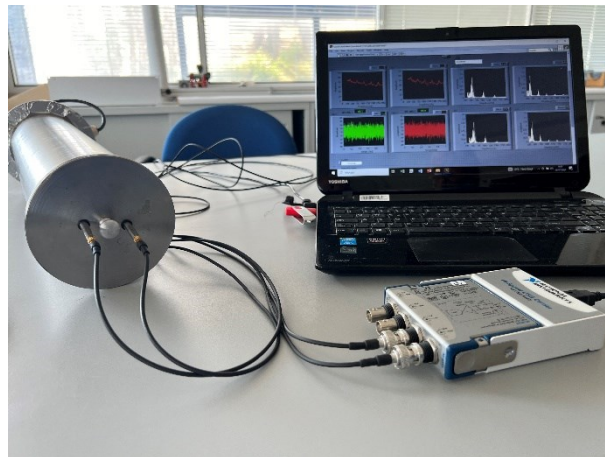


Figura 4 – Sistema utilizado para correção dos erros de fase. Microfones montados no tampo metálico.

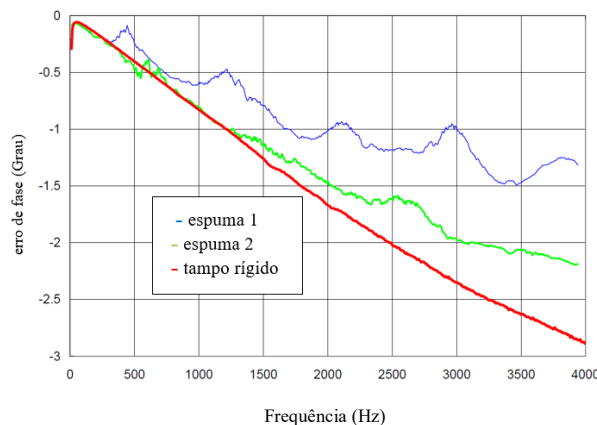


Figura 5 – Erros de fase obtidos com dois materiais absorventes distintos (espuma 1 e espuma 2) e o método do tampo rígido. Adaptado de [8]

A correção devida à utilização do método proposto em [7], pode levar a erros significativos quando o objetivo é caracterizar materiais com coeficientes de absorção muito baixos [8], como é o caso dos pavimentos de pistas de ensaio em que coeficientes de absorção podem ser inferiores a 0,08 [3].

2.5 Correção da atenuação no interior do tubo

É recomendada uma correção devida à atenuação no interior do tubo de impedância uma vez que tanto a onda incidente como a onda refletida estão sujeitas a atenuação devido às perdas térmicas e viscosas [7]. Esta correção pode ser estimada pela eq. (14).

$$\mathbf{k}_0'' = 1,94 \times 10^{-2} \sqrt{f}/c_0 d \quad (14)$$

onde f é a frequência em Hz, d o diâmetro em metros no caso de tubos de secção circular e c_0 a velocidade do som em m/s, finalmente \mathbf{k}_0'' é o fator dissipativo de atenuação acústica no interior do tubo em neper/m. Esta atenuação deve ser considerada quando a distância entre a superfície de teste e o microfone mais próximo excede três vezes o diâmetro do tubo.

Esta correção é distinta da requerida em [6] que preconiza uma correção efetuada com base numa medição de referência. Esta será conseguida aplicando ao sistema uma superfície de ensaio 100% refletora (foi utilizada uma placa de aço de 10mm de espessura). Os valores de absorção assim obtidos foram utilizados como valor de correção para todas as medições posteriores.

3 Procedimento de medição e análise (NP ISO 13472-2)

No presente trabalho foi utilizado um tubo de aço com um comprimento de 480mm e diâmetro 100mm, com dois microfones G.R.A.S. 46BD ¼" CCP, cujos eixos distam entre eles 81mm, estando o microfone mais baixo a uma distância de 100 mm do plano de referência [6].

