

Validação das câmaras reverberantes para isolamento ao ruído aéreo de acordo com a ISO 10140, no laboratório da MMC LAB, localizado em Canoas/RS.

Scherer, Cláudio.¹; Silva, Gêssica.¹; Menoni, Gabriel.¹; Mateus, Diogo.²

¹ MMC LAB, Canoas, RS, Brasil, mmclab@mmclab.com.br; ² Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil - FCTUC.

Resumo

O presente trabalho apresenta os procedimentos de validação, dados pela ISO 10140, das câmaras reverberantes do laboratório da MMC LAB Controle Tecnológico Ltda, utilizadas para determinar o índice de redução sonora (R_w) de elementos de construção. As medições tiveram por objetivo validar os volumes, áreas, difusibilidade, tempo de reverberação das câmaras de emissão e de recepção, bem como determinar os valores máximos do índice de redução sonora ao ruído aéreo (R'_{max}) de uma parede pesada. A amostra foi instalada em um pórtico de concreto, que estava desconectada das câmaras de emissão e recepção, de modo que os resultados aqui apresentados são referentes somente ao sistema de vedação ensaiado. Para a obtenção do índice de redução sonora máximo (R'_{max}) foi utilizada a metodologia especificada na ISO 10140, a qual especifica que a emissão de ruído no ambiente emissor seja feito através de uma fonte sonora omnidirecional e a medição no ambiente receptor seja avaliado em bandas de terço de oitava (de 100 Hz a 5000 Hz). Foram instalados difusores de policarbonato para garantir a uniformidade espacial nas salas, além de definir elementos absorvedores para redução do tempo de reverberação nas câmaras. Definiu-se, através da metodologia apresentada na ISO 10140, o tempo de reverberação estrutural da amostra em questão, onde o fator de perda total (n_{total}) deve ser maior ou igual ao fator de perda mínimo (n_{min}). Os resultados obtidos de uniformidade espacial, tempo de reverberação das duas câmaras reverberantes e tempo de reverberação estrutural se mostraram satisfatórios, uma vez que os valores ficaram dentro da faixa de valores exigidos pela ISO 10140.

Palavras-chave: câmaras reverberantes, ISO 10140, índice de redução sonora, isolamento ao ruído aéreo.

Abstract

The present work outlines the validation procedures, as defined by ISO 10140, for the reverberation chambers at MMC LAB Controle Tecnológico Ltda's laboratory. These chambers are employed to determine the sound reduction index (R_w) of construction elements. The measurements aimed to validate the volumes, areas, diffusibility, and reverberation time of both emission and reception chambers. Additionally, the study sought to determine the maximum values of the sound reduction index for airborne noise (R'_{max}) of a heavy wall. The sample was installed within a concrete portal, isolated from the emission and reception chambers, making the presented results exclusively applicable to the tested sealing system. To determine the maximum sound reduction index (R'_{max}), the methodology specified in ISO 10140 was employed. This methodology stipulates that noise emission in the emitting environment should be carried out using an omnidirectional sound source, and measurements in the receiving environment should be assessed in one-third octave bands (from 100 Hz to 5000 Hz). Polycarbonate diffusers were installed to ensure spatial uniformity in the rooms, and absorptive elements were incorporated to reduce reverberation time in the chambers. Furthermore, using the methodology outlined in ISO 10140, the structural reverberation time of the tested sample was determined, where the total loss factor (n_{total}) should be equal to or greater than the minimum loss factor (n_{min}). The results obtained for spatial uniformity, reverberation time in both reverberation chambers, and structural reverberation time proved to be satisfactory, as they fell within the required range specified by ISO 10140.

Keywords: reverberation chambers, ISO 10140, maximum sound reduction index, airborne sound insulation

1. Introdução

A fim de garantir o isolamento sonoro adequado dos elementos de vedação na construção civil, torna-se cada vez mais importante medir esses parâmetros em ambientes de laboratório. Essa prática tem como objetivo validar materiais que atendam aos requisitos acústicos estabelecidos pelas normas nacionais e internacionais.

Neste estudo, realizou-se a caracterização de duas câmaras reverberantes horizontais, construídas no laboratório da MMC LAB Controle Tecnológico Ltda., localizado em Canoas/RS. Essas câmaras foram especialmente projetadas para os ensaios de isolamento acústico de elementos verticais, como paredes, divisórias, vidros, janelas, portas e demais aberturas. As câmaras são fixas, desconectadas uma da outra e desconectadas do piso (Figura 1).

