

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM 2025
NÍVEL DOUTORADO

SÉRGIO KLIPPEL FILHO

**ESTUDO DE REVESTIMENTO COMPÓSITO DE PORCELANATO E
BORRACHA RECICLADA PARA ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE IMPACTO**

São Leopoldo
2025

SÉRGIO KLIPPEL FILHO

**ESTUDO DE REVESTIMENTO COMPÓSITO DE PORCELANATO E BORRACHA
RECICLADA PARA ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE IMPACTO**

Tese apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
(UNISINOS).

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Patrício

São Leopoldo
2025

K65e Klippel Filho, Sérgio.
Estudo de revestimento compósito de porcelanato e
borracha reciclada para atenuação do ruído de impacto / Sérgio
Klippel Filho – 2025.
226 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

“Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian
Coorientador: Prof. Dr. Jorge Patrício”

1. Desempenho acústico. 2. Isolamento aos sons de
impacto. 3. Materiais resilientes. 4. Revestimento compósito
de piso. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

SÉRGIO KLIPPEL FILHO

**ESTUDO DE REVESTIMENTO COMPÓSITO DE PORCELANATO E BORRACHA
RECICLADA PARA ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE IMPACTO**

Tese apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
(UNISINOS).

Aprovado em 18/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian – Universidade do Vale do Rio dos Sinos
(Unisinos)

Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf Gonzalez – Universidade do Vale do Rio dos Sinos
(Unisinos)

Prof. Dra. Maria Fernanda de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
(Unicamp)

Prof. Dr. Jorge Patrício – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC –
Portugal)

Prof. Dr. Paulo Amado Mendes – Universidade de Coimbra (Portugal)

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos meus pais, Rosinéa e Sérgio, e minha parceira, Gabriela, pelo apoio incondicional e cumplicidade no desenvolvimento deste trabalho, além de embarcarem fisicamente na oportunidade de desenvolvimento de parte da pesquisa em Portugal.

Ao meu orientador, Professor Bernardo Tutikian, figura elementar no meu desenvolvimento acadêmico e profissional, mentor desde minha graduação e exemplo profissional. Obrigado pelo direcionamento, confiança nas minhas escolhas e liberdade total para desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu co-orientador, Professor Jorge Patrício, por ter aceitado a empreitada de desenvolvimento desta pesquisa, contribuindo de forma imensurável ao meu desenvolvimento teórico, e por ter aberto as portas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) português para que pudéssemos desenvolver parte da pesquisa por quase um ano.

Ao itt Performance - Unisinos, responsável pela minha formação profissional e técnica, personificado na Fernanda Pacheco, Hinoel Zamis Ehrenbring, Roberto Christ e demais colegas. Obrigado pelas discussões, direcionamento e por terem cedido o espaço para desenvolvimento da pesquisa.

Ao Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, representado pelo colega Mateus Barth, pela agilidade e disponibilização do espaço laboratorial, sem contar as diversas conversas que auxiliaram de forma muito positiva ao desenvolvimento do programa experimental.

A empresa Aubicon, por ter fornecido as composições de aglomerado de borracha reciclada para desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

Analisando a acústica de edifícios, a propagação dos sons de impacto pela estrutura da edificação pode ser considerada um dos problemas mais relevantes, sendo tema recorrente de reclamação de usuários. Nestes casos, sistemas de piso flutuante são soluções eficientes para redução da transmissão vibracional gerada por impactos nos pisos, sendo compostos por uma superfície rígida de caminhamento sobre um material resiliente. Atuando na forma de uma mola, a camada resiliente deve possuir propriedades de amortecimento e resistência à compressão frente à carregamentos permanentes e acidentais adequadas para garantia de seu desempenho ao longo do tempo. Neste contexto, o objetivo deste estudo é o desenvolvimento e avaliação de revestimentos compósitos de piso formados por porcelanato e manta de aglomerado de borracha reciclada para atenuação da transmissão de sons de impacto em cômodos adjacentes verticalmente, analisando seu desempenho atual e futuro. O estudo foi baseado no desenvolvimento do revestimento compósito de piso e caracterização física e acústica de seus componentes, propondo um modelo de previsão da redução dos sons de impacto, calibrado a partir de medições em escala real em ambiente laboratorial (ISO 10140), baseado na rigidez dinâmica (ISO 9052-1) das mantas de aglomerado de borracha e nas características físicas da camada rígida de caminhamento. A determinação do comportamento do revestimento compósito foi efetuada com base no ensaio de fluência à compressão (ISO 16534) e a avaliação foi realizada a partir de sua aplicação virtual em uma edificação hipotética, considerando a transmissão direta e indireta (ISO 12354-2). Os resultados indicaram que as composições de revestimento compósito de piso possuem desempenho adequado, com valores de ΔL_w na ordem de 16 a 18 dB, demonstrando eficiência, tendo em vista que as composições possuem espessura total de 11,5 a 20,5 mm. No domínio do tempo, quando submetidos à carregamentos de até 15 anos, a capacidade de amortecimento, em termos da redução dos níveis de pressão sonora de impacto ponderado, das composições foi reduzida em até 2 dB. Todavia, as composições desenvolvidas possuem redução considerável frente aos sons de impacto e adequada manutenção de desempenho.

Palavras-chave: Desempenho acústico. Isolamento aos sons de impacto. Materiais resilientes. Revestimento compósito de piso.

ABSTRACT

When analyzing building acoustics, the propagation of impact sounds through the structure of the building can be considered one of the most relevant problems, being a recurring subject of complaints. In these cases, floating floor systems are efficient solutions to reduce the transmission of vibrations generated by impacts on floors, consisting of a rigid walking surface on a resilient material. Acting as a spring, the resilient layer must have damping properties and compression strength against permanent and accidental loads adequate to guarantee its performance over time. In this context, the objective of this study is to develop and evaluate lightweight floating floors formed by ceramic tiles and recycled rubber agglomerate mats to attenuate the transmission of impact sounds in vertically adjacent rooms, analyzing their current and future performance. The study was based on the development of a lightweight floating floor and the physical and acoustic characterization of its components, proposing a model to predict the reduction of impact sounds, calibrated from full-scale measurements in a laboratory environment (ISO 10140), based on the dynamic stiffness (ISO 9052-1) of the rubber agglomerate mats and the physical characteristics of the rigid walking layer. The determination of the future behavior of the lightweight floating floor was carried out based on the compression creep test (ISO 16534) and the evaluation was carried out from its virtual application in a hypothetical building, considering direct and indirect transmission (ISO 12354-2). The results indicated that the lightweight floating floor compositions have adequate performance, with ΔL_w values in the order of 16 to 18 dB, demonstrating efficiency, considering that the compositions have a total thickness of 11.5 to 20.5 mm. In the time domain, when subjected to loads of up to 15 years, the damping capacity, in terms of weighted impact sound pressure levels reduction, of the compositions was reduced by up to 2 dB. However, the developed compositions have a considerable impact sounds reduction and adequate maintenance of performance in the time domain.

Key-words: Acoustic performance. Impact sound insulation. Resilient materials. Composite flooring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparativo da abrangência de propagação de sons aéreos e estruturais	40
Figura 3 – Medição do nível de pressão sonora de impacto: (a) ambiente laboratorial, e (b) situação <i>in situ</i>	44
Figura 4 – Pulso de força de um único martelo da <i>tapping machine</i> : exemplos de oscilações pré-crítica e pós-crítica	51
Figura 5 – Pulso de força inserida pela <i>tapping machine</i> em pisos de: (a) concreto e argamassa (apenas fração positiva e inicial do pulso), e (b) compensado e OSB....	51
Figura 6 – Irradiação sonora de uma placa excitada por uma força pontual	53
Figura 7 – Transmissibilidade vibracional, no domínio das frequências, em função da frequência natural de um sistema	54
Figura 8 – Caminhos de propagação da energia sonora associada a sons de impacto	57
Figura 9 – Exemplo de composição de um sistema de piso flutuante	59
Figura 10 – Sistema vibracional com um grau de liberdade e excitação no elemento flutuante	62
Figura 11 – Composição de sistema de piso flutuante sob solicitação de impacto ...	64
Figura 12 – Excitação de impacto em piso flutuante: (a) reação ressonante, e (b) reação local	65
Figura 13 – Caracterização de sistemas de piso flutuante sob solicitação de impacto	66
Figura 14 – Composição de sistema de piso flutuante leve	67
Figura 15 – Resposta de frequência de molas lineares e não lineares em sistemas massa-mola.....	71
Figura 16 – Frequência de ressonância e frequências adjacentes para uma redução de aceleração de 3 dB em diferentes condições de amortecimento	73
Figura 17 – Rigidez dinâmica em função do carregamento estático em lãs minerais	76
Figura 18 – Mudança na redução dos sons de impacto com sistema flutuante compósito	84
Figura 19 – Seção transversal de um pneu pneumático	85

Figura 20 – Borracha de pneus granulada do tipo com (esquerda) e sem (direita) fibras metálicas ou têxteis	90
Figura 21 – Esquema do processo de sinterização com alta pressão e alta temperatura	91
Figura 22 – Processo de fabricação de mantas de aglomerado de borracha	92
Figura 23 – Diagrama do programa de pesquisa	99
Figura 24 – Composição e configuração do revestimento compósito de piso	100
Figura 25 – Pontos de aplicação do adesivo epóxi	104
Figura 26 – Posição das amostras e <i>tapping machine</i> na laje padrão (medição de L_n)	124
Figura 27 – Posição da <i>tapping machine</i> na laje padrão (medição de $L_{n,0}$)	124
Figura 28 – Posições de fonte sonora e microfone para medição do TR	125
Figura 29 – Posições de microfone para cada uma de <i>tapping machine</i>	126
Figura 30 – Configuração de dormitórios hipotéticos para simulação computacional	130
Figura 31 – Índices de redução sonora do SVV em alvenaria de blocos cerâmicos estruturais	131
Figura 32 – Conexões consideradas entre o sistema de piso e paredes de contorno	139
Figura 33 – Resistência à compressão das composições de camada única	144
Figura 34 – Frequência de ressonância dos sistemas com composições de mesma densidade	147
Figura 35 – Frequência de ressonância estimada para uma camada de 2 mm a partir de valores medidos em diversas composições	149
Figura 36 – Frequência de ressonância medida e estimada a partir de camadas individuais	150
Figura 37 – Rigidez dinâmica de composições com mesma densidade	152
Figura 38 – Frequência de ressonância dos sistemas com composições de densidade e espessura diferentes	152
Figura 39 – Rigidez dinâmica de composições com densidade e espessura diferentes	154
Figura 40 – Comparativo entre os métodos de previsão e resultados experimentais frente ao ΔL por bandas de frequência da amostra: (a) RC-E2,0-D705, (b) RC-E3,0-D705, (c) RC-E5,0-D860, e (d) RC-E9,0-D875	157

Figura 41 – Comparativo entre os métodos de previsão e resultados experimentais frente ao ΔL_w da amostra: (a) RC-E2,0-D705, (b) RC-E3,0-D705, (c) RC-E5,0-D860, e (d) RC-E9,0-D875	159
Figura 42 – Redução dos níveis de pressão sonora previstos para as composições de mesma densidade	161
Figura 43 – Redução dos níveis de pressão sonora previstos para as composições de densidades diferentes	162
Figura 44 – Redução dos níveis de pressão sonora ponderados previstos para todas as composições.....	164
Figura 45 – Frequência de ressonância das composições (presente e futura)	165
Figura 46 – Rigidez dinâmica das composições (presente e futura)	166
Figura 47 – Frequência natural dos revestimentos compósitos (presente e futura)	167
Figura 48 – ΔL_w dos revestimentos compósitos (presente e futuro).....	169
Figura 49 – L'_{nT} previsto dos sistemas estruturais sem revestimento: (a) DORM-2x4m, (b) DORM-3x4m, e (c) DORM-4x4m	171
Figura 50 – L'_{nT} previsto em função da configuração de ambiente para espessura da laje maciça de: (a) 8 cm, (b) 12 cm, e (c) 16 cm	174
Figura 51 – Nível de desempenho dos sistemas estruturais sem revestimento: (a) DORM-2x4m, (b) DORM-3x4m, e (c) DORM-4x4m	176
Figura 52 – L'_{nT} previsto para a configuração DORM-2x4m com revestimento na condição presente e após 15 anos de carregamento sobre laje maciça de espessura de: (a) 8 cm, (b) 12 cm, e (c) 16 cm	178
Figura 53 – Nível de desempenho dos sistemas estruturais com revestimento na condição presente e após 15 anos de carregamento: (a) DORM-2x4m, (b) DORM-3x4m, e (c) DORM-4x4m.....	180

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Sistema de revestimento compósito de piso	101
Fotografia 2 – Amostra de aglomerado de borracha com 200x200 mm.....	102
Fotografia 3 – Piso de porcelanato, face: (a) superior, e (b) inferior	104
Fotografia 4 – Pontos de aplicação da camada de ligação com adesivo epóxi	105
Fotografia 5 – Configuração do ensaio de medição da velocidade de transmissão de onda ultrassônica	109
Fotografia 6 – Medições das amostras: (a) dimensões, e (b) massa	110
Fotografia 7 – (a) Grãos de borracha após moagem, e (b) amostras em recipiente para secagem em estufa	111
Fotografia 8 – Aparato para medição da resistência à compressão dos aglomerados de borracha	113
Fotografia 9 – (a, b e c) Aparato para medição da fluência à compressão dos aglomerados de borracha	115
Fotografia 10 – (a) e (b) Aparato para medição da frequência de ressonância	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios e níveis de desempenho para ruídos de impactos em sistemas de pisos.....	47
Tabela 2 – Requisito de isolamento aos sons de impacto de países Americanos e Europeus.....	47
Tabela 3 – Redução sonora aos sons de impacto proporcionada por sistemas de piso flutuante	60
Tabela 4 – Redução aos sons de impacto proporcionada por revestimentos compósitos rígidos com cerâmicas	61
Tabela 5 – Rigidez dinâmica de porcelanatos 600x600 mm (individuais e compósitos)	82
Tabela 6 – Redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado de porcelanatos (compósitos)	83
Tabela 7 – Composição, por peso, de pneus de linhas leves e pesadas.....	86
Tabela 8 – Peso e expectativa de durabilidade de pneus de linhas leves e pesadas	87
Tabela 9 – Compressibilidade e fluência à compressão em aglomerados de borracha	92
Tabela 10 – Frequência de ressonância, rigidez dinâmica e redução aos sons de impacto de sistemas flutuantes com aglomerado de borracha.....	93
Tabela 11 – Características físicas e vibracionais de aglomerados de borracha.....	94
Tabela 12 – Características vibracionais de aglomerados de borracha com espessura de 8 mm	95
Tabela 13 – Características vibracionais de aglomerados de borracha reciclada.....	96
Tabela 14 – Características físicas de aglomerados de borracha.....	97
Tabela 15 – Relação de composições de manta de aglomerado de borracha reciclada	102
Tabela 16 – Composições de revestimento compósito de piso.....	106
Tabela 17 – Nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje de referência do tipo pesada ($L_{n,r,0}$).....	119
Tabela 18 – Valores de referência (curva padrão) para sons de impacto	120
Tabela 19 – Intervalo de avaliação do coeficiente de correlação r de Pearson	129

Tabela 20 – Dimensões dos dormitórios hipotéticos para simulação computacional	130
Tabela 21 – Coeficientes de absorção sonora das superfícies dos ambientes	130
Tabela 22 – Características do SVV em alvenaria de blocos cerâmicos estruturais	131
Tabela 23 – Composição dos sistemas estruturais de piso propostos	132
Tabela 24 – Níveis de desempenho para ruídos de impactos em sistemas de pisos separando dormitórios de unidades distintas	140
Tabela 25 – Caracterização física do piso de porcelanato	141
Tabela 26 – Densidade aparente, massa específica e porosidade	142
Tabela 27 – Fluência à compressão	145
Tabela 28 – Capacidade de amortecimento e módulo de elasticidade dinâmico dos aglomerados de borracha	155

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente de absorção sonora, adimensional
α_E	Parâmetro em função da natureza do agregado, igual a 1 (agregados de granito e gnaisse)
Δd	Mudança de espessura do material resiliente, de modo dinâmico, quando excitado
ΔL	Redução do nível de pressão sonora de impacto normalizado, em dB
ΔL_{lin}	Termo de adaptação de espectro de redução do nível de pressão sonora de impacto de revestimentos de piso, em dB
$\Delta L_{lin,15anos}$	Termo de adaptação de espectro de redução do nível de pressão sonora de impacto de revestimentos de piso estimado para um período de carregamento de quinze anos, em dB
ΔL_w	Redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado, em dB
$\Delta L_{w,15anos}$	Redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado estimada para um período de carregamento de quinze anos, em dB
ΔL_{15anos}	Redução do nível de pressão sonora de impacto estimada para um período de carregamento de quinze anos, em dB
ϵ_{15anos}	Deformação relativa à espessura inicial após carregamento de 15 anos, em %
ζ	Relação de amortecimento, adimensional
η	Fator de perda, adimensional
η_{tot}	Fator de perda total do sistema, adimensional
$\eta_{tot,lab}$	Fator de perda total do sistema em condição de laboratório, adimensional
η_1	Fator de perda total do sistema de piso, adimensional
η_2	Fator de perda do campo sonoro do ambiente receptor, adimensional
η_{12}	Fator de perda do acoplamento do sistema de piso ao ambiente receptor, adimensional
μ	Massa específica dos grãos de borracha, em kg/m ³
ν	Coeficiente de Poisson, adimensional
ρ	Densidade aparente, em kg/m ³
ρ_0	Densidade do ar, igual a 1,21 kg/m ³

σ	Fator de irradiação, adimensional
σ_{10}	Resistência à compressão para uma deformação de 10% da espessura inicial, em kPa
Ω	Porosidade, adimensional
A	Área de absorção sonora equivalente do cômodo receptor, em m ²
A_0	Área de absorção sonora equivalente de referência, igual a 10 m ²
A_{0e}	Área inicial do exemplar, em mm ²
B	Largura da banda de frequências, em Hz
C_{BC}	Constante referente as condições de contorno do sistema de piso, igual a 1 (simplesmente apoiado)
C_l	Termo de adaptação de espectro, em dB
$C_{l,r}$	Termo de adaptação de espectro da laje de referência com o sistema de revestimento de piso, em dB
$C_{l,r,15anos}$	Termo de adaptação de espectro da laje de referência com o sistema de revestimento de piso estimado para um período de carregamento de quinze anos, em dB
c_L	Velocidade de fase de onda longitudinal, em m/s
C_{OB}	Constante referente as condições de contorno do sistema de piso, igual a 2 (elementos perpendiculares)
c_0	Velocidade de propagação do som no ar, em m/s
d	Espessura, em mm
d_B	Espessura do material sob uma carga de 2 kPa após carregamento temporário de 48 kPa, obtida no ensaio de compressibilidade, em mm
d_F	Espessura do material sob uma carga de 2 kPa, obtida no ensaio de compressibilidade, em mm
d_s	Espessura inicial, em mm
$D_{v,ij,situ}$	Diferença de nível de velocidade média entre direções na junção entre elementos i e j <i>in situ</i> , em dB
E	Módulo de elasticidade, em N/m ²
E_{din}	Módulo de elasticidade dinâmico, em N/m ²
E_v	Absorção de água, em %
E_1	Energia estabelecida no sistema de piso, em J
E_2	Energia estabelecida no ambiente receptor, em J

F	Força perpendicular
f	Frequência central da banda de frequências, em Hz
f_c	Frequência crítica, em Hz
f_{ck}	Resistência característica do concreto, em MPa
f_i	Frequência de repetição da força de impacto, igual a 10 Hz
f_{limit}	Frequência limite, em Hz
F_n	Magnitude da força de impacto, em N
f_r	Frequência de ressonância, em Hz
f_{ref}	Frequência de referência, igual a 1.000 Hz
$f_{r,n}$	Frequência de ressonância do sistema que contém mais de uma camada resiliente de uma mesma composição de material, em Hz
$f_{r,1}$	Frequência de ressonância do sistema que contém uma camada resiliente, em Hz
$f_{r,10anos}$	Frequência de ressonância do sistema estimada para um período de carregamento de 10 anos, em Hz
$f_{r,15anos}$	Frequência de ressonância do sistema estimada para um período de carregamento de quinze anos, em Hz
f_0	Frequência natural, em Hz
$f_{0,15anos}$	Frequência natural do sistema estimada para um período de carregamento de quinze anos, em Hz
f_1	Frequência de imediatamente abaixo da frequência de ressonância quando considerada uma aceleração reduzida em 3 dB do valor de pico, em Hz
$F_1(t)$	Força equivalente a um impacto, no domínio do tempo, em N
f_2	Frequência de imediatamente acima da frequência de ressonância quando considerada uma aceleração reduzida em 3 dB do valor de pico, em Hz
F_{10}	Força aplicada para uma deformação de 10% da espessura inicial, em N
F_{ef}^2	Quadrado do valor eficaz da força solicitante
F_{rms}^2	Quadrado da magnitude da força de impacto, em N
h	Espessura, em m
k	Rigidez do elemento mola, em N/m

K	Rigidez de contato da superfície do sistema de piso, em N/m
K_{ij}	Índice de redução de vibração para cada caminho de transmissão ij ao longo de uma junção, adimensional
	Comprimento, em m
L	Distância, em m
	Nível de pressão sonora, em dB
L_b	Nível de pressão sonora do ruído de fundo, em dB
L_i	Nível de pressão sonora de impacto, em dB
l_{ij}	Comprimento de acoplamento comum entre o elemento i e o elemento j , em m
L_{med}	Comprimento médio da superfície do sistema de piso, em m
L_n	Nível de pressão sonora de impacto normalizado, em dB
$L_{n,d}$	Nível de pressão sonora de normalizado devido a transmissão através do elemento de separação, em dB
$L_{n,ij}$	Nível de pressão sonora normalizado devido à transmissão através dos elementos de flanco (paredes), em dB
$L_{n,situ}$	Nível de pressão sonora de impacto normalizado do elemento de separação <i>in situ</i> , em dB
$L_{n,situ,d}$	Nível de pressão sonora de normalizado devido a transmissão através do sistema estrutural de piso <i>in situ</i> , em dB
$L_{n,r}$	Nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje de referência com o sistema de revestimento de piso, em dB
$L_{n,r,w}$	Nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado da laje de referência com o sistema de revestimento de piso, em dB
$L_{n,r,0}$	Nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje de referência sem o sistema de revestimento de piso, em dB
$L_{n,r,0,w}$	Nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje de referência, em dB
$L_{n,r,15anos}$	Nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje de referência com o sistema de revestimento de piso estimado para um período de carregamento de quinze anos, em dB

$L_{n,r,15anos,w}$	Nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado da laje de referência com o sistema de revestimento de piso estimado para um período de carregamento de quinze anos, em dB
$L_{n,situ}$	Nível de pressão sonora de impacto normalizado do sistema estrutural de piso <i>in situ</i> , em dB
$L_{n,w}$	Nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado, em dB
$L_{n,0}$	Nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje padrão sem o sistema de revestimento de piso, em dB
L_{sb}	Nível de pressão sonora combinado do sinal e do ruído de fundo, em dB
L_T	Comprimento total de todas as arestas do ambiente receptor, em m
L_1	Menor dimensão da superfície do sistema de piso, em m
L_2	Maior dimensão da superfície do sistema de piso, em m
L'_n	Nível de pressão sonora de impacto normalizado considerando a transmissão direta e indireta por flancos, em dB
L'_{nT}	Nível de pressão sonora de impacto padronizado no ambiente receptor considerando a transmissão direta e indireta por flancos, em dB
$L'_{nT,w}$	Nível de pressão sonora de impacto padronizado no ambiente receptor considerando a transmissão direta e indireta por flancos, em dB
m	Massa por unidade de área, em kg/m ²
m_i	Massa do corpo de prova suspenso impregnado pela imersão sob vácuo, em g
m_s	Massa do corpo de prova seco, em g
m_{sat}	Massa do corpo de prova impregnado pela imersão sob vácuo, em g
m_t	Massa de um dos martelos da máquina de impactos, igual a 0,5 kg
m'_t	Carga total (placa de carregamento mais acelerômetros) do aparato de carregamento, em kg/m ²
	Número de bandas de frequências, adimensional
n	Número de elementos de ligação, adimensional
	Quantidade de camadas, adimensional
N_s	Densidade modal estatística, adimensional
N_1	Densidade modal do sistema de piso, adimensional
N_2	Densidade modal do ambiente receptor, adimensional

p_o	Pressão atmosférica, em MPa
Q	Fator de qualidade, adimensional
R	Índice de redução sonora, em dB
r	Raio da área de contato circular do martelo da <i>tapping machine</i> , igual a 0,015 m
R_{situ}	Índice de redução sonora do sistema <i>in situ</i> , em dB
$R_{i,situ}$	Índice de redução sonora do elemento de compartimentação <i>i in situ</i> , em dB
$R_{j,situ}$	Índice de redução sonora do elemento de compartimentação <i>j in situ</i> , em dB
S	Área, em m ²
S_i	Área do elemento de separação <i>i</i> , em m ²
S_j	Área do elemento de separação <i>j</i> , em m ²
S_T	Área total das superfícies do ambiente receptor, em m ²
s'	Rigidez dinâmica, em MN/m ³
s'_i	Rigidez dinâmica individual de cada elemento que compõe o elemento, em MN/m ³
s'_s	Rigidez dinâmica de um elemento resiliente composto por mais de uma camada, em MN/m ³
s'_t	Rigidez dinâmica aparente por unidade de área, em MN/m ³
s'_{15anos}	Rigidez dinâmica por unidade de área estimada para um período de carregamento de quinze anos, em MN/m ³
t	Tempo, em s
T	Tempo de reverberação da câmara receptora, em s
T_i	Período de repetição da força de impacto, igual a 0,1 s
T_s	Tempo de reverberação estrutural do sistema de laje, em s
$T_{s,lab}$	Tempo de reverberação estrutural do sistema em laboratório, em s
$T_{s,situ}$	Tempo de reverberação estrutural do sistema <i>in situ</i> , em s
$T_{s,i,situ}$	Tempo de reverberação estrutural do elemento de separação <i>i in situ</i> , em s
$T_{s,j,situ}$	Tempo de reverberação estrutural do elemento de separação <i>j in situ</i> , em s

V	Volume, em m^3 Volume da câmara receptora, em m^3
U	Perímetro da superfície do sistema de piso, em m
v_0	Velocidade do martelo da <i>tapping machine</i> no ponto de impacto, igual a 0,886 m/s
X	Termo de ajuste de ganho dependente da calibração por via experimental desenvolvida no item “3.5.3 Calibração do modelo teórico de previsão por meio de medições em laboratório da redução aos sons de impacto”
X_{ct}	Fluência à compressão, em mm
X_t	Deformação após 95 dias de carregamento, em mm
X_0	Deformação após 60 segundos de aplicação de uma pressão de 2 kPa, em mm
X_{15anos}	Deformação do material no domínio do tempo estimada para um período de carregamento de quinze anos, em mm
W_{in}	Potência inserida pelo impacto no sistema de piso, em W
$W_{net,12}$	Potência sonora transferida pelo sistema de piso ao ambiente receptor, em dB
Z_{dp}	Impedância mecânica do sistema de piso, em Ns/m

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	31
1.1 TEMA	34
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	34
1.3 PROBLEMA	35
1.4 OBJETIVOS	35
1.4.1 Objetivo geral	35
1.4.2 Objetivos específicos.....	35
1.5 JUSTIFICATIVA	36
1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA	37
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	39
2.1 ISOLAMENTO AOS SONS DE IMPACTO	39
2.1.1 Conceituação	41
2.1.2 Parâmetros de avaliação	42
2.1.3 Requisitos	46
2.1.4 Comportamento de sistemas estruturais.....	48
2.1.5 Contribuição da transmissão indireta	56
2.1.6 Composição de sistemas flutuantes	58
2.1.7 Comportamento e previsão de isolamento em sistemas flutuantes.....	61
2.2 MATERIAIS RESILIENTES	68
2.2.1 Comportamento acústico aos sons de impacto	69
2.2.2 Conservação de desempenho aos sons de impacto	75
2.3 PISOS CERÂMICOS.....	79
2.3.1 Características.....	79
2.3.2 Propriedades acústicas aos sons de impacto	81
2.4 BORRACHA RECICLADA.....	85
2.4.1 Características.....	85
2.4.2 Avaliação ambiental	88
2.4.3 Método de fabricação de mantas de aglomerado de borracha	90
2.4.4 Propriedades acústicas aos sons de impacto	92
3 MÉTODO.....	99
3.1 MATERIAIS	100
3.1.1 Configuração do revestimento compósito de piso	100

3.1.2 Manta de grânulos de borracha aglomerados	101
3.1.3 Revestimento de piso em porcelanato	103
3.1.4 Adesivo epóxi	104
3.2 COMPOSIÇÕES DE REVESTIMENTO COMPÓSITO DE PISO	105
3.3 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO PISO DE PORCELANATO	106
3.3.1 Espessura, porosidade e densidade	107
3.3.2 Velocidade de propagação de onda longitudinal	108
3.4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS E FÍSICAS DOS AGLOMERADOS DE BORRACHA	109
3.4.1 Densidade aparente e massa específica	110
3.4.2 Porosidade	112
3.4.3 Resistência à compressão	112
3.4.4 Fluência à compressão	113
3.4.5 Capacidade de amortecimento vibracional	116
3.5 PREVISÃO DA REDUÇÃO AOS SONS DE IMPACTO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO	118
3.5.1 Modelo teórico para estimativa da redução aos sons de impacto	118
3.5.1.1 Condição presente	118
3.5.1.2 Condição futura	120
3.5.2 Medição da redução aos sons de impacto em laboratório	123
3.5.3 Calibração do modelo teórico de previsão por meio de medições em laboratório da redução aos sons de impacto	127
3.6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AOS SONS DE IMPACTO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS COM O USO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO	129
3.6.1 Soluções construtivas e configuração do ambiente	129
3.6.2 Revestimento compósito	132
3.6.3 Previsão do comportamento acústico dos sistemas estruturais de piso maciços	133
3.6.4 Influência das transmissões indiretas e revestimento compósito	137
3.6.5 Avaliação de desempenho	139
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	141
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PISO DE PORCELANATO	141
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERADOS DE BORRACHA	142

4.2.1 Propriedades físicas	142
4.2.2 Capacidade de amortecimento	147
4.3 REDUÇÃO AOS SONS DE IMPACTO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO ...	156
4.3.1 Calibração do modelo teórico de previsão	157
4.3.2 Capacidade de redução dos níveis de pressão sonora de impacto	160
4.3.2 Conservação de desempenho sob carregamento prolongado	164
4.4 DESEMPENHO AOS SONS DE IMPACTO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS PESADOS COM O USO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO.....	170
4.4.1 Previsão de desempenho sem revestimento.....	170
4.4.2 Modificação e conservação de desempenho com aplicação do revestimento compósito.....	177
5 CONCLUSÃO	183
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	183
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	184
REFERÊNCIAS.....	187
APÊNDICE A – DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO PISO DE PORCELANATO	201
APÊNDICE B – DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERADOS DE BORRACHA	203
APÊNDICE C – DADOS DA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS COM O USO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO	219

1 INTRODUÇÃO

A função primordial das edificações é a de promover abrigo e conforto aos seus usuários, porém, nem todas as edificações conseguem cumprir tais necessidades, com problemas de climatização e qualidade do ar, por exemplo, causando doenças e desconforto. Em certos casos a falta de desempenho é advinda da edificação em si, devido a problemas de projeto e execução falha, assim como uma série de fatores envolvendo falta de manutenção e construções de má qualidade (DE WILDE, 2018).

Neste aspecto, as edificações são sistemas complexos, envolvendo grande quantidade e variedade de produtos que as constituem. Estes produtos muitas vezes são formados por múltiplos componentes e partes, possibilitando modificações, customizações e combinações para que formem a edificação como um sistema. Assim, o interesse na avaliação do desempenho das edificações é fruto de uma série de fatores externos, ao exemplo do manejo ambiental e satisfação do cliente (saúde, conforto e produtividade) (ASSELINEAU, 2015; DE WILDE, 2018).

O isolamento sonoro nas edificações é um aspecto essencial para o seu desempenho, tornando o ambiente adequado aos seus usuários, compondo um aspecto importante em usos residenciais, comerciais, hospitalares e de ensino. É necessário que se assegure aos ocupantes um ambiente acústico adequado para o desenvolvimento de suas atividades de trabalho, descanso e lazer, promovendo um local no qual ruídos possam ser gerados sem causarem incômodo aos outros usuários da edificação, mantendo também a privacidade acústica (HOPKINS, 2017; RINDEL, 2018; ALLEN; IANO, 2019).

Dentro da gama da acústica de edificações, a propagação de sons de impacto, na estrutura das edificações, pode ser considerada um dos problemas mais relevantes. A fonte de ruído vai desde o caminhar até vibrações causadas por equipamentos na edificação, havendo propagação da energia sonora, por meio dos elementos estruturais, até pontos da edificação distantes da fonte emissora. A energia propagada pela estrutura é irradiada pela superfície das paredes, pisos e tetos, sendo percebida pelos seus usuários (MENDIS; NGO, 2005; VIGRAN, 2008; LECHNER, 2012; PATRÍCIO, 2018).

Quando da avaliação dos sistemas construtivos de laje sem revestimento e sem forro, em lajes com espessura mínima (definida por critérios estruturais e de resistência ao fogo), é notável que seu desempenho acústico frente aos sons de

impacto fique aquém do ideal para os usuários da edificação. Para suprir tal necessidade, sistemas de revestimento de piso com capacidade de aumento do isolamento aos sons de impacto podem ser empregados, fazendo uso de composições de materiais que agregam as características necessárias. No âmbito dos revestimentos de piso, os sistemas convencionais de piso cerâmico possuem baixa eficiência frente a atenuação dos sons de impacto, necessitando atenção (WARNOCK; FASOLD, 1997; WARNOCK, 1999; SEDDEQ, 2006; METHA; SCARBOROUGH; ARMPRIEST, 2017).

Analisando os pisos cerâmicos, nos quais se incluem os porcelanatos, a sua fabricação é realizada para suprir a necessidade de áreas submetidas à incidência de água, impacto, abrasão, e são projetados para uma fácil limpeza. Devem possuir coeficiente de atrito e durabilidade adequados, além de resistência aos agentes físicos e químicos impostos. Isto faz com que o uso de tais produtos seja imprescindível em situações nas quais tais características sejam necessárias, resultando em um produto largamente utilizado (BERGE, 2009; METHA; SCARBOROUGH; ARMPRIEST, 2017; ALLEN; IANO, 2019).

Assim, de modo a promover melhoria no isolamento aos sons de impacto de revestimentos rígidos, como as cerâmicas, os sistemas de piso flutuante são uma das soluções mais efetivas no âmbito das tecnologias construtivas de controle de vibrações no meio de transmissão. Um tipo de piso flutuante é o denominado revestimento compósito rígido de piso, que consiste em um piso rígido com uma camada resiliente contínua em seu substrato, responsável por desconectar estruturalmente a laje de suporte do elemento flutuante (revestimento de piso). Neste aspecto, existem diferentes materiais que podem ser utilizados como camada resiliente nestes sistemas, como lãs, feltros, espumas e compósitos poliméricos e materiais reciclados (SCHIAVI; BELLÍ; RUSSO, 2005; SCHIAVI *et al.*, 2007; PATRÍCIO, 2018).

As camadas utilizadas sob as massas flutuantes proporcionam um bom desempenho acústico caso possuam boa resiliência e baixa compressibilidade, sendo requisitos cruciais para garantia de um sistema eficiente. Assim, a capacidade de amortecimento e comportamento sob carga são propriedades das camadas resilientes que determinam a eficiência de sua capacidade de atenuação de vibrações (SCHIAVI; BELLÍ; RUSSO, 2005; HOPKINS, 2007; KIM *et al.*, 2009; CANIATO *et al.*, 2016).

Em outro âmbito, desde a idealização e invenção dos pneus pneumáticos, muitas inovações tecnológicas foram sendo implementadas para melhorar as características do produto e adequação à modernização constante dos sistemas de transporte. Todavia, apesar da modificação das características deste produto, o seu constituinte principal permanece sendo a borracha, que compõe em torno de 45% da massa de um pneu. Desta forma, como são consumidos quatro bilhões de toneladas de pneus por ano a nível global, fica evidente o elevado volume de resíduo que é gerado, necessitando de alternativas para seu correto encaminhamento (DRYDEN; LUCHINI; OUYANG, 2001; SHULMAN, 2004; SATHISKUMAR; KARTHIKEYAN, 2019).

O descarte destes materiais após seu uso é extremamente negativo para o meio ambiente, tanto pelo mal aproveitamento de recursos não renováveis quanto pela falta de aproveitamento de um material com propriedades únicas, sendo a reciclagem a alternativa mais positiva. Neste sentido, os pneus podem ser reciclados por meio da redução de suas dimensões para o tamanho de grãos e pó, servindo de matéria prima para a fabricação de diversos materiais para uma gama de setores produtivos (SHULMAN, 2004; SATHISKUMAR; KARTHIKEYAN, 2019; ALFAYEZ; SULEIMAN; NEHDI, 2020; FAZLI; RODRIGUE, 2020; FERDOUS *et al.*, 2021).

Os resíduos de borracha granulados obtidos pela redução dos pneus podem ser utilizados, por exemplo, para fabricação de mantas de aglomerado de borracha pelo processo de sinterização. Este processo produtivo envolve a prensagem dos grãos em temperaturas elevadas, podendo ser realizado de forma individual ou contínua, promovendo a ligação entre as partículas. O processo gera um produto aglomerado homogêneo e versátil, ao passo que sua espessura e densidade podem ser alteradas com as configurações do maquinário (FARRIS; MORIN, 2002; MORIN; WILLIAMS; FARRIS, 2002; SHULMAN, 2004; SIENKIEWICZ *et al.*, 2017;).

Quando do desenvolvimento e uso dos aglomerados de borracha reciclada como camada resiliente, com o intuito de melhora da capacidade de atenuação dos sons de impacto de sistemas de revestimento flutuante, é evidente o potencial do material. Os resultados obtidos apontam para um desempenho equivalente a outros materiais, como lã de vidro, lã de rocha, espumas de polietileno e cortiça, mesmo após ensaios de fluência à compressão e estimativa de seu comportamento futuro (SCHIAVI *et al.*, 2007; ASDRUBALI; D'ALESSANDRO, 2011; GARCÍA-COBOS; MADERUELO-SANZ, 2022; HONGISTO *et al.*, 2022).

1.1 TEMA

Este estudo aborda o desenvolvimento de um sistema de revestimento flutuante compósito, formado por porcelanato e camada resiliente de borracha reciclada, visando a melhoria de desempenho acústico frente aos sons de impacto de sistemas de piso.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Tendo em vista a vasta quantidade de avaliações a serem realizadas para se certificar um sistema de piso, o presente estudo se propõe a investigar somente as características acústicas de revestimentos compósitos de piso, formados por uma peça de porcelanato e diferentes composições de camada resiliente de borracha.

Desta forma, não foi considerada a avaliação do sistema em relação ao seu desempenho frente aos demais requisitos, como resistência mecânica, em termos de estabilidade sob carga ou aderência à laje estrutural, por exemplo.

Do ponto de vista da condição de uso do revestimento compósito no âmbito da acústica de edifícios, foi avaliada somente a sua capacidade de redução dos sons de impacto, não sendo avaliado seu o desempenho frente aos sons aéreos.

Em função da quantidade de variações de amostras propostas para análise nesta pesquisa, se torna onerosa a caracterização das propriedades acústicas e físicas de todas as composições de camada resiliente. Assim, as composições de camada resiliente formadas por mais de uma camada de aglomerado de borracha foram caracterizadas na íntegra apenas para determinação da rigidez dinâmica.

Também não foram avaliadas peças cerâmicas de diferentes espessuras e/ou medidas, mantendo-se o mesmo modelo de placa cerâmica em todas as composições propostas. A influência da aplicação de rejunte entre as placas também não foi avaliada, o que supostamente não influenciaria o modelo de previsão, uma vez que este considera a camada de caminhamento como infinita, mas é uma delimitação da pesquisa.