Foi utilizada uma placa de aquisição NI 9233 instalada numa interface HI-Speed USB Carrier NI USB-9162. A aquisição de dados foi conseguida com base numa aplicação informática desenvolvida na linguagem de programação LabView.

Esta aplicação possui subrotinas que possibilitam a obtenção dos sinais correspondentes aos espectros de auto-correlação e de correlação cruzada, sendo a partir destas que são obtidas as funções de transferência complexas dos sinais captados pelos microfones.

$$\mathbf{H}_{12} = \left[\frac{\mathbf{S}_{12}}{\mathbf{S}_{11}} \cdot \frac{\mathbf{S}_{22}}{\mathbf{S}_{21}} \right]^{1/2} = \mathbf{H}_r + i\mathbf{H}_i \quad (15)$$

sendo \mathbf{S}_{11} e \mathbf{S}_{22} , respetivamente, os valores complexos das autocorrelações dos sinais captados pelos microfones 1 e 2; \mathbf{S}_{12} e \mathbf{S}_{21} os valores complexos da correlação cruzada entre os dois microfones.

É a partir destas funções de transferência complexas apresentadas na eq.(15) que são obtidos os coeficientes de reflexão sonora (eq.(12)), bem como outros parâmetros relacionados, nomeadamente, os coeficientes de absorção sonora, a impedância acústica específica da superfície e a correspondente admitância acústica específica.

Com o sistema que foi implementado todos estes parâmetros podem ser obtidos num intervalo de frequências de 315 Hz a 1600 Hz.

3.1 Caracterização das pistas de ensaio utilizadas pela ADAI

A ADAI (Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica industrial- unidade ID da UC), encontra-se acreditada para a execução de ensaios em veículos automóveis, pelo IPAC (Instituto

Português de Acreditação). Algumas normas de ensaio [1], [2] requerem pistas onde, para além de outros parâmetros característicos dos pavimentos rodoviários, os coeficientes de absorção acústica devem ser caracterizados aquando do início da sua utilização, sendo posteriormente verificadas regularmente, de 4 em 4 anos. Por forma a poder garantir algumas características referidos na norma, como seja a planicidade, a homogeneidade do piso, as dimensões e afastamento relativamente a obstáculos que possam causar reflexões relevantes, e ainda locais cujos níveis de ruído residual sejam relativamente baixos, para não ser necessário proceder a correções às medições efetuadas durante os ensaios, a ADAI possui autorização para utilizar pistas de aviação que atualmente têm tráfego aéreo muito reduzido, ou mesmo já inexistente. As pistas de aviação caracterizadas são: Aeródromo Municipal Bissaya Barreto, em Coimbra, e a pista de aviação militar, da antiga Base Aérea n.º 2 na Ota, onde atualmente funciona o CFMTFA - Centro de Formação Militar e Técnica da Força Aérea.

3.1.1 Caracterização acústica da pista de aviação do Aeródromo Municipal Bissaya Barreto

A imagem apresentada na figura 6 identifica a posição relativa da pista do Aeródromo Municipal Bissaya Barreto, em Coimbra. Esta pista tem um comprimento total de 920m, com uma largura de 30m e situa-se a uma altitude de 174 m. A zona de ensaios caracterizada encontra-se assinalada a cor laranja.



Figura 6 – Vista aérea da pista do aeródromo, sua orientação e área avaliada

Os pontos de medição foram selecionados seguindo as indicações da norma [3].