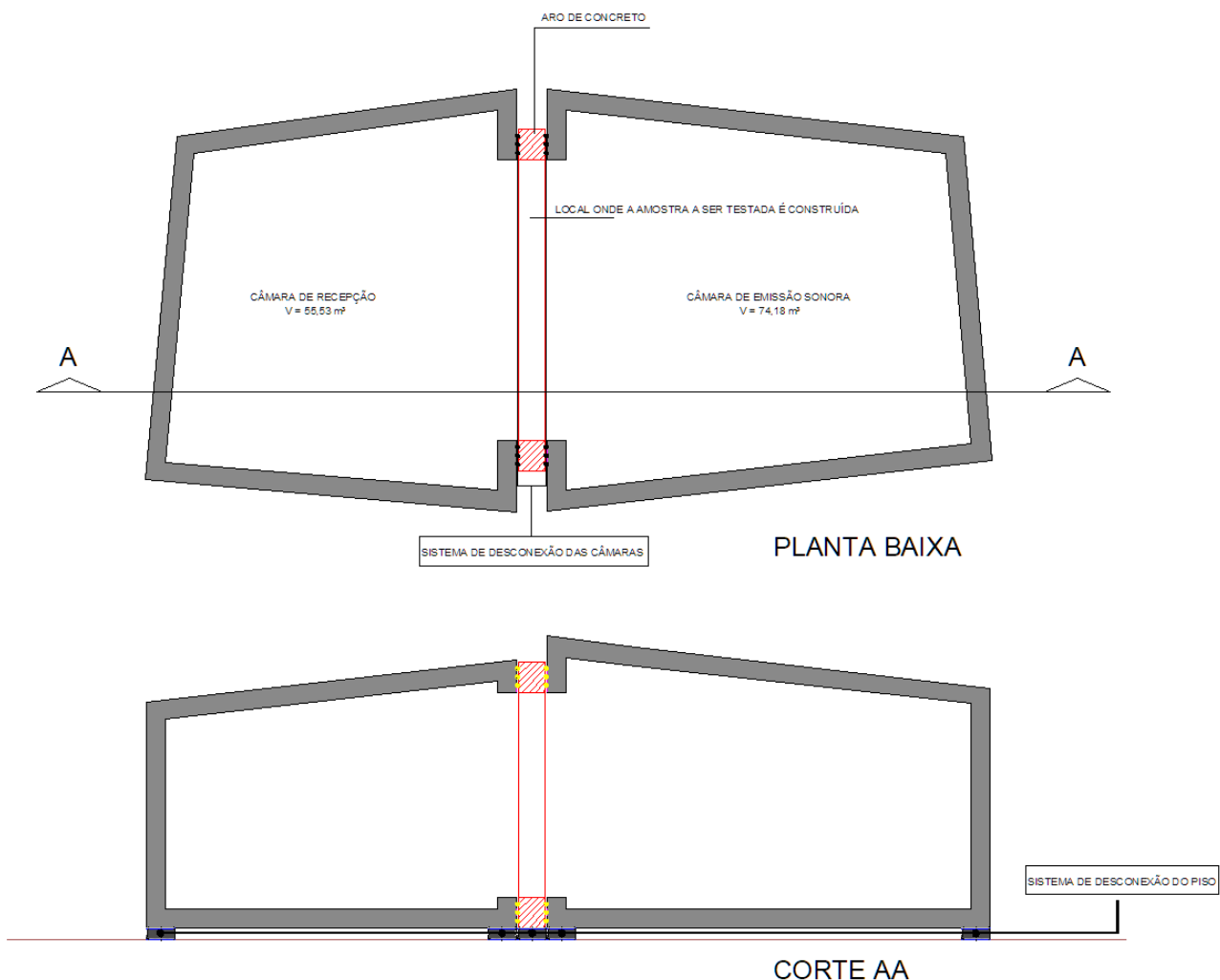


Figura 1: Planta e corte das câmaras reverberantes do laboratório.

Os ensaios para a determinação do índice de redução sonora em laboratório estão baseados nas metodologias dadas pela ISO 10140, que define critérios de aceitação para tempo de reverberação, fator de perdas internas da amostra e também da difusibilidade dos ambientes emissor e receptor. Os valores de ruído de fundo no ambiente receptor devem ser baixos, a fim de garantir que nenhum outro som atrapalhe a medição. Além disso, na interface entre o pórtico de concreto e as câmaras, utilizou-se um sistema de vedação pneumático, com o objetivo de desconectar a amostra das duas câmaras de ensaio. Neste artigo, são descritos os procedimentos de preparação e caracterização necessários para validar as condições exigidas para a realização de ensaios de isolamento a ruído aéreo em laboratório.

2. Características das câmaras de ensaio

A ISO 10140 define que o volume das salas deve ser de no mínimo 50 m³ e que deva existir uma diferença de no mínimo 10% nos volumes das duas salas. Os valores foram obtidos através de uma varredura feita com um scanner 3D a laser (Figura 2). Os volumes das câmaras de emissão e recepção do laboratório são exibidos na Tabela 1.

Tabela 1: Características geométricas das câmaras da MMC LAB.

	Câmara de Emissão	Câmara de Recepção
Área do Piso	22,61 m²	17,83 m²
Volume total	74,19 m³	55,53 m³
Área da abertura de teste	10,00 m²	

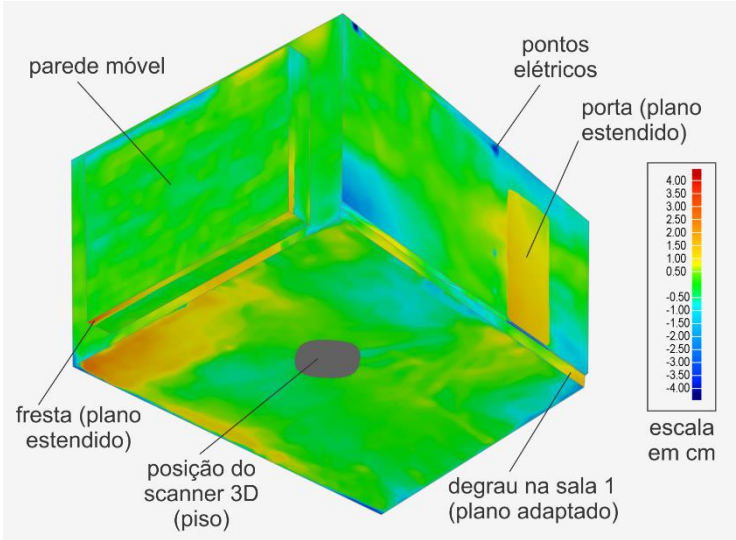


Figura 2: Varredura 3D para determinação do volume das câmaras e o erro atribuído à leitura em centímetros.