Por fim, foi avaliada somente uma configuração de fixação entre a placa cerâmica de porcelanato e a manta de aglomerado de borracha reciclada, não sendo considerada a sua influência, em termos do adesivo e camada de ar, no modelo de previsão.

1.3 PROBLEMA

O problema de pesquisa tem o intuito de verificar a capacidade de melhoria de desempenho acústico frente aos sons de impacto promovida pelo uso de uma camada resiliente de borracha reciclada aderida sob pisos de porcelanato.

1.4 OBJETIVOS

A pesquisa foi desenvolvida de modo a responder ao problema de pesquisa e atingir o cumprimento dos objetivos geral e específicos.

1.4.1 Objetivo geral

Desenvolver um revestimento compósito de piso, formado por porcelanato e camada resiliente a base de borracha reciclada, visando a melhora da capacidade de atenuação aos sons de impacto ao longo do tempo entre unidades adjacentes verticalmente.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) investigar a influência da composição da camada de borracha aglomerada, em termos de suas características físicas e acústicas, na capacidade de atenuação dos sons de impacto;
- b) avaliar o comportamento físico e acústico da camada de borracha aglomerada sob períodos estendidos de carregamento;
- c) propor um método de previsão da atenuação aos sons de impacto do revestimento compósito de piso, a partir de referências bibliográficas e calibração com medições em escala real;
- d) analisar a modificação de desempenho aos sons de impacto de sistemas estruturais pesados a partir do uso do revestimento compósito de piso, considerando uma aplicação real, por meio de um método de previsão.

1.5 JUSTIFICATIVA

Do ponto de vista da acústica nas edificações, o ruído entre unidades em edificações de múltiplos pavimentos é um dos pontos mais preocupantes dentre os sons incidentes. Neste quesito, a falta de tratamento acústico em escritórios, apartamentos e salas de aula pode interferir no efetivo desenvolvimento das atividades dos usuários. Isto impõe que os elementos construtivos que compõem a edificação possuam desempenho acústico adequado, devendo integrar o seu programa de necessidades, de acordo com cada tipo de atividade definida para o local (BARRON, 2003; RINDEL, 2007; POHL, 2011; RINDEL, 2018).

Dentre os sistemas de revestimento de piso largamente utilizados, os pisos em porcelanato suprem as necessidades de durabilidade e uso demandados pela atividade definida para o ambiente em questão. Em contrapartida, do ponto de vista dos sons de impacto, tais revestimentos não possuem eficiência considerável neste quesito, necessitando de alternativas que acrescentem capacidade de isolamento (BERGE, 2009; METHA; SCARBOROUGH; ARMPRIEST, 2017; PATRÍCIO, 2018; ALLEN; IANO, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

No âmbito do consumo de recursos naturais, os pneus de veículos, que somam cerca de quatro bilhões de toneladas produzidas todo ano globalmente, geram graves problemas ambientais e financeiros. A sua produção envolve a vulcanização da borracha, sendo um processo irreversível e que impossibilita a degradação dos pneus, necessitando que sejam descartados ou reciclados. Neste caso, uma das formas de reciclagem é a fabricação de aglomerados por meio do processo de sinterização (CUNLIFFE; WILLIAMS, 1998; ABNT, 2004; RAMARAD *et al.*, 2015; SATHISKUMAR; KARTHIKEYAN, 2019).

Desta forma, o reaproveitamento da borracha reciclada, na forma de camada resiliente para aplicação em revestimentos compósitos de piso, se mostra como um sistema inovador para melhora do desempenho acústico aos sons de impacto. Tal sistema se mostra interessante e competitivo do ponto de vista acústico e garante a recircularidade dos materiais, uma vez que utiliza um resíduo de outros setores.

1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta tese encontra-se dividida em cinco capítulos distintos, sendo que o primeiro se dedica a apresentação do tema de pesquisa, conceituação, relevância, justificativa e objetivos geral e específicos. O capítulo seguinte é destinado a abordagem de todos os conceitos inerentes a área de estudo, necessários para o desenvolvimento e entendimento da pesquisa, além de subsídios bibliográficos de pesquisas e normas técnicas pertinentes.

No terceiro capítulo é abordado o método teórico e experimental para obtenção das análises necessárias para avaliação das amostras, envolvendo sua caracterização física e acústica a partir de métodos prescritos por normas técnicas e referências bibliográficas.

O quarto capítulo é destinado à exposição e análise dos resultados obtidos e, por fim, no quinto capítulo estão fundamentadas as conclusões obtidas no desenvolvimento da pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o passar das décadas, o nível de sensibilidade dos usuários das edificações vem aumentando consideravelmente, fazendo com que o controle dos sons indesejados e a melhora da qualidade acústica para fala e música se tornassem objetivos importantes nos programas de necessidades das edificações (POHL, 2011; RINDEL, 2018).

O esforço em desenvolver soluções para as questões que envolvem os ruídos nos ambientes construídos é fomentado pelo impacto negativo que os ruídos causam nos usuários das edificações. Neste aspecto, o ruído de vizinhança é considerado um problema de saúde que resulta em alteração psicológica e pode acarretar efeitos fisiológicos negativos. Os efeitos psicológicos dos sons são muito mais comuns, caracterizados pelo distúrbio do sono, incômodo, estresse, dificuldade de aprendizado, variação de estado de humor, doenças cardiovasculares, hipertensão, e ataque cardíaco associado ao estresse causado por ruídos (FLINDELL, 2015; COWAN, 2016; RINDEL, 2018; BIES *et al.*, 2023).

Desta maneira, conforme Rindel e Rassmussen (1995), o conforto acústico é caracterizado pela presença apenas de sons desejados em nível e qualidade adequados, e oportunidade de desenvolvimento de atividades que produzam sons que não incomodem ou perturbem outras pessoas, ou que não sejam ouvidos por pessoas não autorizadas. Assim, Hopkins (2007) indica que o isolamento sonoro nos edifícios é um aspecto essencial ao desempenho deles, sendo necessário para garantir que todos os usuários tenham um ambiente acústico com condições adequadas para seu trabalho, descanso e lazer.

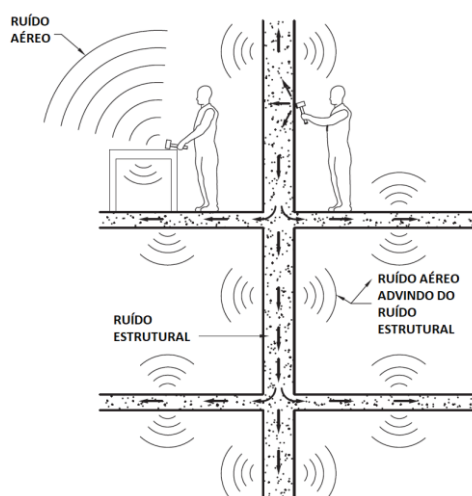
Assim, para o estabelecimento de conforto acústico em uma edificação, certos requerimentos devem ser preenchidos a respeito do isolamento aos sons aéreos e de impacto, e do nível de ruído advindo de sistemas de transporte e dos equipamentos prediais (PATRÍCIO, 2018; RINDEL, 2018).

2.1 ISOLAMENTO AOS SONS DE IMPACTO

Os sons aéreos e os sons estruturais diferem em seu meio de propagação e, consequentemente, na sua abrangência de atuação dentro de uma edificação. De forma análoga, por exemplo, o impacto de um martelo sobre uma mesa gera uma

grande quantidade de ruído aéreo, mas que não é percebido a alguns cômodos, ou andares, de distância. Em contrapartida, com o impacto de um martelo em um pilar, a energia é rapidamente transmitida pela estrutura da edificação e uma grande área pode ser excitada, gerando um elevado nível de som aéreo irradiado pelas superfícies, percebido por uma grande extensão da edificação, conforme ilustrado na Figura 1 (SCHIAVI; BELLI; RUSSO, 2005; POHL, 2011; LECHNER, 2012; PATRÍCIO, 2018; ALLEN; IANO, 2019).

Figura 1 – Comparativo da abrangência de propagação de sons aéreos e estruturais



Fonte: Adaptado pelo autor de Lechner (2012)

Tal fato ocorre pois os impactos inserem um elevado nível de energia que se move por longas distâncias sob reduzida atenuação. Isto ocorre pelo fato do amortecimento interno dos sistemas construtivos comumente empregados nas edificações ser baixo (cerca de 0,5 a 1,0%). Desta forma, mesmo promovendo uma atenuação da energia inserida no sistema, a estrutura da edificação transmite vibrações, gerando ruído aéreo irradiado por superfícies a até uma distância considerável da fonte emissora, agregando uma complexidade considerável ao isolamento aos sons de impacto (POHL, 2011; LECHNER, 2012; NEWELL, 2017; PATRÍCIO, 2018).

Em edificações, as fontes mais comuns de ruído estrutural são advindas do impacto de sapatos em superfícies rígidas, ao exemplo das cerâmicas, sendo facilmente transmitidos e percebidos de forma mais significativa no ambiente imediatamente abaixo do piso excitado pelo caminhar. Este fenômeno pode ser causado pela movimentação de carrinhos de compras, queda de objetos, móveis

sendo arrastados, dentre outros eventos do gênero, gerando impacto no piso. Assim, tal impacto é transmitido por meio de energia sonora ao ambiente imediatamente abaixo por meio dos elementos estruturais da edificação (WARNOCK; FASOLD, 1997; SEDDEQ, 2006; EGAN, 2007; VIGRAN, 2008; POHL, 2011; LECHNER, 2012).

De modo geral, os sons de impacto são explicados como sons aéreos irradiados de paredes e/ou pisos de um ambiente quando sua laje de teto é excitada por meio de vibrações estruturais. Assim, quando o isolamento é o objetivo em questão, a quantidade de energia transmitida pelos sistemas é de importância. Desta forma, para o cumprimento de requerimentos acerca do isolamento sonoro, de forma efetiva e eficiente, ferramentas de projeto adequadas são necessárias (MÖSER, 2009; RASMUSSEN, 2010; NEWELL, 2017).

2.1.1 Conceituação

Para o entendimento do isolamento aos sons de impacto é interessante uma consideração acerca do isolamento aos sons aéreos. Neste caso, na medição da perda de transmissão sonora de um elemento construtivo, são utilizadas medições do nível de pressão sonora no cômodo emissor e receptor para comparação entre os níveis de pressão sonora entre os ambientes. Desta forma, pode haver diferença na potência da fonte sonora entre diferentes campanhas de medição para se obter o mesmo resultado de isolamento aos sons aéreos, desde que seja superior ao ruído de fundo (HOPKINS, 2007; VIGRAN, 2008; RINDEL, 2018).

Já para a medição do isolamento aos sons de impacto, é necessária a introdução de energia em um piso por meio de uma fonte sonora estrutural, demandando o uso de uma mesma energia de impacto no piso por parte da fonte emissora. Tal condição é complexa devido à grande variedade de sistemas de piso, sistemas estruturais, dimensões e revestimentos, resultando em diferentes condições de transmissão da energia vibracional imposta no elemento de piso e no campo sonoro do ambiente (HOPKINS, 2007; VIGRAN, 2008; POHL, 2011).

Em condições normais de uso, existem uma variedade de fontes emissoras de energia estrutural, mas de forma a considerar o ponto de vista da normalização, foi estabelecida a padronização do procedimento de avaliação e das ferramentas para tal. Sendo assim, para verificação do isolamento aos sons de impacto de sistemas de piso, foi adotada, de forma principal, a máquina de impactos ISO (*tapping machine*).

Tal padronização torna desnecessária a medição da energia sonora inserida no sistema (HOPKINS, 2007; ANTÓNIO, 2011; RINDEL, 2018).

Sob a ótica prática, o ruído de impacto transmitido para um ambiente não depende somente da transmissão direta pelo sistema de piso, e sim por uma combinação desta com a transmissão por flancos, indireta, de todas as paredes e estrutura ligadas ao elemento de separação horizontal. Tal influência está presente em avaliações *in situ* e é atenuada em laboratório. Em situação de laboratório, nas análises individuais de sistemas de piso, a câmara de ensaio possui estrutura construída de forma que a transmissão por flancos seja reduzida a níveis insignificantes. Neste último caso, os níveis sonoros medidos no cômodo receptor são advindos somente do sistema de piso em análise, diferenciando os métodos de avaliação em cada situação (ASSELINEAU, 2015).

Assim, no caso de avaliações de isolamento aos sons de impacto em sistemas de piso *in situ*, a transmissão da vibração do elemento de partição horizontal, ao ser excitado, ocorre de forma direta e indireta, pelos elementos de contorno. Logo, verticalmente, haverá um caminho de transmissão para cada uma das quatro paredes conectadas ao elemento de separação, que são somados a transmissão direta pelo elemento sob análise (VIGRAN, 2008; HOPKINS, 2017; RINDEL, 2018).

A transmissão por flancos é onnipresente nas edificações e seus efeitos não estão limitados apenas a alguma faixa de banda de frequências. Na verdade, não é raro que um sistema adjacente irradie uma energia sonora igual, ou superior, do que a parede ou piso de separação de interesse. Tais variações dependem principalmente dos diferentes tipos de ligações entre os sistemas construtivos, mas também por mudanças na mão de obra, propriedades dos materiais, dimensões dos ambientes e incerteza de medição (HOPKINS, 2007).

2.1.2 Parâmetros de avaliação

As avaliações relativas a sons de impacto consistem na medição da energia sonora estabelecida no ambiente imediatamente abaixo do piso de interesse. A medição em laboratório, verificando o nível sonoro irradiado pelo elemento construtivo e percebido no ambiente receptor, é o nível de pressão sonora de impacto normalizado (L_n). Desta forma, um melhor isolamento aos sons de impacto é obtido pelo sistema construtivo que possui o menor valor de nível de pressão sonora de

impacto normalizado. Isto se deve justamente pelo fato de que a transmissão da energia de impacto ocorre por meio de irradiação e não por uma diferença de nível (VIGRAN, 2008; PATRÍCIO, 2018; RINDEL, 2018; BIES *et al.*, 2023).

Para situações de laboratório, utilizadas para caracterização e desenvolvimento de sistemas e componentes construtivos, a metodologia de ensaio está presente na norma ISO 10140-3 (ISO, 2021b), tipicamente no intervalo de frequências de 100 a 5.000 Hz. Nestes casos, o nível de pressão sonora de impacto normalizado é definido pela Equação 1 (ISO, 2021b).

$$L_n = L_i + 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Diferentemente de uma avaliação em laboratório, a medição do isolamento sonoro *in situ* é praticamente determinada pela combinação da transmissão direta e indireta, aumentando a complexidade da previsão do resultado (ASSELINEAU, 2015; HOPKINS, 2017).

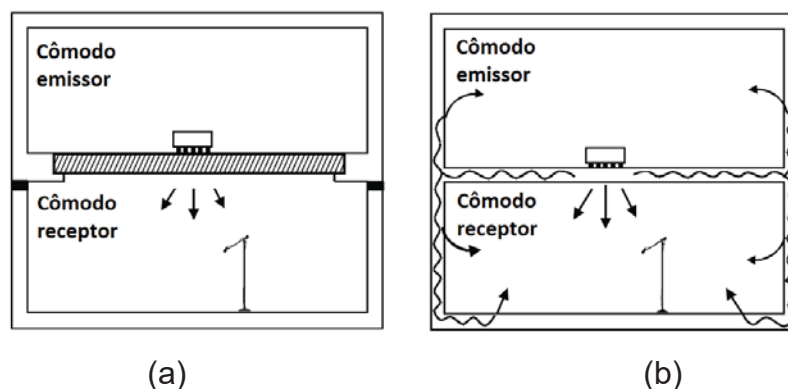
Assim, nas edificações (avaliações *in situ*), a norma de ensaio é a NBR ISO 16283-2 (ABNT, 2021c) e o descritor acústico também é o nível de pressão sonora de impacto normalizado (L'_n) e o nível de pressão sonora de impacto padronizado (L'_{nT}). Neste caso, são esperadas contribuições de outras superfícies e caminhos além do sistema de compartimentação vertical sob análise, sendo utilizados para avaliação do cumprimento dos requisitos legais ou pragmáticos (VIGRAN, 2008; HOPKINS, 2017; PATRÍCIO, 2018; RINDEL, 2018).

Nestas medições, a máquina de impactos é posicionada, em diversas posições, na superfície do piso a ser avaliado, no ambiente definido como cômodo emissor. Podem ser avaliados cômodos adjacentes horizontal e verticalmente ao ambiente emissor, mas a condição de cômodos adjacentes verticalmente é mais prejudicial devido a maior quantidade de energia sonora que é transmitida ao ambiente receptor. Desta forma, usualmente a avaliação da transmissão sonora de sons de impacto é realizada no ambiente localizado imediatamente abaixo do cômodo emissor (VIGRAN, 2008; PATRÍCIO, 2018).

Comparativamente, em um ambiente de laboratório, no qual a tarefa é a determinação da energia sonora irradiada apenas pelo sistema de piso, o cômodo receptor possui a instalação de camadas resilientes para suporte do elemento de piso, fazendo com que as superfícies da câmara estejam desconectadas estruturalmente

do sistema avaliado. Em uma edificação, em contrapartida, as conexões estruturais contribuem para a transmissão de energia sonora de forma indireta, conforme ilustrado na Figura 2 (VIGRAN, 2008; PATRÍCIO, 2018; RINDEL, 2018; BIES *et al.*, 2023).

Figura 2 – Medição do nível de pressão sonora de impacto: (a) ambiente laboratorial, e (b) situação *in situ*



Fonte: Adaptado pelo autor de Vigran (2008)

Ainda, pelas características da câmara de ensaio, nas situações de análise em laboratório, é possível a verificação da melhora do isolamento aos sons de impacto promovida por revestimentos de piso, que podem ser resilientes (como carpete e vinil) ou rígidos (como pisos flutuantes, parquet, e pisos cerâmicos) ao caminhar. A diferença promovida pelos revestimentos no isolamento aos sons de impacto depende do sistema de piso de suporte. Desta forma, as lajes e sistemas de suporte são descritas pela norma ISO 10140-5 (ISO, 2021d), como sistemas pesados (concreto armado) ou leves (madeira), com uma área mínima de 10 m² (HOPKINS, 2007; ASSELINEAU, 2015; HOPKINS, 2017).

Nestes casos, quando da avaliação destes sistemas, a norma ISO 10140-5 (ISO, 2021d) preconiza que a diferença no isolamento aos sons de impacto, promovida pelo sistema de revestimento de piso, seja calculada por meio da Equação 2. Neste caso, o parâmetro é obtido por banda de frequências e definido como a redução do nível de pressão sonora de impacto normalizado (ΔL) resultante da instalação de um revestimento de piso em uma laje de referência (WARNOCK; FASOLD, 1997; HOPKINS, 2017; PATRÍCIO, 2018).

$$L_{n,r} = L_{n,r,0} - \Delta L \quad \text{Equação 2}$$

Independentemente da composição do revestimento, é de grande valia, para a praticidade de comparações simplificadas, a utilização de um único resultado, ao invés de toda curva de frequências. Tal valor caracteriza, em um único número, o resultado da medição de um elemento construtivo, promovendo uma rápida comparação da capacidade de isolamento sonoro de diferentes sistemas, assim como facilidade na especificação de requisitos de desempenho, sendo denotado como um parâmetro ponderado (VIGRAN, 2008; PATRÍCIO, 2018; RINDEL, 2018).

Os resultados ponderados são obtidos por meio das prescrições da norma ISO 717-2 (ISO, 2020a), independentemente da condição das medições (laboratório ou campo), sendo obtidos a partir dos níveis de pressão sonora de impacto por banda de frequências. Os níveis de pressão sonora de impacto são comparados com valores de referência, no intervalo de 100 a 3.150 Hz, em bandas de 1/3 de oitava, ou de 125 a 2.000 Hz, para medições realizadas em bandas de oitava.

De acordo com a norma ISO 717-2 (ISO, 2020a), em medições realizadas em bandas de 1/3 de oitava, os resultados obtidos devem ser comparados com valores de referência, modificando a curva em incrementos de 1 dB, até que a soma dos valores desfavoráveis não ultrapasse 32 dB, para avaliações na faixa de 100 a 3.150 Hz (16 bandas de 1/3 de oitava). Neste ponto, o valor, em decibéis, da posição da curva de referência na banda de 500 Hz, após a movimentação da curva, é referente ao valor ponderado do descritor utilizado, como $L_{n,w}$, $L'_{n,w}$ ou $L'_{nT,w}$.

Quando do cálculo da redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado (ΔL_w), obtida em laboratório, há a necessidade de normalização dos resultados para uma laje padrão, promovendo a comparação direta de revestimentos de piso ensaiados em laboratórios diferentes. O nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado é um valor separado do resultado da laje sem revestimento e é obtido por meio da Equação 3 (ISO, 2020a).

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} = 78 \text{ dB} - L_{n,r,w} \quad \text{Equação 3}$$

Os valores ponderados se mostram adequados na caracterização de sons de impacto, porém, tal parâmetro não leva suficientemente em consideração picos no espectro em bandas de baixas frequências. Desta forma, é calculado um termo de adaptação (C_i) que deve ser informado separadamente do valor de L_n , por exemplo,

levando em consideração o comportamento em baixas frequências em sistemas de laje, corrigindo o comportamento do impacto da *tapping machine* para um espectro de caminamento de uma pessoa. Tal termo de adaptação de espectro também é adotado na avaliação da redução dos níveis de pressão sonora de impacto ponderado de sistemas de revestimento, sob a nomenclatura ΔL_{lin} . Em ambos os casos a metodologia de cálculo é prescrita pela norma ISO 717-2 (VIGRAN, 2008; PATRÍCIO, 2018; ISO, 2020a).

2.1.3 Requisitos

Para garantia de um desempenho básico, mínimo, para as edificações, leis e normas são desenvolvidas, e cobradas pelo governo, para que a saúde e bem-estar dos usuários das edificações seja garantida. Desta forma, tais métodos visam regulamentar requisitos mínimos de desempenho, a serem obtidos pelas edificações, sendo atualizados periodicamente para melhoria das condições de performance (TOCCI, 1997; ASSELINEAU, 2015; DE WILDE, 2018).

No âmbito nacional, os requisitos acústicos para sistemas de pisos estão presentes na NBR 15575-3 (ABNT, 2021b), que trata do desempenho de edificações residenciais, inexistindo regulamentação para outros tipos de usos. Neste caso, para os sistemas de pisos, é requerido o atendimento, pelo menos, do desempenho mínimo frente aos de impacto (em termos do nível de pressão sonora de impacto padronizado - $L'_{nT,w}$), possuindo os níveis intermediário e superior um caráter de possibilidade de melhoria do desempenho dos sistemas construtivos. Na Tabela 1 estão presentes os requisitos frente aos sons de impacto em sistemas de pisos.

A partir dos requerimentos da norma NBR 15575-3 (ABNT, 2021b), é possível verificar que o cumprimento de desempenho dos sistemas de pisos, em caráter mínimo, é obrigatório somente para situações nas quais o ambiente imediatamente abaixo do sistema de piso avaliado seja um dormitório. Ainda, fica evidente um intervalo de desempenho mais restritivo em situações nas quais áreas de uso comum localizam-se sobre dormitórios, devido a maior probabilidade de geração de ruído de impacto nestes locais.

Tabela 1 – Critérios e níveis de desempenho para ruídos de impactos em sistemas de pisos

Elemento de separação	$L'_{nT,w}$	Nível de desempenho
Sistema de piso de unidades habitacionais autônomas sobre dormitório	66 a 80	Mínimo
	56 a 65	Intermediário
	≤ 55	Superior
Sistema de piso de unidades habitacionais autônomas sobre sala	Não requisitado	Mínimo
	56 a 65	Intermediário
	≤ 55	Superior
Sistema de piso de áreas de uso coletivo sobre dormitório de unidades habitacionais autônomas	51 a 55	Mínimo
	46 a 50	Intermediário
	≤ 45	Superior
Sistema de piso de áreas de uso coletivo sobre sala de unidades habitacionais autônomas	Não requisitado	Mínimo
	46 a 50	Intermediário
	≤ 45	Superior

Fonte: Adaptado pelo autor de ABNT NBR 15575-3 (2021a)

A partir do exposto por Alonso et al. (2020), os requisitos acústicos adotados nas normas e regulamentos variam de um país para o outro, estando presente na Tabela 2 um cenário do requerimento aos sons de impacto para construções novas em alguns países das Américas e Europa. Isto evidencia que grande parte destes países possuem níveis mais restritivos de desempenho mínimo do que os preconizados pela norma NBR 15575-3 (ABNT, 2021b), sendo o limite mais estrito demandado na Áustria, com $L'_{nT,w}$ máximo de 48 dB.

Tabela 2 – Requisito de isolamento aos sons de impacto de países Americanos e Europeus

País	Requisito	País	Requisito
Áustria	$L'_{nT,w} \leq 48$ dB	França	$L'_{nT,w} \leq 58$ dB
Bélgica	$L'_{nT,w} \leq 58$ dB	Grécia	$L'_{nT,w} \leq 57$ dB
Brasil	$L'_{nT,w} \leq 80$ dB	Holanda	$L'_{nT,w} \leq 53$ dB
Chile	$L'_{nT,w} \leq 75$ dB	Inglaterra e País de Gales	$L'_{nT,w} \leq 62$ dB
Escócia	$L'_{nT,w} \leq 56$ dB	Irlanda	$L'_{nT,w} \leq 58$ dB
Espanha	$L'_{nT,w} \leq 65$ dB	Portugal	$L'_{nT,w} \leq 60$ dB
Estados Unidos da América	$L'_{nT,w} \leq 65$ dB	Suíça	$L'_{nT,w} \leq 58$ dB

Fonte: Adaptado pelo autor de Alonso et al. (2020)

No caso do Brasil, do ponto de vista prático, o cumprimento dos níveis, pelo menos, mínimos de desempenho, frente aos requisitos da norma NBR 15575-3 (ABNT, 2021b) deve ser realizado impreterivelmente por meio de medições *in situ*, com a edificação finalizada e na condição de entrega da unidade autônoma ao cliente (conforme memorial descritivo). A avaliação deve ser realizada por meio da metodologia de ensaio presente na norma NBR ISO 16283-2 (ABNT, 2021c), para determinação do nível de pressão sonora de impacto padronizado (L'_{nT}), e obtenção do resultado ponderado ($L'_{nT,w}$), por meio da norma ISO 717-2 (ISO, 2020a), para efetiva verificação do desempenho requerido.

Ainda, a norma NBR 15575-3 (ABNT, 2021b) recomenda uma metodologia para estimativa do isolamento acústico em sistemas de piso, a ser executada na fase de projeto, de modo a promover a especificação dos sistemas construtivos para posterior cumprimento dos requisitos de desempenho. Para tal, é indicada a norma NBR ISO 12354-2 (ABNT, 2025) para execução da previsão de desempenho, considerando as características acústicas, determinadas em laboratório, dos sistemas, materiais e revestimentos a serem empregados nos sistemas de pisos, e as interações entre os elementos construtivos presentes em cada caso.

2.1.4 Comportamento de sistemas estruturais

Os ambientes das edificações são formados por placas, na forma de paredes e lajes, as quais possuem um papel importante tanto para a irradiação sonora como para a transmissão por flancos entre seus componentes. Muitas paredes e pisos, dentre outros elementos construtivos, podem ser representados na forma de placas sólidas e, conseqüentemente, formam elementos fundamentais de estudo na acústica de edificações (HOPKINS, 2007).

Diferentemente do som no ar, no qual existe apenas um tipo de onda a ser considerada (ondas longitudinais), nas placas existem ondas de flexão, ondas longitudinais e ondas cortantes. No caso da avaliação da irradiação sonora de placas, apesar dos três tipos de ondas estarem presentes em uma placa quando submetida a esforços dinâmicos, as ondas de flexão são as mais importantes (HOPKINS, 2007; VIGRAN, 2008).

De acordo com Hopkins (2007), ondas de flexão puras ocorrem quando o comprimento da onda de flexão é grande em relação à espessura da placa. Devido a

este fato, ondas de flexão puras são estabelecidas somente em placas consideradas finas, nas quais a propagação de uma onda de flexão gera rotação e deslocamento lateral dos elementos de uma laje. Comparativamente às ondas planares, as ondas de flexão resultam em maior deslocamento lateral do elemento, fazendo com que sejam protagonistas na irradiação sonora. Neste aspecto, Hansen e Hansen (2021) citam que a velocidade de propagação das ondas de flexão aumenta quando a relação do comprimento de onda frente à espessura da placa diminui, ou seja, a rigidez da placa frente à flexão aumenta com o aumento da frequência de excitação.

Devido à excitação, são estabelecidos modos de vibração locais, os quais são formados quando uma onda, após ser refletida pelos elementos de limite com a placa sob análise, retorna para o ponto de origem com exatamente a mesma direção com a que iniciou seu deslocamento, atingindo o fechamento de sua fase (HOPKINS, 2007).

Considerando a propagação de ondas de flexão nas placas, é necessária a definição das suas condições de ligação com os demais componentes da edificação. Estas condições de ligação podem ser: livres; simplesmente apoiada (restrição de movimento em um eixo); rotulada ou apoio fixo (restrição de movimento em dois eixos); engastada (restrição de movimento nos três eixos). A magnitude de uma onda refletida, a partir destes tipos de apoios, é a mesma da onda incidente, ou seja, reflexão absoluta, porém, o tipo de ligação com os demais elementos pode introduzir modificações de fase na onda refletida (DE SILVA, 2000; HOPKINS, 2007).

Em uma edificação, a identificação da condição de ligação de uma placa com os demais elementos muitas vezes é desconhecida, gerando dificuldade na realização de uma estimativa precisa dos modos de vibração, mas uma estimativa generalizada pode ser suficiente. A determinação das frequências modais pode ser necessária para indicação da faixa de frequências, sendo utilizada uma análise estatística para estimativa da transmissão sonora. Neste cenário, para frequências acima do décimo modo local, de forma aproximada, a estimativa estatística da densidade modal não é significativamente influenciada pelas condições de ligação entre a placa e os outros elementos (HOPKINS, 2007; RINDEL, 2018).

Neste caso, a partir das definições dadas por Hopkins (2007), a densidade modal estatística de ondas de flexão em placas homogêneas, para cada banda de frequências, pode ser calculada por meio da Equação 4.

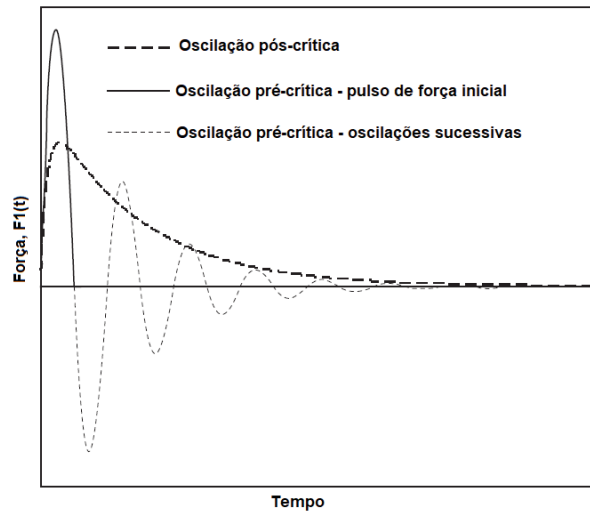
$$N_s = \frac{BL}{\sqrt{\frac{2\pi fh \sqrt{\frac{E}{\rho(1-v^2)}}}{\sqrt{12}}}} \quad \text{Equação 4}$$

Quando uma placa é submetida a uma força dinâmica de solicitação em sua superfície há a ocorrência da transferência de energia, entre a força externa e o elemento, para a estrutura, gerando excitação. Neste caso, a energia mecânica transferida para a estrutura será parcialmente dissipada por perdas internas no material, outra parte será parcialmente transmitida às estruturas conectadas ao elemento (transmissão indireta por flancos) e o restante será irradiado pela superfície do elemento na forma de som (VIGRAN, 2008).

Em termos da incidência de solicitações externas de impacto na superfície de um elemento de piso, ao exemplo dos martelos da *tapping machine*, o comportamento da força de impacto pode ser calculado por meio de um modelo de parâmetros concentrados. O modelo considera o efeito da impedância de cada martelo e a impedância do piso quando da ocorrência do pulso de força, por meio de um sistema massa-mola-amortecedor. Neste caso, o piso é representado por uma mola para a rigidez de contato (K), conectada em série com um amortecedor para considerar a impedância do piso (Z_{dp}), assumindo que ambos são independentes da frequência. A energia potencial contida nos martelos da *tapping machine* é representada por sua massa (0,5 kg) e velocidade de impacto (0,886 m/s), completando os componentes do sistema (HOPKINS, 2007).

A interação entre a rigidez de contato e os martelos da *tapping machine* com a impedância do piso possui influência no comportamento da transferência de energia potencial dos martelos para o sistema de piso. Neste caso, o impacto pode gerar uma oscilação pré-crítica ($K_m < 4Z_{dp}^2$) ou pós-crítica ($K_m \geq 4Z_{dp}^2$), conforme ilustrado na Figura 3. Para pulsos de força do impacto individual de um martelo ($F_1(t)$), o pulso de força em uma oscilação pós-crítica decai para zero e possui apenas valores positivos. Já em oscilações pré-críticas, após o pulso de força inicial, a força $F_1(t)$ oscila de forma alternada entre valores positivos e negativos próximos de zero (HOPKINS, 2007).

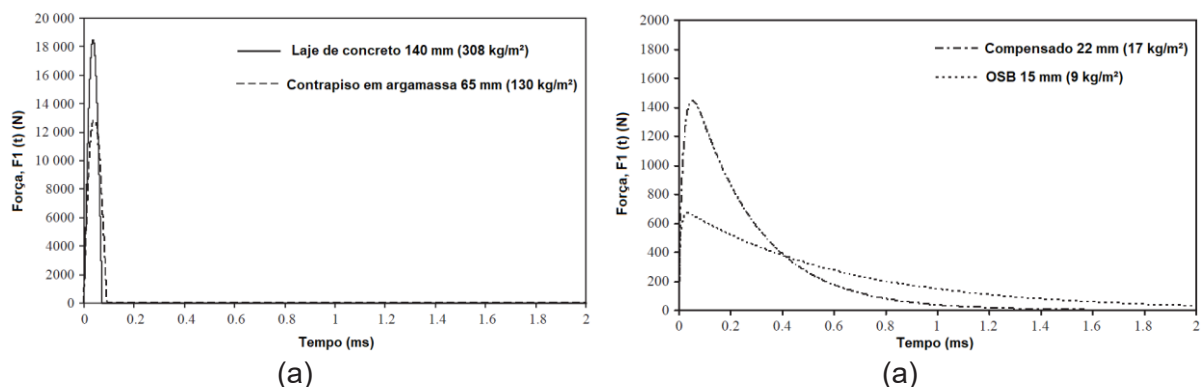
Figura 3 – Pulso de força de um único martelo da *tapping machine*: exemplos de oscilações pré-crítica e pós-crítica



Fonte: Adaptado pelo autor de Hopkins (2007)

Lajes de concreto armado e contrapisos em argamassa, em função de sua impedância e rigidez de contato, fazem com que os martelos da *tapping machine* repiquem após o primeiro impacto, gerando uma oscilação pré-crítica e o pulso de força possui uma pequena duração (Figura 4a). Todavia, para sistemas de piso em madeira (compensado e OSB), por exemplo, o repique dos martelos não ocorre e o pulso de transferência da energia dos martelos para o piso possui uma duração muito maior (Figura 4b), devido a uma oscilação pós-crítica.

Figura 4 – Pulso de força inserida pela *tapping machine* em pisos de: (a) concreto e argamassa (apenas fração positiva e inicial do pulso), e (b) compensado e OSB



Fonte: Adaptado pelo autor de Hopkins (2007)

Tal fator indica que, para a variedade de sistemas de piso, a impedância e rigidez de contato possuem um efeito significativo no comportamento do pulso de força e, conseqüentemente, são determinantes para o espectro de força (HOPKINS, 2007).

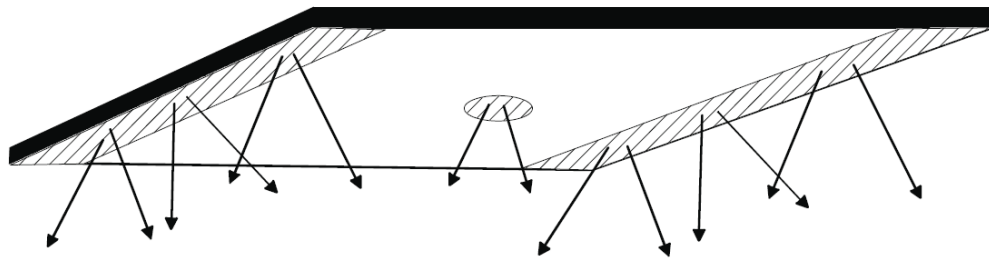
No caso da rigidez de contato, existem dois tipos diferentes de sistemas que podem ser considerados para a determinação do pulso de força, baseados nas características do material da superfície de impacto. Primeiramente, existe a rigidez de contato do sistema estrutural de piso, sem qualquer revestimento. E o segundo tipo pode ser exemplificado por meio de revestimentos resilientes, como carpete, no qual se assume que a rigidez de contato é determinada somente pelo revestimento e não é afetada pelo sistema estrutural localizado abaixo do revestimento. Em ambos os casos deve ser considerada a deformação na área de contato entre os martelos da *tapping machine* e a superfície do piso (HOPKINS, 2007).

Patrício (2018) cita que, quando do uso de revestimentos resilientes, a rigidez de contato promovida pelo revestimento aumenta consideravelmente o tempo de impacto da energia inserida no sistema, devido às características elásticas do material. Tal comportamento gera uma redistribuição da força aplicada, no domínio do tempo e, conseqüentemente, da frequência, causando um ligeiro aumento da amplitude de força nas baixas frequências e reduzindo consideravelmente a amplitude nas faixas de frequências mais altas, sendo fruto da capacidade de amortecimento interno deste tipo de material.

Em termos da irradiação de um sistema excitado, quando o meio que envolve o elemento construtivo é o ar, correspondendo a grande maioria das situações de interesse na acústica de edificações, a fração de energia irradiada é baixa, correspondendo a um máximo de 1 a 2% da energia imposta no sistema. Tal energia irradiada pela superfície do elemento é parcialmente proveniente do estabelecimento de um campo de ondas reverberantes no elemento a partir das reflexões que ocorrem nos limites da placa. Por este motivo que são estabelecidos modos ressonantes na placa, se desenvolvendo junto ao ponto de impacto da força externa e os limites da placa, havendo descontinuidade no entorno do local de solicitação externa, conforme ilustrado na Figura 5 (VIGRAN, 2008).

De acordo com Vigran (2008), ao se assumir que a vibração de uma placa é determinada por seus modos naturais, a irradiação sonora deste elemento é função do padrão modal (quantidade e amplitude de vibração), implicando no fato de que a velocidade de fase no material não é individualmente responsável pela determinação da energia irradiada. Assim, o fator de irradiação deve ser calculado levando em consideração as dimensões e as propriedades dos materiais que compõem a placa, em conjunto com as características da fonte de excitação do sistema.