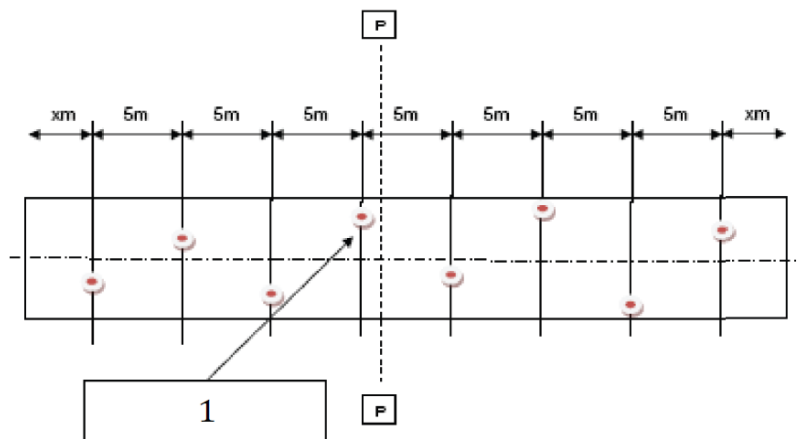


Figura 7 – Esquema ilustrativo para marcação dos pontos a caracterizar - área de condução. Adaptado de [3]

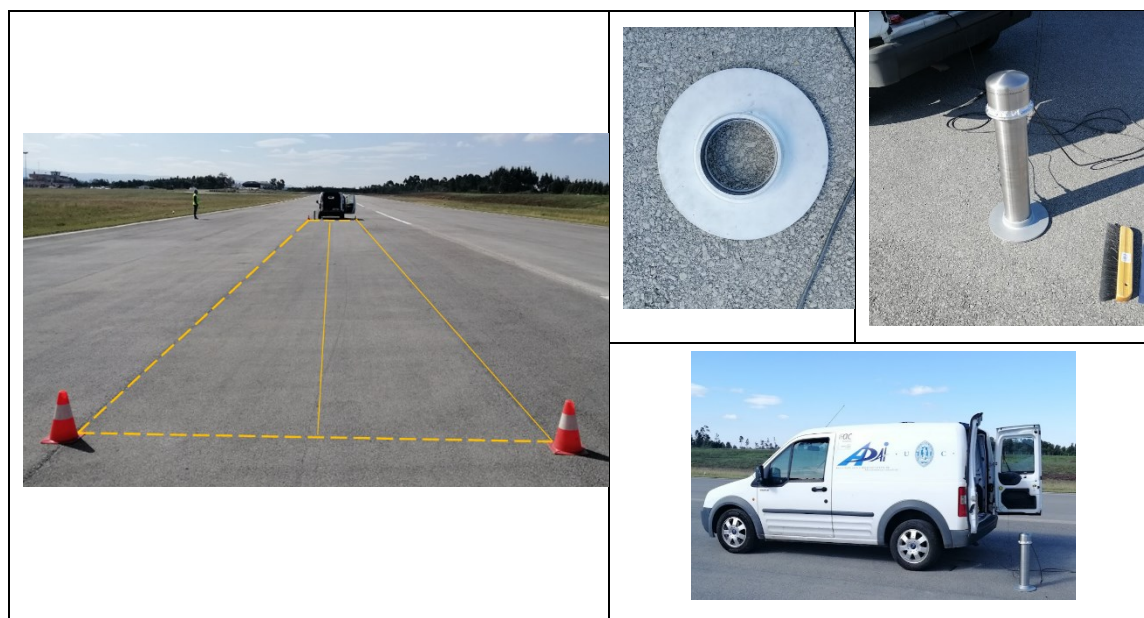


Figura 8 – Perspetiva da área de medição e colocação do tubo de medição sobre a pista. Fotos de autor

Tabela 1 – Resultados da medição por bandas de terços de oitava.

Frequência, Hz	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600
Coefficiente de absorção médio	---	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06
Desvio padrão	---	0,003	0,004	0,004	0,005	0,006	0,007	0,007	0,007

Para cada banda de terço e oitava, a incerteza expandida do coeficiente de absorção é estimada em 0,029, com um fator de probabilidade de cobertura de 95% [6].