As lajes do piso e teto são maciças em concreto armado, com 20 cm e 25 cm de espessura, respectivamente. As paredes foram construídas em pedra grês e reboco argamassado, totalizando 30 cm de espessura. As portas utilizadas são duplas e o espaço entre elas foi preenchido com lã de pet de alta densidade. A abertura do aro de concreto para testes tem dimensões de 3,70 m x 2,70 m, totalizando 10 m² de área. O aro é construído em concreto armado e é utilizado para dar suporte às amostras a serem testadas. Essa estrutura é então içada por uma ponte rolante e posicionada entre as duas câmaras. As câmaras foram construídas sobre amortecedores de borracha natural desconectadas da estrutura do prédio e entre si (Figura 3). Além disso, o isolamento entre a câmara e o aro da amostra é garantido através de um sistema de vedação pneumático.



Figura 3: Construção das câmaras acústicas.

2.1 Tempo de reverberação das câmaras

Para cumprir com esse requisito da ISO 10140, exige-se que o tempo de reverberação nas duas câmaras esteja situado dentro do intervalo dado pela Equação 1:

$$1 \leq T \leq 2 (V/50)^{2/3}, \quad (1)$$

sendo que:

V é o volume da câmara em metros cúbicos;

T é o tempo de reverberação obtido para as frequências de 100 Hz a 5.000 Hz, em segundos. Os resultados obtidos pelo laboratório são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Tempo de reverberação das câmaras, de acordo com a ISO 3382

Frequência (terço de oitava)	$T(s)$ na Câmara de emissão	$T(s)$ na Câmara de recepção
100 Hz	2,52	2,09
125 Hz	2,51	1,57
160 Hz	2,07	1,59
200 Hz	1,80	1,55
250 Hz	1,39	1,22
315 Hz	1,19	1,05
400 Hz	1,23	1,14
500 Hz	1,11	1,16
630 Hz	1,31	1,23
800 Hz	1,38	1,29
1 kHz	1,46	1,35
1,25 kHz	1,45	1,40
1,6 kHz	1,46	1,44
2 kHz	1,53	1,48
2,5 kHz	1,59	1,49
3,15 kHz	1,56	1,47
4 kHz	1,55	1,44
5 kHz	1,42	1,35

O tempo de reverberação ideal, tanto nas baixas quanto nas altas frequências, foi atingido após a instalação de painéis absorvedores preenchidos com lã de rocha de alta densidade, fixos nas paredes das duas câmaras (Figura 4).



Figura 4: Absorvedores instalados nas paredes das câmaras.

2.2 Uniformidade espacial nas câmaras

As câmaras devem ser suficientemente difusas, conforme requer a norma ISO 10140. Para isso, foi escolhido estudar a uniformidade espacial do campo de pressão das câmaras, através do desvio padrão da pressão sonora, que está relacionada com a variância do campo sonoro, dado pela Equação 2

$$\sigma^2(f) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [SPL(r_i, f) - \overline{SPL}(f)]^2, \quad (2)$$

sendo que:

N = número de posições de fonte investigadas;

$SPL(r_i, f)$ = Nível de pressão sonora (LZ_{eq}) na posição r_i e frequência f , em dB;

$\overline{SPL}(f)$ = média logarítmica das N posições para cada frequência f , em dB.

Como referência, foram utilizados os valores máximos admissíveis para o desvio padrão dados pela ISO 3741, como mostra a Tabela 3:

Tabela 3: Valores máximos permitidos para a uniformidade especial, de acordo com a ISO 3741.

Frequência central (terço de oitava)	Desvio padrão máximo σ (dB)
100 Hz – 160 Hz	1,5
200 Hz – 630 Hz	1,0
800 Hz – 2500 Hz	0,5
3150 Hz – 10.000 Hz	1,0

Para garantir a difusão sonora no ambiente, foram instalados painéis fixos de policarbonato no teto das duas câmaras (Figura 5). Esses painéis foram fixados aleatoriamente utilizando esticadores metálicos de comprimentos diferentes, proporcionando curvaturas levemente côncavas e convexas, com raios de curvatura variados.



Figura 5: Difusores fixos, constituídos por painéis em policarbonato, dispostos no teto da câmara.

Foram realizadas 26 medições do nível de pressão sonora para cada posição de fonte sonora e em cada câmara reverberante. Os resultados da uniformidade espacial obtidos para as 6 posições de fonte nas câmaras de emissão e recepção são apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Comparam-se os resultados obtidos pelo laboratório do desvio padrão com o desvio padrão máximo dado na Tabela 3. São considerados aceitáveis se os resultados obtidos pelo laboratório são menores ou iguais aos limites, ou seja, se $\sigma(f) \leq \text{limite ISO 3741}$.