Figura 5 – Irradiação sonora de uma placa excitada por uma força pontual



Fonte: Adaptado pelo autor de Vigram (2008)

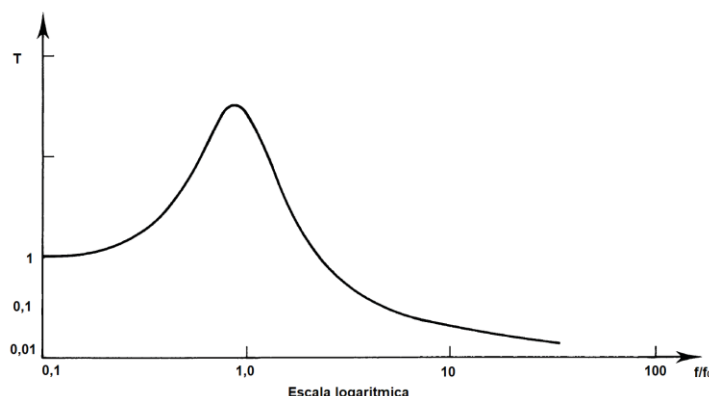
Considerando tal comportamento, a energia sonora irradiada, acima da frequência crítica (f_c), pode ser determinada. O fator de irradiação irá aumentar consideravelmente quando a frequência em análise se aproxima da frequência crítica do elemento construtivo. Neste caso, a frequência crítica, também denominada de frequência de coincidência, representa a faixa na qual a velocidade de fase e comprimento de onda das oscilações desenvolvidas no elemento construtivo e no ar que o circunda são iguais. Para elementos homogêneos, a frequência crítica pode ser determinada a partir da Equação 5 (HOPKINS, 2007; VIGRAN, 2008).

$$f_c = \frac{c_0^2 \sqrt{3}}{\pi h c_L} \quad \text{Equação 5}$$

Considerando tal comportamento, a frequência natural (f_0) de um elemento influencia diretamente na transmissibilidade de energia vibracional (T) através de sua estrutura. Neste caso, conforme ilustrado na Figura 6, no domínio da frequência, quando a relação $f/f_0 > 2^{0,5}$ há a ocorrência do isolamento das vibrações, ou seja, $T < 1$. Na faixa formada por $f/f_0 < 2^{0,5}$ a transmissibilidade de vibrações é amplificada ($T > 1$). Desta forma, conforme esperado, a maior amplitude de vibração ocorre na frequência de natural do elemento (INMAN, 2006).

Isto implica no fato de que, acima de determinada frequência, o campo reverberante contribui mais para a energia irradiada. Assim, o fator de perda (η) da estrutura interna do material de separação é de suma importância para atenuação da energia irradiada. Neste caso, uma forma de aumentar este fator é a adição de camadas viscoelásticas nas lajes estruturais (VIGRAN, 2008).

Figura 6 – Transmissibilidade vibracional, no domínio das frequências, em função da frequência natural de um sistema



Fonte: Adaptado pelo autor de Inman (2006)

A modificação estrutural do elemento pode ser realizada também para melhoria do desempenho em baixas frequências, faixa na qual o espaçamento entre ressonâncias individuais é grande e que também integra uma importante componente na resposta vibracional, pela redução da magnitude das ressonâncias. Tal alteração tem a finalidade de se evitar a coincidência da ressonância com uma forte frequência de excitação. Desta forma, a rigidez do elemento pode ser aumentada para gerar o aumento das frequências naturais ou massa pode ser adicionada para reduzir as frequências naturais. Ainda, pode ser inserido mais amortecimento no elemento para reduzir a resposta vibracional na ressonância, assim como uso de um sistema massa-mola, devidamente dimensionado, para atenuar a vibração em bandas de frequências específicas (TURNER; PRETLOVE, 1991; THOMPSON, 2015).

De modo geral, a dissipação de energia promovida por um elemento construtivo é proveniente de diversos mecanismos, envolvendo perdas internas no material (energia vibracional é transformada em calor), a irradiação sonora e a transmissão por flancos (perdas de contorno que ocorrem na ligação do elemento com os sistemas adjacentes). Desta forma, o fator de perda total de um elemento construtivo é representado pela soma destes três fatores que representam os mecanismos de dissipação de energia de impacto (VIGRAN, 2008).

De acordo com Ewins (2002) e Mace (2015), as constantes de amortecimento, como o fator de perda, raramente podem ser estimadas a partir das características de um material, sendo usualmente medidas em laboratório.

Todavia, para determinação do fator de perda, o Anexo C da norma NBR ISO 12354-1 (ABNT, 2023a) promove rotinas de cálculo que consideram as perdas

internas do material, a energia sonora que é irradiada pela superfície da placa e as perdas em suas ligações de contorno. Ainda, a presente norma indica metodologias para estimativa do fator de perda, em condições de laboratório e *in situ*, para elementos leves e pesados.

De posse de tais conceitos, considerando o método de R. Josse, descrito por Patrício (2018), a previsão do nível de pressão sonora de impacto normalizado pode ser efetuada a partir da Equação 6.

$$L_n = 92 + 10 \log \left(\frac{F_{ef}^2 f_c}{\rho^2 h^2 f \eta} \right) - 10 \log A \quad \text{Equação 6}$$

Ainda, por meio das prescrições da norma NBR ISO 12354-2 (ABNT, 2025), há uma segunda alternativa para previsão do nível de pressão sonora de impacto de um sistema homogêneo, que pode ser efetuada por meio da Equação 7.

$$L_n = 155 - 30 \log m + 10 \log T_s + 10 \log \sigma + 10 \log \frac{f}{f_{ref}} \quad \text{Equação 7}$$

Outra opção, descrita por Hopkins (2007) e Rindel (2018), é a utilização de uma análise energética estatística (*statistical energy analysis* - SEA) para estimativa da transmissão sonora de um elemento excitado por um campo sonoro ou vibracional. Neste caso, os ambientes e os elementos de compartimentação que os formam são analisados individualmente, facilitando o cálculo de sua capacidade de isolamento no término do modelo de cálculo.

Neste caso, o sistema SEA é uma estrutura de análise que possibilita a previsão da transmissão sonora e vibracional em estruturas, por meio do uso de uma abordagem estatística considerando a energia como sua variável primária. O sistema considera que a energia efetivamente transferida entre dois subsistemas acoplados entre si é proporcional à diferença de suas energias modais, sendo válido para bandas de frequência de oitava com mais de seis modos de vibração. Isto indica que o modelo é baseado na avaliação da transferência de energia de sistemas com elevada energia modal para aqueles com reduzida energia modal, promovendo uma estrutura de base que possibilita análise de dois ou mais subsistemas (HOPKINS, 2007; RINDEL, 2018).

Devem ser levadas em consideração as incertezas associadas ao comportamento das placas modeladas no SEA nas bandas de frequências nas quais há a ocorrência de poucos modos de vibração. Neste caso, as incertezas podem ser consideráveis caso haja menos de cinco modos de vibração em uma placa, sendo

uma ocorrência corrente em lajes e paredes de concreto e alvenaria (HOPKINS, 2007).

Neste caso, ferramentas computacionais que aplicam métodos de elementos finitos, como ANSYS™, ABAQUS™ e FEMLAB™, são instrumentos que facilitam a consideração da interação de toda rede de elementos e sistemas que compõem os ambientes, evitando aproximações realizadas quando da consideração individual dos sistemas como placas (VIGRAN, 2008).

2.1.5 Contribuição da transmissão indireta

Considerando um sistema de piso em uma edificação, as condições de ligação deste elemento com sua envolvente possuem uma influência considerável em sua capacidade de isolamento. Neste caso, o tipo e propriedades das conexões do elemento de piso e sua envolvente (sistemas construtivos adjacentes) são fatores importantes na verificação das propriedades de transmissão sonora de um determinado sistema construtivo (VIGRAN, 2008).

A precisão das estimativas realizadas para tais modelos é dependente dos tipos de elementos que constituem os ambientes e a complexidade da ligação que cada sistema construtivo possui entre si. Tratando-se de construções homogêneas e pesadas, como concreto armado, a precisão dos modelos é considerável, mas quando da presença de sistemas leves e de múltiplas camadas, tal previsão é mais complexa, demandando o levantamento e consideração de mais informações acerca da interação entre os elementos (VIGRAN, 2008).

A previsão da capacidade de isolamento sonoro aos sons de impacto de elementos estruturais de piso *in situ* pode ser realizada por meio das prescrições da norma NBR ISO 12354-2 (ABNT, 2025).

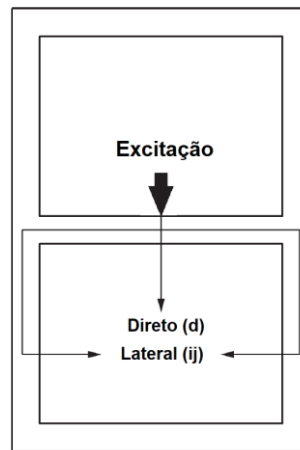
Neste caso, a energia sonora irradiada no ambiente receptor (imediatamente abaixo do piso excitado por uma força externa dinâmica) é função da irradiação sonora de cada elemento construtivo que compõe o ambiente. Tal irradiação sonora de cada elemento é fruto da energia transmitida a cada sistema devido ao impacto imprimido ao elemento estrutural (laje) presente entre o ambiente emissor e receptor. No modelo é considerado que a transmissão que ocorre através de cada um dos caminhos é independente entre si e que os campos vibracionais podem ser tratados de forma estatística. Desta forma, o nível de pressão sonora de impacto, considerando as

contribuições indiretas por flancos (L'_n) pode ser obtido pelo somatório da energia transmitida por cada caminho, conforme Equação 8 (ISO, 2017b; PATRÍCIO, 2018).

$$L'_n = \left(10 \log \left(10^{L_{n,d}/10} + \sum_{j=1}^n 10^{L_{n,ij}/10} \right) \right) \quad \text{Equação 8}$$

Neste caso, os caminhos associados a transmissão da energia de impacto que incide sobre um elemento estrutural de piso que mais contribuem para o estabelecimento do campo sonoro no ambiente receptor podem ser descritos conforme Figura 7 (ISO, 2017b; PATRÍCIO, 2018).

Figura 7 – Caminhos de propagação da energia sonora associada a sons de impacto



Fonte: Adaptado pelo autor de ISO (2017b)

Para o desenvolvimento deste modelo, é necessária a determinação do nível de pressão sonora de normalizado advindo da transmissão direta através do elemento de separação ($L_{n,situ}$), e da propagação sonora proveniente da vertente indireta (L_{ij}), entre o sistema estrutural de piso (i) e o elemento de flanco (j) (ISO, 2017b).

Para tal, também é necessário o cálculo do índice de redução de vibração para cada caminho de transmissão entre os elementos de separação (K_{ij}), conforme a norma NBR ISO 12354-1 (ABNT, 2023), relacionando a massa entre os dois elementos e o tipo de ligação presente entre eles.

Ainda, a medição da energia transmitida de forma indireta por flancos em ambientes adjacentes pode também ser medida, em laboratório ou *in situ*, por meio da metodologia presente na norma ISO 10848-1 (ISO, 2017a).

No âmbito dos revestimentos de piso, especificamente nos sistemas flutuantes, as transmissões indiretas podem ser consideráveis caso haja conexões estruturais

(pontes acústicas) entre o elemento flutuante e a laje estrutural e/ou paredes de contorno do ambiente. Nestes casos, as pontes acústicas variam em grau de influência a partir do tipo de piso flutuante em questão, adotando um comportamento diferente em pisos reativos de forma local ou não (VIGRAN, 2008).

De forma geral, Vigran (2008) menciona que os pisos flutuantes compostos a base de massas flutuantes de concreto possuem maior propensão à redução de desempenho quando da ocorrência de pontes acústicas do sistema com a laje estrutural e/ou com as paredes que formam o ambiente.

No caso de pisos flutuantes leves, ao exemplo de parquet ou tábuas de madeira, a influência de conexões de contorno rígidas entre o revestimento flutuante e as paredes do ambiente é menor do que a redução de desempenho verificada nos sistemas pesados, como os de concreto. Assim, considerando os sistemas leves, a sua resposta local às solicitações de impacto faz com que a ocorrência de pontes acústicas laterais acarrete uma menor perda de desempenho quando do estabelecimento de conexões estruturais não intencionais (VIGRAN, 2008).

2.1.6 Composição de sistemas flutuantes

Nos casos em que o sistema estrutural e sua envoltória não promovem um isolamento aos sons de impacto adequado, soluções como revestimentos de piso, sistemas flutuantes e sistemas de forro podem ser adotados para melhoria de desempenho (VIGRAN, 2008; HOPKINS, 2017; PATRÍCIO, 2018).

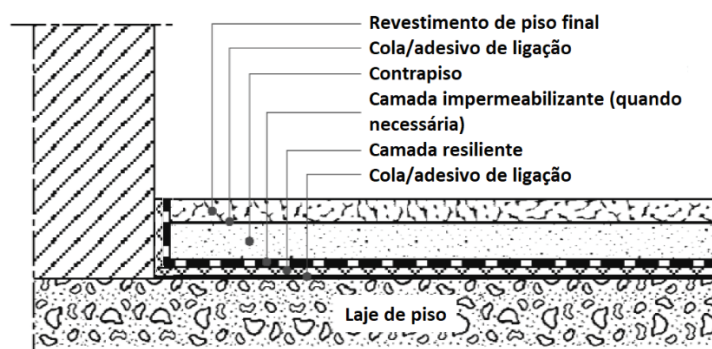
Os sistemas flutuantes são interessantes pois possibilitam agregar o uso de revestimentos cerâmicos a um desempenho acústico adequado frente aos sons de impacto, além de possuírem maior eficiência em comparação aos sistemas de forro suspenso. Neste caso, os sistemas de forro possuem eficiência reduzida pois atuam principalmente na redução da transmissão sonora direta, podendo resultar em elevada contribuição por flancos (WARNOCK; FASOLD, 1997; MÖSER, 2009; VIGRAN, 2008; POHL, 2011; LECHNER, 2012).

Quando da avaliação de sistemas para isolamento de sons de impacto, os pisos flutuantes compõem uma solução interessante, possuindo um comportamento acústico caracterizado por um sistema massa-mola-amortecedor. Neste caso, o sistema possui uma placa rígida, que atua como elemento massa, e uma camada resiliente, com função de mola e amortecedor, entre a placa rígida e a laje de suporte.

Desta forma, por meio das características elásticas e de amortecimento da camada resiliente, os pisos flutuantes são considerados soluções altamente eficientes para redução da transmissão de sons de impacto (ALONSO; PATRICIO; SUÁREZ, 2019).

Os pisos flutuantes são formados por uma camada de distribuição de carga e uma base resiliente, responsável por desconectar a superfície de preenchimento e/ou caminhamento da laje de suporte estrutural. A camada resiliente pode ser composta por isoladores pontuais ou contínuos (mantas) sobre a superfície da laje de suporte. Em ambos os casos, é necessário o devido cuidado na prescrição e execução dos sistemas para garantir que a camada flutuante esteja completamente desconectada das paredes que delimitam o ambiente, conforme abordado anteriormente. Um esquema detalhando o sistema flutuante está presente na Figura 8 (WARNOCK; FASOLD, 1997; MÖSER, 2009; POHL, 2011; PATRÍCIO, 2018; SCHIAVI, 2018).

Figura 8 – Exemplo de composição de um sistema de piso flutuante



Fonte: Adaptado pelo autor de Patrício (2018)

Tais sistemas são soluções construtivas complexas, demandando projeto e recomendações detalhadas, com uma correta especificação de materiais e métodos, além do acompanhamento da instalação. Somente assim haverá garantia de um resultado satisfatório em relação ao padrão de desempenho estabelecido. Tal especificação e controle possuem o objetivo de reduzir as transmissões indiretas, causadas pelo contato do elemento de piso flutuante com as paredes que delimitam o ambiente, e perda de eficiência e durabilidade, geradas pela sobrecarga do elemento resiliente (WARNOCK; FASOLD, 1997; EGAN, 2007; MÖSER, 2009; HOPKINS, 2017).

De forma geral, para exemplificar a capacidade de desempenho destes sistemas, na Tabela 3 estão presentes os resultados de redução de nível de pressão

sonora de impacto ponderado (ΔL_w) de diferentes composições de piso flutuante obtidos em ambiente de laboratório.

Tabela 3 – Redução sonora aos sons de impacto proporcionada por sistemas de piso flutuante

Composição e espessura (mm)	ΔL_w (dB)
Contrapiso em laje de concreto armado (40 mm), sobre manta asfáltica com granulado de cortiça, revestido por carpete industrial (6 mm)	27
Contrapiso em laje de concreto armado (40 mm), sobre manta asfáltica com granulado de cortiça, revestido por régua de madeira (6 mm)	20
Contrapiso em laje de concreto armado (40 mm), sobre manta asfáltica com granulado de cortiça, revestido por peças cerâmicas aderidas (5 mm)	18
Contrapiso em argamassa (80 mm), sobre espuma de poliuretano e cortiça (6 mm), sem revestimento	23
Contrapiso em argamassa (80 mm), sobre espuma de poliuretano e cortiça (10 mm), sem revestimento	26
Contrapiso em argamassa (80 mm), sobre espuma de poliuretano (12 mm), sem revestimento	29

Fonte: Adaptado pelo autor de Getzner (2017a, b), Patrício (2018) e Getzner (2020)

Analisando os resultados selecionados, primeiramente é notável a variação da capacidade de redução dos sons de impacto quando a camada de caminhamento do sistema é modificada. Por exemplo, um sistema flutuante com a mesma base (feltro compósito de cortiça e laje de concreto) e variações de revestimento superficial, possui resultado consideravelmente maior quando utilizado em conjunto com um revestimento resiliente, como o carpete, neste caso, do que com revestimentos rígidos, como madeira e cerâmica.

Analisada tal seleção de composições de piso flutuante, é interessante a caracterização, dada por Patrício (2018), acerca dos revestimentos compósitos rígidos. Tais sistemas utilizam o mesmo princípio de atuação dos típicos pisos flutuantes e são compostos por um revestimento de piso com rigidez considerável, ao exemplo de madeira laminada ou peças cerâmicas, instalados de forma aderida ou não, sobre uma camada de material de alta resiliência, como cortiça ou polietileno extrusado.

No caso de revestimentos compósitos rígidos que utilizam cerâmicas como superfície flutuante, na Tabela 4 estão presentes exemplos de redução aos sons de impacto, obtidos em laboratório, com diferentes tipos de camadas resilientes.

Tabela 4 – Redução aos sons de impacto proporcionada por revestimentos compósitos rígidos com cerâmicas

Composição e espessura	ΔL_w (dB)
Compósito de piso cerâmico (7 mm) e aglomerado de cortiça (6 mm)	14
Compósito de piso cerâmico (6 mm) e aglomerado de cortiça (10 mm)	17
Compósito de piso cerâmico (9 mm) e aglomerado de borracha e cortiça (6 mm)	18
Compósito de piso cerâmico (7 mm) e aglomerado de borracha e cortiça (2 mm)	17

Fonte: Adaptado pelo autor de Patrício (2018) e Damtec (2021)

A capacidade global de redução aos sons de impacto das composições presentes na Tabela 4 demonstram que tais sistemas, mesmo com uma massa flutuante consideravelmente inferior aos pisos flutuantes anteriormente mencionados, possuem um desempenho satisfatório. Cada composição de material resiliente, devido às suas propriedades físicas, possui uma capacidade de amortecimento distinta, resultando em diferentes eficiências na redução dos sons de impacto. A partir dos dados, é visível que o aumento da espessura da camada resiliente tende a resultar em maior capacidade de atenuação e que os compósitos resilientes com borracha possuem performance alta, mesmo com espessura reduzida.

2.1.7 Comportamento e previsão de isolamento em sistemas flutuantes

As vibrações são, geralmente, salvo casos especiais, movimentos oscilatórios com pequena amplitude sobre uma posição de equilíbrio estático. O movimento oscilatório de um sistema, quando excitado, é causado quando a energia presente no elemento varia de um estado para outro, repetidamente, resultando em um comportamento sinusoidal em relação ao tempo. Tais vibrações naturais ocorrem pela conversão da energia cinética, contida na inércia da massa dos elementos, em energia potencial, repetidamente, durante o deslocamento gerado por uma excitação. Neste caso, a energia potencial elástica está presente na deformação de materiais com comportamento de mola e a energia potencial gravitacional é gerada pela movimentação da massa do elemento em relação à força da gravidade (DE SILVA, 2000).

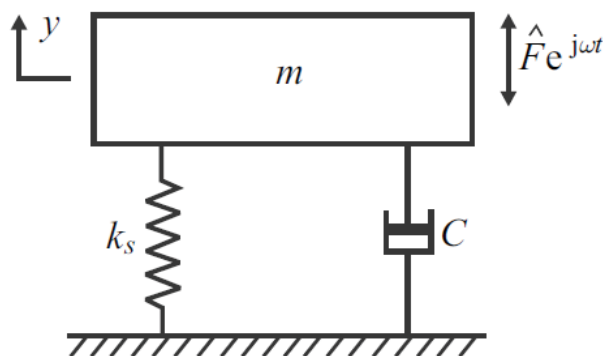
O isolamento de vibrações é considerado fundamental para uma reduzida vibração estrutural advinda da interação entre uma fonte externa e uma estrutura. Nesta senda, a transmissão de movimentos vibracionais ou forças de um elemento

para outro pode ser reduzida pela inserção de um elemento relativamente flexível entre as estruturas, caracterizando o conceito de isolamento de vibrações (MACE, 2015; BIES *et al.*, 2023).

Neste caso, uma consideração importante de projeto é a frequência de ressonância da estrutura isolada. Nesta frequência o elemento de isolamento irá amplificar consideravelmente a quantidade de energia transmitida entre as camadas. Isto implica em que a frequência de ressonância deva estar posicionada bem abaixo da faixa de frequências as quais se pretende isolar (BIES *et al.*, 2023).

Para o entendimento do funcionamento dos princípios de isolamento de vibrações é importante a análise comportamental de sistemas com um grau de liberdade, conforme ilustrado na Figura 9. Este sistema é composto por um elemento mola (com rigidez k_s), uma massa (m) e um amortecedor (coeficiente de amortecimento C). Neste caso, a massa é excitada por uma força periódica externa (F_e) e o deslocamento (y), causado por sua atuação, é função do quociente entre a velocidade de vibração e a frequência de ocorrência (BIES *et al.*, 2023).

Figura 9 – Sistema vibracional com um grau de liberdade e excitação no elemento flutuante



Fonte: Adaptado pelo autor de Bies *et al.* (2023)

Neste caso, as propriedades básicas deste sistema em vibração são formadas pela inércia proveniente da massa, responsável por acumular energia cinética, e a rigidez do elemento mola, que acumula energia potencial. Ainda, a força externa introduz energia ao sistema e o amortecimento provido pelo amortecedor possui a função de dissipar a energia presente no deslocamento forçado. A capacidade de amortecimento afeta a taxa de redução do movimento oscilatório, mas imprime

somente uma fraca influência na frequência de vibração (FOREMAN, 1990; TURNER; PRETLOVE, 1991; MACE, 2015).

Neste sentido, de acordo com Bies *et al.* (2023), é de interesse a indicação de que o deslocamento não ocorre em fase com a força externa devido ao amortecimento proveniente do amortecedor.

Quando da ausência de excitação proveniente de uma força externa, o sistema vibra de forma sinusoidal em uma amplitude constante (dependente da amplitude gerada pela excitação inicial), em sua frequência natural (f_0), que muitas vezes é denominada de frequência de ressonância. Tal relação pode ser descrita pela Equação 9 (BIES *et al.*, 2023).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m}} \quad \text{Equação 9}$$

No caso de sistemas com múltiplos graus de liberdade, compostos pela ligação em série de mais de um elemento massa e camada resiliente, sua interação é descrita, em termos da frequência natural do sistema, a partir da combinação matricial entre a massa dos elementos, rigidez das camadas resilientes e os vetores de deslocamento e velocidade. Desta forma, a Equação 10 explica a interação matricial que rege o comportamento vibracional de sistemas com mais de um grau de liberdade (WEAVER; TIMOSHENKO; YOUNG, 1991; RAM, 2002; YANG, 2002; SEM; KUJUR, 2018; BIES *et al.*, 2023).

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n \end{bmatrix} - f_0^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} = 0 \quad \text{Equação 10}$$

Quando da avaliação de sistemas compostos por apenas uma massa flutuante ($m_1 > 0$; $m_2, \dots, m_n = 0$), a interação entre os elementos de um sistema com mais de um grau de liberdade formado por apenas um elemento massa, na camada superior, e mais de um elemento mola, faz com que o sistema possua apenas uma frequência natural. Neste caso, a Equação 11, Equação 12 e Equação 13, indicam a frequência de ressonância de um piso flutuante com uma camada rígida e duas, três e quatro camadas resilientes, respectivamente.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_1 s'_2}{m(s'_1 + s'_2)}} \quad \text{Equação 11}$$

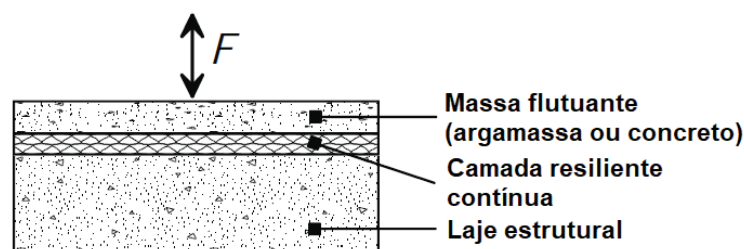
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_1 s'^2_3 + s'^2_2 s'_3 - s'_3 s'^2_2}{m(s'_1 s'_2 + s'_1 s'_3 + s'_2 s'_3)}} \quad \text{Equação 12}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_1 s'_2 s'_3 s'_4}{m(s'_1 s'_2 s'_3 + s'_1 s'_2 s'_4 + s'_1 s'_3 s'_4 + s'_2 s'_3 s'_4)}} \quad \text{Equação 13}$$

Assim, para a estimativa da capacidade de isolamento dos sistemas construtivos de uma edificação, são necessárias as propriedades acústicas dos elementos que constituem os sistemas e contribuem para a transmissão sonora. De modo geral, as características acústicas podem ser obtidas por meio de ensaios em ambientes laboratoriais. Neste cenário, são obtidos os parâmetros acústicos relevantes para descrição das propriedades dos materiais, servindo de subsídio para previsão do desempenho acústico dos sistemas construtivos baseado na teoria física associada à análise (METZEN, 1996).

No caso da estimativa do desempenho acústico de pisos flutuantes (Figura 10), a superfície de caminhamento é desconectada da laje de suporte por meio de um material resiliente, com ausência de conexões rígidas aos elementos e paredes de contorno no perímetro do sistema de piso. A interface resiliente, entre o revestimento e a laje, resulta em uma ressonância do tipo massa-mola associada ao piso flutuante. Devido às características elásticas e de amortecimento da camada resiliente, estes sistemas são bastante eficientes na redução da transmissão dos sons de impacto (HOPKINS, 2007; ALONSO; PATRICIO; SUÁREZ, 2019).

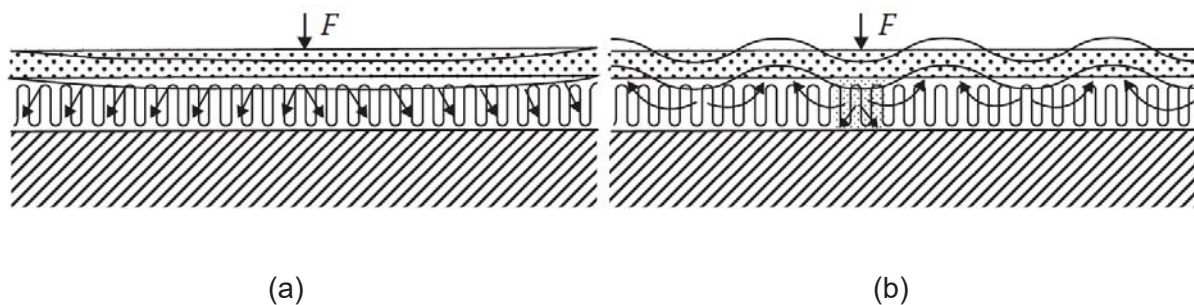
Figura 10 – Composição de sistema de piso flutuante sob solicitação de impacto



Fonte: Adaptado pelo autor de Vigran (2008)

A camada de revestimento, ou massa flutuante, é caracterizada por ser local ou ressonantemente reativa, implicando que a força inserida por uma solicitação de impacto seja transmitida pela camada flutuante para a laje estrutural justamente no entorno do ponto de impacto, ou um campo reverberante de onda de flexão é gerado, conforme ilustrado na Figura 11 (VIGRAN, 2008).

Figura 11 – Excitação de impacto em piso flutuante: (a) reação ressonante, e (b) reação local



Fonte: Adaptado pelo autor de Rindel (2018)

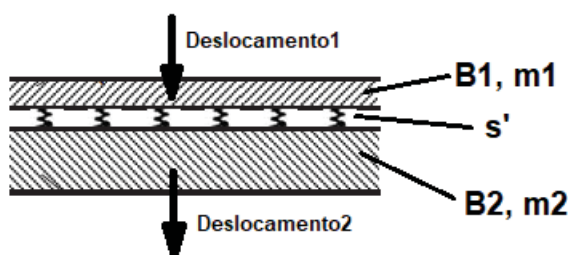
Nos casos em que a massa e impedância (oposição ao movimento em termos da relação força e deslocamento) da laje de piso é muito mais elevada do que a do piso flutuante, a frequência de ressonância do sistema massa-mola da superfície de revestimento é aproximadamente a mesma que a de um sistema massa-mola-massa que inclui o sistema de laje de piso. Neste caso, o projeto destes sistemas deve ter como objetivo obter uma frequência de ressonância bem abaixo do intervalo de frequências de interesse na acústica de edificações. Isto se dá pelo fato de que o revestimento pode ter um efeito indesejado, resultando em valores de ΔL negativos, piorando o desempenho do conjunto, em bandas de frequências próximas da frequência natural do sistema (HOPKINS, 2007; VIGRAN, 2008).

Os pisos flutuantes podem ser analisados de forma a considerar que a superfície de caminhamento e a laje de suporte agem como placas homogêneas infinitas (caracterizadas pela sua massa e rigidez à flexão). Desta forma, é formado um campo de ondas de flexão que se propaga a partir do ponto de impacto, significando que não existem reflexões para formação de um campo reverberante, implicando que a camada flutuante e a laje de suporte sejam reativas localmente. Ainda, é considerado que a camada de caminhamento (mais fina que a laje estrutural)

e a laje de suporte sejam formadas por placas pesadas com densidade e módulo de elasticidade similares (HOPKINS, 2007; VIGRAN, 2008).

Em relação a camada resiliente, sua atuação ocorre como uma série de molas com pequeno espaçamento entre si (sendo considerada apenas sua rigidez dinâmica – s'), sendo tratada desta forma uma vez que sua espessura é reduzida ao ponto de não suportar movimentações ondulatórias dentro do intervalo de frequências de interesse. Por mais que a camada flutuante seja caracterizada por sua massa (m) e rigidez (B), sua rigidez não é considerada na estimativa da capacidade de redução aos sons de impacto. Neste caso, a excitação gerada por uma solicitação de impacto é transmitida da superfície de caminhamento para a laje de suporte por meio do material resiliente. Na Figura 12 estão ilustrados os componentes que caracterizam sistemas flutuantes (CREMER; HECKL; PETERSSON, 2005; HOPKINS, 2007; VIGRAN, 2008; NILSSON; LIU, 2015; CANIATO *et al.*, 2016).

Figura 12 – Caracterização de sistemas de piso flutuante sob solicitação de impacto



Fonte: Adaptado pelo autor de Cremer, Heckl e Pertersson (2005)

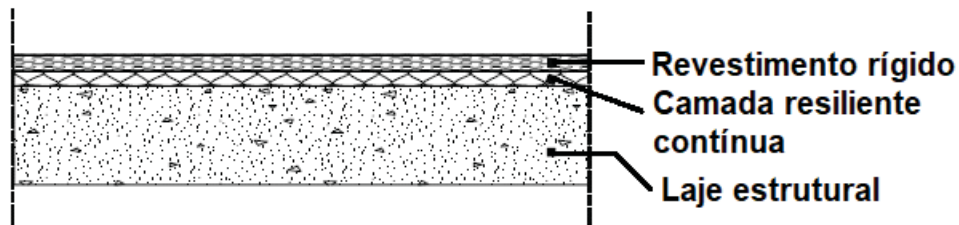
Desta forma, à parte da complexidade associada a tais interações, a redução do nível de pressão sonora de impacto de pisos flutuantes pode ser calculada por meio da Equação 14 (CREMER; HECKL; PETERSSON, 2005; HOPKINS, 2007; VIGRAN, 2008).

$$\Delta L = 40 \log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right) \quad \text{Equação 14}$$

No caso de aplicação de pisos flutuantes com uma camada de caminhamento leve (Figura 13), como os revestimentos compósitos rígidos, a impedância das solicitações de impacto deve ser considerada com o aumento da frequência. Isto se dá principalmente pela combinação de uma menor rigidez e uma maior capacidade de dissipação interna da energia, quando comparado aos pisos flutuantes pesados (contrapiso flutuante de argamassa ou concreto), gerando uma reação mais local no

sistema de piso. Assim, deve ser considerada a redução na energia inserida pela solicitação de impacto acima da frequência limite (CREMER; HECKL; PETERSSON, 2005; HOPKINS, 2007; VIGRAN, 2008).

Figura 13 – Composição de sistema de piso flutuante leve



Fonte: Adaptado pelo autor de Vigran (2008)

Devido a este fato, a Equação 15 promove a previsão da redução do nível de pressão sonora de impacto para sistema de piso flutuante com camada de superfície de caminhamento leve, considerado como uma placa infinita, acima da frequência limite (HOPKINS, 2007).

$$\Delta L = 40 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) + 10 \log \left[1 + \left(\frac{\pi f m_t}{2,3 \rho c_L h^2} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 15}$$

Neste caso, a frequência limite (f_{limit}) pode ser calculada a partir do ponto em que a impedância da camada de revestimento é equivalente à magnitude da impedância do martelo da máquina de impactos, conforme a Equação 16.

$$f_{\text{limit}} = \frac{2,3 \rho c_L h^2}{2 \pi m_t} \quad \text{Equação 16}$$

Tais equações são válidas para frequências acima da frequência natural do sistema (f_0) e resultam em estimativas razoáveis no intervalo de frequências de interesse na acústica de edificações: $f_0 < f < 4f_0$. Ainda, vale ressaltar que, a partir da Equação 14, espera-se um acréscimo de 40 dB na redução do nível de pressão sonora de impacto com o aumento na frequência com um fator de dez (intervalo denominado de década). Ainda, uma perda de desempenho é esperada na banda que contém a f_0 e bandas adjacentes. Desta forma, em determinados casos é mais prático considerar-se que $\Delta L=0$ para todas as bandas de frequências abaixo da f_0 (WARNOCK; FASOLD, 1997; CREMER; HECKL; PETERSSON, 2005; HOPKINS, 2007).

Na prática, nem todos os pisos flutuantes com camadas resilientes contínuas atingem um acréscimo de 40 dB entre uma banda de frequências com uma largura

equivalente a dez vezes o valor da frequência mais baixa. Isto ocorre, principalmente, pelo fato de que a superfície de caminhamento e a laje de suporte não agem como placas infinitas, e pelo fato de que, com o aumento da frequência, as camadas resilientes não atuam como molas simples. Devido a este fenômeno, a Equação 14 tende a superestimar o valor de ΔL e a taxa (positiva) de inclinação real é mais bem definida por uma razão de 30 dB a cada modificação na frequência de avaliação sob um fator de dez. Ainda, pode ser esperada uma taxa reduzida, ou até um platô, nas bandas de médias e altas frequências em uma condição real. Sendo assim, a Equação 17, empírica, é comumente utilizada e indicada pela norma NBR ISO 12354-2 para pisos flutuantes a base de misturas de areia e cimento (VÉR, 1971a; VÉR, 1971b; GERRETSEN, 1999; STEWART; MACKENZIE, 2000; HOPKINS, 2007; ABNT, 2025).

$$\Delta L = 30 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad \text{Equação 17}$$

Por fim, a redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado (ΔL_w) pode ser obtida por meio da Equação 18, presentes nas prescrições da norma NBR ISO 12354-2, para pisos flutuantes a base de cimento e areia, ou cálcio e sulfato (ABNT, 2025).

$$\Delta L_w = 13 \log(m) - 14,2 \log(s') + 20,8 \quad \text{Equação 18}$$

2.2 MATERIAIS RESILIENTES

A nível nacional, não existe regulamento específico para avaliação da conformidade de composições de material resiliente para uso sob pisos flutuantes, porém, tal análise é requisitada, por exemplo, na União Europeia, por meio da norma EN 16354 (CEN, 2018).

A norma EN 16354 (CEN, 2018) é destinada a avaliação de camadas resilientes para uso sob revestimentos de piso laminado e requer o cumprimento de limites mínimos de aceitação de produtos frente aos seguintes parâmetros e características: espessura (t); conformação pontual – nivelamento de deformações do substrato (PC); resistência à compressão (CS); resistência a fluência à compressão (CC); resistência à carga dinâmica (DL_{25}); resistência térmica (R); resistência ao vapor de água (SD); resistência à agentes alcalinos (AR); massa por unidade de área (AW); reação ao fogo (RTF); resistência à impacto de esfera de grande diâmetro (RLB); comportamento

eletroestático (EB); emissão de formaldeído; emissão de compostos orgânicos voláteis (VOCs); redução aos sons de impacto (IS); redução aos sons aéreos (AS); som irradiado pelo caminhamento (RWS).

2.2.1 Comportamento acústico aos sons de impacto

O isolamento de vibrações entre elementos, placas ou superfícies, é obtido pela incorporação de materiais resilientes no sistema, de modo a promover uma desconexão física entre o elemento de caminhamento e a laje de suporte. Os materiais resilientes também podem ser chamados de viscoelásticos pois combinam a capacidade de dissipação de energia (viscoso) com armazenamento de energia (elástico) (UNGAR, 2002; HOPKINS, 2007; CANIATO *et al.*, 2016).

Existe uma vasta gama de materiais comumente utilizados para isolamento de vibrações, incluindo feltros sintéticos, lãs minerais, espumas, cortiças, borrachas e elastômeros, além de composições com matéria prima reciclada. Sua aplicação varia em função das características de carregamento e limite de deflexão estática. Por exemplo, a cortiça e feltros são utilizados em situações nas quais existem carregamentos menores e demandam cuidado para prevenção de contaminações, como óleo e água. Nos compósitos de borracha, carregamentos moderados são suportados, sendo suas características físicas fortemente dependentes da sua composição (BARRON, 2003; SCHIAVI *et al.*, 2007; ZINI *et al.*, 2016; BIES *et al.*, 2023).

Os materiais resilientes podem ser analisados na forma de molas simples, sendo descritos pela sua rigidez dinâmica, que pode ser medida pela utilização de sistemas de massa-mola, por meio da interação da camada resiliente a uma ou mais massas. Neste caso, a rigidez dinâmica é constituída pela relação entre uma força solicitante dinâmica e o deslocamento dinâmico do material resiliente quando excitado por esta força. A rigidez dinâmica caracteriza a capacidade de um material de resistir a uma carga externa oscilatória, sendo descrita pela Equação 19 (ISO, 1989; HOPKINS, 2007; WATERS, 2015).

Para sua medição, o aparato de ensaio é arranjado de forma que cada uma das massas atue como uma massa uniforme simples que não suporta movimentos de onda na faixa de frequências que contém a frequência de ressonância do sistema massa-mola. Neste caso, o ensaio para determinação da rigidez dinâmica de

materiais resilientes para aplicação em pisos flutuantes, com camada contínua, é prescrito na norma ISO 9052-1 (ISO, 1989), para carregamentos estáticos na faixa de 40 a 400 kg/m², apesar da medição ser realizada sob uma carga de 200 kg/m² (HOPKINS, 2007; VIGRAN, 2008).

$$s' = \frac{(F/S)}{\Delta d} \quad \text{Equação 19}$$

Neste caso, a rigidez dinâmica aparente (s'_t) é calculada a partir da frequência de ressonância medida no ensaio e a carga do elemento de carregamento, conforme consta na Equação 20.

$$s'_t = \frac{4\pi^2 m'_t f_r^2}{1000000} \quad \text{Equação 20}$$

De posse da rigidez dinâmica aparente, é importante considerar que a rigidez dinâmica por unidade de área (s') dos materiais resilientes é influenciada pela resistividade ao fluxo de ar (r), na direção lateral, uma vez que o material pode possuir um índice de vazios suficiente para que a compressibilidade do ar em seus poros ofereça resistência significativa (CREMER; HECKL; PETERSSON, 2005).

Nos casos em que o material possui uma baixa resistividade ao fluxo de ar ($r < 10 \text{ kPa.s/m}^2$) e a rigidez dinâmica por unidade de área do ar presente nos seus poros é pequena quando comparada à rigidez dinâmica aparente por unidade de área (s'_t), a determinação da rigidez dinâmica se dá pela Equação 21. Ainda, quando o material possui alta resistividade ao fluxo de ar ($r > 100 \text{ kPa.s/m}^2$), a sua rigidez dinâmica também é determinada da mesma forma, tendo em vista que a estrutura do material oferece resistência suficiente à movimentação lateral de ar que tende a se formar com a excitação do sistema (CREMER; HECKL; PETERSSON, 2005).