3.1.2 Caracterização acústica da pista de aviação militar do CFMTFA - Centro de Formação Militar e Técnica da Força Aérea (BA2)

A imagem da figura 9 identifica a entrada no perímetro militar da antiga Base Aérea N.º 2 (BA2), que em 1960 deixou de ser uma base operacional, e que desde 1992 passou a ser denominada por Centro de Formação Militar e Técnica da Força Aérea (CFMTFA)



Figura 9 – Centro de Formação Militar e Técnica da Força Aérea (BA2)



Figura 10 – Vista aérea da pista de aviação, sua orientação e área avaliada

A imagem 10 mostra a posição relativa da pista de aviação militar, na Ota. Esta pista tem um comprimento aproximado de 2000m, com uma largura de 40m. A zona de ensaios caracterizada encontra-se assinalada com a cor amarela.

Os pontos de medições, anteriormente ilustrados na Figura 7, foram selecionados segundo o critério da norma,



Figura 10 – Perspetiva da área de medição e colocação do tubo de medição sobre a pista. Fotos dos autores

Tabela 2 – Resultados da medição por bandas de terços de oitava.

Frequência, Hz	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600
Coeficiente de absorção médio	---	0,01	0,04	0,08	0,03	0,07	0,08	0,07	0,08
Desvio padrão	---	0,012	0,013	0,019	0,012	0,010	0,015	0,013	0,014

Para cada banda de terço e oitava, a incerteza expandida do coeficiente de absorção é estimada em 0,029, com um fator de probabilidade de cobertura de 95% [6].

4 Conclusões

A implementação da norma de ensaio [6] permitiu a obtenção dos coeficientes de absorção acústica da superfície das pistas de ensaio com o equipamento construído e desenvolvido no Laboratório.

Os coeficientes de absorção não excedem os valores especificados para todas as frequências no intervalo de 315Hz a 1600Hz [3] sendo sempre inferiores ou iguais a 0,08, o valor máximo permitido na área de condução.

O intervalo de frequências que é possível analisar com a instalação, depende do comprimento e do diâmetro do tubo metálico utilizado. O posicionamento e o distanciamento entre microfones poderão requerer ainda algum ajuste caso se pretenda utilizar o tubo de impedância num intervalo de frequências

ligeiramente diferente. Com a geometria da montagem utilizada, houve alguma falta de repetibilidade nos valores de absorção sonora para a frequência de 250Hz. Esta situação poderá vir a ser melhorada experimentando diferentes posições e espaçamentos dos microfones, como por exemplo a possibilidade de utilizar três opções distintas de espaçamento que permitam explorar uma gama de frequência mais baixa [6].

Agradecimentos

Trabalho desenvolvido no âmbito do projeto LAETA LA/P/0079/2020, DOI: 10.54499/LA/P/0079/2020 (<https://doi.org/10.54499/LA/P/0079/2020>)

Referências

- [1] Regulamento n.º 51 da Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE) — Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles having at least four wheels with regard to their sound emissions. E/ECE/324/Rev.1 Add.50/Rev.3 E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.50/Rev.3; 2016
- [2] Regulamento n.º 138 da Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE) — Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility E/ECE/324/Rev.2/Add.137/Rev.1, E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.137/Rev.1; 2017
- [3] ISO 10844: 2014, Acoustics — Specification of test tracks for measuring sound emitted by road vehicles and their tyres; 2014.
- [4] ISO 10844: 1994, Acoustics — Specification of test tracks for measuring sound emitted by road vehicles and their tyres; 1994.
- [5] ISO 10534-1:1996, Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 1: Method using standing wave ratio.
- [6] NP ISO13472-2:2022, Acústica — Medição *in situ* de propriedades de absorção acústica de pavimentos rodoviários - Parte 2: Método local para superfícies refletoras; 2022.
- [7] ISO 10534-2:1998, Acoustics — Determination of acoustic properties in impedance tubes - Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance, 1998.
- [8] Han, J., Herrin, D.W. & Seybert, A.F. (2007). Accurate Measurement of Small Absorption Coefficients. *Department of Mechanical Engineering, University of Kentucky*, 07NVC-234, pp1-5.