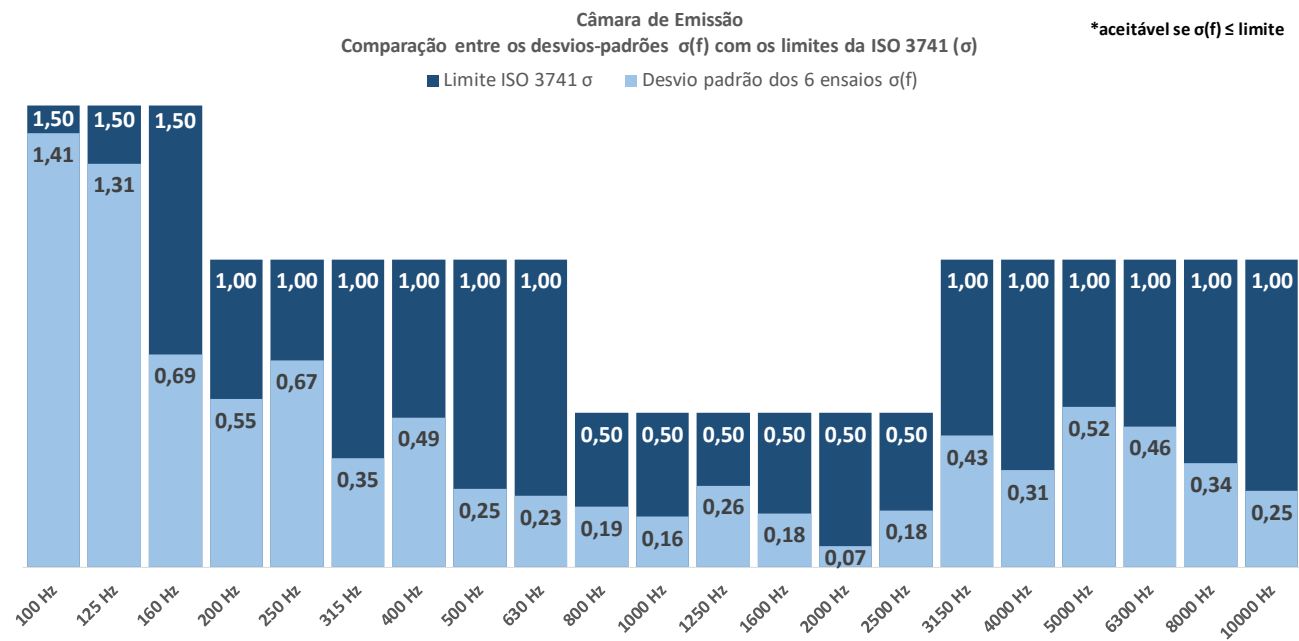


Figura 6 - Resultados da uniformidade espacial na câmara de emissão.

Observa-se, através dos resultados da Figura 6, que em todas as bandas de frequência os desvios-padrões obtidos pelo laboratório ficaram abaixo dos limites apresentados pela ISO 3741.

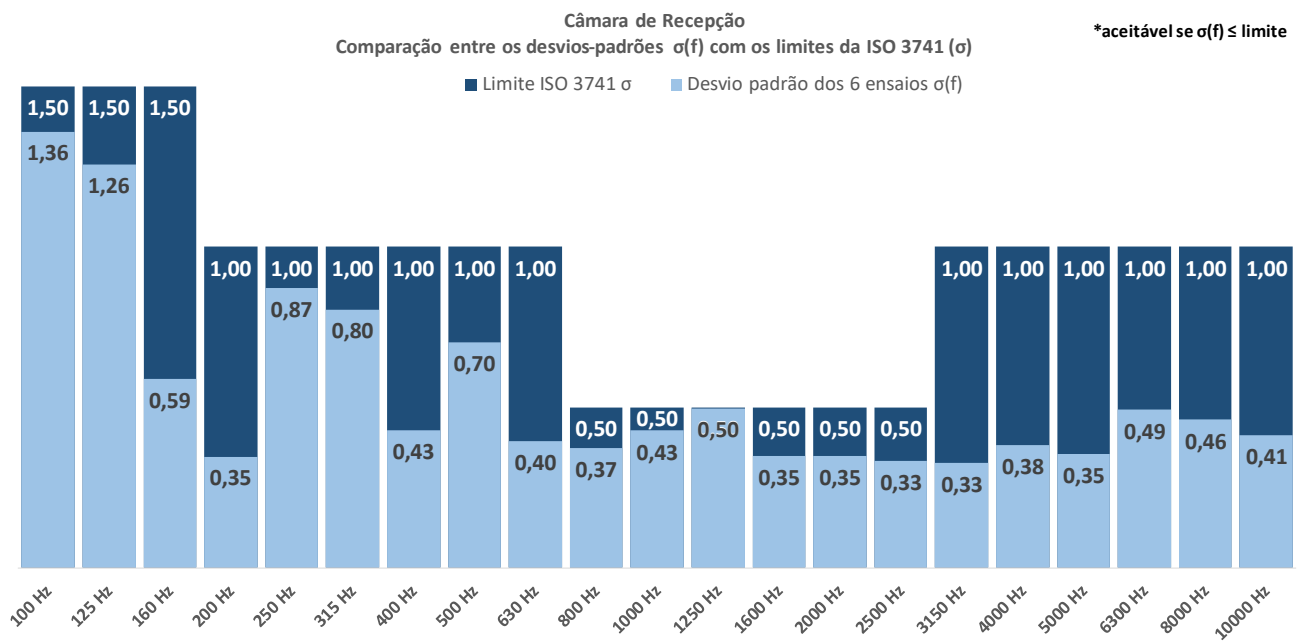


Figura 7 - Resultados da uniformidade espacial na câmara de recepção.