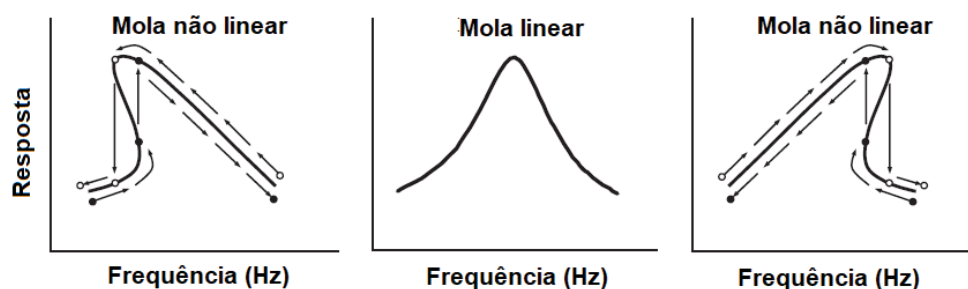
$$s' = s'_t \quad \text{Equação 21}$$

Considerando materiais resilientes com resistividade ao fluxo de ar intermediária, ou seja, na ordem de $10 \text{ kPa.s/m}^2 < r < 100 \text{ kPa.s/m}^2$, a rigidez dinâmica é função da estrutura interna e do ar contido em seus poros, sendo obtida por meio da Equação 22 (CREMER; HECKL; PETERSSON, 2005).

$$s' = s'_t + \left(\frac{\frac{p_0}{d\Omega}}{1000000} \right) \quad \text{Equação 22}$$

Ainda, pela natureza da forma de instalação dos materiais resilientes em sistemas de piso, é necessário assumir que podem ser comprimidos, agindo como molas lineares, obedecendo a Lei de Hooke, com uma relação linear entre rigidez e deslocamento. Infelizmente, muitos materiais resilientes agem como molas não lineares com aumento, ou redução, de rigidez com o aumento da força de carregamento. Nestes casos, nem sempre é possível identificar a região que pode ser considerada como linear, conforme ilustrado na Figura 14 (BAJAJ; KROUSGRILL, 2002; HOPKINS, 2007).

Figura 14 – Resposta de frequência de molas lineares e não lineares em sistemas massa-mola



Fonte: Adaptado pelo autor de Hopkins (2007)

No caso de molas lineares, o pico do espectro ocorre na frequência de ressonância, enquanto em molas não lineares o espectro é mais complexo, ao passo que, em algumas frequências, a curva teórica possui mais de um valor. Tal dificuldade associada a medição da frequência de ressonância das molas não lineares pode ser superada pela medição da frequência de ressonância com aplicação de forças muito baixas em um número diferente de níveis de força para uma determinada faixa. Nestes casos, quando as forças inseridas são suficientemente baixas, a frequência de ressonância, com uma força nula, pode ser obtida por um método de regressão (HOPKINS, 2007).

Quando da aplicação simultânea de diferentes camadas resilientes sobrepostas, de acordo com Kim *et al.* (2009), a rigidez dinâmica destas composições pode ser calculada a partir da rigidez dinâmica individual de cada um dos elementos resilientes. Tal comportamento vai ao encontro do estabelecido por Beards (1996) e

De Silva (2000), considerando que rigidez equivalente de um conjunto de elementos mola em série, desacoplados entre si, é dado pelo somatório da rigidez individual de cada componente. Desta forma, a rigidez dinâmica de um elemento composto por mais de uma camada de uma mesma composição de material resiliente pode ser determinada por meio da Equação 23.

$$s'_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s'_i}} \quad \text{Equação 23}$$

Na mesma senda, de acordo com Schiavi *et al.* (2007), quando a aplicação de duas ou mais camadas de uma mesma composição de material resiliente sobrepostas, a relação entre a frequência de ressonância de um sistema que compõe uma ou várias camadas está presente na Equação 24.

$$f_{r,n} = \frac{f_{r,1}}{\sqrt{n}} \quad \text{Equação 24}$$

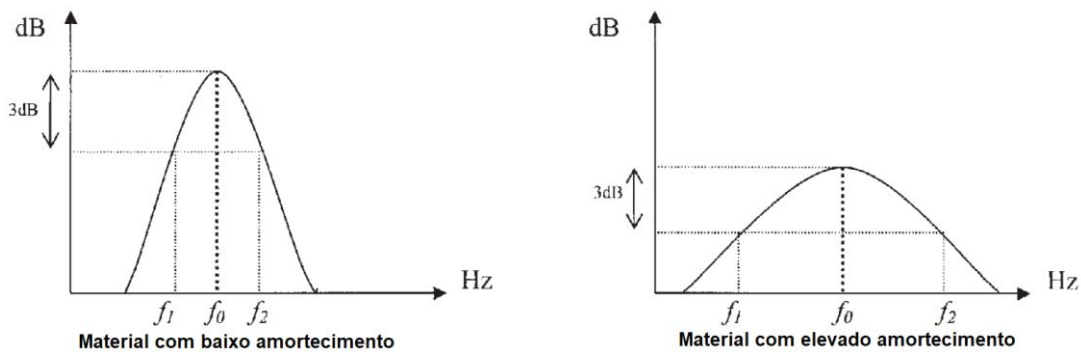
Ainda, a frequência de ressonância do conjunto de ensaio promove outras informações importantes acerca da capacidade de amortecimento do material nas bandas de frequência próximas à frequência de ressonância. Uma forma de análise é fundamentada no *Half-Power Point Method*, que consiste na avaliação das frequências adjacentes (f_1 e f_2) à frequência de ressonância (f_r) quando analisado um nível de aceleração 3 dB abaixo do valor de pico na frequência de ressonância do sistema. Desta forma, é analisado o intervalo de frequências no qual a energia é de, pelo menos, a metade da verificada na frequência de ressonância (SCHIABI; BELLI; RUSSO, 2005; HOPKINS, 2007; MADERUELO-SANZ; MARTÍN-CASTIZO; VÍLCHEZ-GÓMEZ, 2011).

A largura da banda de frequências entre f_1 e f_2 é dependente da capacidade de amortecimento do material, sendo que quanto maior é o amortecimento, mais larga é a faixa de frequências, conforme ilustrado na Figura 15 (SCHIABI; BELLI; RUSSO, 2005; BIES *et al.*, 2023).

Por meio das frequências adjacentes à frequência de ressonância, considerando uma redução de 3 dB, é viável a realização do cálculo para determinação de outras propriedades de amortecimento do material. O amortecimento, ou dissipação, de energia vibracional está associada na conversão da energia mecânica contida em uma oscilação em outra forma de energia, geralmente

calor (UNGAR, 2002; CREMER; HECKL; PETERSSON, 2005; MADERUELO-SANZ; MARTÍN-CASTIZO; VÍLCHEZ-GÓMEZ, 2011).

Figura 15 – Frequência de ressonância e frequências adjacentes para uma redução de aceleração de 3 dB em diferentes condições de amortecimento



Fonte: Adaptado pelo autor de Schiavi, Belli e Russo (2005)

Tal capacidade de atenuação de energia é comumente expressada em termos de um fator de amortecimento, sendo considerada uma métrica baseada na viscosidade do material e proporcional à velocidade de partícula da excitação, adimensional e caracterizada por um fator de perda e relação de amortecimento. Desta forma, a relação de amortecimento (ζ) da estrutura interna de um material, estimada no domínio da frequência por meio da faixa na qual se localiza a frequência de ressonância, pode ser calculada por meio da Equação 25 (HARRIS, 1991; MADERUELO-SANZ; MARTÍN-CASTIZO; VÍLCHEZ-GÓMEZ, 2011; HANSEN; HANSEN, 2021).

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f_r} \quad \text{Equação 25}$$

O fator de perda (η), por sua vez, representa a fração de energia vibracional mecânica que é convertida em calor pela estrutura interna do material, em um ciclo de vibração, na frequência de ressonância. Sendo assim, é desejável que os materiais resilientes tenham perdas internas elevadas quando da sua aplicação para isolamento aos sons de impacto. Este fator de perda pode ser obtido por uma aproximação realizada a partir da relação de amortecimento, conforme Equação 26, variando de 0 a 1 (STEWART; MACKENZIE, 2000; CREMER; HECKL; PETERSSON, 2005; MADERUELO-SANZ; MARTÍN-CASTIZO; VÍLCHEZ-GÓMEZ, 2011; SCHIAVI, 2018).

$$\eta = 2\zeta \quad \text{Equação 26}$$

Ainda, o Módulo de Young dinâmico (E_{din}) pode ser estimado considerando que a rigidez dinâmica é inversamente proporcional a espessura do material resiliente em análise. Uma previsão pode ser obtida por meio da Equação 27. Neste caso, tais características demonstram que se espera que uma combinação de um Módulo de Young relativamente baixo, ou seja, uma rigidez dinâmica baixa, e um alto fator de perda para uma boa capacidade de redução dos sons de impacto (MADERUELO-SANZ; MARTÍN-CASTIZO; VÍLCHEZ-GÓMEZ, 2011).

$$E_{\text{din}} = s'd \quad \text{Equação 27}$$

Por fim, outro parâmetro de interesse é o fator de qualidade (Q), sendo inversamente proporcional ao fator de perda, ou seja, quanto menor o valor de Q , melhor é a eficiência do sistema. Esta característica descreve a largura da banda de frequências de pico do sistema ressonante, sendo definida pela Equação 28 (GENTA, 2009; NEWELL, 2017; HANSEN; HANSEN, 2021).

$$Q = \frac{1}{\eta} = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad \text{Equação 28}$$

Em situações nas quais o pico de ressonância do sistema é fortemente assimétrico, o fator Δf ($f_2 - f_1$) pode ser substituído por $2(f_2 - f_r)$, caso necessário (SCHIAVI; BELLÍ; RUSSO, 2005).

De acordo com Ewins (2002), a capacidade de amortecimento de um material é uma das propriedades vibracionais mais difíceis de ser estimada e/ou medida com precisão. Tal dificuldade na obtenção de dados precisos se dá pela complexidade associada ao comportamento real do material quando excitado e os métodos relativamente simples disponíveis para descrever a característica.

Assim, analisadas tais características, e de posse da rigidez dinâmica do material resiliente, específicas para a espessura do material e sistema de medição, a frequência de ressonância do sistema massa-mola do piso flutuante pode ser estimada, bem como a previsão da capacidade de redução aos sons de impacto (HOPKINS, 2007; KIM *et al.*, 2009).

Porém, de acordo com Mace (2015), vale ressaltar que tais parâmetros, como módulo de elasticidade e fator de perda, são dependentes da frequência, temperatura,

amplitude de deslocamento, carregamento e histórico de ciclos de excitação. Isto faz com que seja necessária a avaliação da resposta dos materiais resilientes frente a tais condições que modificam seu comportamento.

2.2.2 Conservação de desempenho aos sons de impacto

Pelo fato de haver um elemento de massa (camada de revestimento) e outro com função de mola (material resiliente) na composição dos pisos flutuantes, se faz necessário que a camada resiliente deva suportar de forma eficiente tal imposição. Quando considerada uma situação real de uso, ou seja, *in situ*, a carga acidental proveniente de mobiliário e equipamentos pode alterar significativamente o desempenho do sistema. Tal ocorrência é mais severa, causando maior perda de desempenho, em pisos flutuantes leves, nos quais se classificam os revestimentos compósitos rígidos (HOPKINS, 2007).

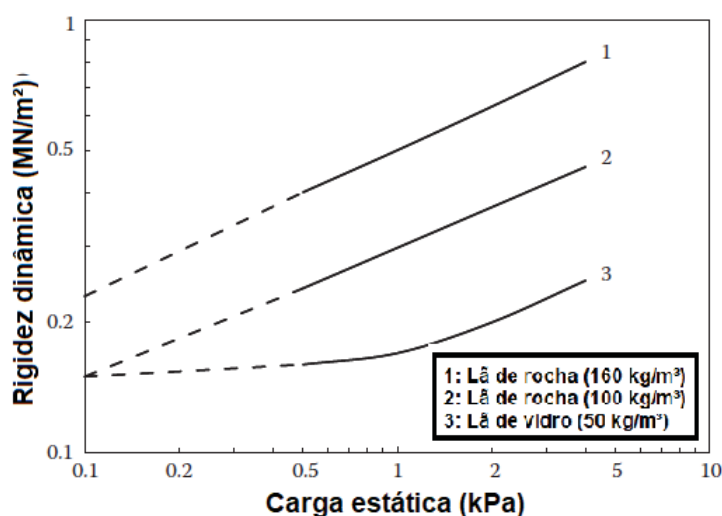
Nos materiais resilientes, devido a atuação na função de mola, a sua resistência sob constante carregamento, no domínio do tempo, e resposta a cargas inesperadas são importantes e devem ser avaliadas. Para tal, os principais parâmetros para caracterização de suas propriedades mecânicas são a rigidez dinâmica, compressibilidade e fluência à compressão. Tais parâmetros são de suma importância e devem ser verificados em laboratório, para garantia de que o material resiliente especificado atinja a sua expectativa de durabilidade na edificação (CANIATO *et al.*, 2016).

Considerando apenas a rigidez dinâmica de um material resiliente, por si só, não há uma caracterização adequada de suas propriedades mecânicas. Neste aspecto, a deflexão estática, imposta pela massa flutuante e carregamento acidental, em função do tempo, deve ser bastante reduzida. Em relação a isto, algumas tipologias de camadas resilientes podem sofrer uma redução lenta de sua espessura ao longo do tempo, sendo de interesse a sua verificação. Isto se faz necessário pois a rigidez dinâmica é inversamente proporcional à espessura do material, fazendo com que a capacidade acústica de um sistema possa ser deteriorada com o tempo (SCHIAVI; BELLI; RUSSO, 2005; SCHIAVI *et al.*, 2007).

Como esperado, na presença de um carregamento, a espessura do material resiliente é reduzida e a rigidez dinâmica aumenta. Tal comportamento é fruto do fato de que a velocidade de propagação de uma onda de compressão, em um meio

elástico, aumenta com o aumento da pressão estática no material. Por exemplo, na Figura 16 está ilustrado o aumento da rigidez dinâmica de lãs minerais fibrosas, com o aumento na carga estática. Neste caso, as lãs com densidade de 100 e 160 kg/m³ obtiveram um aumento de três vezes a sua rigidez dinâmica quando a carga foi aumentada de 10 a 400 kg/m², além de que a rigidez dinâmica, de todas as amostras, aumentou com o acréscimo de carga (RINDEL, 2018).

Figura 16 – Rigidez dinâmica em função do carregamento estático em lãs minerais



Fonte: Adaptado pelo autor de Rindel (2018)

Isto se deve ao fato de que determinadas composições de material podem possuir uma alta compressibilidade, gerando uma dependência de frequência, em função do tempo, quando submetidas a carregamentos prolongados. Neste caso, por mais que uma camada resiliente com alta compressibilidade agregue alta capacidade de amortecimento a um sistema, existe a propensão de sofrer deflexão com o carregamento imposto pela camada flutuante, causando rompimentos em sua estrutura interna, gerando redução de espessura. Por fim, a redução de espessura acaba por aumentar a frequência de ressonância do sistema e sua rigidez dinâmica, reduzindo as propriedades de amortecimento (SCHIAVI; BELLI; RUSSO, 2003; SCHIAVI; BELLI; RUSSO, 2005; ZINI *et al.*, 2016).

Para considerar tal comportamento, a avaliação da espessura do material pode ser realizada, por meio da medição da compressibilidade, avaliando a carga dinâmica que o material pode ser submetido, mantendo sua elasticidade e fluência à compressão. Esta avaliação engloba a resistência do material sob carga no domínio do tempo e possibilita, ainda, em um curto período, uma estimativa da espessura do

material e suas propriedades acústicas após longos períodos de carregamento (SCHIAVI *et al.*, 2007; CANIATO *et al.*, 2016).

Quando da análise da compressibilidade, uma total recuperação da espessura e formato do material resiliente, no término do ensaio, indica que o material possui boas características elásticas. Em contrapartida, uma recuperação incompleta após o carregamento do ensaio (nível de compressibilidade baixo), causada, por exemplo, por uma má agregação de sua estrutura interna, limita o efeito mola que a camada deve promover ao sistema de piso flutuante (CANIATO *et al.*, 2016).

A partir das medições de espessura no ensaio de compressibilidade, Schiavi *et al.* (2007) indicam que a modificação da frequência de ressonância dos sistemas que contém o material pode ser estimada, simulando carregamentos prolongados de 10 anos, por meio da Equação 29.

$$f_{r,10anos} = f_r \frac{1}{\sqrt{\frac{d_B}{d_F}}} \quad \text{Equação 29}$$

Desta forma, a partir da estimativa da frequência de ressonância modificada pela simulação de carregamentos prolongados, a rigidez dinâmica para carregamentos maiores pode ser determinada (SCHIAVI *et al.*, 2007).

De forma análoga à verificação do comportamento dos materiais resilientes frente às cargas dinâmicas, por meio de sua compressibilidade, outra característica de interesse é sua resistência à compressão. De acordo com Wasiak e Sudol (2018), a resistência à compressão indica a aptidão do material resiliente para utilização em sistemas flutuantes sem risco de fissuração do revestimento de piso, por deformação excessiva da camada elástica, quando aplicados carregamentos de curta ou longa duração.

A resistência à compressão dos materiais resilientes pode ser avaliada por meio da norma ISO 29469 (ISO, 2022), a partir da compressão do material em uma prensa instrumentada com transdutores de carga e deslocamento. Neste caso, a resistência à compressão (σ_m) é determinada pela relação da maior carga aplicada para obtenção de um deslocamento equivalente a 10% da espessura original do material e da área inicial da amostra. De acordo com a norma EN 16354 (CEN, 2018), a resistência à compressão mínima de um material resiliente para uso sob pisos flutuantes é de 10 kPa.

Por fim, analisando o comportamento do material sob carregamentos prolongados, a fluência à compressão é um parâmetro ligado às condições reais enfrentadas pelo material resiliente durante seu uso, sendo utilizada para determinar se o material consegue suportar as cargas impostas e garantir o efeito massa-mola do sistema ao longo do tempo. A avaliação é uma análise direta e, com a redução de espessura do material no domínio do tempo, há a indicação de que estrutura original não é preservada, resultando em diferenças entre o seu desempenho previsto e real (CANIATO *et al.*, 2016).

No caso de uma redução de espessura não significativa, por parte do material, é provável que sua estrutura interna foi rearranjada pelo carregamento, mesmo assim é esperado um incremento em sua rigidez dinâmica, prejudicando o desempenho acústico original (CANIATO *et al.*, 2016).

A determinação da fluência à compressão de um material resiliente pode ser realizada com base no ensaio prescrito pela norma ISO 16534 (ISO, 2020c). Esta avaliação consiste na aplicação de carga sobre uma amostra do material e medição de sua espessura ao longo de um período. As medições consistem na aplicação de uma carga inicial de 250 Pa, durante 120 ± 5 segundos, e medição da espessura inicial (d_s). Após esta medida, a carga é incrementada para 2 kPa, sendo medida a deformação inicial (X_0) quando transcorridos 60 ± 5 segundos.

De acordo com a norma ISO 16534 (ISO, 2020c), a sequência do ensaio consiste na medição da deformação (X_t), mantendo-se a carga de 2 kPa, após 1 minuto, 1 hora, 5 horas, e nos seguintes intervalos: 1, 2, 4, 7, 9, 11, 14, 18, 24, 32, 42, 53, 65, 80 e 95 dias. Assim, a fluência à compressão é calculada por meio da Equação 30.

$$X_{ct} = X_t - X_0 \quad \text{Equação 30}$$

De acordo com Schiavi *et al.* (2003), os valores de deformação medidos nos intervalos propostos servem para progressão, via regressão, do comportamento do material para períodos estendidos. Neste caso, Caniato *et al.* (2016) indicam que tal progressão pode ser realizada para períodos até 30 vezes maiores que o intervalo de análise do material sob carregamento, variando o período de ensaio em função da estimativa de comportamento que se deseja analisar.

2.3 PISOS CERÂMICOS

2.3.1 Características

Os pisos são um dos componentes funcionais mais importantes da edificação, sendo agentes primários de desgaste, tendo em vista que são submetidos a água, impactos, poeira, além das solicitações abrasivas e penetrantes geradas pelo caminhamento e mobiliário. Desta forma, devem ser projetados de forma a suportar as solicitações que envolvem seu coeficiente de atrito, facilidade de limpeza, redução da transmissão sonora entre pavimentos, reação e resistência ao fogo, além de contribuição de carga na estrutura (BERGE, 2009; METHA; SCARBOROUGH; ARMPRIEST, 2017; ALLEN; IANO, 2019).

No caso das cerâmicas, sua instalação é feita por meio de sua adesão ao substrato e de preenchimento das juntas com rejunte. São fabricadas a partir de argila natural, porcelana e outros materiais cerâmicos, possuindo superfície esmaltada ou não, e então queimadas a temperaturas suficientes para produzir as características físicas necessárias. Geralmente possuem formas quadradas, retangulares, hexagonais e podem ser aplicadas com uma combinação destas formas, trazendo um acabamento elaborado ao ambiente (BERGE, 2009; WARD-HARVEY, 2009; ZHANG, 2011; METHA; SCARBOROUGH; ARMPRIEST, 2017).

As peças cerâmicas possuem uma variedade de propriedades físicas, promovendo opções para a seleção de um modelo apropriado para cada uso. Neste sentido, as características primordiais podem ser consideradas como a sua qualidade e uniformidade, tanto de cor como dimensional, absorção de água, resistência a impactos e à abrasão (METHA; SCARBOROUGH; ARMPRIEST, 2017).

Em relação a sua aplicação, de acordo com Metha, Scarborough e Armpriest (2017) e Allen e Iano (2019), a adesão das cerâmicas ao substrato pode ser feita por meio do uso de:

- Adesivos orgânicos: utilizados em ambientes interiores com pouca carga e sem incidência de altas temperaturas;
- Argamassa colante: consiste em uma mistura de cimento Portland, areia, água e aditivos, sendo o produto mais utilizado em instalações convencionais. No Brasil, seu uso é prescrito pela norma NBR 13753 (ABNT, 1996);

- Epóxi lavável com água: utilizado em situações de uso pesado, altas temperaturas e locais com necessidades específicas;
- Argamassa a base de resina de furano: desenvolvido para possuir resistência a agentes químicos.

Ainda, segundo Metha, Scarborough e Armpriest (2017), após a instalação das peças cerâmicas no piso do pavimento e cura do material de adesão, rejunte é utilizado para preencher as juntas formadas entre as arestas das peças. Para tal, existem diferentes materiais, com usos específicos, como:

- Rejunte a base de areia, cimento Portland e aditivos;
- Rejunte de cimento modificado por polímero: tendem a possuir maior estabilidade de cor, boa resistência à flexão, adesão e manchas, e menor absorção de umidade, sendo resistentes ao congelamento;
- Epóxi lavável com água e rejunte a base de resina de furano: são utilizados nas mesmas condições e necessidades que as argamassas de adesão das peças ao substrato.

Existem diversas opções de tamanhos, formas, padrões e cores a disposição no mercado. Tradicionalmente, quanto maiores as dimensões das peças, maior deveria ser a sua espessura para resistir aos esforços de transporte, instalação e uso, sem quebrar. Todavia, a tecnologia de composição e produção promove a produção de peças de grandes dimensões com espessuras reduzidas (WARD-HARVEY, 2009).

Pela característica da superfície deste material, na maioria dos casos, é necessária uma camada superficial antiderrapante. Este recurso pode ser atingido por meio da incorporação de grânulos de carbetto de silício, ou texturas, nas peças. Assim, em áreas molhadas ou molháveis, um piso adequado deve ser especificado para garantia de sua funcionalidade (WARD-HARVEY, 2009).

No caso de edificações residenciais, a norma NBR 15575-3 (ABNT, 2021b) preconiza que os ambientes nos quais é requerida a resistência ao escorregamento são: áreas molhadas, rampas, escadas em áreas de uso comum e terraços. Nestes casos, as camadas de acabamento dos sistemas de piso devem possuir coeficiente de atrito dinâmico dentro dos limites do Anexo N da norma NBR 13818 (ABNT, 1997).

Os pisos cerâmicos podem ser nomeados como placas cerâmicas e descritos como placas finas de composição determinada a base de argilas e/ou matérias-primas inorgânicas, usualmente conformados por extrusão ou prensagem e,

subsequentemente, secas e queimadas a temperaturas necessárias para as características esperadas. Podem ser esmaltadas (GL) ou não esmaltadas (UGL), são incombustíveis e não possuem reação frente a luz. Ainda, a definição das placas cerâmicas como porcelanato se dá nos casos de placas vitrificadas que possuem coeficiente de absorção de água igual ou inferior a uma fração de massa de 0,5%, sendo pertencentes aos grupos AI_a e BI_a (ABNT, 2020a).

A classificação das placas cerâmicas se dá por meio da norma NBR ISO 13006 (ABNT, 2020a), que as divide em grupos em função do seu método de fabricação e absorção de água, não pressupondo o uso dos produtos. Em relação ao método de fabricação, estas recebem a nomenclatura de “Método A” quando fabricadas por extrusão, e “Método B” quando são prensadas a seco.

Ainda, a norma NBR ISO 13006 (ABNT, 2020a) requer o cumprimento de certas características, em função do uso do piso (interior ou exterior), e indica normas para sua verificação. Os requisitos tangem as dimensões e qualidade superficial das peças, suas propriedades físicas e químicas.

2.3.2 Propriedades acústicas aos sons de impacto

Tendo em vista a vasta gama de revestimentos de piso, escolhidos em função das necessidades de uso do local, é necessária a avaliação da capacidade de desempenho acústico para determinação do sistema mais adequado.

No caso de materiais de revestimento rígidos, conforme Warnock e Fasold (1997) e Warnock (1999), como os pisos cerâmicos, aderidos diretamente a lajes de concreto, não há melhora representativa da capacidade de atenuação aos sons de impacto. Todavia, como indicado por Rambaldi, Prete e Bignozzi (2015), tais revestimentos de piso podem ter seu desempenho acústico melhorado por meio da incorporação de uma camada resiliente em sua face inferior, configurando um revestimento composto.

De modo a exemplificar as características acústicas deste tipo de material, na Tabela 5 estão presentes valores de rigidez dinâmica de sistemas de piso cerâmico, utilizados de forma individual e de modo composto com camada resiliente, conforme estudo de Rambaldi, Prete e Bignozzi (2015).

Tabela 5 – Rigidez dinâmica de porcelanatos 600x600 mm (individuais e compósitos)

Composição	s_t' (MN/m³)
Porcelanato esmaltado com espessura de 4,7 mm	693
Porcelanato esmaltado com espessura de 3,0 mm	691
Compósito de porcelanato esmaltado com espessura de 4,7 mm e lâ de fibra de vidro de 0,5 mm	597
Compósito de porcelanato esmaltado com espessura de 3,0 mm e lâ de fibra de vidro de 0,5 mm	584
Compósito de porcelanato não esmaltado com espessura de 10,0 mm e aglomerado de borracha de 1,0 mm	61

Fonte: Adaptado pelo autor de Rambaldi, Prete e Bignozzi (2015)

A partir dos dados, é visível que a rigidez dinâmica das quatro composições de porcelanato é similar quando da avaliação apenas das peças cerâmicas, sugerindo que a espessura e acabamento superficial são independentes da rigidez dinâmica. Neste caso, com pequena variação e magnitude, as medições mostram que peças de porcelanato com maior espessura tendem a obter uma rigidez dinâmica do sistema mais baixa, indicando uma maior capacidade de oposição a solicitações oscilatórias, mesmo que com baixa eficiência.

Ainda, sob análise destes resultados, é possível verificar que a adição de uma camada resiliente, como lâ de fibra de vidro, reduziu a rigidez dinâmica do sistema em cerca de 100 MN/m³. Isto se dá a partir da maior capacidade de amortecimento do sistema pela desconexão da peça de porcelanato do substrato (sistema compósito rígido). Ademais, quando utilizado um aglomerado de borracha como camada resiliente, a rigidez dinâmica do sistema foi reduzida drasticamente, indicando uma considerável melhora na capacidade de redução aos sons de impacto, advinda da elevada capacidade de amortecimento interno do aglomerado de borracha.

De modo geral, os dados do estudo de Rambaldi, Prete e Bignozzi (2015) indicam que a utilização de revestimentos compósitos se mostra como uma solução interessante para agregar desempenho acústico aos sons de impacto aos revestimentos cerâmicos.

Ainda, o presente estudo, de Rambaldi, Prete e Bignozzi (2015), efetuou medições para obtenção da redução dos níveis de pressão sonora de impacto

ponderado de algumas composições de piso de porcelanato, com e sem camada resiliente, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado de porcelanatos (compósitos)

Composição	ΔL_w (dB)
Compósito de porcelanato esmaltado (7,0 mm) e camada de fibra de vidro (0,5 mm)	9
Compósito de porcelanato não esmaltado (10,0 mm) e camada de aglomerado de borracha (1,0 mm)	21
Fonte: Adaptado pelo autor de Rambaldi, Prete e Bignozzi (2015)	

Em termos da composição das peças de porcelanato, os resultados indicam uma baixa influência da espessura do material em seu desempenho, corroborando com o comportamento verificado nas medições de rigidez dinâmica. Ainda, neste caso, a porosidade das cerâmicas, de 5% para as peças de 7 mm de espessura e 9% para as de 10 mm, indica que esta pequena diferença não impacta consideravelmente no desempenho do conjunto.

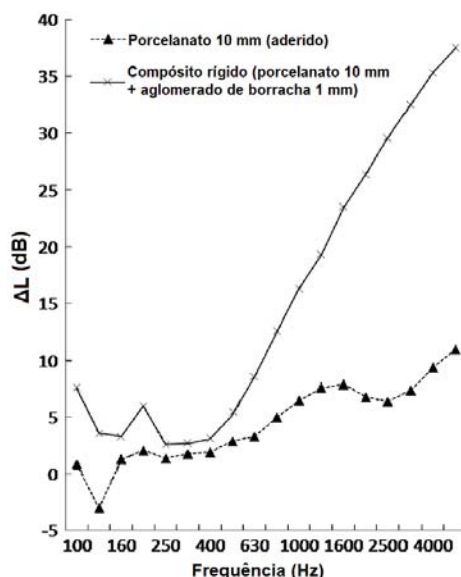
Com uso da lã de fibra de vidro nos porcelanatos com espessura de 7 mm e de aglomerado de borracha nas peças de 10 mm de espessura, o comportamento previsto através da rigidez dinâmica foi confirmado. A inserção da camada resiliente resultou em um aumento global na capacidade de redução aos sons de impacto de 3 dB com aplicação de lã de fibra de vidro e de 14 dB com o aglomerado de borracha. Novamente, isto indica uma elevada capacidade de amortecimento interno do aglomerado de borracha, aumentando consideravelmente a eficiência do sistema de piso frente aos sons de impacto.

Por fim, o estudo de Rambaldi, Prete e Bignozzi (2015) avaliaram também, por banda de frequências, a influência na mudança da capacidade de redução dos sons de impacto entre o revestimento de porcelanato com espessura de 10 mm aderido ao substrato e com camada de aglomerado de borracha, conforme ilustrado na Figura 17.

Assim, por meio dos dados, é possível verificar que o sistema de porcelanato aderido ao substrato promoveu aumento na capacidade de atenuação dos sons de impacto a partir da banda de frequências de 160 Hz. Tal aumento ocorreu de forma

gradativa nas bandas de médias frequências, com uma redução nas bandas de altas frequências, de 2.000 a 3.150 Hz, e recuperação nas bandas de 4.000 e 5.000 Hz.

Figura 17 – Mudança na redução dos sons de impacto com sistema flutuante compósito



Fonte: Adaptado pelo autor de Rambaldi, Prete e Bignozzi (2015)

Ainda, considerando o revestimento de porcelanato aderido ao substrato, na banda de frequências de 125 Hz o sistema resultou em um efeito negativo frente aos sons de impacto, o que é esperado em alguns casos, na proximidade da frequência natural do revestimento de piso, conforme Warnock e Fasold (1997), Warnock (1999), Seddeq (2006), Zeitler, Nightingale e Schoenwald (2009).

A partir da modificação da interação entre a peça de porcelanato e a laje de referência, por meio da camada resiliente de aglomerado de borracha, houve uma mudança positiva e considerável frente a capacidade de atenuação dos sons de impacto. Neste caso, o aumento da capacidade de amortecimento promovida pela camada resiliente agregou ganho de desempenho em todas as bandas de frequências.

Na banda de frequências de 100 Hz o sistema obteve aproximadamente 8 dB de capacidade de redução dos sons de impacto, com uma queda de desempenho verificada pelo platô estabelecido nas bandas adjacentes a frequência natural do sistema (bandas de frequências de 125 a 400 Hz). Nas bandas seguintes, o sistema obteve ganhos crescentes, com elevada linearidade entre as bandas de frequências,

seguindo o comportamento previsto por Cremer, Heckl e Petersson (2005), com elevada capacidade de atenuação dos sons de impacto a partir da frequência de ressonância do sistema, nas bandas de médias e altas frequências.

2.4 BORRACHA RECICLADA

Os compostos de borracha são, provavelmente, a classe de materiais mais complexa e com maior abrangência de aplicação. Uma vasta gama de diferentes propriedades pode ser obtida pela capacidade de modificação da borracha por meio de vários compostos químicos, polímeros e fíleres. No caso de pneus, o mercado de produção é responsável majoritariamente pelo consumo de borracha natural e sintética ao redor do mundo (CONZATTI *et al.*, 2009).

2.4.1 Características

O pneu pneumático é uma estrutura toroidal com geometria e composição da sua seção transversal conforme ilustração presente na Figura 18. Os principais componentes são a banda de rodagem (item A), cintura metálica (item B), flancos/paredes laterais (item C), lonas de carcaça (item D), talão (item E), *apex*/cunha (item F), e *innerliner*/ revestimento interno (item G) (DRYDEN; LUCHINI; OUYANG, 2001; SHULMAN, 2004; ROUSE, 2005).

Figura 18 – Seção transversal de um pneu pneumático



Fonte: Adaptado pelo autor de Shulman (2004)

A composição material de um pneu varia em função da sua categoria e tipo de veículo (carro de passageiros, utilitário, caminhão, ônibus e outros), porém, todas

estas categorias incluem quatro dos principais grupos de materiais: borrachas, negro de fumo (*carbon black*) e/ou sílicas, materiais de reforço e aditivos. Na Tabela 7 está presente a composição, em peso, de pneus de veículos leves e pesados (SHULMAN, 2004).

Tabela 7 – Composição, por peso, de pneus de linhas leves e pesadas

Material	Carro/Utilitário (%)	Caminhão/Ônibus (%)
Borracha/Elastômeros	± 43	± 45
Negro de fumo e sílica	± 27	± 20
Metais	± 11	± 22
Têxteis	± 5	± 1
Facilitadores de vulcanização	± 3	± 3
Aditivos	± 3	± 3
Óleos aromáticos	± 8	± 8

Fonte: Adaptado pelo autor de Shulman (2004)

O grupo principal de materiais de um pneu, representando cerca de 40 a 45% do seu peso, são as borrachas naturais e sintéticas, sendo obtidas pela extração natural em árvores Seringueiras e baseada em produtos de petróleo, respectivamente. A fabricação de pneus consome cerca de 70% das borrachas produzidas mundialmente. A relação de borracha natural para sintética é de aproximadamente dois para um em pneus de caminhão, e de três a quatro para um em pneus de carros. Ainda, diferentes polímeros e aditivos são utilizados em cada componente de um pneu (HAMED, 2001; SHULMAN, 2004; CONZATTI *et al.*, 2009).

O segundo grupo de materiais prevalentes são os negros de fumo e/ou sílicas, que quantificam de 23 a 27% do peso de um pneu. Uma variedade de negros de fumo, com diferentes formas, tamanhos e estruturas são utilizados em diferentes componentes do pneu. Tamanhos maiores podem ser utilizados no *innerliner*, enquanto partículas menores devem ser utilizadas nas lonas de carcaça. Avanços do mercado de fabricação vem sendo realizados para substituição do negro de fumo por sílicas, em algumas aplicações, dando origem ao Pneu Verde, tendo em vista seu viés sustentável (SHULMAN, 2004; NOORDERMEER; DIERKES, 2009).

Já o terceiro grupo de materiais que compõem os pneus são os materiais de reforço, compostos principalmente por metais e têxteis, que variam em função do tipo de uso do pneu. Em pneus de caminhão, cerca de 25% do peso do pneu é advindo de tramas de aço adicionadas para reforço dos talões, cintura metálica e lonas de

carcaça. Já nos carros, que utilizam uma proporção maior de têxteis em sua composição, as ligas metálicas compõem cerca de 11 a 13% do peso de cada pneu. Assim, os têxteis (raiom natural, náilon e poliéster), utilizados como tramas nas lonas de carcaça, correspondem a 5% do peso de um pneu de carro e a 1% do peso de um pneu de caminhão (SHULMAN, 2004; WENNEKES; DATTA, 2009).

Por fim, o quarto grupo de materiais são responsáveis por agirem como facilitadores nas diferentes etapas de fabricação dos pneus, sendo adicionados às misturas para melhoria da performance dos componentes, facilitadores de cura e eficiência de fabricação. Variedades de negro de fumo, dióxido de titânio, óxido de zinco e enxofre são utilizados para auxílio no processo de vulcanização e são misturados de forma uniforme em toda a matriz polimérica (SHULMAN, 2004; DUGGAL, 2009; BANERJEE, 2015).

Após a mistura e montagem dos elementos que compõem o pneu, é efetuado o processo de vulcanização (cura da mistura), que modifica a dureza e resistência da borracha, além de aumentar sua resistência a abrasão, óleo, oxigênio, solventes químicos e ao calor. Ainda, é importante ressaltar que diferentes composições dos elementos supracitados geram produtos com diferentes características, sendo que, geralmente, cada fabricante possui a sua própria receita para cada tipo de produto que fabrica (HAMED, 2001; LYON, 2004; SHULMAN, 2004).

A expectativa de uso média de um pneu rodoviário varia em função da sua categoria, podendo até ser aumentada, em certos modelos, pela execução de novos sulcos na banda de rodagem, ou até pela recapagem, prolongando a vida útil da carcaça. Ainda, o desgaste é mais evidente na banda de rodagem, fazendo com que um pneu perca aproximadamente 20% de seu peso ao longo da sua vida útil. A longevidade de um pneu está diretamente ligada ao comportamento e uso do veículo por parte do condutor e condições do pavimento e clima, porém, uma estimativa da durabilidade esperada para pneus de diferentes categorias está presente na Tabela 8 (SHULMAN, 2004).

Tabela 8 – Peso e expectativa de durabilidade de pneus de linhas leves e pesadas

Tipo	Peso (kg)	Durabilidade esperada (km)
Carro de passeio	± 7-9	± 35.000-45.000
Utilitário e van	± 8-11	± 60.000-70.000
Caminhão e ônibus	± 40-75	± 180.000-200.000

Fonte: Adaptado pelo autor de Shulman (2004)

2.4.2 Avaliação ambiental

O descarte de pneus é um dos grandes problemas econômicos e ambientais há décadas e, atualmente, a geração global anual de pneus usados é estimada em cerca de quatro bilhões de toneladas. Apesar de não serem considerados resíduos perigosos, o descarte destes produtos é difícil e gera diversos poluentes ambientais. Tais materiais não são facilmente degradáveis devido ao processo de vulcanização da borracha com ligantes a base de enxofre, inibindo a ação de antioxidantes (CUNLIFFE; WILLIAMS, 1998; ABNT, 2004; RAMARAD *et al.*, 2015; SATHISKUMAR; KARTHIKEYAN, 2019).

A queima destes produtos é interessante pelo seu alto poder calorífico, visto que a energia incorporada nos pneus é de cerca de 32 MJ/kg, sendo atrativo quando comparado, por exemplo, com o carvão, que possui poder calorífico em torno de 23 MJ/kg. Isto faz com que muitas indústrias, principalmente a do cimento, os utilizem como combustível em seus fornos, porém, este é considerado um meio de descarte e não a sua reciclagem. Neste processo, a queima de uma tonelada de unidades usadas gera cerca de 450 kg de gases tóxicos e 270 kg de fuligem, prejudicando o meio ambiente (SHULMAN, 2004; SIENKIEWICZ *et al.*, 2012; SATHISKUMAR; KARTHIKEYAN, 2019; FERDOUS *et al.*, 2021).