De igual forma, os resultados apresentados pela Figura 7 mostram-se aceitáveis, pois $\sigma(f) \leq \text{limite}$ da ISO 3741 em todas as bandas de frequência.

2.2 Determinação dos pontos ótimos de medição

A ISO 10140 define que devem ser estabelecidos pontos ótimos para as posições de fonte sonora na sala emissora. Essas posições levam em consideração a excitação dos modos das câmaras, com o objetivo de posicionar os equipamentos em pontos que atinjam a maior homogeneidade sonora possível.

O laboratório investigou 6 posições de fonte sonora e a diferença D entre a sala emissora e receptora tem seu desvio padrão s_i calculado, nas frequências centrais de 100 Hz a 315 Hz. O desvio padrão s_i da diferença D é apresentado pela Equação 3.

$$s_i^2 = \left[\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (D_{ji} - u_i)^2 \right], \quad (3)$$

sendo que:

D_{ji} é a diferença de nível para a posição j de fonte na frequência i , em dB;

u_i é a média aritmética das diferenças de nível na frequência i , em dB;

m é o número de posições de fonte investigadas pelo laboratório.

O número N de posições de fonte deve satisfazer as três seguintes condições:

$$N \geq 2, \quad (3.3.1)$$

$$N \geq (s_i / \sigma_i)^2, \quad (3.3.2)$$

$$N \geq (\sum_i s_i / 4,8)^2, \quad (3.3.3)$$

sendo que:

s_i é dado pela Equação 3;

σ_i é o desvio padrão máximo do valor médio das diferenças de nível para as 6 posições de fonte, prescrito pela ISO 10140 e apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Desvio padrão máximo da média das diferenças de nível para as N posições.

f (Hz)	σ_i (dB)
100	1,4
125	1,2
160	1,0
200	0,8
250	0,8
315	0,8

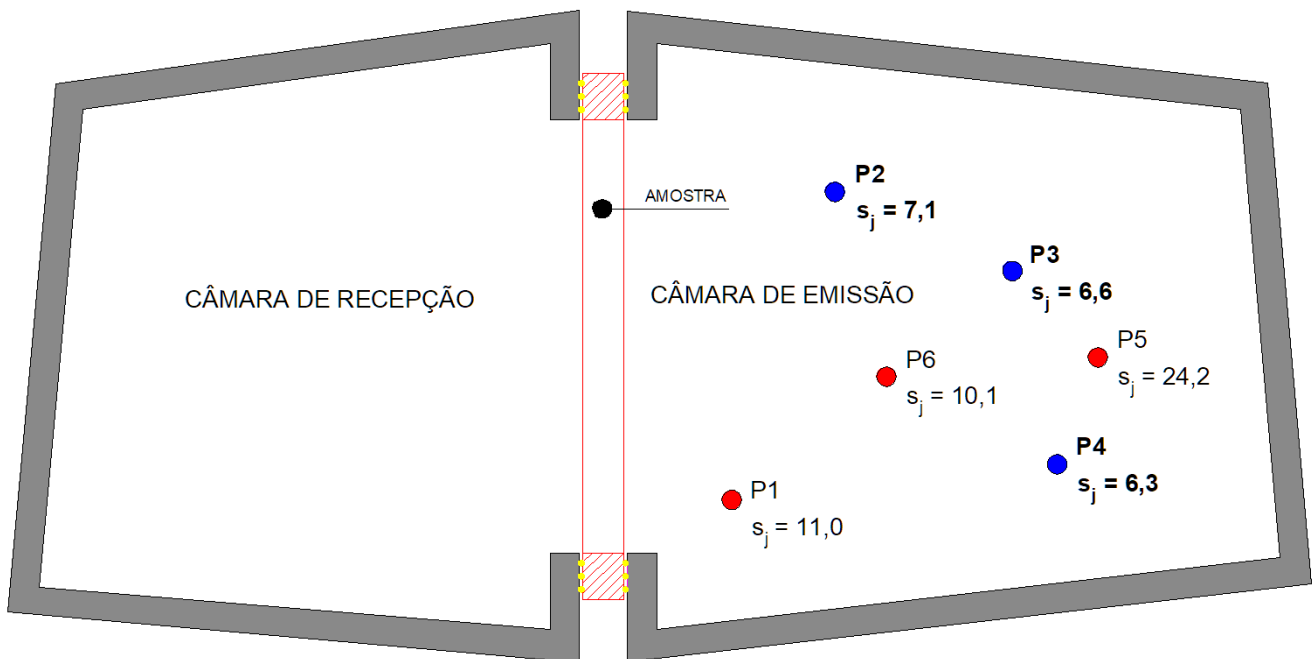
O valor de N que atendeu às 3 condições anteriores foi de 3.