Ainda, existe o fato de que, a nível global, grande quantidade dos resíduos de pneus é encaminhada para aterros, com reduzido volume de material reciclado, o que, obviamente, não é interessante do ponto de vista ambiental. Os aterros são um dos métodos de descarte mais indesejáveis que os pneus usados podem ter, pois causa problemas ambientais, de saúde e segurança graves, não gera retorno econômico, além de não possuir nenhuma perspectiva de um futuro promissor (ADHIKARI; DE; MAITI, 2000; ROUSE, 2005; FIKSEL *et al.*, 2011; RAMARAD *et al.*, 2015; FERDOUS *et al.*, 2021).

Uma fração do resíduo gerado acaba sendo descartado em aterros, gerando graves problemas ambientais e de saúde pública ocasionados pelas toxinas, lixiviados e gases do efeito estufa. Tal panorama, com volumes elevados de potenciais poluidores, é agravado pelo fato de que a finalidade dos aterros deveria ser a última alternativa do manejo ambiental e é recomendada apenas para resíduos não recicláveis. Assim, se mostra necessária a implementação de legislações que limitem a quantidade de resíduo de pneu bruto ou granulado que é encaminhada para tais

locais (ALSALEH; MELAINE, 2014; RAMARAD *et al.*, 2015; SIENKIEWICZ *et al.*, 2017; SATHISKUMAR; KARTHIKEYAN, 2019; FERDOUS *et al.*, 2021).

Fora tais práticas, os pneus podem ser reaproveitados pelo processo de recapagem (apenas unidades com sua carcaça íntegra podem ser utilizadas). Ainda, pode ser realizada a pirólise dos pneus para sua decomposição em componentes (estado sólido, líquido e gasoso), além da reciclagem dos pneus em sua forma/condição original e reciclagem do material (redução do resíduo a partículas ou desvulcanização), sendo alternativas interessantes do ponto de vista ambiental (BRAVO; BRITO, 2012; SIENKIEWICZ *et al.*, 2012; FAZLI; RODRIGUE, 2020).

Outra abordagem é a modificação da composição de novos produtos, especificamente em relação a banda de rodagem, que é o elemento que sofre maior desgaste. Tal desgaste, além de influenciar diretamente na vida útil do pneu, acaba por contaminar o meio ambiente, local e regionalmente, que circunda as rodovias. Ainda, a banda de rodagem é majoritariamente responsável pela resistência de rolagem do pneu, impactando diretamente no consumo de combustível do veículo. Assim, com a necessidade de redução de emissões (sólidas e gasosas), os Pneus Verdes têm sido desenvolvidos a partir de alterações nas características de pneus convencionais, como a redução de peso, mudanças estruturais e composição da borracha (PANKO *et al.*, 2013; CHATTERJEE; NASKAR, 2015; KOLE *et al.*, 2017; KNIGHT *et al.*, 2020; LEE; JU; KIM, 2020; BIJINA *et al.*, 2022; OLIVEIRA; RODRIGUES; RODRIGUEZ, 2022).

Por fim, a composição deste resíduo proporciona seu processamento, via reciclagem (único método com impacto positivo no meio ambiente), para fabricação de borracha em forma de *pellets*, flocos e pó, para utilização como matéria prima em diversos setores. Isto torna a reciclagem deste material interessante do ponto de vista da redução de impactos ambientais, possuindo sua utilização fomentada em sistemas empregados no setor da construção civil (pisos, tapetes, mantas, juntas, agregado, sistemas de absorção sísmica, dentre outros) e infraestrutura (SHULMAN, 2004; ADDIS, 2006; OIKONKOMOU; MAVRIDOU, 2009; ALFAYEZ; SULEIMAN; NEHDI, 2020; FAZLI; RODRIGUE, 2020; FERDOUS *et al.*, 2021).

Este processo de reciclagem dos pneus gera produtos denominados de materiais derivados de pneus, nos quais se integra uma porção mais refinada chamada de materiais de borracha granulada, sendo utilizados na fabricação de novos pneus e em várias outras aplicações. Neste sentido, pela possibilidade de reutilização

deste produto, os pneus usados são valiosos e integram um recurso importante, restando o desafio de utilização dos mesmos da melhor forma, tendo em vista a sua vasta possibilidade de reaproveitamento (ROUSE, 2005).

2.4.3 Método de fabricação de mantas de aglomerado de borracha

Como supracitado, os pneus possuem diversas propriedades que podem ser exploradas quando seus resíduos são beneficiados em materiais derivados de pneus, sendo que, do ponto de vista acústico dos sons de impacto, a reologia do material é de interesse pela sua resiliência. Desta forma, os pneus no final da sua vida útil, podem ser encaminhados para plantas de processamento para a redução de suas dimensões originais para grãos, além da remoção dos componentes metálicos e têxteis de sua composição. Na Figura 19 está ilustrada a borracha de pneus fracionada em duas granulometrias distintas, sendo designada de grãos derivados de pneus com ou sem fibras metálicas ou têxteis (SHULMAN, 2004; ROUSE, 2005).

Figura 19 – Borracha de pneus granulada do tipo com (esquerda) e sem (direita) fibras metálicas ou têxteis



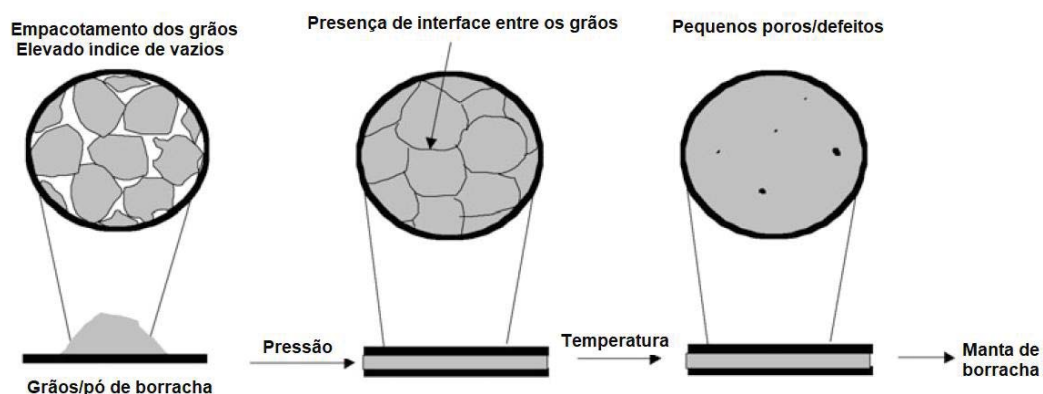
Fonte: Adaptado pelo autor de Rouse (2005)

A partir de tais características, mantas podem ser fabricadas com o uso apenas destes resíduos de borracha granulados, obtidas por meio da sinterização dos grãos de borracha em elevada temperatura e pressão. Para tal, os pneus devem ser reduzidos a dimensões adequadas para promover a ligação entre as partículas. Além da necessidade de os grãos estarem livres de fibras metálicas e têxteis. Neste caso, a norma ASTM D6270 (ASTM, 2020) recomenda que os grãos possuam dimensões de 0,425 a 12,000 mm para a efetiva ligação entre cada grão (FARRIS; MORIN, 2002;

MORIN; WILLIAMS; FARRIS, 2002; SHULMAN, 2004; SIENKIEWICZ *et al.*, 2017; FAZLI; RODRIGUE, 2020).

De modo geral, o processo de fabricação destes componentes consiste na prensagem dos grãos e pó de borracha reciclada, em conjunto com lubrificantes (óleo aromático, parafina ou solventes voláteis), com pressões na ordem de 0,5 a 26,0 MPa, promovendo a consolidação e adesão dos grãos. Concomitantemente, é feita a aplicação de temperaturas na ordem de 80 a 240 °C para causar a quebra das interligações superficiais dos grãos de borracha e criar uma recombinação da estrutura. Um esquema gráfico da sinterização com alta pressão e alta temperatura está presente na Figura 20 (FARRIS; MORIN, 2002; MORIN; WILLIAMS; FARRIS, 2002; FARRIS; WILLIAMS; TRIPATHY, 2005; SIENKIEWICZ *et al.*, 2017; FAZLI; RODRIGUE, 2020).

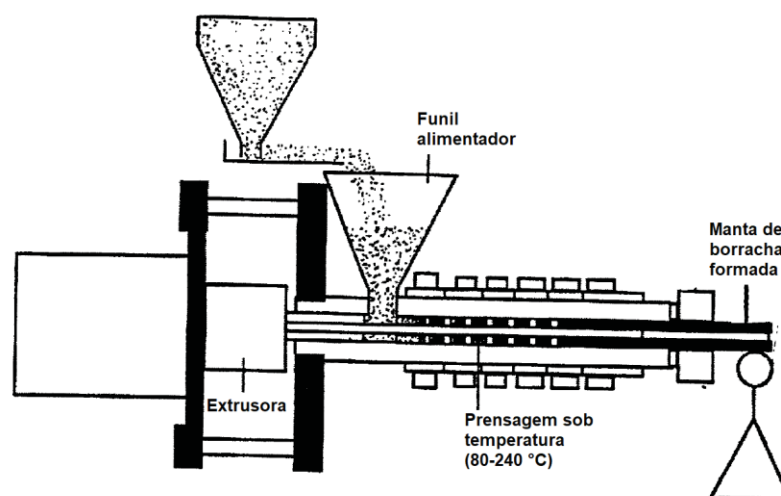
Figura 20 – Esquema do processo de sinterização com alta pressão e alta temperatura



Fonte: Adaptado pelo autor de Morin, Williams e Farris (2002)

Ainda, pelas características físicas da mistura de borracha granulada, esta pode ser extrudada por meio de uma extrusora e o processo de sinterização pode ser feito de forma contínua, conforme ilustrado na Figura 21. O produto final é uma borracha homogênea e pode ser executada na forma de manta, com possibilidade de diferentes densidades e espessuras, a partir da configuração do maquinário e composição da matéria prima (FARRIS; MORIN, 2002; MORIN; WILLIAMS; FARRIS, 2002).

Figura 21 – Processo de fabricação de mantas de aglomerado de borracha



Fonte: Adaptado pelo autor de Farris e Morin (2002)

2.4.4 Propriedades acústicas aos sons de impacto

No extensivo estudo realizado por Schiavi *et al.* (2007), dentre outros materiais, foram ensaiados aglomerados de borracha. As composições foram caracterizadas em função da sua compressibilidade (c) e fluência à compressão após 10 anos de carregamento ($X_{10\text{anos}}$), com os resultados presentes na Tabela 9.

Tabela 9 – Compressibilidade e fluência à compressão em aglomerados de borracha

Densidade (kg/m ³)	Espessura sob 250 Pa (mm)	c (mm)	$X_{10\text{anos}}$ (mm)
340	7,56	1,52	1,53
380	8,60	1,50	1,55
460	7,90	1,20	1,18

Fonte: Adaptado pelo autor de Schiavi *et al.* (2007)

A partir dos resultados do estudo, é possível verificar que a compressibilidade das composições de aglomerado de borracha obtida teve um comportamento inverso à densidade de cada amostra, ou seja, uma maior deflexão sob carga foi medida quanto menor a densidade do material. Ainda, a redução de espessura, estimada para um período de 10 anos, calculada a partir do ensaio de fluência à compressão, foi similar aos resultados de compressibilidade, indicando uma relação entre tais parâmetros de avaliação.

Neste mesmo estudo, de Schiavi *et al.* (2007), foi determinada a frequência de ressonância (f_r) e calculada a rigidez dinâmica dos sistemas contendo os aglomerados

de borracha (s'). Ainda, a frequência de ressonância dos sistemas foi estimada para um carregamento prolongado ($f_{r,10\text{anos}}$), a partir das medições de compressibilidade, e prevista a rigidez dinâmica para um período de 10 anos ($s'_{10\text{anos}}$). Por fim, considerando uma massa flutuante de concreto, com massa por unidade de área de 90 a 110 kg/m², foi realizada uma previsão da capacidade de redução aos sons de impacto, atual e futura, além da medição deste parâmetro em laboratório. Tais dados estão presentes na Tabela 10.

Tabela 10 – Frequência de ressonância, rigidez dinâmica e redução aos sons de impacto de sistemas flutuantes com aglomerado de borracha

Espessura (mm)	Densidade (kg/m³)	f_r (Hz)	$f_{r,10\text{anos}}$ (Hz)	s' (MN/m³)	$s'_{10\text{anos}}$ (MN/m³)	$\Delta L_{500\text{Hz}}$ previsto (dB)	$\Delta L_{500\text{Hz},10\text{anos}}$ (dB)	$\Delta L_{500\text{Hz}}$ medido (dB)
8	340	83	86	54	59	18,8	18,3	18,6
	460	121	124	116	121	13,9	13,6	13,5
9	380	110	113	96	101	15,1	14,8	14,6

Fonte: Adaptado pelo autor de Schiavi (2007)

Primeiramente, a partir dos dados, é possível avaliar que, com a variação de apenas 1 mm de espessura entre as composições, a densidade se demonstrou um fator de influência na frequência de ressonância do sistema, com valores mais baixos para as densidades mais baixas. Tal comportamento refletiu nos valores de rigidez dinâmica das composições. A previsão da frequência de ressonância sob um carregamento prolongado, conforme o esperado pela redução de espessura do material, demonstrou valores ligeiramente maiores, culminando em uma maior rigidez dinâmica.

A capacidade de redução dos sons de impacto, atual e futura, calculada por meio da rigidez dinâmica presente e sob carregamento prolongado, demonstra uma boa eficiência do sistema, com resultados próximos de 19 dB, atingidos pela composição de menor densidade e espessura. A perda de desempenho máxima prevista para carregamentos prolongados foi consideravelmente baixa (estimada em 0,5 dB) e a diferença máxima entre o desempenho previsto e medido em laboratório foi de 0,5 dB, indicando uma boa concordância entre o método de estimativa e as medições em escala real.

Outro estudo nesta área, realizado por Arenas e Sepulveda (2022), verificou a capacidade de redução dos sons de impacto de treze composições de materiais resilientes, dentre eles um aglomerado de borracha, com espessura de 3,0 mm e

densidade de 766,5 kg/m³. Neste caso, a partir de ensaios laboratoriais no aglomerado de borracha, os resultados foram: $f_r=111,6$ Hz, $s'=98,3\pm3,43$ MN/m³, e $\eta=0,32$. A frequência de ressonância e rigidez dinâmica obtidas, quando comparadas ao estudo de Schiavi *et al.* (2007), corroboram com o fato de que a composição do aglomerado de borracha influencia diretamente em seu comportamento acústico. E o fator de perda indica que 32% da energia inserida no material absorvida por sua estrutura interna.

Em outra pesquisa, desenvolvida por Maderuelo-Sanz, Martín-Castizo e Vílchez-Gómez (2011), foram analisados, dentre outras composições, aglomerados de borracha. Neste caso, as propriedades físicas e vibracionais de algumas composições estão presentes na Tabela 11.

Tabela 11 – Características físicas e vibracionais de aglomerados de borracha

Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)	c (mm)	h(c) (%)	s' (MN/m ³)	η	Ω	E (MPa)
9,8	544,7	0,1	6,5	48,5	0,46	0,59	0,48
9,9	558,5	0,2	2,1	33,4	0,43	0,54	0,33
10,1	570,0	0,3	3,0	29,9	0,33	0,36	0,30

Fonte: Adaptado pelo autor de Maderuelo-Sanz, Martín-Castizo e Vílchez-Gómez (2011)

A partir dos resultados selecionados, é possível verificar uma diferença pequena de espessura entre as composições e densidades relativamente próximas. Neste caso, quando analisada a compressibilidade do material, as três composições apresentaram reduzida compressibilidade, com baixa espessura não recuperada ($h(c)$), indicando que é esperada baixa modificação de suas capacidades acústicas quando submetidas a carregamentos de curta duração.

Ainda, apesar da variação na espessura e densidade relativamente pequenas, os sistemas com as amostras mais espesas obtiveram menor rigidez dinâmica, indicando que possuem melhor capacidade de amortecimento. Em relação ao fator de perda, uma maior capacidade de amortecimento (maior largura de atenuação nas bandas adjacentes a frequência de ressonância do sistema) foi obtida pelas amostras com maior porosidade, módulo de elasticidade e rigidez dinâmica. Desta forma, mesmo que provavelmente o seu desempenho aos sons de impacto seja menor, tais composições possuem uma maior eficiência em termos de sua composição.

Considerando outro estudo, desenvolvido por Asdrubali e D'Alessandro (2011), foi realizada a produção de mantas de aglomerado de grãos de borracha reciclados, ficando evidente, mais uma vez, a influência da composição nas características físicas

e acústicas. Todas as mantas foram fabricadas com 8 mm de espessura, sendo possível verificar a influência da densidade dos aglomerados de borracha nas características vibracionais, por meio dos dados presentes na Tabela 12.

Tabela 12 – Características vibracionais de aglomerados de borracha com espessura de 8 mm

Densidade (kg/m ³)	f_r (Hz)	s' (MN/m ³)	Q	η
540	100,7	80	8,6	0,116
579	88,0	61	7,9	0,126
616	90,7	65	8,3	0,120
697	92,5	68	11,4	0,088
723	135,7	145	12,0	0,083
749	131,5	137	10,4	0,096

Fonte: Adaptado pelo autor de Asdrubali e D'Alessandro (2011)

Neste caso, considerando que todas as composições possuem a mesma espessura, de 8 mm, comparativamente as amostras mais densas obtiveram os piores resultados, tendo em vista que a matriz sólida das amostras ficou mais rígida. O exemplar de menor densidade obteve um comportamento diferente de suas composições adjacentes, com frequência de ressonância e rigidez dinâmica maiores, se opondo ao comportamento esperado a partir das demais. As amostras com densidade intermediária, entre 579 e 697 kg/m³, obtiveram os melhores resultados.

Acompanhando os resultados obtidos de frequência de ressonância dos sistemas, o fator de qualidade e fator de perda indicam uma baixa eficiência da capacidade de amortecimento das composições (fator de perda médio de 10,5%), sendo a composição com densidade de 579 kg/m³ a qual obteve o melhor resultado (12,6%).

Outra investigação, desenvolvida por García-Cobos e Maderuelo-Sanz (2022), também analisa aglomerados de borracha, formados a partir de grãos reciclados, mas fabricados sem aplicação de pressão nos moldes, com composições de 10 mm de espessura. Uma seleção das composições e parâmetros vibracionais definidos nesta pesquisa está presente na Tabela 13.

A partir dos resultados, fica evidente que todas as composições possuem densidades similares (amplitude máxima de 27,1 kg/m³ entre as amostras mais extremas) e, pela ausência de prensagem no processo de consolidação dos grãos de borracha, são esperadas inconsistências na acomodação dos grãos que formam o aglomerado. Desta forma, houve variação na frequência de ressonância dos sistemas,

dificultando uma análise comparativa. Porém, os resultados de rigidez dinâmica são baixos, indicando a previsão de um bom comportamento acústico para o material.

Tabela 13 – Características vibracionais de aglomerados de borracha reciclada

Densidade (kg/m ³)	f_r (Hz)	s' (MN/m ³)	Q	η	E (MPa)
722,5	42,0	14,4	4,0	0,25	0,14
725,8	51,5	21,7	5,2	0,19	0,22
731,4	47,5	18,5	4,0	0,25	0,19
732,0	53,5	23,4	5,1	0,20	0,23
741,3	61,0	30,5	3,8	0,26	0,31
746,4	59,5	29,0	4,0	0,25	0,29
749,6	60,0	29,5	4,3	0,23	0,23

Fonte: Adaptado pelo autor de García-Cobos e Maderuelo-Sanz (2022)

Ainda, é interessante mencionar que o fator de perda médio ficou em torno de 20,7%, com fator de qualidade, em algumas composições, levemente superior a 5. O módulo de elasticidade dinâmico médio dos exemplares foi de 0,23 MPa, sendo notável a sua variação, considerando que algumas composições obtiveram um módulo de elasticidade maior que o dobro de outras, fugindo do padrão esperado para uma mesma espessura e pequena variação de densidade.

Outro parâmetro que deve ser considerado no comportamento acústico de aglomerados de borracha é a resistividade ao fluxo de ar, sendo um parâmetro de interesse quando da determinação da rigidez dinâmica de um material, pela influência do ar presente na estrutura interna do material em sua capacidade de atenuação de excitações oscilatórias. De acordo com Pfretzschner e Rodriguez (1999), a resistividade ao fluxo de ar de materiais compostos a partir de grãos de borracha é muito menor do que materiais fibrosos, como a lã de vidro. Por exemplo, a resistividade ao fluxo de ar de aglomerados de borracha fica em torno de 1 a 12 kPa.s/m², enquanto materiais fibrosos tal intervalo é de 4 a 100 kPa.s/m².

Devido a este motivo, Asdrubali e D'Alessandro (2011), baseados nas investigações feitas por Pfretzschner e Rodriguez (1999) e Horoshenkov e Swift (2001), não consideram a influência do ar presente dentro do material para determinação de sua rigidez dinâmica, ou seja, quando estudados aglomerados de borracha, estes autores adotaram $s' = s'_t$.

Por fim, é de importância para este tipo de material, conforme definido por Maderuelo-Sanz *et al.* (2013), a determinação de sua porosidade, tendo em vista que com uma diminuição do tamanho dos grânulos é esperado um aumento na

resistividade ao fluxo de ar, ao passo que a porosidade diminui. Neste caso, os autores indicam resultados de porosidade, presentes na Tabela 14, em função da densidade e diâmetro dos grânulos de borracha, sustentando a afirmação definida acima.

Tabela 14 – Características físicas de aglomerados de borracha

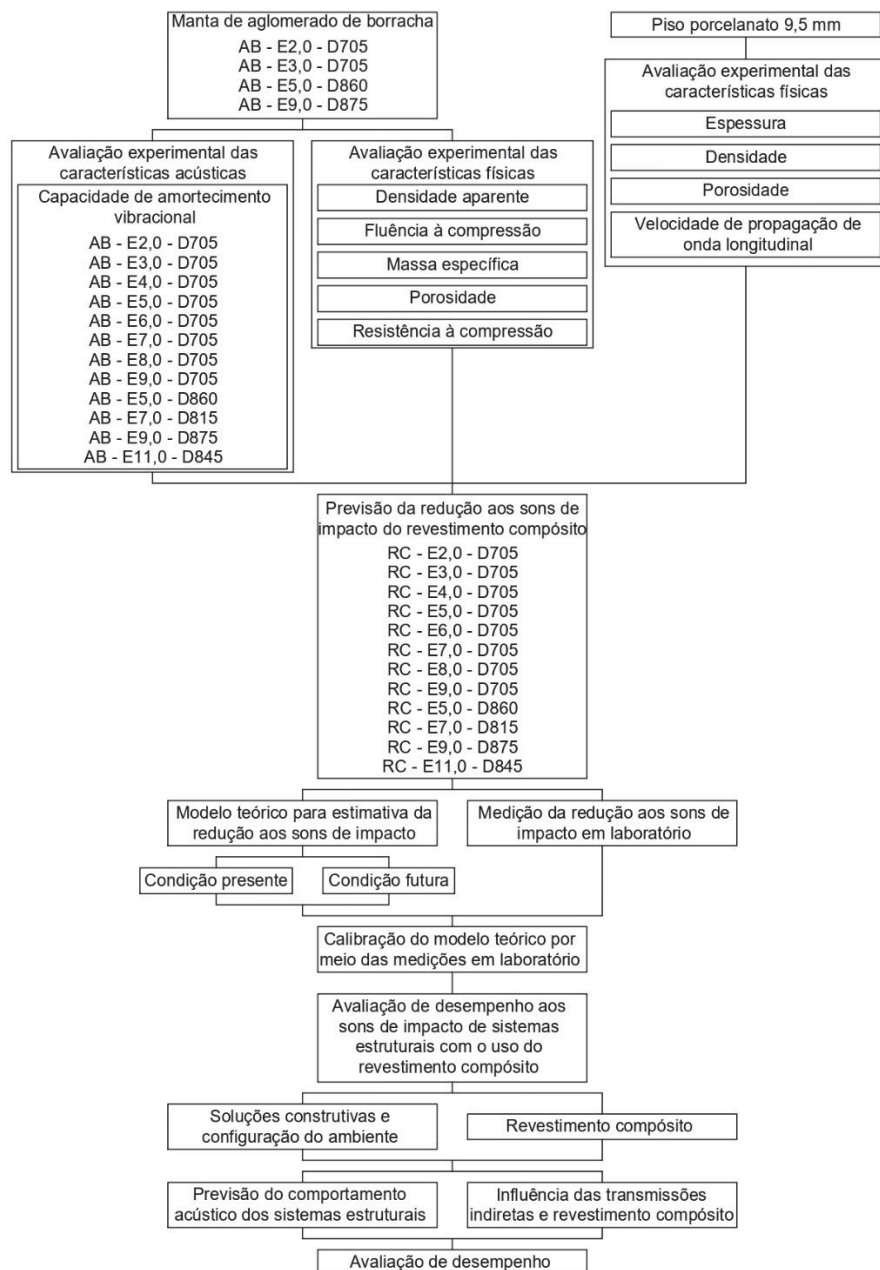
Espessura (mm)	Densidade (kg/m³)	Diâmetro de grão (mm)	Ω
16,0	559,8	0,5-1,0	0,36
16,5	547,6	1,0-3,0	0,53
17,0	554,7	1,0-3,0	0,47
14,0	594,6	0,5-1,0	0,59
17,5	520,0	<0,5	0,31

Fonte: Adaptado pelo autor de Maderuelo-Sanz et al. (2013)

3 MÉTODO

Os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento e conclusão do problema de pesquisa e objetivos deste trabalho estão presentes em um programa de pesquisa baseado em avaliações experimentais, proposição de métodos de previsão e análise do desempenho agregado pelo revestimento compósito por meio de um método de previsão, subsidiando as análises e avaliações. Um fluxograma do programa de pesquisa está presente na Figura 22.

Figura 22 – Diagrama do programa de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

O desenvolvimento do programa de pesquisa deste estudo foi realizado no Departamento de Edifícios do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC; Portugal), e nas instalações da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), junto ao Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat), Laboratório de Materiais de Construção (LMC) e Instituto itt Performance.

3.1 MATERIAIS

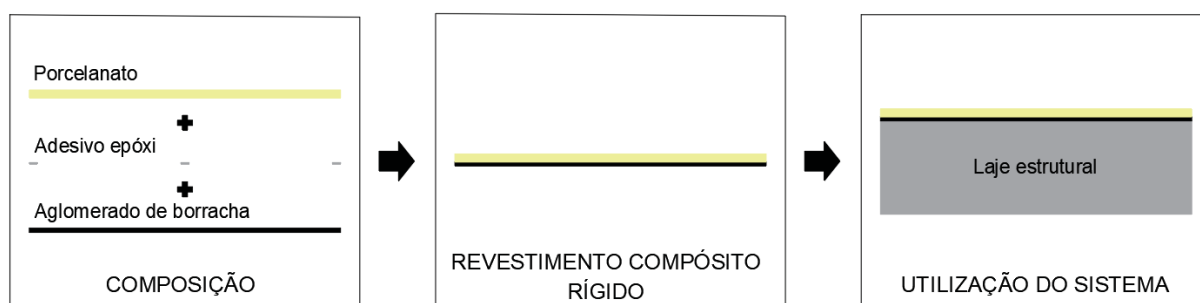
3.1.1 Configuração do revestimento compósito de piso

O sistema de revestimento compósito proposto é formado por uma camada de caminhamento rígida, composta por uma peça de porcelanato, e uma camada inferior resiliente, constituída por um aglomerado de borracha reciclada, que são aderidas entre si por meio de uma fina camada de adesivo epóxi em cinco pontos (nas quatro arestas e no centro, vide Figura 24).

O sistema foi desenvolvido para ser simplesmente apoiado sobre a laje estrutural, sendo todas as avaliações desenvolvidas nesta pesquisa levando isto em consideração.

Na Figura 23 está ilustrada a sua composição e aplicação, e na Fotografia 1 está presente o aspecto do revestimento compósito.

Figura 23 – Composição e configuração do revestimento compósito de piso



Fonte: Elaborado pelo autor

Fotografia 1 – Sistema de revestimento compósito de piso



Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda, de forma a facilitar a análise das diferentes composições de revestimentos compósitos propostos, foi adotada a sigla *AB* para referenciar as mantas de aglomerado de borracha, sucedida de sua espessura e densidade, ao exemplo de *AB-E2,0-D705* (manta de aglomerado de borracha com espessura de 2,0 mm e densidade de 705 kg/m³). De forma análoga, a nomenclatura adotada para denominação dos revestimentos compósitos (piso de porcelanato com aglomerado de borracha) é dada pela sigla *RC* (revestimento compósito), sucedida pelas características de espessura e densidade do aglomerado de borracha presente em cada composição.

3.1.2 Manta de grânulos de borracha aglomerados

A camada resiliente utilizada na presente pesquisa é composta por um aglomerado de grânulos de borracha reciclada, em diferentes composições, proveniente de pneus reciclados.

Este material foi fabricado em forma de manta, a partir do processo de sinterização, e fornecido em rolos com dimensões e em quantidades adequadas para o desenvolvimento de todas as análises propostas pela pesquisa. Atualmente, o material já é produzido em escala industrial e é fornecido para o mercado da construção civil e indústria.

De forma a ilustrar o aspecto do material, na Fotografia 2 está presente um exemplar, cortado nas dimensões de 200x200 mm, de uma das composições de aglomerado de borracha.

Fotografia 2 – Amostra de aglomerado de borracha com 200x200 mm



Fonte: Elaborado pelo autor

De modo a verificar o desempenho do sistema e a efetividade dos métodos de previsão frente às medições de capacidade de redução aos sons de impacto em escala real, a partir das características físicas e acústicas da camada resiliente, foram definidas e adotadas diferentes composições de espessura e densidade dos aglomerados de borracha.

Tais composições de mantas de aglomerado de borracha reciclada estão descritas na Tabela 15, contemplando quatro diferentes configurações, fabricadas a partir da mesma matéria prima.

Tabela 15 – Relação de composições de manta de aglomerado de borracha reciclada

Nomenclatura	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)
AB-E2,0-D705	2,0	705
AB-E3,0-D705	3,0	705
AB-E5,0-D860	5,0	860
AB-E9,0-D875	9,0	875

Fonte: Elaborado pelo autor

As diferentes espessuras e densidades promovem a avaliação do comportamento do material em relação aos parâmetros físicos e acústicos de interesse quando da análise de sistemas compósitos rígidos de revestimento, promovendo o estudo destes dois parâmetros no desempenho presente e sua conservação quando impostos a carregamentos prolongados. Por limitação do processo de fabricação não foi possível a obtenção de mais composições de manta, com espessuras mais próximas, por exemplo, mas as configurações avaliadas contemplam uma gama representativa de espessura para o material neste tipo de aplicação.

Ademais, consideradas as limitações de fabricação, as composições utilizadas possuem características adequadas as comumente utilizadas neste tipo de material, quando comparadas com Schiavi (2007), Maderuelo-Sanz, Martín-Castizo e Vílchez-Gómez (2011), dB Cover (2018), Arenas e Sepulveda (2022) e García-Cobos e Maderuelo-Sanz (2022).

3.1.3 Revestimento de piso em porcelanato

Para a camada rígida do revestimento compósito de piso proposto, foram utilizadas peças cerâmicas de piso porcelanato com medidas de 600x600x9,5 mm (comprimento x largura x espessura).

A definição do uso de apenas uma composição de peças cerâmicas, em relação à sua espessura, foi realizada levando em consideração o estudo de Rambaldi, Prete e Bignozzi (2015), o qual verificou uma reduzida influência da espessura do piso cerâmico na capacidade de isolamento aos sons de impacto do sistema. Ainda, em relação a largura e comprimento das peças, a medida de 600x600 mm é a de maior aplicação no mercado, de acordo com Boch e Niepce (2007), Eliane (2023) e Zhang (2011).

O presente porcelanato, é pertencente ao grupo *B1a*, ou seja, possui baixa absorção de água e é fabricado pelo método de prensagem a seco. Ainda, possui revestimento superficial em esmalte, sendo considerado pertencente ao grupo GL, e laterais retificadas, garantindo a planeza e dimensões das faces.

De forma a ilustrar a composição do piso de porcelanato utilizado para o desenvolvimento da pesquisa, na Fotografia 3 estão presentes a face superior e inferior de um dos exemplares utilizados.

Fotografia 3 – Piso de porcelanato, face: (a) superior, e (b) inferior

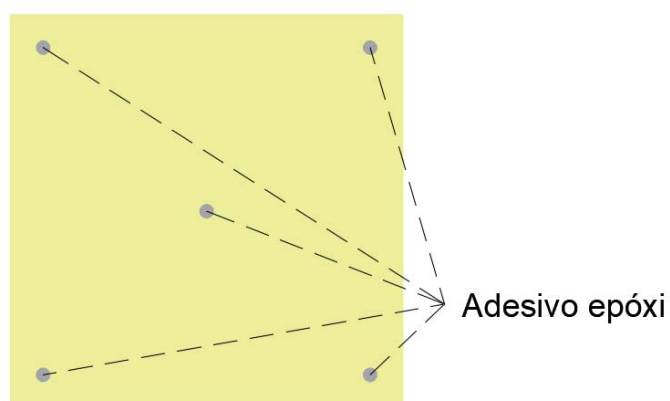


Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.4 Adesivo epóxi

Visando a aplicação e funcionalidade do revestimento compósito desenvolvido, a camada rígida de caminhamento (piso de porcelanato) foi aderida a camada resiliente (aglomerado de borracha). Para tal, foi utilizada uma camada com espessura de 1 mm de adesivo epóxi, em cinco pontos da peça cerâmica (nas quatro arestas e no centro), na interface entre a superfície inferior das peças cerâmicas e a face superior do aglomerado de borracha, conforme esquema ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Pontos de aplicação do adesivo epóxi

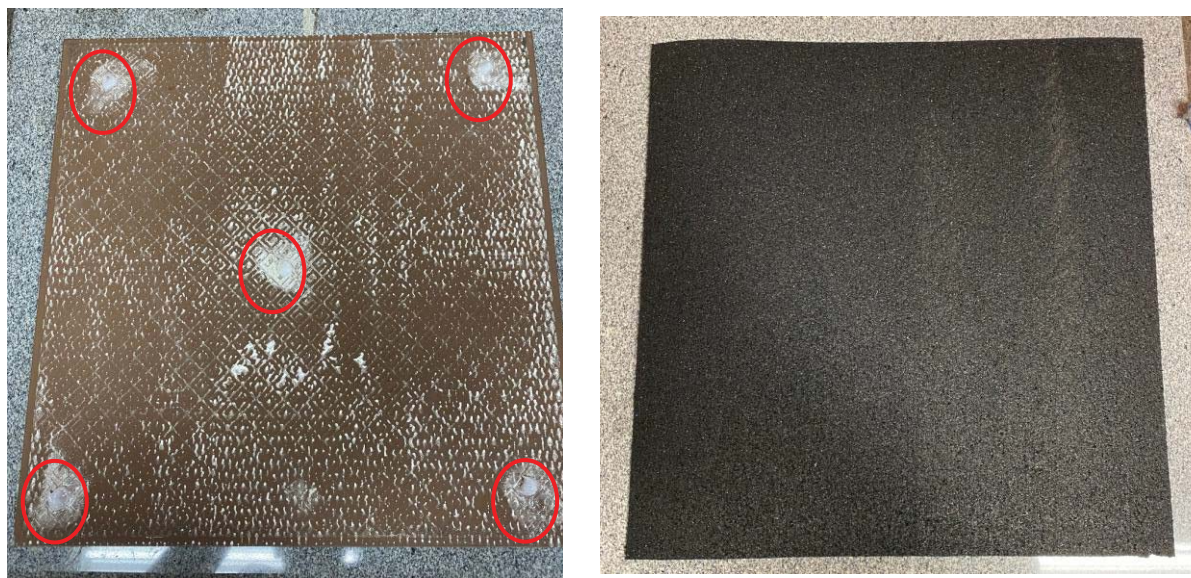


Fonte: Elaborado pelo autor

O adesivo epóxi foi selecionado pois, após seu período de cura, fica endurecido, não inserindo mais uma componente elástica no sistema, com um aumento desprezível de massa ao sistema.

Desta forma, a Fotografia 4, ilustra a etapa de disposição da camada do adesivo epóxi sobre uma das composições de aglomerado de borracha durante o processo de ligação entre os componentes.

Fotografia 4 – Pontos de aplicação da camada de ligação com adesivo epóxi



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 COMPOSIÇÕES DE REVESTIMENTO COMPÓSITO DE PISO

A partir das composições de aglomerado de borracha propostas para esta pesquisa, descritas no item “3.1.2 Manta de grânulos de borracha aglomerados”, foram propostas composições de revestimento compósito utilizando camada resiliente formada por uma ou mais camadas de aglomerado de borracha para desenvolvimento das análises de desempenho acústico frente aos sons de impacto. As composições formadas por mais de uma camada resiliente foram avaliadas pela simples sobreposição das camadas, justapostas, sem aplicação de nenhum elemento para aderência de uma camada a outra.

De forma a avaliar a influência da espessura em sistemas resilientes da mesma densidade e de densidades distintas, a relação das composições de revestimento compósito de piso proposta está presente na Tabela 16. As composições com densidades diferentes foram desenvolvidas com o objetivo de utilização de uma camada inferior com melhor capacidade de regularização de imperfeições no substrato (menor espessura e densidade) e outra superior mais espessa e densa.

Tabela 16 – Composições de revestimento compósito de piso

Nomenclatura	Aglomerado de borracha		
	Esp. (mm)	Composição	Densidade (kg/m³)
RC-E2,0-D705	2,0	AB-E2,0-D705	705
RC-E3,0-D705	3,0	AB-E3,0-D705	
RC-E4,0-D705	4,0	2 x AB-E2,0-D705	
RC-E5,0-D705	5,0	AB-E2,0-D705 + AB-E3,0-D705	
RC-E6,0-D705	6,0	2 x AB-E3,0-D705	
RC-E7,0-D705	7,0	AB-E2,0-D705 + AB-E3,0-D705 + AB-E2,0-D705	
RC-E8,0-D705	8,0	4 x AB-E2,0-D705	
RC-E9,0-D705	9,0	3 x AB-E3,0-D705	
RC-E5,0-D860	5,0	AB-E5,0-D860	860
RC-E7,0-D815	7,0	AB-E2,0-D705 + AB-E5,0-D860	815
RC-E9,0-D875	9,0	AB-E9,0-D875	875
RC-E11,0-D845	11,0	AB-E2,0-D705 + AB-E9,0-D875	845

Fonte: Elaborado pelo autor

De modo a promover a obtenção dos dados inerentes às análises propostas, as composições formadas por mais de uma camada foram analisadas experimentalmente no desenvolvimento dos itens “3.4.5 Capacidade de amortecimento vibracional”. Frente aos demais parâmetros, foi realizada uma estimativa de seu comportamento a partir das avaliações individuais de cada aglomerado de borracha que as compõem.

3.3 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO PISO DE PORCELANATO

A caracterização física das amostras de piso de porcelanato, por meio de avaliação experimental em laboratório, é necessária para verificação das propriedades do material inerentes à determinação de sua contribuição ao comportamento acústico do revestimento compósito, servindo de subsídio para as etapas seguintes.

3.3.1 Espessura, porosidade e densidade

Tais propriedades foram determinadas junto ao Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos).

A determinação das dimensões das peças cerâmicas de piso foi conduzida de acordo com uma adaptação das prescrições da norma NBR ISO 10545-2 (ABNT, 2020b), que preconiza a avaliação de sete amostras distintas.

A espessura foi medida por meio de um paquímetro digital, do fabricante *Mitutoyo*, modelo *150 mm*, com resolução de 0,01 mm, em três pontos de cada lateral das peças de porcelanato, efetuando uma média aritmética para consideração da espessura de cada exemplar.