Por fim, define-se a soma s_j dos quadrados dos desvios obtidos a partir dos valores médios das seis frequências de 100 Hz a 315 Hz, dado pela Equação 4.

$$s_j = \sum_{i=1}^6 (D_{j,i} - u_i)^2, \quad (4)$$

Para a definição dos pontos ótimos de fonte sonora, escolhe-se N posições que tenham os menores valores de s_j . Portanto, são utilizadas as 3 posições de fonte que obtiveram os menores resultados de s_j .

Na Figura 8 são apresentados os resultados de s_j e as 3 posições escolhidas (P2, P3 e P4 em azul) dentre as 6 posições investigadas. As outras 3 posições de fonte (P1, P5 e P6 em vermelho) foram descartadas.

**Figura 8:** Posições de fonte que atenderam a todas as condições.

2.4 – Tempo de reverberação estrutural da amostra

A amostra testada foi uma parede com blocos de concreto, preenchidos com graute (total de 281,33 kg/m²), revestidos com 3 cm de reboco em uma face (total de 60 kg/m²) e argamassa de assentamento dos blocos (25 kg/m²).

A ISO 10140 exige que a dissipação da energia da estrutura do aro resulte num fator de perda de no mínimo ($\eta_{\min}$) o valor dado pela Equação 5:

$$\eta_{\min} = 0,01 + 0,3\sqrt{f}, \quad (5)$$

sendo que:

f é a frequência (Hz).

Já o fator de perdas total (η_{total}) obtido pelo laboratório é a soma das perdas das frações de energia dissipadas devido às perdas internas, nas fronteiras e por radiação. Esse descritor deve ser determinado a partir da Equação 6 e para efeitos de validação desse requisito, $\eta_{\text{total}} \geq \eta_{\min}$.

$$\eta_{\text{total}} = \frac{2,2}{f \cdot T_s}, \quad (6)$$

O ensaio foi realizado com a excitação da parede através de impactos manuais com um martelo de borracha. O tempo de reverberação estrutural (T_s) foi obtido com o uso de um acelerômetro instalado na amostra e posteriormente inserido na Equação 4 para a obtenção de η_{total} . Os valores obtidos pelo laboratório para esses requisitos são apresentados no gráfico da Figura 7.

Constata-se que para as frequências de 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz e 200 Hz, os valores ficam acima dos limites exigidos pela ISO 10140 (Figura 9). Os valores teóricos impostos pela referida Norma talvez devam ser revistos, visto que outros trabalhos que abordaram o mesmo tema [6] chegaram a essa mesma conclusão. Para os valores a partir de 250 Hz até 3.150 Hz, todos os resultados obtidos pelo laboratório ficaram em acordo com os limites da Norma.

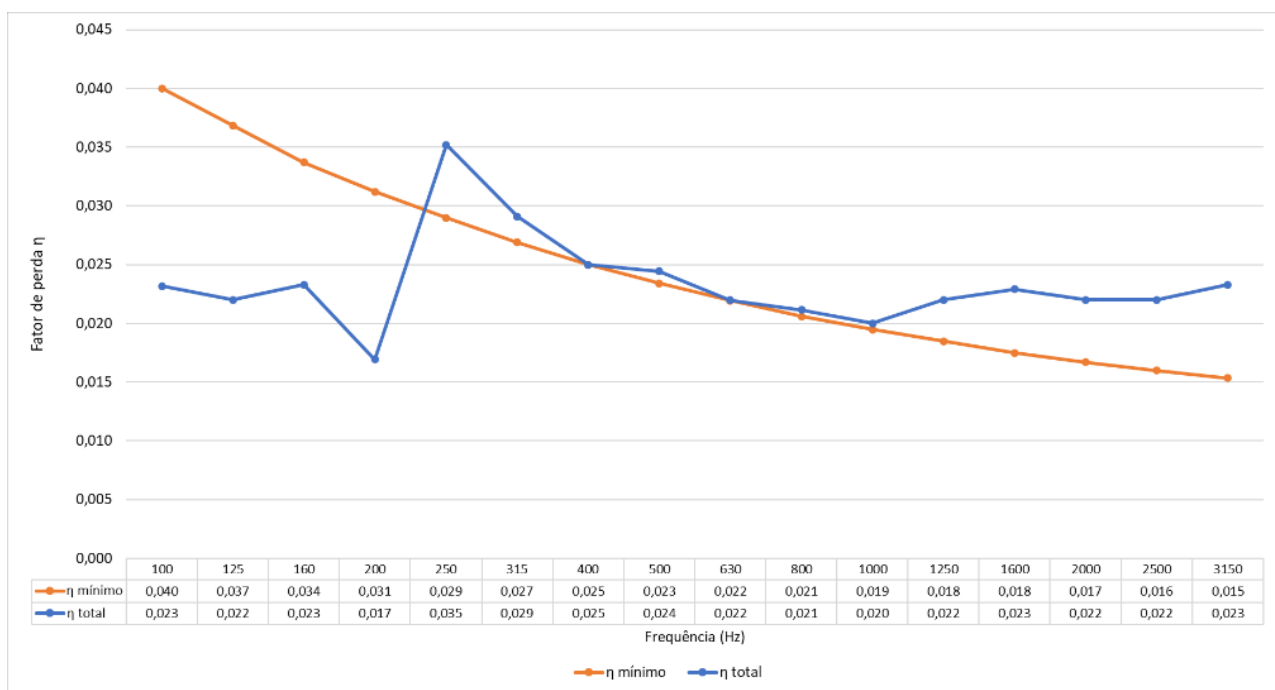


Figura 9: Resultados do fator de perda obtidos pelo laboratório em comparação com o fator de perda mínimo.