Para determinação da porosidade e densidade das peças cerâmicas, de acordo com a norma NBR ISO 10545-3 (ABNT, 2018), foram separadas cinco peças para extração de um corpo de prova de cada uma, mantendo as amostras limpas e sem material contaminante ao longo dos ensaios. Os corpos de prova foram constituídos por uma seção de 200x200 mm, sendo extraídos de um dos vértices de cada uma das amostras por meio de marcação com vídeo e rompimento do corte com equipamento convencional de corte de peças cerâmicas.

Os corpos de prova foram secos em estufa, a uma temperatura de 110 °C por um período de 72 horas até atingirem uma massa constante (peso final não variando mais do que 0,1% entre duas pesagens subsequentes). Nesta etapa foi determinada a massa de cada corpo de prova (m_s), em balança digital, do fabricante *Marte*, modelo *AS5500C*, com resolução de 0,01 g.

Após este procedimento, as amostras foram colocadas, na vertical e com um dos lados voltados para o fundo, em um recipiente com água para sua impregnação por um período de 168 horas. Passado o período de submersão dos corpos de prova, a massa suspensa (m_i) foi determinada por meio da pesagem, com exatidão de 0,01% de massa, individual de cada corpo de prova, em uma cesta submersa ligada a uma balança do fabricante *Marte*, modelo *UX8200S*, com resolução de 0,1 g.

Por fim, as amostras foram enxugadas levemente com pano de microfibras úmido, removendo todas as gotas de água visíveis presentes nas superfícies das mesmas, e a massa saturada (m_{sat}) foi determinada imediatamente em balança do fabricante *Marte*, modelo *AS5500C*, com resolução de 0,01 g.

Assim, a partir das medições realizadas nos procedimentos supracitados, os parâmetros de caracterização física foram obtidos conforme a Equação 31 (absorção de água), Equação 32 (porosidade aparente) e Equação 33 (densidade aparente).

$$E_V = 100 \frac{(m_{sat} - m_s)}{m_s} \quad \text{Equação 31}$$

$$\Omega = 100 \frac{(m_{sat} - m_s)}{(m_{sat} - m_i)} \quad \text{Equação 32}$$

$$\rho = \frac{m_s}{(m_{sat} - m_i)} \quad \text{Equação 33}$$

3.3.2 Velocidade de propagação de onda longitudinal

A velocidade de onda longitudinal foi determinada junto ao Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos).

O método para determinação da velocidade de onda longitudinal foi adaptado da norma NBR 8802 (ABNT, 2019), por meio de um ensaio não destrutivo com uso de pulsos ultrassônicos.

Para tal, foram utilizadas sete amostras de 200x200 mm, extraídas de diferentes peças do piso de porcelanato. Para promover uma condição adequada aos transdutores, a face inferior das amostras de piso foi lixada para promover uma superfície lisa, plana e limpa, tendo em vista que possui rugosidade e saliências inerentes ao seu uso em situações reais.

As amostras foram condicionadas por 72 horas em uma sala com atmosfera-padrão (temperatura de $23,0 \pm 2,0$ °C e umidade relativa do ar de $50,0 \pm 5,0\%$) e sua espessura foi determinada por meio de paquímetro analógico, do fabricante *Mitutoyo*, modelo *200 mm*, com resolução de 0,01 mm.

O método adotado para medição da velocidade de onda ultrassônica foi o da transmissão direta, no sentido da espessura das amostras com os transdutores em faces opostas, conforme ilustra a Fotografia 5, sendo utilizado um equipamento modelo *Pundit Lab* do fabricante *Proceq*, com uso de uma frequência de 54.000 Hz e gel de acoplamento modelo *Ultragel II* do fabricante *Magnaflux*.

O ensaio consiste na medição do tempo decorrido desde a emissão, pelo transdutor emissor, até a recepção, pelo transdutor receptor, da onda ultrassônica

pelo material, sendo então calculada a velocidade de propagação de onda conforme a Equação 34.

$$c_L = \frac{L}{t} \quad \text{Equação 34}$$

Fotografia 5 – Configuração do ensaio de medição da velocidade de transmissão de onda ultrassônica



Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente o equipamento foi calibrado por meio de uma barra de referência e foi aplicada uma fina camada de gel de acoplamento na face dos transdutores, sendo então os transdutores posicionados nas duas faces principais opostas do corpo de prova (sentido da espessura). As medições foram realizadas em três pontos distintos de cada exemplar.

3.4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS E FÍSICAS DOS AGLOMERADOS DE BORRACHA

As características físicas e acústicas das composições de aglomerado de borracha se fazem necessárias para a determinação das propriedades que definem o material e são necessárias para verificação de seu comportamento acústico de forma individual e quando integrante do revestimento compósito.

3.4.1 Densidade aparente e massa específica

A medição da densidade aparente das composições de aglomerado de borracha foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), por meio da metodologia presente na norma ISO 29470 (ISO, 2020d).

Para tal, cinco amostras, de cada composição de aglomerado, foram cortadas com 200 ± 3 mm por 200 ± 3 mm e mantidas, até as medições, por 72 horas em uma sala condicionada com atmosfera-padrão com temperatura de $23,0 \pm 2,0$ °C e umidade relativa do ar de $50,0 \pm 5,0\%$.

Com as amostras estabilizadas, suas medidas laterais e espessura foram determinadas por meio de paquímetro analógico, do fabricante *Mitutoyo*, modelo 200 mm, com resolução de 0,01 mm, observando as prescrições da norma ISO 29768 (ISO, 2022e). Ainda, foi verificada a massa correspondente a cada uma das amostras, por meio de balança digital, do fabricante *Marte*, modelo AS5500C, com resolução de 0,01 g, promovendo a determinação da densidade aparente dos aglomerados por meio da Equação 35.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Equação 35}$$

A Fotografia 6 ilustra o processo de ensaio para determinação das dimensões e massa das amostras cortadas com 200x200 mm.

Fotografia 6 – Medições das amostras: (a) dimensões, e (b) massa



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

Para medição da massa específica, os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), com uso da metodologia da norma NBR ISO 12154 (ABNT, 2022a).

Para tal, foram selecionadas quatro amostras representativas dos grãos de borracha que compõem os aglomerados, tendo em vista que todas utilizam a mesma granulometria e composição de borracha, obtidas a partir da moagem das mesmas em moinho de lâminas, conforme ilustra a Fotografia 7. Tais amostras foram, posteriormente, submetidas a secagem em estufa, a 50 °C por 72 horas.

Fotografia 7 – (a) Grãos de borracha após moagem, e (b) amostras em recipiente para secagem em estufa



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

A massa específica das amostras foi determinada por meio da utilização da técnica de picnometria por intrusão de gás hélio, no equipamento *AccuPyc II 1340*, do fabricante *Micrometitics*. O ensaio consistiu na penetração de gás hélio na composição de material sob avaliação, condicionada dentro de um cilindro, com superfície permeável, com dimensões conhecidas.

Primeiramente a amostra foi pesada, por meio de balança analítica, do fabricante *Shimadzu*, modelo *AUY220*, com resolução de 0,1 mg, e foi iniciada a etapa de intrusão de gás hélio. O equipamento introduz o gás na câmara que contém a amostra, permeando nos poros da amostra, até que uma determinada pressão seja atingida, transferindo então o gás para uma câmara de referência, com medidas conhecidas, para verificação da pressão resultante, permitindo uma correlação entre

pressões para obtenção do volume real da amostra. O equipamento realiza dez medições consecutivas, calculando a massa específica a partir da média de tais medições e registro de seus desvios.

Desta forma, a partir da medição da massa da amostra e do seu volume real, obtidos no ensaio, a massa específica (μ) é obtida pela divisão da massa pelo volume real de cada amostra.

3.4.2 Porosidade

A determinação da porosidade das composições de manta de aglomerado de borracha foi realizada a partir das medições de densidade aparente e massa específica, obtidas no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) e Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos).

De posse de tais dados, a porosidade (Ω) de cada amostra proposta foi obtida por meio da metodologia de cálculo presente na Equação 36.

$$\Omega = 1 - \left(\frac{\rho}{\mu} \right) \quad \text{Equação 36}$$

3.4.3 Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão das mantas de aglomerado de borracha foi desenvolvida com a aplicação das prescrições da norma ISO 29469 (ISO, 2022), na estrutura do Departamento de Edifícios do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

O ensaio foi realizado em três exemplares de cada composição de aglomerado de borracha, com dimensões de 200 ± 1 mm por 200 ± 1 mm, individualmente. Para tal, foi utilizada uma prensa modelo *AG-I*, do fabricante *Shimadzu*, dotada de uma célula de carga com capacidade de 20 kN e resolução de 0,125 N, e transdutor de deslocamento integrado, com resolução de 0,1 mm.

As amostras foram condicionadas durante 72 horas, e permaneceram durante o ensaio, em ambiente com controle das condições ambientais, com temperatura de $23,0 \pm 2,0$ °C e umidade relativa do ar de $50,0 \pm 5,0\%$.

Cada exemplar foi posicionado entre os dois pratos da máquina de ensaio (Fotografia 8) e o procedimento de ensaio consistiu na aplicação de uma carga de acomodação de 10 N (equivalente a uma pressão de 250 Pa), seguido pela aplicação de carregamento em uma taxa de 10% da espessura inicial da amostra por minuto até uma deformação equivalente à metade da espessura inicial da amostra.

Fotografia 8 – Aparato para medição da resistência à compressão dos aglomerados de borracha



Fonte: Elaborado pelo autor

De posse do gráfico da carga versus deslocamento, foi traçada uma linha de tendência na faixa linear do gráfico, realizando a progressão do comportamento do material para determinação do carregamento equivalente a uma deformação de 10% da espessura inicial. Neste caso, a resistência à compressão de cada exemplar foi calculada por meio da Equação 37.

$$\sigma_{10} = 10^3 \frac{F_{10}}{A_{0e}} \quad \text{Equação 37}$$

3.4.4 Fluência à compressão

A medição da fluência à compressão das mantas de aglomerado de borracha foi realizada no Laboratório de Acústica (LaVIT) do itt Performance (Unisinos), a partir de uma adaptação da norma ISO 16534 (ISO, 2020c).

Por indisponibilidade de espaço laboratorial, em virtude da extensão do período de ensaio (190 dias), a fluência à compressão foi determinada apenas para as composições de aglomerado de borracha de camada individual (AB-E2,0-D705, AB-E3,0-D705, AB-E5,0-D860 e AB-E9,0-D875), impossibilitando a estimativa de perda de desempenho das composições formadas por mais de uma camada.

Para tal, foram utilizadas três amostras representativas das composições de aglomerado de camada individual, com dimensões de 200 ± 3 mm por 200 ± 3 mm, condicionadas em ambiente com temperatura controlada em $23,0\pm 2,0$ °C e umidade relativa do ar de $50,0\pm 5,0\%$, nas 24 horas que antecederam o início do ensaio e durante toda a sua duração.

A realização do ensaio foi baseada na aplicação de uma carga vertical sobre a amostra, por meio de uma placa metálica, com dimensões de 200 ± 3 mm por 200 ± 3 mm e superfícies planas com irregularidades de até 0,5 mm e peso de 8 kg, sobre uma base plana e rígida.

A placa de 8 kg representa um carregamento de 200 kg/m^2 , prevendo a deformação causada pelo revestimento de piso e cargas acidentais quando da aplicação real. O presente carregamento é condizente aos 150 kg/m^2 prescritos pela norma NBR 6120 (ABNT, 2019) para áreas privativas internas de edificações residenciais e considera uma condição de sobrecarregamento, favorável à segurança das estimativas propostas.

A base é fixa e a placa de carregamento se move livremente na vertical, que serve de ponto de referência para leitura da deformação da amostra, no centro de cada uma das faces, por meio de um paquímetro com resolução de 0,01 mm, do fabricante *Mitutoyo*, modelo *200 mm*.

Primeiramente foi a espessura da amostra (d_s) foi medida sem nenhum carregamento, com paquímetro digital, do fabricante *Mitutoyo*, modelo *150 mm*, com resolução de 0,01 mm, servindo de referência para a determinação da deformação ao longo do tempo. Após a medida de d_s , foi adicionado o carregamento de 2 kPa (200 kg/m^2 ; utilização da placa de carregamento de 8 kg), em um intervalo de 10 ± 5 segundos, sendo medida da deformação inicial (X_0) quando transcorridos 60 ± 5 segundos da aplicação desta carga.

Posteriormente à medição da deformação inicial, foram efetuadas medidas da deformação (X_t) após 1 minuto, 1 hora, 5 horas, e nos seguintes intervalos: 1, 2, 4, 7,

9, 11, 14, 18, 24, 32, 42, 53, 65, 80, 100, 123, 156 e 190 dias. Desta forma, a fluência à compressão das amostras foi obtida por meio da Equação 38.

$$X_{ct} = X_t - X_0 \quad \text{Equação 38}$$

Ainda, a deformação relativa (ε_{15anos}) foi calculada por meio da Equação 39 para verificação da representatividade da deformação estimada para o material após carregamento de 15 anos em relação a sua espessura inicial e o aparato de medição está ilustrado na Fotografia 9.

$$\varepsilon_{15anos} = 100 \frac{X_{15anos}}{d_s} \quad \text{Equação 39}$$

Fotografia 9 – (a, b e c) Aparato para medição da fluência à compressão dos aglomerados de borracha



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4.5 Capacidade de amortecimento vibracional

Para determinação das características de amortecimento das composições de aglomerado de borracha, primeiramente foi medida a frequência de ressonância do sistema que contém cada amostra, através das prescrições da norma ISO 9052-1 (ISO, 1989), na estrutura do Departamento de Edifícios do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

O objetivo deste ensaio, dentre os demais parâmetros a seguir, é a determinação da rigidez dinâmica aparente por unidade de área da amostra (s'_t), por meio do método ressonante, no qual a frequência de ressonância (f_r) da vibração vertical fundamental do sistema de mola-massa é medida. Neste caso, o elemento mola consiste na resiliência da amostra e a massa é a placa de carregamento.

Para tal, foi utilizado o método de excitação na placa de carregamento (excitação impulsiva por impacto), em três amostras de 200 ± 3 mm por 200 ± 3 mm de cada uma das composições de aglomerado de borracha proposta. Para tal, foram utilizados equipamentos do fabricante *Brüel&Kjaer*, incluindo: uma marreta modal *Type 8208* com terminal de excitação macio, um analisador *PULSE Type 3560-D*, um acelerômetro piezoelétrico *DeltaShear Unigain Type 4383* (sensividade de $3,148 \text{ pC/ms}^{-2}$ na banda de frequências de 159,2 Hz), e um conversor de carga *DeltaTron Type 2646*, conforme ilustra a Fotografia 10.

Fotografia 10 – (a) e (b) Aparato para medição da frequência de ressonância



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

O aparato de excitação e de medição foi arranjado de forma que somente oscilações verticais ocorressem, ou seja, a força de excitação ocorre no centro da placa de carregamento e não existem elementos livres para rotação. Ainda, a carga aplicada sobre a amostra, composta pela placa de carregamento (200 ± 3 mm por 200 ± 3 mm e superfícies planas com irregularidades de até 0,5 mm) e acelerômetro, foi de 7.762,7 g.

O método utilizado para obtenção da frequência de ressonância do sistema massa-mola consiste na excitação da placa de carregamento, em seu centro, com o impacto vertical de um martelo. Foram realizadas leituras de amplitude de vibração, por meio de um acelerômetro, posicionado na imediação do centro geométrico da placa metálica de carregamento com uso de uma base magnética conectada fisicamente à base do acelerômetro por um parafuso.

A aquisição dos dados foi realizada por meio do analisador *PULSE*, com software de aquisição e tratamento de dados *PULSE LabShop*. Foi analisado o intervalo de frequências de 0 a 200 Hz, com uma amostragem de dados de 200 linhas e um período total de aquisição do sinal após excitação de um segundo, resultando em uma resolução de frequência de 1 Hz ($200 \text{ Hz}/200 \text{ linhas} = 1 \text{ Hz}$), realizando uma média de 10 excitações para cada medição.

Para efeitos desta pesquisa, tendo em vista a influência negligível do ar presente no material, como sustentado por Asdrubali e D'Alessandro (2011), Schiavi, Guglielmone e Miglietta (2011) e Rindel (2018), em virtude de sua composição, a rigidez dinâmica das amostras adotada foi igual à rigidez dinâmica aparente. Assim, a frequência de ressonância do sistema com as amostras, obtida nos ensaios, foi utilizada para determinação da rigidez dinâmica por unidade de área (s') de cada amostra por meio da Equação 40.

$$s' = \frac{4\pi^2 m'_t f_r^2}{1000000} \quad \text{Equação 40}$$

Por fim, a partir das medições e dos dados coletados, foi calculada a relação de amortecimento (ζ), o fator de perda (η), o Módulo de Young dinâmico (E_{din}) e o fator de qualidade (Q), através da Equação 41, Equação 42, Equação 43 e Equação 44, respectivamente.

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f_r} \quad \text{Equação 41}$$

$$\eta = 2\zeta \quad \text{Equação 42}$$

$$E_{\text{din}} = s'd \quad \text{Equação 43}$$

$$Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad \text{Equação 44}$$

3.5 PREVISÃO DA REDUÇÃO AOS SONS DE IMPACTO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO

3.5.1 Modelo teórico para estimativa da redução aos sons de impacto

De posse das características físicas dos pisos cerâmicos e das propriedades das mantas de aglomerado de borracha reciclada, os itens subsequentes propõem uma metodologia para estimativa da capacidade de redução aos sons de impacto, do revestimento compósito de piso.

A estimativa engloba uma avaliação da condição presente e após carregamentos prolongados (futura), a partir de modelos teóricos de previsão estabelecidos pela literatura.

3.5.1.1 Condição presente

A frequência natural do revestimento compósito dos sistemas de piso de porcelanato com camada de borracha foi calculada a partir da Equação 45, por meio da rigidez dinâmica da manta de aglomerado de borracha e da massa superficial da camada de caminhamento (piso de porcelanato).

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m}} \quad \text{Equação 45}$$

De posse da frequência natural do revestimento compósito de piso e das características físicas do piso de porcelanato, foi possível realizar a previsão da capacidade de redução dos níveis de pressão sonora de impacto para cada banda de

frequências. Neste caso, a frequência limite, definindo o ponto em que a impedância da camada de revestimento é equivalente à magnitude da impedância do martelo da máquina de impactos, deve ser determinada conforme a Equação 46, sendo então aplicada a Equação 47 para bandas de frequências abaixo da frequência limite e a Equação 48 para bandas de frequências acima da frequência limite.

$$f_{limit} = \frac{2,3\rho c_L h^2}{2\pi m_t} \quad \text{Equação 46}$$

$$\Delta L = X \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad \text{Equação 47}$$

$$\Delta L = X \log\left(\frac{f}{f_0}\right) + 10 \log\left[1 + \left(\frac{2\pi f m_t}{2,3\rho c_L h^2}\right)^2\right] \quad \text{Equação 48}$$

Nestes casos, a estimativa da capacidade de redução do nível de pressão sonora de impacto foi realizada em bandas de frequências de um terço de oitava com bandas centrais de 100 a 5.000 Hz, sendo considerados iguais a zero ($\Delta L=0$) os resultados presentes abaixo da frequência de natural do sistema (f_0), tendo em vista as variações presentes na banda que contêm a f_0 .

Ainda, para a estimativa da redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado (ΔL_w), foi utilizada a metodologia presente na norma ISO 717-2 (ISO, 2020a), a qual compara os resultados por banda de frequências (ΔL) com uma laje de piso de referência do tipo pesada ($L_{n,r,0}$). Os cálculos foram realizados conforme a Equação 49 e os valores de referência ($L_{n,r,0}$) estão presentes na Tabela 17.

$$L_{n,r} = L_{n,r,0} - \Delta L \quad \text{Equação 49}$$

Tabela 17 – Nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje de referência do tipo pesada ($L_{n,r,0}$)

Frequência (Hz)	$L_{n,r,0}$ (dB)	Frequência (Hz)	$L_{n,r,0}$ (dB)
100	67,0	630	71,0
125	67,5	800	71,5
160	68,0	1.000	72,0
200	68,5	1.250	72,0
250	69,0	1.600	72,0
315	69,5	2.000	72,0
400	70,0	2.500	72,0
500	70,5	3.150	72,0

Fonte: Adaptado pelo autor de ISO 717-2 (2020a)

Assim, de posse do nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje de referência com o sistema de revestimento de piso ($L_{n,r}$), é possível calcular o seu valor ponderado ($L_{n,r,w}$). Este parâmetro é obtido por meio da comparação dos valores de $L_{n,r}$ com os valores de referência, com modificações de 1 dB na curva padrão, até que a soma dos valores desfavoráveis atinja um limite máximo de 32 dB, para avaliações na faixa de 100 a 3.150 Hz (16 bandas de 1/3 de oitava). Neste caso, o valor do $L_{n,r,w}$ é igual a posição da curva padrão na banda de 500 Hz. Os valores da curva padrão estão presentes na Tabela 18 e a obtenção da redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado (ΔL_w) do sistema de piso é possível por meio da Equação 50.

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} = 78 \text{ dB} - L_{n,r,w} \quad \text{Equação 50}$$

Tabela 18 – Valores de referência (curva padrão) para sons de impacto

Frequência (Hz)	Curva padrão (dB)	Frequência (Hz)	Curva padrão (dB)
100	62	630	59
125	62	800	58
160	62	1.000	57
200	62	1.250	54
250	62	1.600	51
315	62	2.000	48
400	61	2.500	45
500	60	3.150	42

Fonte: Adaptado pelo autor de ISO 717-2 (2020a)

Ainda, considerando a redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado de cada uma das composições de revestimento compósito, se faz necessário o cálculo do termo de adaptação de espectro (ΔL_{lin}), prescrito pela norma ISO 717-2 (ISO, 2020a), de acordo com a Equação 51.

$$\Delta L_{lin} = 78 - 11 - (L_{n,r,w} + C_{I,r}) \quad \text{Equação 51}$$

3.5.1.2 Condição futura

Para estimativa do comportamento do sistema quando submetido a períodos prolongados de carregamento, considerando apenas a camada resiliente, os dados de deformação do ensaio de fluência à compressão, em escala logarítmica, foram utilizados. Neste caso, de forma a contemplar um período de até 30 vezes o intervalo de ensaio, uma regressão foi realizada para determinar uma equação que explique a estimativa de deformação para um período de carregamento de quinze anos ($X_{15\text{anos}}$),

sendo avaliadas somente as composições formadas por uma camada individual de aglomerado de borracha. Tal equação foi obtida por meio do *software Microsoft Excel*, com aplicação de uma linha de tendência de base logarítmica, acompanhando o intervalo logarítmico das medições.

Para tal, foi utilizada uma linha de tendência com aplicação de base logarítmica para obtenção da equação no *software Microsoft Excel*, individual para cada composição analisada, que descreve o comportamento do sistema e permite extrapolação de seu comportamento para um período de 131.400 horas de carregamento, equivalente a 15 anos.

Considerando tal comportamento, no domínio do tempo, a Equação 52 relaciona a deformação inicial e estimativa futura obtidas no ensaio de fluência à compressão e a frequência de ressonância presente para obtenção da frequência de ressonância estimada para um período de carregamento de quinze anos ($f_{r,15anos}$).

$$f_{r,15anos} = f_r \sqrt{\frac{1}{\frac{(d_s - X_{15anos})}{(d_s - X_0)}}}$$

Equação 52

Desta forma, a rigidez dinâmica aparente e, conseqüentemente, a rigidez dinâmica (s'_{15anos}) de cada composição foi calculada para estimativa de seu comportamento considerando um período de carregamento de quinze anos, por meio da Equação 53.

$$s'_{15anos} = \frac{4\pi^2 m'_t f_{r,15anos}^2}{1000000}$$

Equação 53

A partir da estimativa da rigidez dinâmica para um carregamento de quinze anos, a frequência natural do sistema ($f_{0,15anos}$) foi determinada a partir da Equação 54.

$$f_{0,15anos} = 160 \sqrt{\frac{s'_{15anos}}{m'}}$$

Equação 54

A previsão da capacidade de redução dos níveis de pressão sonora de impacto para cada banda de frequências (100 a 5.000 Hz) para um período de carregamento de 15 anos (ΔL_{15anos}) foi determinada por meio da Equação 55 para bandas de frequências abaixo da frequência limite e a Equação 56 para bandas de frequências acima da frequência limite. A frequência limite não foi alterada do modelo de previsão

da condição presente, uma vez que é inerente da camada de caminhamento e da *tapping machine*, com características não alteradas com o tempo. Ainda, foi considerada igual a zero a capacidade de redução aos sons de impacto das bandas de frequências abaixo da frequência natural do sistema ($f_{0,15\text{anos}}$).

$$\Delta L_{15\text{anos}} = X \log \left(\frac{f}{f_{0,15\text{anos}}} \right) \quad \text{Equação 55}$$

$$\Delta L_{15\text{anos}} = X \log \left(\frac{f}{f_{0,15\text{anos}}} \right) + 10 \log \left[1 + \left(\frac{2\pi f m_t}{2,3\rho c_L h^2} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 56}$$

Para determinação da futura capacidade de redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado ($\Delta L_{w,15\text{anos}}$), a metodologia prescrita pela norma ISO 717-2 (ISO, 2020a) foi utilizada. Inicialmente foram calculados os níveis de pressão sonora de impacto da laje pesada de referência com sistema de revestimento compósito após um período de carregamento de quinze anos, conforme os valores de referência anteriormente mencionados na Tabela 17 e pela Equação 57.

$$L_{n,r,15\text{anos}} = L_{n,r,0} - \Delta L_{15\text{anos}} \quad \text{Equação 57}$$

Em seguida, os valores de $L_{n,r,15\text{anos}}$, calculados para as bandas de frequências de um terço de oitava no intervalo de 100 a 3.150 Hz, foram comparados com a curva padrão (Tabela 18), realizando modificações de 1 dB na curva padrão, até uma soma máxima de 32 dB dos desvios desfavoráveis fosse obtida. Neste caso, a posição da curva padrão modificada na banda de 500 Hz indica o $L_{n,r,15\text{anos},w}$. Por fim, utilizando a Equação 58, a estimativa da redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado do sistema de piso, considerando um carregamento de quinze anos ($\Delta L_{w,15\text{anos}}$), foi obtida.

$$\Delta L_{w,15\text{anos}} = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,15\text{anos},w} = 78 \text{ dB} - L_{n,r,15\text{anos},w} \quad \text{Equação 58}$$

O termo de adaptação de espectro também foi calculado para a estimativa do comportamento do revestimento compósito após um carregamento de quinze anos ($\Delta L_{\text{lin},15\text{anos}}$), seguindo as prescrições da norma ISO 717-2 (ISO, 2020a), conforme a Equação 59.

$$\Delta L_{\text{lin},15\text{anos}} = 78 - 11 - (L_{\text{n},\text{r},15\text{anos},\text{w}} + C_{\text{I},\text{r},15\text{anos}})$$
Equação 59

3.5.2 Medição da redução aos sons de impacto em laboratório

A determinação da capacidade de redução dos níveis de pressão sonora de impacto em laboratório (ΔL) foi realizada no Laboratório de Acústica (LaVIT) do Itt Performance por meio da metodologia presente na norma ISO 10140-3 (ISO, 2021b).

A câmara de ensaio é composta por duas câmaras adjacentes verticalmente, sendo que a câmara superior é móvel e possui uma estrutura de vigas com consoles, de modo a promover a troca da laje sob ensaio, que é simplesmente apoiada em uma camada resiliente, cumprindo com os requisitos da norma ISO 10140-5 (ISO, 2021d).

A câmara emissora (superior) possui um volume de 39,97 m³ e a receptora (inferior) é dotada de 49,60 m³, sendo ambas divididas pela laje de piso sob ensaio. Neste caso, foi utilizada uma laje padrão, em concreto armado, com espessura de 120 mm, simplesmente apoiada na estrutura de suporte da câmara, desvinculada estruturalmente, em concordância com a norma ISO 10140-5 (ISO, 2021d).

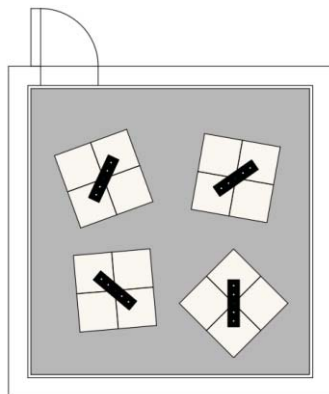
A área da laje padrão é de 19,40 m² (4,46 x 4,35 m), e a área ensaiada é de 16,80 m². Na laje foram ensaiadas, individualmente, as diferentes composições de revestimento compósito de piso, sendo simplesmente dispostas sobre a superfície da laje padrão. No ensaio dos revestimentos compósitos sobre a laje padrão, cuidado foi tomado para garantir a planeza da laje e a ausência de sujeira entre os elementos, evitando incertezas de medição, conforme apontado por Schiavi, Prato e Belli (2015) e Arenas e Supulveda (2022).

Foram utilizadas quatro peças de revestimento compósito (600x600 mm cada), dispostas de modo a formar um quadrado de 1,20x1,20 m, posicionadas em quatro posições distintas, conforme permite a norma ISO 10140-1 (ISO, 2021a) e utilizado por Asdrubali e D'Alessandro (2011). Neste caso, foram avaliadas apenas as composições formadas pelo piso de porcelanato e uma camada individual de aglomerado de borracha.

A posição da *tapping machine* e das amostras sobre a laje padrão, para determinação do nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje padrão com o sistema de revestimento de piso (L_n), está ilustrada por meio da Figura 25. Estas

mesmas posições foram adotadas para verificação do nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje padrão ($L_{n,0}$), conforme ilustrado na Figura 26.

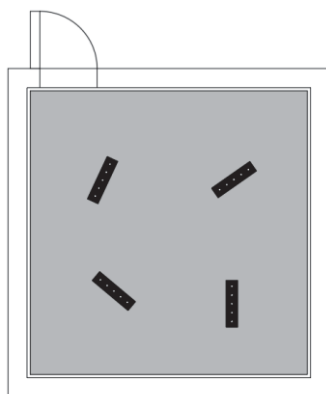
Figura 25 – Posição das amostras e *tapping machine* na laje padrão (medição de L_n)



Câmara emissora

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Posição da *tapping machine* na laje padrão (medição de $L_{n,0}$)



Câmara emissora

Fonte: Elaborado pelo autor

A temperatura e umidade dentro das câmaras de ensaio, e, conseqüentemente, das amostras não foi controlada, porém, tais fatores foram verificados durante cada ensaio, de modo a cumprir com uma temperatura de 18 a 25 °C e a umidade relativa do ar entre 30 e 90%.

O procedimento de ensaio consiste, primeiramente, na medição da temperatura e umidade relativa do ar dentro de cada uma das câmaras de ensaio pelo uso de um termo-higrômetro, devidamente calibrado, sucedido pelo fechamento das portas das câmaras e desligamento das luzes, restando dentro do ambiente somente o analisador sonoro na câmara receptora.

As medições foram realizadas em bandas de frequências de 1/3 de oitava, de 100 a 5.000 Hz. Foi realizada a verificação intermediária da calibração do analisador sonoro no início e no término de cada bateria de medições, de modo a verificar quaisquer problemas no equipamento de medição que possam ter ocorrido durante sua utilização.

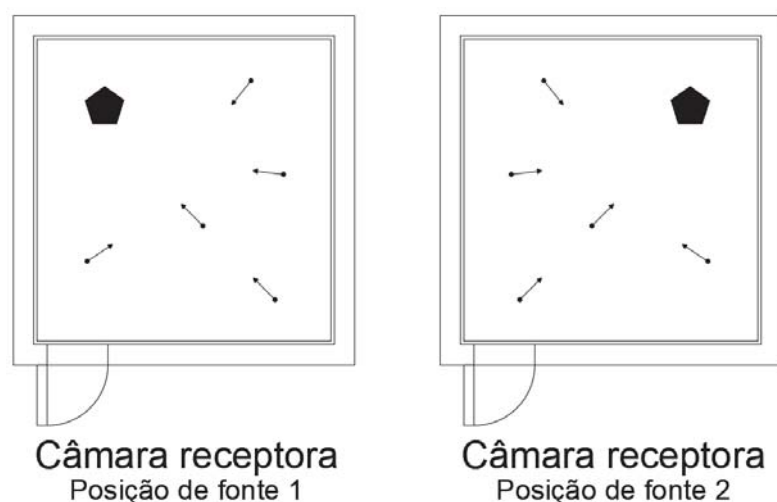
Para as medições foram utilizados os seguintes equipamentos: analisador sonoro do fabricante *Brüel&Kjaer Type 2270*, microfone do fabricante *Brüel&Kjaer Type 4189*, fonte sonora dodecaédrica do fabricante *Brüel&Kjaer Type 4292-L*, amplificador sonoro do fabricante *Brüel&Kjaer Type 2734*, e *tapping machine* do fabricante *Brüel&Kjaer Type 3207*.

A primeira medição realizada foi a do ruído de fundo, no centro da câmara receptora, durante 10 segundos, de forma a servir de referência e, caso a diferença entre os níveis dos parâmetros medidos na sequência e o ruído de fundo seja inferior a 15 dB, seja feita a correção conforme a Equação 60, de acordo com a norma ISO 10140-4 (ISO, 2021c).

$$L = 10 \log(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10}) \quad \text{Equação 60}$$

Em sequência, o tempo de reverberação da câmara receptora foi medido pelo método interrompido, com três decaimentos por ponto, adotando duas posições de fonte emissora de sons aéreos e cinco posições de microfone para cada posição de fonte emissora, como exemplificado na Figura 27.

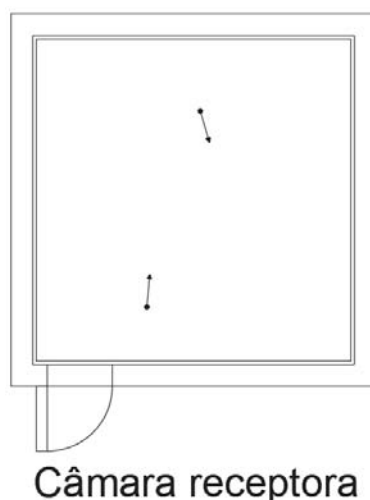
Figura 27 – Posições de fonte sonora e microfone para medição do TR



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a medição do tempo de reverberação da câmara receptora, o microfone permaneceu na câmara receptora e a *tapping machine* foi colocada sobre a laje padrão (com e sem cada amostra), nas posições indicadas, para medição dos níveis de pressão sonora de impacto estabelecidos na câmara receptora. No total, foram adotadas cinco posições de *tapping machine* e duas posições de microfone para cada posição de *tapping machine*, na câmara receptora, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Posições de microfone para cada uma de *tapping machine*



Fonte: Elaborado pelo autor

Com os valores de cada parâmetro medidos, o nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje padrão com e sem o revestimento (L_n e $L_{n,0}$, respectivamente) foi calculado conforme metodologia prescrita pela norma ISO 10140-3 (ISO, 2021b) e ISO 10140-4 (ISO, 2021c), de acordo com a Equação 61.

$$L_n = L_i \log \left(\frac{\left(\frac{0,16V}{T} \right)}{10} \right) \quad \text{Equação 61}$$

Por meio dos valores obtidos de nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje com e sem revestimento (L_n e $L_{n,0}$, respectivamente), foi calculado seu valor ponderado ($L_{n,w}$ e $L_{n,0,w}$), por meio da metodologia prescrita pela norma ISO 717-2 (2020a).

Ainda, o cálculo do termo de adaptação de espectro (C_i), para todas as condições de medição (com cada composição de amostra e sem amostra sobre a laje padrão), foi obtido por meio das prescrições da norma ISO 717-2 (2020a), conforme rotina presente na Equação 62.

$$C_I = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} - 15 - L_{n,w} \quad \text{Equação 62}$$

De posse dos níveis de pressão sonora de impacto normalizado, para as situações de laje sem revestimento e com amostra, por banda de frequências, a redução do nível de pressão sonora de impacto normalizado (ΔL), de cada composição de revestimento compósito de piso, foi obtida por meio da Equação 63.

$$\Delta L = L_{n,0} - L_n \quad \text{Equação 63}$$

De posse da redução do nível de pressão sonora de impacto normalizado de cada uma das composições de revestimento compósito, obtida pelas medições em escala real, foi calculada a capacidade de redução do nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje de referência com as amostras ($L_{n,r}$), para cada banda de frequências, conforme a Equação 64.

$$L_{n,r} = L_{n,r,0} - \Delta L \quad \text{Equação 64}$$

A partir dos valores de nível de pressão sonora de impacto normalizado da laje de referência com cada composição de amostra, seguindo as recomendações da norma ISO 717-2 (2020a) indicadas nos itens anteriores, foi calculado o seu valor ponderado ($L_{n,r,w}$), de modo a promover a obtenção da redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado de cada composição de revestimento compósito (ΔL_w), por meio da Equação 65.

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} = 78 \text{ dB} - L_{n,r,w} \quad \text{Equação 65}$$

Por fim, foi calculado o termo de adaptação de espectro de cada uma das amostras de revestimento compósito (ΔL_{lin}), seguindo as recomendações da norma ISO 717-2 (ISO, 2020a), conforme a Equação 66.

$$\Delta L_{lin} = 78 - 11 - (L_{n,r,w} + C_{I,r}) \quad \text{Equação 66}$$

3.5.3 Calibração do modelo teórico de previsão por meio de medições em laboratório da redução aos sons de impacto

O método de previsão da redução do nível de pressão sonora de impacto descrito na Equação 14, o qual considera uma expectativa de que o sistema de piso flutuante obtenha uma melhoria de 40 dB com o aumento na frequência com um fator

de dez, tende a superestimar a capacidade de isolamento aos sons de impacto. Isto ocorre pois o revestimento flutuante e a laje estrutural não agem como placas infinitas, e pelo fato de que, com o aumento da frequência, as camadas resilientes não atuam como molas simples, sendo então realizada uma proposição empírica, acatada pela norma NBR ISO 12354-2, para consideração de um ganho de 30 dB com o aumento na frequência com um fator de dez (VÉR, 1971a; VÉR, 1971b; GERRETSEN, 1999; STEWART; MACKENZIE, 2000; HOPKINS, 2007; ABNT, 2025).

Levando isto em consideração, o método proposto para ajuste do modelo de previsão da redução dos níveis de pressão sonora de impacto consiste em reduzir a razão de aumento da capacidade de isolamento em passos de 5 decibéis, partindo de 30 dB, e realizar uma comparação dos valores previstos e verificados experimentalmente (item “3.5.2 Medição da redução aos sons de impacto em laboratório”).

Desta forma, foram propostas e analisadas modificações para uma expectativa de aumento de 30, 25, 20, 15 e 10 dB com o aumento na frequência com um fator de dez, correspondentes ao parâmetro “X” da Equação 47 e Equação 48.

Tal comparação da redução dos níveis de pressão sonora de impacto estimada e obtida experimentalmente foi realizada graficamente por meio de análise espectral, em bandas de um terço de oitava, na faixa de 100 a 5.000 Hz, e em termos dos resultados ponderados (ΔL_w), com a finalidade de determinar qual é a equação que melhor corresponde os resultados obtidos com os previstos, para as mesmas composições de revestimento compósito rígido.

A partir da análise gráfica, foi realizada uma verificação estatística da correlação entre a equação com maior compatibilidade gráfica com os dados de ensaio por meio do coeficiente de correlação r de Pearson. Tal coeficiente possibilita a quantificação da associação linear dos dados presentes nos dois espectros de redução dos níveis de pressão sonora de impacto. Neste caso, quando maior for o coeficiente de correlação r de Pearson, em módulo, maior é a correlação entre as variáveis, conforme intervalos presentes na Tabela 19.

Tabela 19 – Intervalo de avaliação do coeficiente de correlação r de Pearson

Resultado	Interpretação
$ r = 0$	Não há relação linear
$0,0 < r < 0,3$	Relação fraca
$0,3 < r < 0,7$	Relação moderada
$0,7 < r < 1,0$	Relação forte
$ r = 1$	Perfeita relação linear

Fonte: Adaptado pelo autor de Ratner (2009)

Por fim, definida a expectativa de aumento na redução dos níveis de pressão sonora de impacto com o aumento na frequência com um fator de dez, o mesmo valor do parâmetro “X” definido para a condição presente foi aplicado para a estimativa futura, por meio da Equação 55 e Equação 56.