2.5 – Índice de redução sonora máximo

Para evitar que seja necessário avaliar a contribuição das transmissões marginais sempre que se testam elementos com um desempenho alto, deve-se determinar o índice de redução sonora máximo ($R'_{\max}$) para um conjunto de soluções representativas do tipo de ensaios a efetuar. O anexo A da norma ISO 10140 indica três construções representativas a serem ensaiadas nas câmaras horizontais (parede do tipo A, parede do tipo B e parede do tipo C).

Além de determinar o $R'_{\max}$ do laboratório, o objetivo é atestar que não existem transmissões significativas por flancos (F_d , F_f e D_f) e apenas transmissão por via direta (D_d) da câmara de emissão (1) para a câmara de recepção (2) (Figura 10). Quando os resultados obtidos de R' forem superiores a ($R'_{\max} - 15\text{dB}$), faz-se necessário investigar as transmissões por flancos. Caso sejam menores que essa diferença, R' pode ser considerado como R e a transmissão por flancos é considerada insignificante.

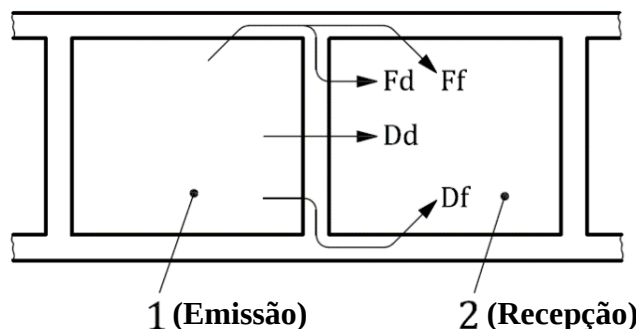


Figura 10: Avaliação da transmissão por flancos da câmara emissora para a receptora.

sendo que:

D_d é pressão sonora que entra diretamente na sala receptora através da amostra em teste;

D_f é a pressão sonora que entra diretamente na sala receptora, mas é transmitida por flancos;

F_d é a pressão sonora que entra pelos flancos, mas é transmitida pela amostra em teste;

F_f é a pressão sonora que entra por flancos e é transmitida por flancos.

Nesse artigo são apresentados os resultados da parede tipo C, que consiste em uma parede de alvenaria pesada, $(400 \pm 40) \text{ kg/m}^2$. Essa parede deverá ser revestida por uma estrutura independente constituída por duas camadas de placas de gesso cartonado, com 12,5 mm de espessura cada, assentados sobre perfis de madeira ou metálicos. Entre a parede e o revestimento deve existir uma cavidade com pelo menos 50 mm de espessura contendo lã mineral.

A parede deste tipo, que foi construída para ser ensaiada nas câmaras da MMC LAB, foi executada com blocos de concreto de 14 cm de espessura, preenchidos com graute. As juntas possuem cerca de 1,0 cm e a parede foi rebocada com argamassa com 3 cm em uma das faces e 2 cm na outra face, apresentando uma massa superficial de cerca de $396,33 \text{ kg/m}^2$.

Na janela de testes da câmara de emissão foi executado um revestimento composto por duas placas de gesso acartonado com 12,5 mm de espessura cada, com juntas desencontradas e convenientemente tratadas em ambas as camadas (com bandas de papel e massa de acabamento) e calafetadas (com bandas acústicas no perímetro do aro), fixadas sobre uma estrutura independente de perfis metálicos, onde se incluiu lã de rocha com 5 cm de espessura e densidade de 32 kg/m^3 (Figura 11). A caixa de ar entre a parede pesada e o revestimento é de aproximadamente 20 cm. Este revestimento foi executado fixado na janela de ensaio da câmara de emissão, totalmente desvinculado estruturalmente do aro de testes que contém a parede pesada.

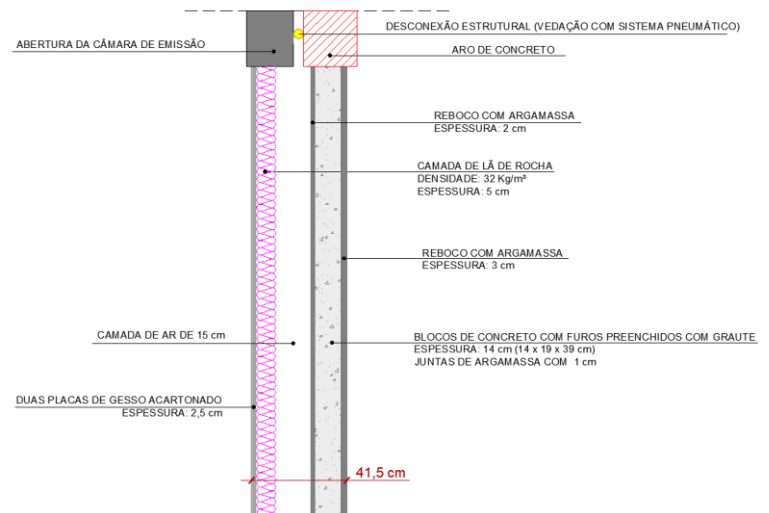
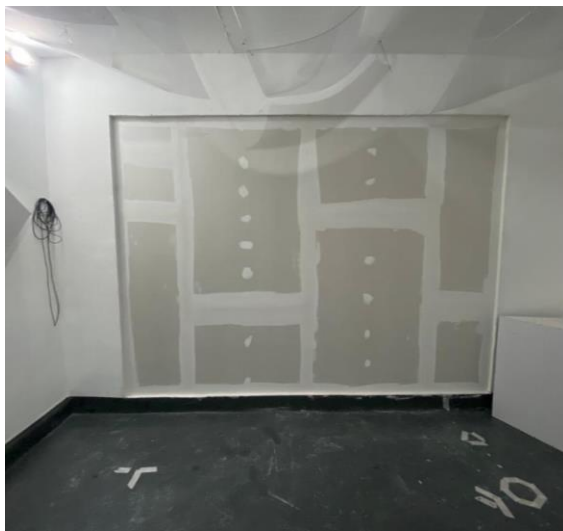


Figura 11: Parede do tipo C: a) provete instalado entre as câmaras horizontais; b) composição pesada de alvenaria.

Os resultados comparativos dos dois ensaios são apresentados na Tabela 7 e mostram que em nenhuma banda de frequência o resultado de R' superou a diferença de ($R'_{\text{máx}} - 15\text{dB}$), atestando que para essa amostra a transmissão por flancos (F_d , F_f e D_f) é considerada insignificante. Portanto, todos os resultados obtidos pelo laboratório são oriundos de transmissão direta (D_d).

Tabela 7: Valores de $R'_{\text{máx}}$, R' e R_w (dB) para a parede do tipo C.

Frequência (Hz)	Parede do tipo C	Parede do tipo C – sem revestimento em drywall
	$R'_{\text{máx}}$ (dB)	R' (dB)
100	63,2	37,1
125	60,3	40,4
160	62,3	44,0
200	62,7	41,1
250	67,3	41,7
315	73,2	44,7
400	76,5	48,2
500	77,8	50,1
630	83,2	53,8
800	86,0	56,4
1000	88,6	58,5
1250	92,5	60,4
1600	94,8	61,4
2000	96,5	62,3
2500	98,0	64,1
3150	99,3	64,7
4000	98,5	65,8
5000	94,3	65,8
R_w	80 dB	55 dB

3. Conclusão

Este documento apresentou, de forma resumida, as características e resultados obtidos para a validação das câmaras acústicas do laboratório da MMC LAB Controle Tecnológico Ltda. A difusão do campo sonoro foi controlada e garantida através da instalação de painéis de policarbonato fixos no teto das duas salas. Todos os resultados obtidos para o controle da uniformidade espacial em ambas as câmaras foram considerados satisfatórios pelo laboratório, pois todos os resultados para as bandas de 100 Hz a 10.000 Hz ficaram abaixo dos limites exigidos pela literatura.

Os tempos de reverberação obtidos nas câmaras de emissão e recepção foram garantidos através da instalação de painéis absorvedores nas paredes das câmaras.

Os valores obtidos para o tempo de reverberação estrutural da amostra ensaiada também foram obtidos através de um ensaio realizado com um martelo de borracha. Verificou-se que para as bandas de 100 Hz a 200 Hz não foi possível cumprir com os valores exigidos em literatura. O laboratório sugere que os valores sejam revistos, pois estudos similares apresentados por diferentes autores também não conseguiram cumprir com essa exigência nas baixas frequências.

Por fim, o resultado de índice de redução sonoro máximo ($R'_{\max}$) para o corpo de prova em questão foi de 80 dB e o laboratório atestou a ausência de transmissão por flancos em suas câmaras, pois a diferença entre os dois ensaios não superou os 15 dB determinados pela ISO 10140 em nenhuma banda de frequência.

Referências

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 3382-2:2017 - Acústica - Medição dos parâmetros acústicos de salas - Parte 2: Medição dos tempos de reverberação em salas de uso geral. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 19 p.
2. CASTRO, I.; TADEU, A.; ANTÓNIO, J.; MOREIRA, A.; MENDES, P. A.; GODINHO, L. Câmaras móveis IteCons para a realização de ensaios acústicos: Parte II – Preparação e caracterização das câmaras horizontais; Acústica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal, 2008.
3. DELANNOY, J.; Recuero, M. Loss factor measurements on plasterboard. 19th International Congress on Acoustics, Madrid, 2-7 September 2007.
4. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10140-2:2021 *Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation*. Genebra, 2021. 14 p.
5. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10140-5:2021 *Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 5: Requirements for test facilities and equipment*. Genebra, 2021. 39 p.
6. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3741:2010 *Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure — Precision methods for reverberation test rooms* - Genebra, 2010. 61 p.
7. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 354:2003 *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*. Genebra, 2003. 21p.
8. PAIXÃO, D. X. Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria utilizando análise estatística de energia, SEA; Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.