3.6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AOS SONS DE IMPACTO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS COM O USO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO

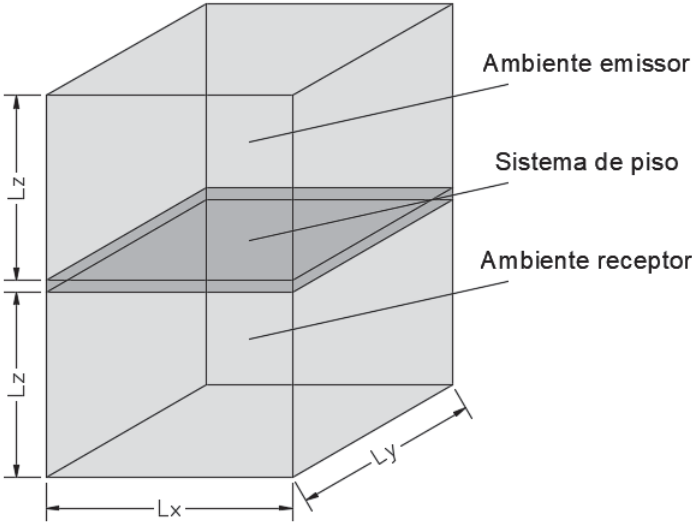
3.6.1 Soluções construtivas e configuração do ambiente

De modo a promover a avaliação da mudança de desempenho frente aos sons de impacto, em sistemas estruturais de piso, com o uso das composições de revestimento compósito propostas nesta pesquisa, foram realizados modelos de previsão para determinação do isolamento aos sons de impacto dos sistemas com e sem aplicação do revestimento compósito em uma situação real de uso.

Para tal, foi definido um ambiente destinado a uso como dormitório, integrante de uma unidade habitacional de uma edificação hipotética, com pavimentos sobrepostos e de mesma configuração. Neste caso, o sistema estrutural de piso em análise é responsável por formar a laje de piso entre dois dormitórios adjacentes verticalmente. Ainda, em oposição a uma condição real, não foi considerada a presença de aberturas, como portas e janelas, no modelo.

De modo a avaliar configurações distintas de ambiente, foram propostas três composições de dormitórios, com modificação da componente de dimensional entre cada um. A configuração dos ambientes propostos está presente na Figura 29 e Tabela 20, com dimensões baseadas nas recomendações de Neufert (2022).

Figura 29 – Configuração de dormitórios hipotéticos para simulação computacional



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 20 – Dimensões dos dormitórios hipotéticos para simulação computacional

Nomenclatura	Dimensão (m)			Área de piso (m²)	Volume (m³)	
	Lx	Ly	Lz		Receptor	Emissor
DORM-2x4m	2,0	4,0	2,7	8,0		21,6
DORM-3x4m	3,0	4,0		12,0		32,4
DORM-4x4m	4,0	4,0		16,0		43,2

Fonte: Elaborado pelo autor

O tempo de reverberação do ambiente receptor, nas bandas centrais de frequência de 100 a 3.150 Hz, foi determinado a partir das premissas de Sabine (1922), a partir da Equação 67, com coeficientes de absorção sonora das superfícies presentes na Tabela 21. Tal configuração considera a condição de entrega das unidades (ausência de mobiliário e dispositivos inerentes do uso), promovendo uma situação real para atendimento de desempenho.

$$T = \frac{0,161V}{\sum S\alpha}$$

Equação 67

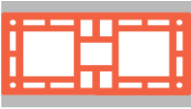
Tabela 21 – Coeficientes de absorção sonora das superfícies dos ambientes

Frequência (Hz)	$\alpha_{paredes}$	$\alpha_{piso,teto}$	Frequência (Hz)	$\alpha_{paredes}$	$\alpha_{piso,teto}$
100	0,02	0,01	630	0,02	0,02
125	0,02	0,01	800	0,02	0,02
160	0,02	0,01	1.000	0,02	0,02
200	0,02	0,01	1.250	0,02	0,02
250	0,02	0,01	1.600	0,02	0,02
315	0,02	0,01	2.000	0,02	0,02
400	0,02	0,01	2.500	0,02	0,02
500	0,02	0,01	3.150	0,02	0,02

Fonte: Adaptado pelo autor de Cox e D’Antonio (2017)

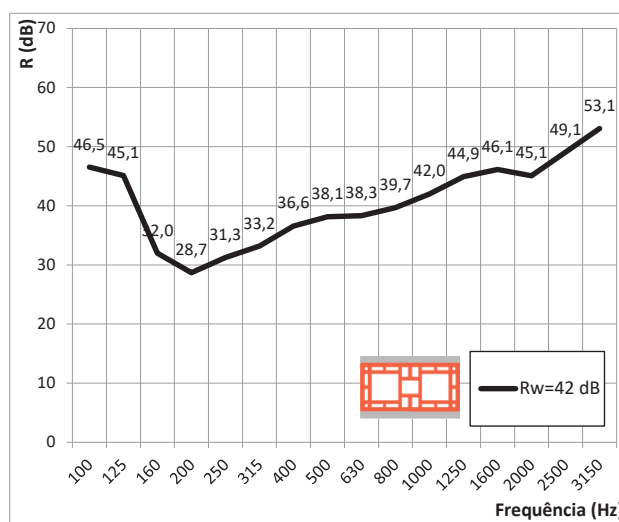
Os sistemas de vedação vertical (SVV) que compõem os ambientes foram padronizados para as composições de laje estrutural e condição de revestimento de piso, sendo adotadas paredes de alvenaria em blocos cerâmicos estruturais, com assentamento e revestimento em argamassa. Tal sistema de vedação vertical foi avaliado em escala real, em ambiente laboratorial, por Oliveira *et al.* (2021). A descrição das características do SVV está presente na Tabela 22 e índices de redução sonora por banda de frequências (R), na faixa de bandas centrais de um terço de oitava de 100 a 3.150 Hz, e ponderado (R_w) estão presentes na Figura 30.

Tabela 22 – Características do SVV em alvenaria de blocos cerâmicos estruturais

Descrição	Seção	Massa por unidade de área (kg/m ²)
Parede em alvenaria de blocos cerâmicos estruturais ($f_{bk}=7,23$ MPa) de 14x19x29 cm, assentados em argamassa com juntas horizontais e verticais de 1,0 cm completamente preenchidas, e revestidos em ambas as faces com argamassa em 2,0 cm		225

Fonte: Adaptado pelo autor de Oliveira *et al.* (2021)

Figura 30 – Índices de redução sonora do SVV em alvenaria de blocos cerâmicos estruturais



Fonte: Adaptado pelo autor de Oliveira *et al.* (2021)

Em relação ao sistema estrutural de piso, foram definidas três composições de laje maciça de concreto armado, com diferentes espessuras, definidas a partir do limite mínimo da norma NBR 6118 (ABNT, 2023b) e práticas correntes.

A velocidade de fase de onda longitudinal dos sistemas estruturais de concreto armado foi determinada por meio das recomendações de Hopkins (2007), conforme a Equação 68.

$$c_{L,p} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}}$$

Equação 68

Para tal, conforme as prescrições da norma NBR 6118 (ABNT, 2023b), o módulo de elasticidade (E) foi calculado por meio da Equação 69.

$$E = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}}$$

Equação 69

Desta forma, na Tabela 23 estão presentes as principais características físicas dos sistemas estruturais maciços considerados, em termos da espessura (h), resistência característica (f_{ck}), módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), massa específica (σ) e velocidade de fase de onda longitudinal da estrutura de concreto armado (c_{L,p}).

Tabela 23 – Composição dos sistemas estruturais de piso propostos

Composição	Nomenclatura	h (cm)	f _{ck} (MPa)	E (MPa)	ν	ρ (kg/m³)	c _{L,p} (m/s)
Laje maciça		8,0					
de concreto	L.M.C.A.	12,0	30,0	30672	0,2	2500	3575
armado		16,0					

Fonte: Elaborado pelo autor

3.6.2 Revestimento compósito

Em virtude da vasta gama de composições de revestimento compósito propostas pela pesquisa, para a avaliação de desempenho aos sons de impacto dos sistemas estruturais de piso, foi selecionada apenas uma composição de revestimento para análise de desempenho conjunta no ambiente proposto.

Neste caso, o critério para definição do revestimento compósito a ser utilizado na previsão de comportamento frente aos sons impacto foi a perda de desempenho, em termos da redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado (ΔL_w), da condição presente em relação à previsão futura com carregamento de 15 anos,

calculadas a partir dos dados do item “3.5 Previsão da redução aos sons de impacto do revestimento compósito”.

Desta forma, o isolamento aos sons de impacto dos sistemas estruturais de piso foi avaliado sem e com a aplicação de revestimento compósito. No caso das condições de laje revestida, foi avaliado seu desempenho presente e futuro, promovendo a verificação da necessidade de manutenção, dentro do período de 15 anos, para que o nível de desempenho seja mantido.

3.6.3 Previsão do comportamento acústico dos sistemas estruturais de piso maciços

De modo a promover a previsão comportamento dos sistemas construtivos frente aos sons de impacto, considerando a interação entre a superfície dos elementos e os impactos da máquina de impactos padrão ISO (*tapping machine*), foi utilizada a metodologia definida por Hopkins (2007). Para tal, o quadrado da magnitude da força de impacto (F^2_{rms}) foi definido por meio da Equação 70, para as bandas de frequências centrais de um terço de oitava de 100 a 3.150 Hz.

$$F^2_{rms} = \frac{|F_n|^2 0,23f}{2f_i} \quad \text{Equação 70}$$

A magnitude da força de impacto (F_n) foi determinada a partir da Equação 71, sendo fruto de uma transformada de Fourier para obtenção da força inserida pela *tapping machine*, por banda de frequências, a partir da força aplicada no domínio do tempo durante o período de 0,1 segundos de ciclo de impacto. Neste caso, foram utilizados 4096 pontos para a transformada de Fourier, resultando na faixa de frequências de 0 a 40.950 Hz, com uma resolução de frequência de 10 Hz. Ainda, para realização da transformada de Fourier, foram utilizados apenas valores de força iguais ou maiores a zero, referentes apenas ao primeiro impacto dos martelos da *tapping machine*, desconsiderando repiques.

$$F_n = \frac{2}{T_i} \int_0^{T_i} F_1(t) \cos(2\pi f_i n t) dt \quad \text{Equação 71}$$

Neste caso, a força equivalente a um impacto de um martelo da *tapping machine* ($F_1(t)$), no domínio do tempo, foi obtida a partir da relação entre as propriedades físicas dos martelos da *tapping machine* e a impedância mecânica do

sistema de piso. Tal propriedade, no domínio do tempo, promove a verificação da duração do impacto e o comportamento da transferência de energia entre os martelos da *tapping machine* e o sistema de piso. Sua determinação depende do estabelecimento de uma oscilação pós-crítica ou pré-crítica, sendo definidas a partir da relação $Km \geq 4Z_{dp}^2$ e $Km < 4Z_{dp}^2$, respectivamente, conforme a Equação 72.

$$F_1(t) = \begin{cases} \frac{v_0 K e^{\left(\frac{-Kt}{2Z_{dp}}\right)} \sinh\left(t \sqrt{\left(\frac{K}{2Z_{dp}}\right)^2 - \frac{K}{m_t}}\right)}{\sqrt{\left(\frac{K}{2Z_{dp}}\right)^2 - \frac{K}{m_t}}}, & Km_t \geq 4Z_{dp}^2 \\ \frac{v_0 K e^{\left(\frac{-Kt}{2Z_{dp}}\right)} \sinh\left(t \sqrt{\frac{K}{m_t} - \left(\frac{K}{2Z_{dp}}\right)^2}\right)}{\sqrt{\frac{K}{m_t} - \left(\frac{K}{2Z_{dp}}\right)^2}}, & Km_t < 4Z_{dp}^2 \end{cases} \quad \text{Equação 72}$$

A rigidez da superfície de contato entre os martelos e o sistema de piso foi calculada por meio da Equação 73, e a impedância mecânica do sistema de piso foi obtida pela Equação 74.

$$K = \frac{2rE}{1 - \nu^2} \quad \text{Equação 73}$$

$$Z_{dp} = 2,3\rho c_L h^2 \quad \text{Equação 74}$$

Desta forma, determinado o comportamento da transferência de energia dos martelos da *tapping machine* ao sistema de piso, a potência sonora transferida pelo sistema de piso ao ambiente receptor ($W_{net,12}$) foi calculada com base em um sistema de análise energética estatística (*statistical energy analysis – SEA*), conforme Equação 75, para as bandas centrais de frequências de um terço de oitava de 100 a 3.150 Hz. Conforme retratado na fundamentação teórica, o modelo *SEA* possui elevada incerteza nas bandas de frequências nas quais ocorrem menos de cinco modos de vibração, porém, o modelo foi utilizado para previsão do nível de pressão sonora de impacto padronizado para fins comparativos entre os sistemas construtivos e com a aplicação dos revestimentos compósitos.

$$W_{\text{net},12} = 10 \log \left(\frac{\left(2\pi f \eta_{12} N_1 \left(\frac{E_1}{N_1} - \frac{E_2}{N_2} \right) \right)}{10^{-12}} \right) \quad \text{Equação 75}$$

Para tal, a energia estabelecida no sistema de piso (E_1), a partir do impacto de um martelo da *tapping machine*, foi determinada a partir da Equação 76, sendo necessário o fator de perda do campo sonoro do ambiente receptor (η_2) e o fator de perda do acoplamento do sistema de piso ao ambiente receptor (η_{12}), utilizando a Equação 77 e Equação 78, respectivamente.

$$E_1 = \frac{\eta_2 E_2}{\eta_{12}} \quad \text{Equação 76}$$

$$\eta_2 = \frac{2,2}{fT} \quad \text{Equação 77}$$

$$\eta_{12} = \frac{\rho_0 c_0 \sigma}{2\pi f \rho_s} \quad \text{Equação 78}$$

A determinação da energia estabelecida no ambiente receptor (E_2) foi realizada por meio da Equação 79, fazendo uso dos parâmetros η_2 e η_{12} , supracitados, e da potência inserida pelo impacto no sistema de piso (W_{in}), conforme Equação 80, e fator de perda total do sistema de piso (η_1), calculado com uso da Equação 81, obtido por meio das prescrições da norma NBR ISO 12354-2 (ABNT, 2025).

$$E_2 = \frac{\eta_{12} W_{\text{in}}}{\eta_1 \eta_2 2\pi f} \quad \text{Equação 79}$$

$$W_{\text{in}} = F_{\text{rms}}^2 \left(\frac{Z_{\text{dp}}}{Z_{\text{dp}}^2 + (2\pi f m_t)^2} \right) \quad \text{Equação 80}$$

$$\eta_1 = 0,01 + \frac{m}{485\sqrt{f}} \quad \text{Equação 81}$$

Ainda, para aplicação da Equação 75, a densidade modal, por banda de frequências, do sistema de piso e do ambiente receptor foram calculadas a partir da Equação 82 e Equação 83, respectivamente.

$$N_1 = \frac{0,23fL_{med}}{\sqrt{\frac{2\pi fh c_L}{\sqrt{12}}}} \quad \text{Equação 82}$$

$$N_2 = \frac{4\pi f^2 V}{c_0^3} + \frac{\pi f S_T}{2c_0^2} + \frac{L_T}{8c_0} \quad \text{Equação 83}$$

Conforme a necessidade da Equação 78 de considerar o fator de irradiação do sistema de piso (σ), sua determinação foi realizada considerando as diferentes faixas da banda de frequências de interesse em relação à frequência crítica (f_c – determinada pela Equação 87), conforme a Equação 84, Equação 85 e Equação 86. Ainda, um termo de ajuste semiempírico foi adotado, para corrigir o pico da eficiência de irradiação próximo à f_c , que não é característico de placas com conexões rígidas em suas extremidades, determinando $\sigma=1$ para a primeira banda de frequências na qual $\sigma>1$ e $\sigma=1$ para todas as bandas subsequentes.

$$\sigma = \frac{U}{2\pi\sqrt{\frac{f_c}{f}}\left(\frac{2\pi f_c}{c_0}\right)S\sqrt{\frac{f_c}{f}-1}} \left[\ln\left(\frac{\sqrt{\frac{f_c}{f}}+1}{\sqrt{\frac{f_c}{f}}-1}\right) + \frac{2\sqrt{\frac{f_c}{f}}}{\frac{f_c}{f}-1} \right] \left[C_{BC}C_{OB} - \left(\sqrt{\frac{f_c}{f}}\right)^{-8} (C_{BC}C_{OB}-1) \right] \quad \text{para } f < f_c \quad \text{Equação 84}$$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_c}{f}}} \quad \text{para } f > f_c \quad \text{Equação 85}$$

$$\sigma \approx \left(0,5 - \frac{0,15L_1}{L_2}\right) \sqrt{\frac{2\pi f_c}{c_0}} \sqrt{L_1} \quad \text{para } f = f_c \quad \text{Equação 86}$$

$$f_c = \frac{c_0^2 \sqrt{3}}{\pi h c_L} \quad \text{Equação 87}$$

Por fim, baseado no sistema *SEA*, o nível de pressão sonora de impacto normalizado do sistema estrutural de piso foi calculado por meio da Equação 88, para as bandas de frequências centrais de um terço de oitava, na faixa de 100 a 3.150 Hz. Ainda, a partir dos níveis de pressão sonora de impacto normalizado de cada sistema estrutural de piso, seu índice de redução sonora aos sons aéreos foi determinado por meio da Equação 89, conforme prescrições da norma NBR ISO 12354-2 (ABNT, 2025).

$$L_n = W_{\text{net},12} + 10 \log \left(\frac{\left(\frac{0,16V}{T} \right)}{10} \right) \quad \text{Equação 88}$$

$$R = 38 + 30 \log(f) - L_n \quad \text{Equação 89}$$

3.6.4 Influência das transmissões indiretas e revestimento compósito

De posse do isolamento aos sons aéreos e de impacto dos sistemas que compõem os ambientes hipotéticos, foi utilizada a metodologia prescrita pela norma NBR ISO 12354-2 (ABNT, 2025) para previsão da capacidade de isolamento aos sons de impacto de cada sistema estrutural de piso considerando a contribuição dos elementos de contorno presentes nos ambientes propostos. Tal avaliação foi realizada tanto para os sistemas sem revestimento como com aplicação de cada configuração de revestimento compósito.

Para tal, foi necessária uma conversão do isolamento sonoro definido para cada sistema estrutural de piso e paredes de contorno para ajuste dos valores originais, baseados em uma condição de laboratório, para uma condição *in situ*. Tal modificação é baseada no tempo de reverberação estrutural em laboratório ($T_{s,\text{lab}}$) e *in situ* ($T_{s,\text{situ}}$), conforme Equação 90 e Equação 91, para o sistema estrutural de piso e sistema de vedação vertical (paredes).

$$L_{n,\text{situ}} = L_n + 10 \log \frac{T_{s,\text{situ}}}{T_{s,\text{lab}}} \quad \text{Equação 90}$$

$$R_{\text{situ}} = R - 10 \log \frac{T_{s,\text{situ}}}{T_{s,\text{lab}}} \quad \text{Equação 91}$$

Neste caso, o tempo de reverberação estrutural de cada sistema construtivo foi calculado, para condição de laboratório e *in situ*, por meio da Equação 92, baseado na estimativa do fator de perda total em situação de laboratório ($\eta_{\text{tot},\text{lab}}$) e *in situ* ($\eta_{\text{tot},\text{situ}}$), conforme Equação 93 e Equação 94, respectivamente.

$$T_s = \frac{2,2}{f\eta_{\text{tot}}} \quad \text{Equação 92}$$

$$\eta_{\text{tot,lab}} = 0,01 + \frac{m}{485\sqrt{f}} \quad \text{Equação 93}$$

$$\eta_{\text{tot,situ}} = 0,01 + \frac{0,5}{\sqrt{f}} \quad \text{Equação 94}$$

Sendo,

$\eta_{\text{tot,lab}}$: Fator de perda total do sistema *in situ*, adimensional;

f : Frequência de interesse, em Hz.

Desta forma, foram calculados os níveis de pressão sonora de impacto padronizado (L'_{nT}), considerando as contribuições indiretas por flancos provenientes das quatro paredes que contornam o sistema de piso, por meio da Equação 95, por bandas de um terço de oitava, nas frequências centrais de 100 a 3.150 Hz.

$$L'_{nT} = \left(10 \log \left(10^{L_{n,\text{situ,d}}/10} + \sum_{j=1}^4 10^{L_{n,ij}/10} \right) \right) - 10 \log(0,032V) \quad \text{Equação 95}$$

Para determinação do nível de pressão sonora de normalizado devido à transmissão através do sistema estrutural de piso *in situ* ($L_{n,\text{situ,d}}$) foi considerada a redução promovida pela camada de revestimento, quando aplicável, conforme Equação 96.

$$L_{n,\text{situ,d}} = L_{n,\text{situ}} - \Delta L \quad \text{Equação 96}$$

Tanto para condições do sistema estrutural de piso com e sem aplicação do revestimento compósito, o cálculo da propagação sonora proveniente da vertente indireta por flancos ($L_{n,ij}$), entre o sistema estrutural de piso (i) e o elemento de flanco (j), foi realizado segundo a Equação 97.

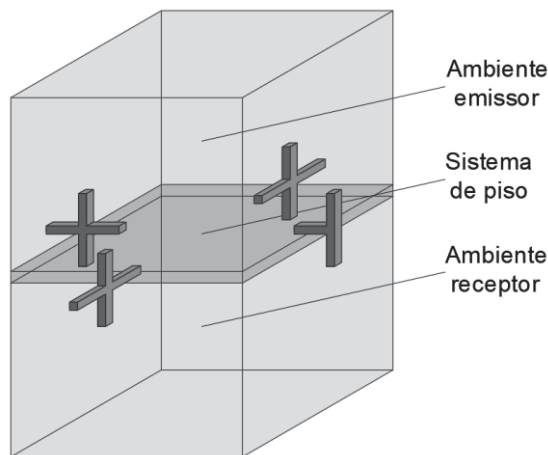
$$L_{n,ij} = L_{n,\text{situ}} - \Delta L + \frac{R_{i,\text{situ}} - R_{j,\text{situ}}}{2} - \overline{D_{v,ij,\text{situ}}} - 10 \log \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \quad \text{Equação 97}$$

Como parte integrante da Equação 97, a determinação da diferença de nível de velocidade média na junção entre elementos ($D_{v,ij,\text{situ}}$) foi realizada conforme a Equação 98.

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = K_{ij} - 10 \log \frac{c_0 l_{ij}}{2,2\pi^2 \sqrt{\frac{S_i S_j 1000}{T_{s,i,situ} T_{s,j,situ} f}}} \quad \text{Equação 98}$$

De forma análoga, para aplicação das equações supracitadas, a determinação do índice de redução de vibração para cada caminho de transmissão entre os elementos de separação (K_{ij}) foi obtida a partir dos preceitos da norma NBR ISO 12354-1 (ABNT, 2023), relacionando a massa entre o sistema estrutural de piso e as paredes, além do tipo de ligação presente entre eles. Neste caso, foram consideradas conexões rígidas entre os elementos e na Figura 31 estão ilustrados os tipos de conexões consideradas em cada um dos bordos do sistema de piso.

Figura 31 – Conexões consideradas entre o sistema de piso e paredes de contorno



Fonte: Elaborado pelo autor

3.6.5 Avaliação de desempenho

A partir dos níveis de pressão sonora de impacto padronizado (L'_{nT}) dos sistemas estruturais de piso, com e sem revestimento, para cada uma das bandas de frequências de um terço de oitava, no intervalo de 100 a 3.150 Hz, o seu valor ponderado ($L'_{nT,w}$) e termo de adaptação de espectro (C_i) foram obtidos a partir da metodologia presente na norma ISO 717-2 (2020a).

De posse dos níveis de pressão sonora de impacto estimados para cada sistema estrutural de piso, com e sem a aplicação do revestimento compósito, para o

ambiente proposto, seu desempenho foi avaliado com base nos intervalos prescritos pela norma NBR 15575-3 (ABNT, 2021b), presentes na Tabela 24.

Tabela 24 – Níveis de desempenho para ruídos de impactos em sistemas de pisos separando dormitórios de unidades distintas

Elemento de separação	$L'_{nT,w}$	Nível de desempenho
Sistema de piso de unidades habitacionais autônomas sobre dormitório	66 a 80	Mínimo
	56 a 65	Intermediário
	≤ 55	Superior

Fonte: Adaptado pelo autor de ABNT NBR 15575-3 (2021)

Ainda, a avaliação foi realizada na condição presente de desempenho e estimada para um carregamento de 15 anos, visando a análise da necessidade de manutenção do revestimento de piso dentro deste período, por meio da verificação da redução da capacidade de isolamento aos sons de impacto no domínio do tempo, para cada composição de revestimento analisada.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PISO DE PORCELANATO

Nesta sessão estão expostos os resultados referentes aos ensaios de caracterização experimental das propriedades físicas dos pisos de porcelanato inerentes à avaliação do comportamento acústico frente aos sons de impacto quando utilizados em uma configuração de revestimento compósito de piso.

Os dados estão expressos em função da média dos resultados das amostras analisadas, acompanhados do desvio padrão verificado em cada parâmetro de caracterização, estando os valores completos presentes no “APÊNDICE A – DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO PISO DE PORCELANATO”.

Desta forma, na Tabela 25 estão presentes os resultados de espessura, absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente e velocidade de propagação de onda longitudinal do piso de porcelanato.

Tabela 25 – Caracterização física do piso de porcelanato

Característica	Média	Desvio padrão
Espessura (mm)	9,31	0,06
Absorção de água (%)	0,34	0,02
Porosidade (%)	0,80	0,06
Densidade aparente (kg/m ³)	2375,75	3,31
Velocidade de propagação de onda longitudinal (m/s)	4654,29	30,62

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação à espessura das peças de porcelanato amostradas, a variação de espessura tolerada pela norma NBR ISO 13006 (ABNT, 2020a) foi respeitada pelo fabricante, ficando abaixo de 0,4 mm da espessura nominal de 9,5 mm declarada pelo fabricante. A mesma verificação pode ser realizada em relação à absorção de água, em função da fração de massa, que foi menor do que o limite especificado pela norma ($E_v \leq 0,5\%$), corroborando para uma porosidade aparente baixa.

Ainda, em função da baixa porosidade dos pisos de porcelanato, o seu índice de vazios é baixo, fazendo com que a velocidade de onda seja elevada mesmo com uma densidade aparente não tão elevada quando comparados, por exemplo, com concreto, que possui uma densidade em torno de 2.500 kg/m³ e uma velocidade de

onda de 3.575 m/s, como determinado no item de simulação “3.6.1 Soluções construtivas e configuração do ambiente”.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERADOS DE BORRACHA

Nesta sessão estão expostos os resultados referentes aos ensaios de caracterização experimental das propriedades acústicas e físicas dos aglomerados de borracha inerentes à avaliação do comportamento acústico frente aos sons de impacto, quando utilizados em uma configuração de revestimento compósito de piso.

Os dados estão expressos em função da média dos resultados das amostras analisadas, acompanhados do desvio padrão verificado em cada parâmetro de caracterização, estando os valores completos presentes no “APÊNDICE B – DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERADOS DE BORRACHA”.

Como descrito no método da pesquisa, os aglomerados de borracha em composições formadas por mais de uma camada foram avaliados na íntegra apenas nos ensaios de determinação de frequência de ressonância e rigidez dinâmica. Os demais parâmetros de caracterização de composições formadas por mais de uma camada foram estimados a partir dos resultados individuais de cada camada, sendo acompanhados pela marcação com “*” para indicar tal limitação.

4.2.1 Propriedades físicas

Por meio da determinação experimental das características físicas dos aglomerados de borracha, na Tabela 26 estão presentes os resultados de densidade aparente, massa específica e porosidade de todas as composições analisadas.

Tabela 26 – Densidade aparente, massa específica e porosidade

Nomenclatura	Densidade aparente (kg/m ³)		Massa específica (kg/m ³)		Porosidade	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
AB-E2,0-D705	704,87	10,65	1146,75	1,77	0,39	0,01
AB-E3,0-D705	703,99	7,37			0,39	0,01
AB-E5,0-D860	858,60	10,09			0,25	0,01
AB-E9,0-D875	875,64	9,30			0,24	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor

Com certa flutuação entre as composições de mesma densidade, o valor médio da densidade das amostras com espessura de 2,0 e 3,0 mm ficou próximo do padrão esperado (705 kg/m^3). Por outro lado, o desvio padrão entre as amostras de mesma composição foi mais elevado, evidenciando flutuação de até $10,65 \text{ kg/m}^3$ na densidade das amostras avaliadas. Todavia, tal variação entre as amostras analisadas resulta apenas em uma modificação máxima de 1,51% da densidade aparente das composições.

Em relação às composições com diferentes densidades, a densidade aparente medida de forma experimental também indica que o material possui resultados condizentes com a configuração proposta. De forma análoga às amostras anteriormente discutidas, a variação de densidade aparente entre as amostras de cada composição representa uma variação em função da densidade de apenas 1,17%.

A determinação da massa específica dos grânulos de borracha que formam os aglomerados indica $1146,72 \text{ kg/m}^3$ com reduzido desvio padrão entre as amostras analisadas, estando condizente com Rouse (2005) e Banerjee (2015).

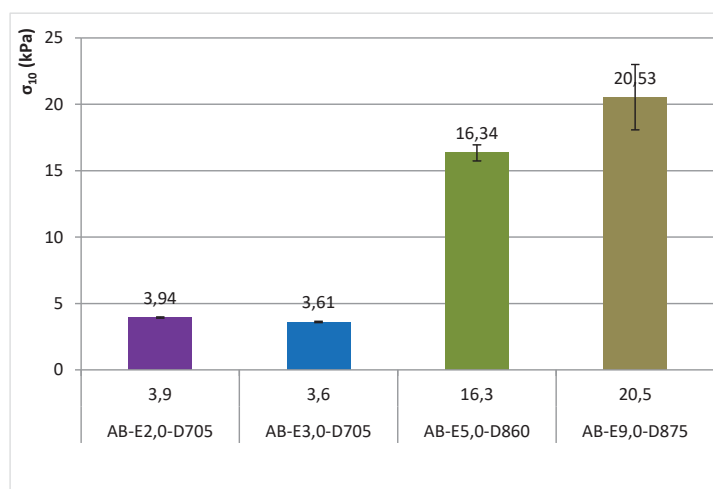
Por fim, a partir das medições de densidade aparente, que considera o volume de vazios dentro da estrutura do material, e da massa específica, responsável por caracterizar a massa por unidade de volume intrinsecamente dos grânulos de borracha, a porosidade de cada composição foi calculada. Para as composições de mesma densidade, por possuírem configuração similar, a porosidade das amostras foi de 0,39, indicando que 39% do volume ocupado pelo material é formado por ar. No caso das composições com densidades e espessuras mais elevadas, a porosidade foi mais reduzida, com resultados indicando em torno de 25% de poros no material. Todas as amostras apresentaram desvio padrão de apenas 1%.

Os resultados de porosidade obtidos se mostram inferiores ao verificado por Maderuelo-Sanz, Martín-Castizo e Vílchez-Gómez (2011) e Maderuelo-Sanz *et al.* (2013), o que vai ao encontro do esperado, uma vez que nos estudos referenciados foram analisadas composições de menor densidade. Neste caso, mesmo que os grânulos de borracha possuam configurações distintas, os materiais possuem a mesma composição e é esperado um maior índice de vazios em configurações de menor densidade. Ainda, com base nos dados providos por Schiavi, Guglielmone e Miglietta (2011), quando a porosidade dos aglomerados de borracha é comparada com outros tipos de materiais utilizados como camada resiliente, fica evidente que seu

índice de vazios é menor, ao exemplo de lãs de fibra de poliestireno, espumas de poliuretano ou lãs minerais, que possuem porosidade acima de 90%.

Em sequência, na Figura 32 estão presentes os resultados de resistência à compressão, em relação a uma deformação equivalente a 10% da espessura original, das composições de camada individual.

Figura 32 – Resistência à compressão das composições de camada única



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos indicam que as amostras de mesma densidade e espessura similar (AB-E2,0-D705 e AB-E3,0-D705) obtiveram uma resistência à compressão bastante próxima e reduzida, ficando abaixo da resistência mínima recomendada pela norma EN 16354 (CEN, 2018). Neste caso, logicamente, ao comparar as amostras de menor espessura e densidade com os exemplares mais espessos e densos, fica evidente que o incremento em densidade e espessura resultou em uma maior resistência à compressão, atendendo ao requisito da norma EN 16354 (CEN, 2018).

Todavia, apesar das composições AB-E2,0-D705 e AB-E3,0-D705 terem obtido resultados de resistência à compressão inferiores ao mínimo preconizado pela norma EN 16354 (CEN, 2018) para materiais resilientes destinados a uso em sistemas flutuantes, a resistência à compressão da amostra com pior desempenho representa a necessidade de um carregamento em torno de 37.000 kg/m² para uma deformação de 10% da espessura original do material. Para as condições de uso propostas para análise nesta pesquisa, dificilmente os sistemas de piso possuirão solicitações acima

de 200 kg/m², sendo mais assertiva a verificação da deformação dos aglomerados de borracha sob carregamentos prolongados.

Sendo assim, na Tabela 27 estão presentes os resultados obtidos no ensaio de fluência à compressão pelas composições de aglomerado de borracha reciclada, representando a deformação inicial (X_0), deformação no término do ensaio (X_{ct} ; 4560 horas), estimativa da deformação após 15 anos de carregamento com 200 kg/m² e deformação relativa ($\epsilon_{15\text{anos}}$). Neste caso, os dados completos do ensaio, para cada composição analisada, estão presentes no “APÊNDICE B – DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERADOS DE BORRACHA”.

Tabela 27 – Fluência à compressão

Nomenclatura	X_0 (mm)		X_{ct} (mm)		$X_{15\text{anos}}$ (mm)	$\epsilon_{15\text{anos}}$ (%)
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	
AB-E2,0-D705	0,01	0,01	0,35	0,01	1,32	62
AB-E3,0-D705	0,00	0,00	0,30	0,02	1,24	39
AB-E5,0-D860	0,04	0,01	0,22	0,05	0,94	18
AB-E9,0-D875	0,02	0,02	0,29	0,03	1,34	14
Legenda - X_0 : deformação inicial; X_{ct} : fluência à compressão; $X_{15\text{anos}}$: deformação após quinze anos; $\epsilon_{15\text{anos}}$: deformação relativa à espessura inicial após carregamento de 15 anos.						

Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar do uso de um carregamento de 200 kg/m² durante o ensaio, 50 kg/m² a mais do que o prescrito pela norma NBR 6120 (ABNT, 2019) para áreas privativas internas de edificações residenciais, tal condição é favorável à segurança pois prevê um sobrecarregamento. Assim, os resultados de deformação inicial (X_0) indicam uma baixa deformação imediata com a aplicação do carregamento nas quatro composições de aglomerado de borracha reciclada avaliadas, com um reduzido desvio padrão entre os três exemplares de cada composição ensaiados. No término do período de ensaio (4560 horas) a maior deformação foi registrada pela amostra de menor espessura e densidade, e a menor deformação foi registrada pela amostra com maior espessura e densidade. Tal comportamento evidencia uma menor perda de espessura quanto maior for a densidade da composição de aglomerado de borracha.

Em relação à previsão da deformação das composições de aglomerado de borracha reciclada sob carregamento prolongado (15 anos) indica uma expectativa de

redução de 0,94 a 1,34 mm entre os exemplares o que é mais representativa quanto menor a espessura da composição.

Neste caso, por exemplo, para a composição AB-E2,0-E705 a previsão indica que o material terá sua espessura reduzida para um terço do valor original (espessura reduzida em 62%) em 15 anos após ser submetida a um carregamento de 200 kg/m², gerando perda de desempenho. Tal influência negativa da perda de espessura das composições AB-E3,0-E705, AB-E5,0-E860 e AB-E9,0-E875 após 15 anos de carregamento não foi tão significativa, representando uma redução na espessura de 39%, 18% e 14%, respectivamente, indicando uma melhor manutenção do desempenho no domínio do tempo.

Comparando os resultados obtidos pelas composições analisadas com os resultados obtidos no estudo de Schiavi *et al.* (2007), mesmo que da avaliação para períodos diferentes (10 e 15 anos), a redução relativa de espessura estimada entre os dois estudos é bastante similar, encontrando-se na faixa de 15 a 20%.

Tal divergência pode ser proveniente da composição dos aglomerados de borracha avaliados nas duas pesquisas, além de incertezas de medição associadas a precisão do equipamento de medição da deformação quando da análise de deformações reduzidas no domínio do tempo.

Ainda, para comparação, o estudo desenvolvido por Caniato *et al.* (2016) indica a deformação relativa para um período de sete anos, representando um período de carregamento menor do que a presente pesquisa, porém, com a avaliação de diversas composições de materiais com espessura compatível com esta pesquisa. Neste caso, as composições mais representativas para comparação são: lã de polietileno ($\epsilon_{7\text{anos}}=45$ a 53%), não-tecido de polietileno com camada betuminosa ($\epsilon_{7\text{anos}}=17\%$), espuma de borracha expandida ($\epsilon_{7\text{anos}}=8$ a 20%) e grão de borracha reciclada ($\epsilon_{7\text{anos}}=28\%$).

A partir de tais resultados do estudo de Caniato *et al.* (2016) fica evidente que são esperados resultados distintos de previsão da deformação relativa, causada pelo carregamento prolongado, em função da composição de cada tipo e estrutura interna de material resiliente, sendo encontrados resultados com diferentes faixas de redução da espessura inicial em função do tempo.

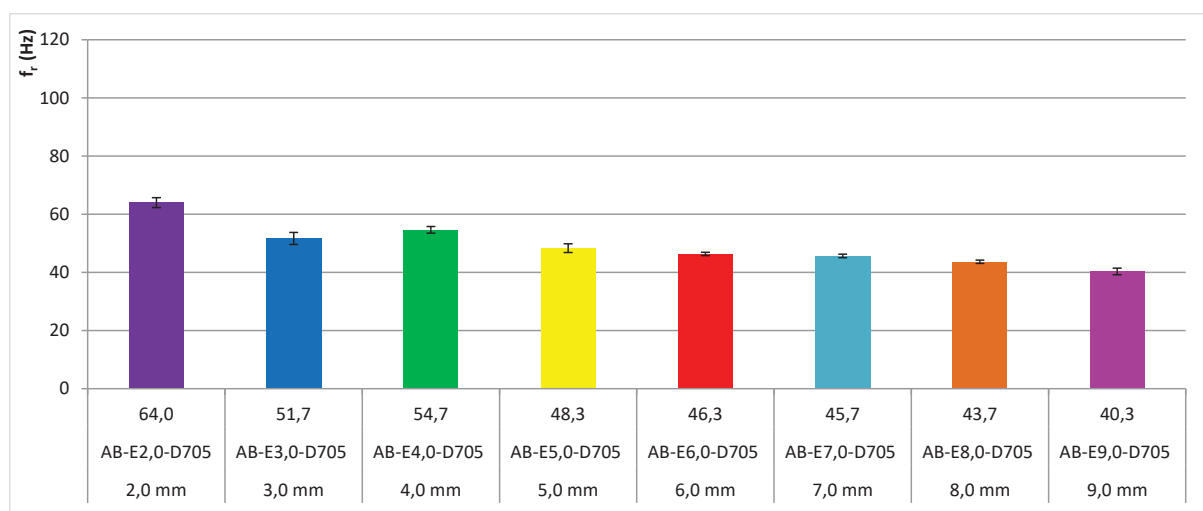
Somando à análise da deformação relativa do material, que possui impacto mecânico na estrutura de um sistema de piso flutuante, no âmbito do desempenho acústico é necessária a avaliação da perda de desempenho no domínio do tempo,

sendo estes dados utilizados para as análises presentes no item “4.3.2 Conservação de desempenho sob carregamento prolongado”.

4.2.2 Capacidade de amortecimento

De forma a avaliar a capacidade de amortecimento vibracional dos aglomerados de borracha de mesma densidade, na Figura 33 está presente a frequência de ressonância obtida, de forma experimental, pelo sistema que compõe cada composição proposta.

Figura 33 – Frequência de ressonância dos sistemas com composições de mesma densidade



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados obtidos experimentalmente é possível verificar que, em função dos extremos de espessura da camada resiliente analisadas, a frequência de ressonância do sistema formado pela placa de ensaio e camada resiliente variou em aproximadamente 24 Hz. Neste caso, a frequência de ressonância mais elevada foi medida no sistema com a manta de aglomerado de borracha de menor espessura (camada única de 2,0 mm), igual a 64,0 Hz, e a menor frequência de ressonância (40,3 Hz) foi verificada na amostra mais espessa (9,0 mm, formada por três camadas de 3,0 mm).

Desta forma, o comportamento do aumento da espessura da camada de aglomerado de borracha indica uma redução da frequência de ressonância do sistema com o aumento da espessura.

No caso das composições com camada individual de aglomerado de borracha, comparando a amostra com espessura de 2,0 mm com a amostra de 3,0 mm, o incremento em 50% na espessura resultou em uma redução de 12,3 Hz na frequência de ressonância do sistema.

Quando prevista a frequência de ressonância de uma camada de 3,0 mm por meio do resultado obtido com a composição de 2,0 mm, conforme a Equação 24, dada por Schiavi *et al.* (2007), sua frequência de ressonância prevista seria de 52,3 Hz, estando muito próxima da f_r medida experimentalmente de 51,7 Hz, indicando uma concordância do modelo teórico com o experimental.

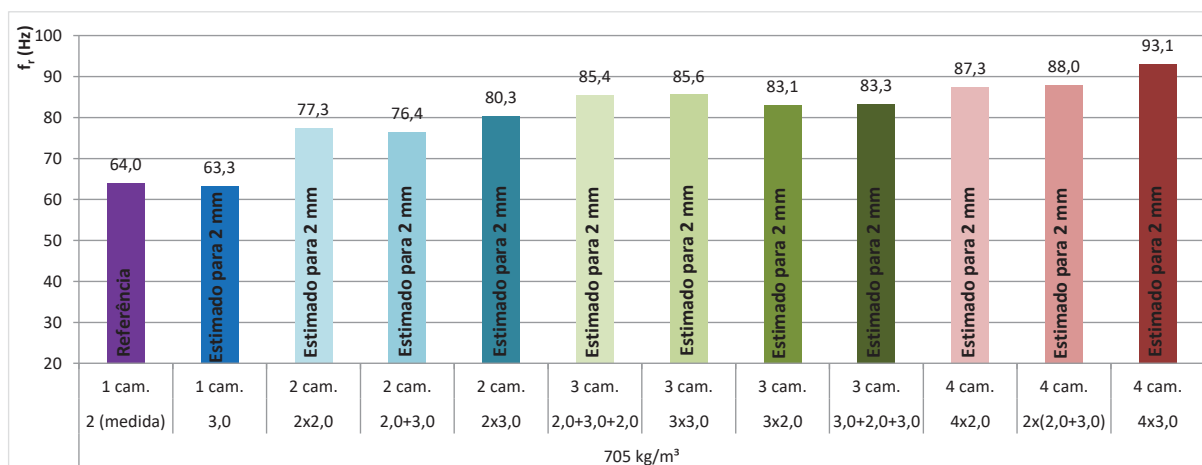
Todavia, apesar dos resultados obtidos confirmarem a expectativa de redução da frequência de ressonância do sistema com aumento da espessura da camada resiliente, a redução na frequência de ressonância não ocorreu em uma taxa equivalente ao aumento na espessura do material, indicando um comportamento fora do esperado pelas referências bibliográficas. Desta forma, os dados indicam uma diferença no desempenho previsto e obtido experimentalmente que pode estar associada à interação das camadas de aglomerado de borracha simplesmente sobrepostas entre si, sem uma ligação da estrutura interna do material de cada camada.

A partir de tal comportamento dos resultados de frequência de ressonância apresentado pelas camadas individuais e pelas composições formadas por mais de uma camada, foram realizadas medições complementares para avaliar o comportamento previsto e verificado experimentalmente com composições formadas por mais de uma camada. Para tal, na Figura 34 está presente a frequência de ressonância do sistema, conforme a Equação 24, dada por Schiavi *et al.* (2007), estimada para uma espessura de 2,0 mm a partir do valor medido experimentalmente em diferentes composições, utilizando o resultado experimental da composição com 2,0 mm de espessura como referência.

Como supramencionado, os dados presentes na Figura 34 buscam desenvolver uma forma de avaliação da divergência do comportamento previsto versus medido experimentalmente para as composições formadas por mais de uma camada de aglomerado de borracha reciclada. Neste caso, o gráfico compara a frequência de ressonância do sistema que compõe a camada individual de 2,0 mm de espessura medida experimentalmente com o valor de frequência de ressonância de

uma mesma camada de 2,0 mm de espessura estimada a partir das medições com composições de maior espessura e mais de uma camada.

Figura 34 – Frequência de ressonância estimada para uma camada de 2 mm a partir de valores medidos em diversas composições



Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente, quando comparada a frequência de ressonância da camada de referência (2,0 mm em camada única) com o valor estimado a partir do resultado de uma camada individual de 3,0 mm de espessura, fica visível que a frequência de ressonância estimada é muito próxima do valor de referência, indicando uma boa concordância entre o método de previsão e os valores obtidos experimentalmente.

Todavia, o mesmo comportamento não foi evidenciado na estimativa da frequência de ressonância da camada de 2,0 mm de espessura a partir dos resultados obtidos por composições de mais de uma camada. Neste caso, o desempenho do material, em termos da frequência de ressonância do sistema, foi subestimado em todos os casos, sendo agravado com o aumento de camadas, ou seja, o modelo experimental tende a superestimar a frequência de ressonância do sistema, em comparação com a previsão teórica.

Desta forma, os dados calculados a partir dos resultados experimentais indicam uma frequência de ressonância estimada para a camada de referência (2,0 mm de espessura) mais elevada, havendo uma diferença maior com o aumento da quantidade de camadas da composição testada experimentalmente. Este comportamento pode indicar que a simples disposição de uma camada sobre a outra, com o intuito do aumento de espessura e, consequentemente, desempenho, tende a

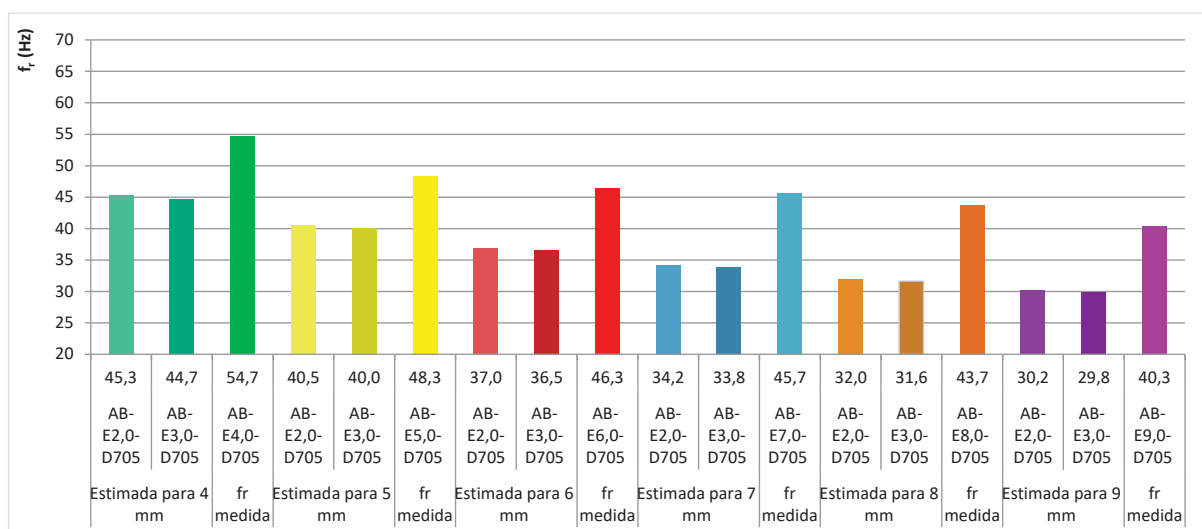
resultar em um desempenho inferior quando comparada a uma composição idêntica, porém formada por uma camada única.

Esta diferença entre o modelo teórico e dados obtidos experimentalmente indicam que provavelmente a simples sobreposição entre camadas de material resiliente provocam uma descontinuidade vibracional entre cada camada, devido à ausência de ligação estrutural interna entre cada camada. Neste cenário, apenas o atrito entre camadas adjacentes, auxiliado pela presença da massa de carregamento e peso próprio de cada camada, é responsável pela transferência de energia vibracional entre as camadas.

Sendo assim, tal comparação busca avaliar e indicar que os resultados obtidos na caracterização experimental de composições de aglomerado de borracha reciclada compostas por mais de uma camada tendem a subestimar o desempenho do material caso fosse formado por uma camada única, demonstrando ineficiência na simples sobreposição de camadas em relação ao potencial do material.

Acrescentando a tal discussão, na Figura 35 estão presentes os resultados de frequência de ressonância de sistemas compostos por mais de uma camada, e a frequência de ressonância estimada a partir dos resultados obtidos experimentalmente nas composições de camada individual (2,0 e 3,0 mm de espessura), servindo como referência para comparação, com base na Equação 24, dada por Schiavi *et al.* (2007).

Figura 35 – Frequência de ressonância medida e estimada a partir de camadas individuais



Fonte: Elaborado pelo autor

De forma análoga à análise anterior, os dados presentes na Figura 35 indicam que a frequência de ressonância dos sistemas formados por mais de uma camada de material resiliente deveria ser teoricamente inferior à verificada experimentalmente. Para todas as seis composições formadas por mais de uma camada, a frequência de ressonância estimada a partir das camadas individuais é bastante similar, demonstrando concordância do modelo teórico utilizando os dados das composições de camada individual (2,0 e 3,0 mm de espessura).

Ainda, não foi verificado nenhum comportamento que pudesse sugerir o impacto da quantidade de camadas sobrepostas no grau de diferença entre o modelo teórico e os resultados obtidos experimentalmente. Apesar disto, com ligeira variação entre as composições, a frequência de ressonância teórica das composições deveria se posicionar na ordem de 10 Hz abaixo da frequência de ressonância verificada experimentalmente nas composições formadas por mais de uma camada resiliente. Tal fato, independentemente da quantidade de camadas sobrepostas, indica uma dependência da espessura na frequência de ressonância dos sistemas obtida experimentalmente e calculada a partir da teoria quando camadas de aglomerado de borracha são justapostas umas sobre as outras.

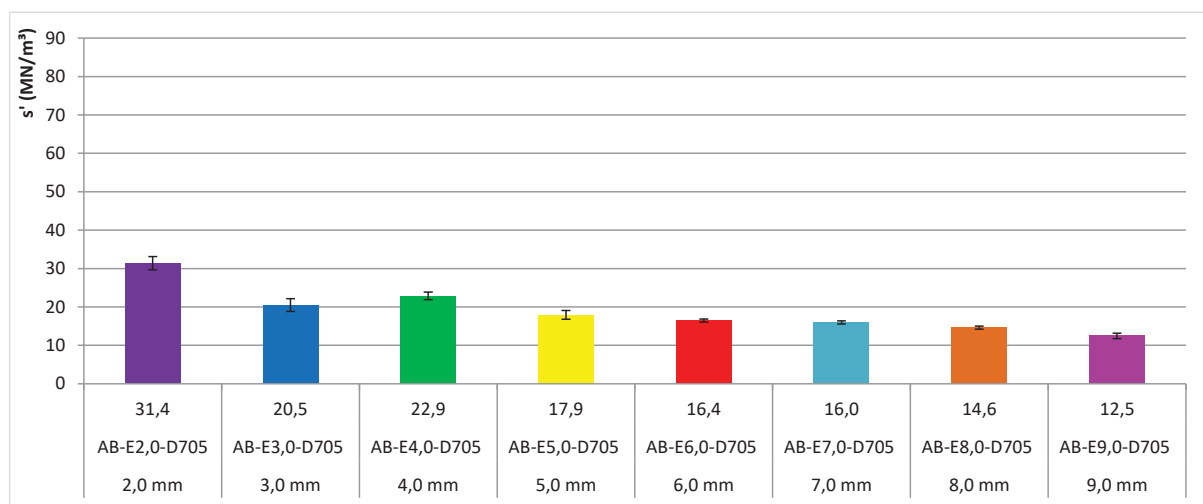
Desta forma, os resultados obtidos experimentalmente indicam que não há aumento na capacidade de redução vibracional de forma eficiente quando da simples sobreposição de camadas de aglomerado de borracha.

Por fim, na Figura 36 está presente a rigidez dinâmica de cada uma das composições formada por mantas de aglomerado de borracha de mesma densidade, calculada a partir dos resultados dos ensaios experimentais de frequência de ressonância.

Como uma consequência do comportamento verificado na análise da frequência de ressonância obtida experimentalmente dos sistemas que contém as composições de aglomerado de borracha reciclada, a rigidez dinâmica calculada indica melhoria de desempenho com o aumento da espessura total da camada resiliente.

Neste caso, a rigidez dinâmica das composições variou de 12,5 a 31,4 MN/m³, aumentando com a redução da espessura, mas com um comportamento contrário ao esperado para a composição AB-E4,0-D705, provavelmente causado pelas incertezas promovidas pela simples sobreposição das camadas de aglomerado de borracha no teste experimental.

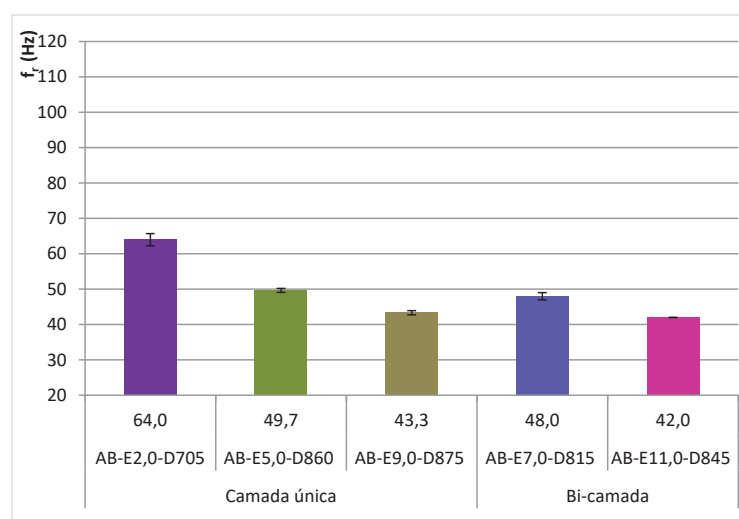
Figura 36 – Rigidez dinâmica de composições com mesma densidade



Fonte: Elaborado pelo autor

Em paralelo, analisando as composições formadas por mantas de densidades e espessuras diferentes, na Figura 37 está presente a frequência de ressonância obtida experimentalmente para composições de camada individual e com duas camadas, incluindo a composição AB-E2,0-D705, analisada anteriormente, que foi incorporada para avaliação.

Figura 37 – Frequência de ressonância dos sistemas com composições de densidade e espessura diferentes



Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio dos resultados obtidos experimentalmente é possível verificar que o acréscimo de espessura, apesar de não ser a única variável alterada (amostras AB-

E5,0-D860 e AB-E9,0-D875 possuem uma densidade aparente maior), resultou em uma redução na frequência de ressonância.

Em termos da densidade das amostras, comparando a amostra AB-E5,0-D860 (camada individual) com a amostra AB-E5,0-D705 (composta por duas camadas), a frequência de ressonância do sistema foi de 49,7 e 48,3 Hz, respectivamente, indicando uma baixa representatividade da diferença de 155 kg/m^3 de densidade aparente entre as composições. O mesmo comportamento, atrelado à densidade aparente, pode ser verificado comparando a amostra AB-E9,0-D705 (composta por três camadas) com a AB-E9,0-D875 (camada individual), com frequências de ressonância do sistema de 40,3 e 43,3 Hz, respectivamente, com uma diferença de 170 kg/m^3 de densidade aparente, demonstrando uma baixa representatividade da densidade das composições na frequência de ressonância para a faixa analisada.

Em termos do acréscimo de uma camada de manta da composição AB-E2,0-D705 às camadas individuais AB-E5,0-D705 e AB-E9,0-D875, a redução na frequência de ressonância não foi substancial, sendo de 1,7 e 1,3 Hz, respectivamente. Neste caso, de forma análoga à discussão quando da avaliação prévia de composições formadas por mais de uma camada, era esperada uma redução maior da frequência de ressonância do sistema com a adição de mais uma camada. A previsão, baseada em Weaver, Timoshenko e Young (1991), Ram (2002), Yang (2002), Sem e Kujur (2018), e Bies *et al.* (2023) por meio da Equação 12, era de uma redução em torno de 9 e 6 Hz, respectivamente para as amostras AB-E7,0-E815 e AB-E11,0-D845, a mais do que a verificada experimentalmente, evidenciando a perda de eficiência no amortecimento vibracional quando da simples sobreposição de camadas de aglomerado de borracha.

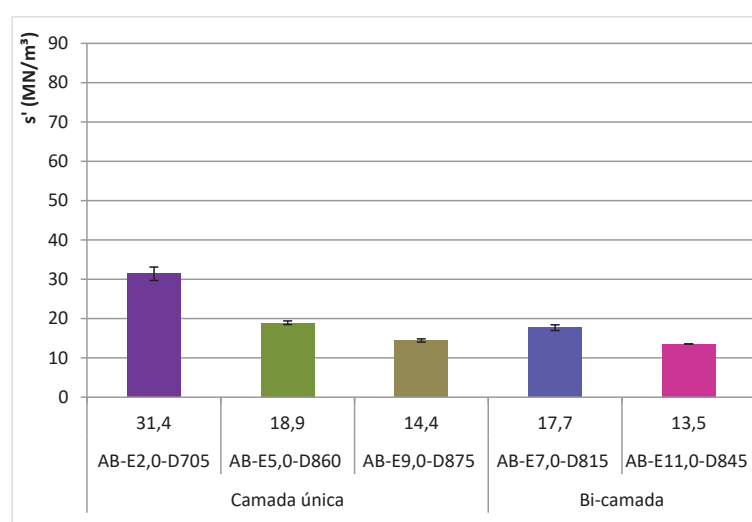
Determinada a partir da frequência de ressonância do sistema de cada composição, obtida experimentalmente, a rigidez dinâmica das amostras de aglomerado de borracha reciclada de diferentes espessuras e densidades está presente na Figura 38.

Seguindo o mesmo comportamento evidenciado na análise da frequência de ressonância, obtida experimentalmente, das composições de diferente espessura e densidade, o aumento da espessura da manta de borracha reciclada resultou em redução da rigidez dinâmica.

Conforme análise realizada na Figura 37, quando comparadas as composições AB-E5,0-D860 e AB-E9,0-D875, além das amostras AB-E7,0-D815 e AB-E11,0-D845,

com composições de espessura equivalente e densidade aparente de 705 kg/m^3 , é evidente que frequências de ressonância ligeiramente superiores resultariam em uma rigidez dinâmica também superior. Isto indica que, apesar da perda de eficiência proveniente da simples sobreposição de camadas para formação de composições de maior espessura na capacidade de amortecimento, composições de aglomerado de borracha reciclada de menor densidade, dentro da faixa de amostras analisada, tendem a obter uma menor rigidez dinâmica.

Figura 38 – Rigidez dinâmica de composições com densidade e espessura diferentes



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar da consideração de tais fatores, as composições obtiveram resultados de rigidez dinâmica equivalentes a materiais de uso consagrado no mercado, como lãs minerais e sintéticas, espumas e cortiça com espessura similar, conforme estudo de Caniato *et al.* (2016), e bastante similares ao obtido por García-Cobos e Maderuelo-Sanz (2022), com avaliação de aglomerados de borracha de espessura e densidade similar, indicando concordância no método experimental de caracterização.

Por fim, de forma a promover a avaliação da capacidade de amortecimento das composições de aglomerado de borracha, na Tabela 28 estão os resultados de relação de amortecimento, fator de perda, fator de qualidade e módulo de elasticidade dinâmico calculados a partir das medições da frequência de ressonância dos sistemas que continham as amostras.

Tabela 28 – Capacidade de amortecimento e módulo de elasticidade dinâmico dos aglomerados de borracha

Nomenclatura	ζ	η	Q	E_{din} (MPa)
AB-E2,0-D705	0,12	0,25	4,26	0,07
AB-E3,0-D705	0,09	0,19	5,30	0,07
AB-E4,0-D705	0,10	0,19	5,15	0,10
AB-E5,0-D705	0,10	0,20	5,01	0,10
AB-E6,0-D705	0,08	0,17	5,90	0,11
AB-E7,0-D705	0,09	0,18	5,69	0,12
AB-E8,0-D705	0,09	0,18	5,69	0,13
AB-E9,0-D705	0,09	0,19	5,41	0,12
AB-E5,0-D860	0,10	0,19	5,39	0,10
AB-E9,0-D875	0,10	0,20	5,08	0,13
AB-E7,0-D815	0,09	0,18	5,45	0,13
AB-E11,0-D845	0,09	0,18	5,44	0,15

Legenda – ζ : relação de amortecimento; η : fator de perda; Q: fator de qualidade; E_{din} : módulo de elasticidade dinâmico.

Fonte: Elaborado pelo autor

Em termos da relação de amortecimento, que busca retratar a largura da faixa de frequências vicinais à frequência de ressonância em que o material é eficiente no amortecimento de vibrações, fica claro um comportamento similar entre as composições de aglomerado de borracha, com valores variando de 0,09 a 0,12, sem identificação de um comportamento dependente de características físicas como espessura ou densidade aparente.

Considerando o fator de perda, que representa a quantidade de energia vibracional que é convertida em calor, seguindo o comportamento da relação de amortecimento, os resultados variaram entre 0,17 e 0,25, sem uma dependência nas propriedades físicas das composições. De forma comparativa em composições de aglomerado de borracha, os resultados de fator de perda são similares, mas ligeiramente inferiores, aos obtidos por García-Cobos e Maderuelo-Sanz (2022), e substancialmente menores que os obtidos por Maderuelo-Sanz, Martín-Castizo e Vílchez-Gómez (2011), indicando uma menor eficiência das composições de aglomerado de borracha analisadas nesta pesquisa.

De forma inversa ao fator de perda, o fator de qualidade busca indicar a eficiência do material resiliente em converter a energia vibracional em calor, sendo

que quanto menor seu valor melhor é a sua eficiência. Neste caso, para as composições analisadas, o fator de qualidade, que segue o mesmo comportamento do fator de perda, ficou abaixo de 5,90 em todas as amostras, sendo similar aos obtidos por García-Cobos e Maderuelo-Sanz (2022) em composições equivalentes de aglomerado de borracha.

Já em termos do módulo de elasticidade dinâmico, resultados mais baixos indicam melhor capacidade do material em se deformar quando submetido a ondas vibratórias advindas de uma solicitação externa. No caso das composições analisadas, o módulo de elasticidade dinâmico aumentou com o aumento da espessura de cada composição, ficando entre 0,07 e 0,15 MPa. De forma comparativa, os resultados são validados pelos obtidos no estudo de García-Cobos e Maderuelo-Sanz (2022), com valores mais baixos.

De forma resumida, apesar da inconsistência entre o modelo teórico e experimental, causada pela simples sobreposição das camadas, a rigidez dinâmica das composições de aglomerado de borracha reciclada indica um bom desempenho do material, equiparando-se a outros materiais com espessura similar, como lãs minerais (rocha e vidro) e sintéticas, espumas poliméricas e cortiça, conforme Hopkins (2007), Schiavi et al. (2007) e Arenas e Sepulveda (2022). Tal comparação demonstra que as mantas de aglomerado de borracha reciclada possuem potencial para atender às demandas do mercado quando utilizadas sob pisos flutuantes, agregando desempenho acústico com a recircularidade dos materiais.

4.3 REDUÇÃO AOS SONS DE IMPACTO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO

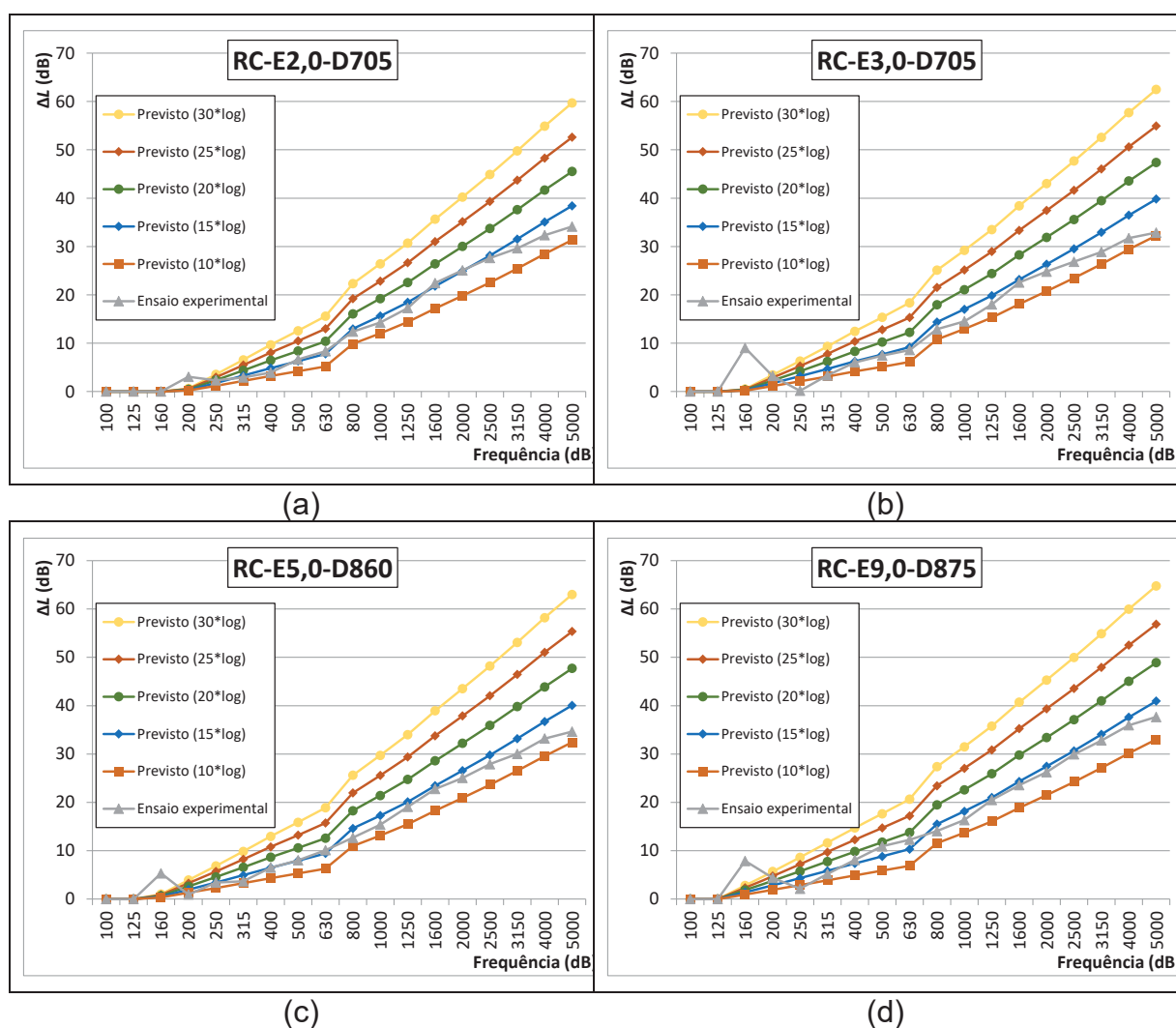
Nesta sessão estão expostos os resultados referentes aos ensaios de caracterização experimental e modelo de previsão das propriedades acústicas do revestimento compósito em condição presente e após carregamentos prolongados.

Os dados foram selecionados de forma a facilitar a avaliação das diferentes composições, estando expressos a seguir, porém, cabe ressaltar que os valores completos estão presentes no “APÊNDICE B – DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERADOS DE BORRACHA”.

4.3.1 Calibração do modelo teórico de previsão

A partir da necessidade de calibração do modelo teórico proposto para previsão do comportamento do sistema de revestimento composto desenvolvido, na Figura 39 está presente a redução do nível de pressão sonora de impacto normalizado, por banda de frequências, obtida experimentalmente e estimada com diferentes taxas de aumento de desempenho para as composições de camada individual.

Figura 39 – Comparativo entre os métodos de previsão e resultados experimentais frente ao ΔL por bandas de frequência da amostra: (a) RC-E2,0-D705, (b) RC-E3,0-D705, (c) RC-E5,0-D860, e (d) RC-E9,0-D875



Fonte: Elaborado pelo autor

De forma gráfica, a partir da redução dos níveis de pressão sonora de impacto obtida experimentalmente, fica evidente que o método de previsão que mais se assemelha graficamente é o que considera um aumento na capacidade de redução

dos sons de impacto de 15 decibéis com o aumento na frequência com um fator de dez. Neste caso, tal modelo de previsão possui semelhança com os resultados experimentais em grande parte das bandas de frequência analisadas, salvo nas bandas de altas frequências e na proximidade da frequência natural do revestimento compósito.

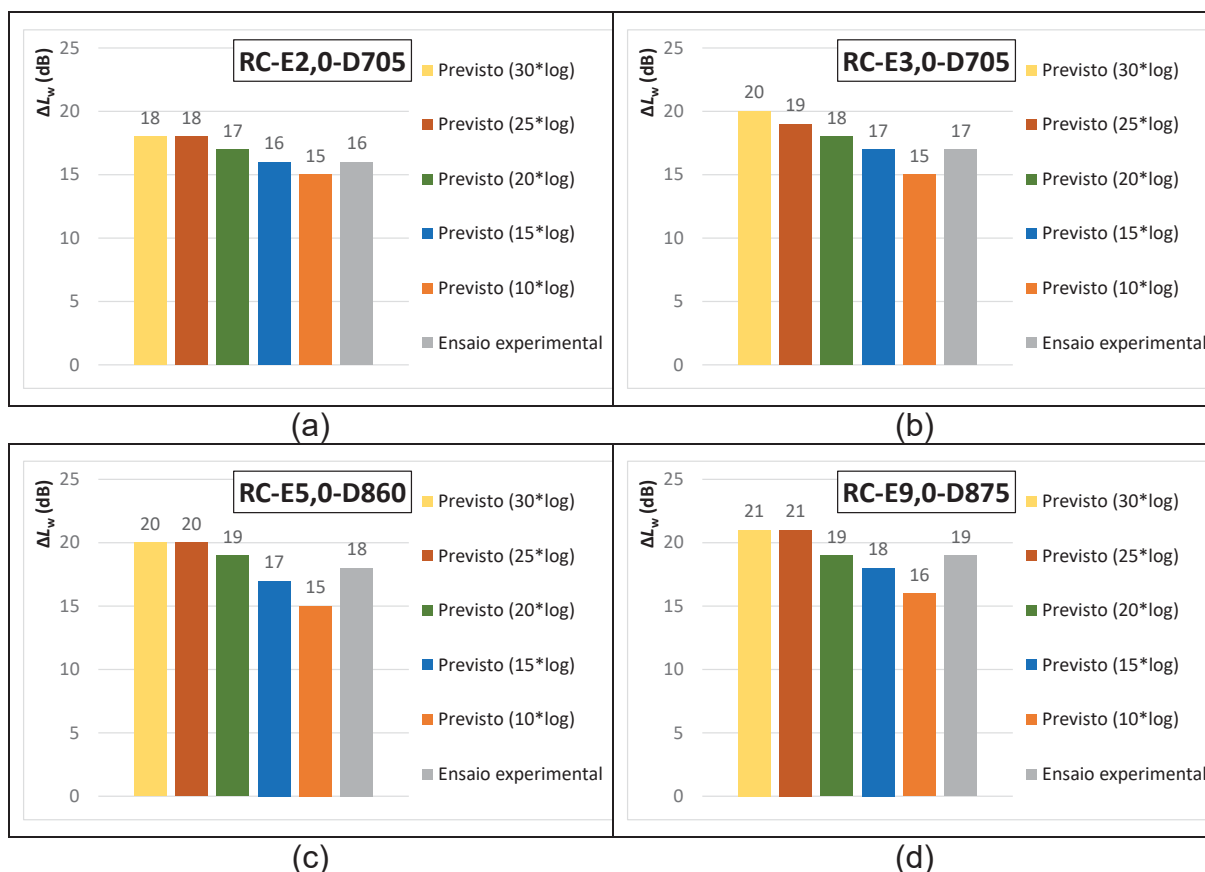
As demais composições de modelo de previsão, para as amostras analisadas, tendem a superestimar a capacidade de desempenho do material, incluindo a expectativa de aumento de 30 decibéis com o aumento na frequência com um fator de dez proposta pela norma NBR ISO 12354-2 (ABNT, 2025). O inverso é verificado quando do uso de uma estimativa de ganho de desempenho na razão de 10 decibéis com o aumento na frequência com um fator de dez.

No caso do modelo de previsão com maior semelhança gráfica com os resultados obtidos experimentalmente, quando considerada a composição RC-E2,0-D705 o coeficiente de correlação r de Pearson foi de 1,00, indicando uma perfeita relação linear entre o modelo teórico e as medições. O mesmo cenário é confirmado pelos resultados das composições RC-E3,0-D705, RC-E5,0-D860 e RC-E9,0-D875, com coeficientes r de Pearson de 0,98, 0,99 e 0,99, respectivamente, indicando uma relação forte.

De modo a complementar a análise do modelo de previsão que melhor retrata o comportamento real dos revestimentos compósitos analisados, na Figura 40 está presente uma comparação da redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado estimada e obtida experimentalmente para as composições de camada individual.

Como um produto da análise por bandas de frequências, o comportamento da redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado estimada, em comparação aos valores medidos experimentalmente, indica que os diferentes modelos de previsão tendem a superestimar ou subestimar o desempenho do sistema de revestimento. Neste caso, avaliando o modelo com melhor correlação na análise de frequências (consideração de um aumento de 15 decibéis na capacidade de redução dos níveis de pressão sonora de impacto com o aumento na frequência com um fator de dez), sua assertividade não foi tão alta quando da avaliação dos resultados ponderados.

Figura 40 – Comparativo entre os métodos de previsão e resultados experimentais frente ao ΔL_w da amostra: (a) RC-E2,0-D705, (b) RC-E3,0-D705, (c) RC-E5,0-D860, e (d) RC-E9,0-D875



Fonte: Elaborado pelo autor

Neste caso, o modelo supracitado resultou em valores de redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado idênticos com os verificados experimentalmente para as amostras RC-E2,0-D705 e RC-E3,0-D705, demonstrando perfeita correlação. Considerando os resultados obtidos nas composições RC-E5,0-D860 e RC-E9,0-D875, o modelo de previsão subestimou a redução dos níveis de pressão sonora de impacto ponderado em um decibel.

Tal diferença pode ser explicada pela redução nos níveis de pressão sonora de impacto normalizado na banda de frequências de 160 Hz, na qual o resultado experimental indicou um maior desempenho do revestimento compósito do que foi estimado pelo modelo de previsão, influenciando no somatório de descartes preconizados pela norma ISO 717-2 (ISO, 2020a) e alterando o resultado em um decibel. Pela proximidade desta banda de frequências (160 Hz) da frequência natural das composições, conforme Hopkins (2007), tal diferença pode ser advinda das

incertezas de medição agregadas a esta faixa de bandas de frequência adjacentes à frequência natural, que usualmente geram mudanças positivas ou negativas.

Desta forma, considerando tais pontos, o modelo de previsão com melhor correlação com os resultados obtidos experimentalmente é o caracterizado por uma expectativa de aumento da redução dos níveis de pressão sonora de impacto com uma razão de 15 decibéis com o aumento na frequência com um fator de dez. Tal modelo é utilizado para estimativa do comportamento de todos os modelos de previsão na condição presente e futura de carregamento, sendo representado pela Equação 99 para frequências até a frequência limite e pela Equação 100 para frequências acima da frequência limite.

$$\Delta L = 15 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) \quad \text{Equação 99}$$

$$\Delta L = 15 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) + 10 \log \left[1 + \left(\frac{2\pi f m_t}{2,3\rho c_L h^2} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 100}$$

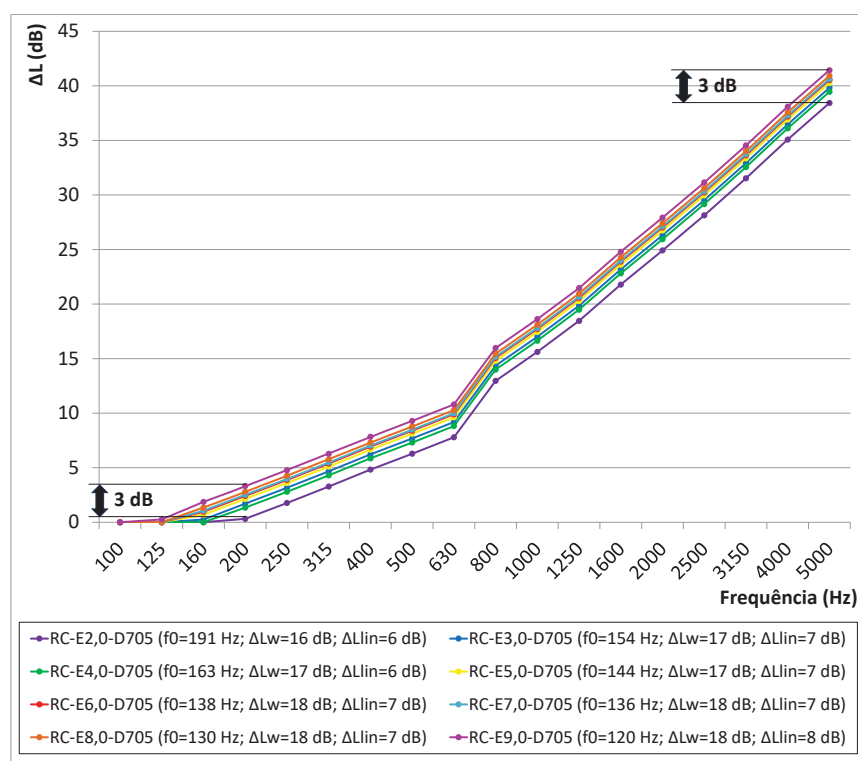
4.3.2 Capacidade de redução dos níveis de pressão sonora de impacto

A partir da calibração do modelo de previsão, baseado na determinação experimental da redução dos níveis de pressão sonora de impacto de composições formadas por camada individual de borracha reciclada, a estimativa da capacidade de redução dos sons de impacto foi determinada para as demais composições. Neste caso, na Figura 41 está presente a redução dos níveis de pressão sonora previstos para as composições de mesma densidade.

Primeiramente, por meio dos resultados presentes na Figura 41, é possível verificar a influência da rigidez dinâmica na frequência natural dos revestimentos compósitos avaliados, sendo visível o impacto do aumento da espessura da camada resiliente, reduzindo a frequência natural do sistema. Neste caso, como evidenciado no gráfico, uma frequência natural mais baixa possibilita uma maior abrangência de frequências nas quais o sistema de revestimento compósito é capaz de atenuar os sons de impacto e promover uma melhoria de desempenho. Tal ocorrência pode ser verificada quando comparada a amostra RC-E9,0-D705, a qual possui valores de ΔL positivos a partir da banda de frequências de 125 Hz, com a amostra RC-E2,0-D705,

com resultados de ΔL desprezíveis até a banda de frequências de 200 Hz, representando um intervalo de duas bandas centrais de um terço de oitava.

Figura 41 – Redução dos níveis de pressão sonora previstos para as composições de mesma densidade



Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico da Figura 41 indica, ainda, duas taxas de expectativa de acréscimo da redução dos níveis de pressão sonora de impacto com o aumento das frequências, resultantes da Equação 99 e Equação 100. Tais diferenças são provenientes da consideração da impedância das solicitações de impacto pela menor rigidez e maior capacidade de dissipação interna da energia da camada leve que compõe a superfície flutuante dos revestimentos compósitos, conforme Cremer, Hackl e Petersson (2005), Hopkins (2007) e Vigran (2008).

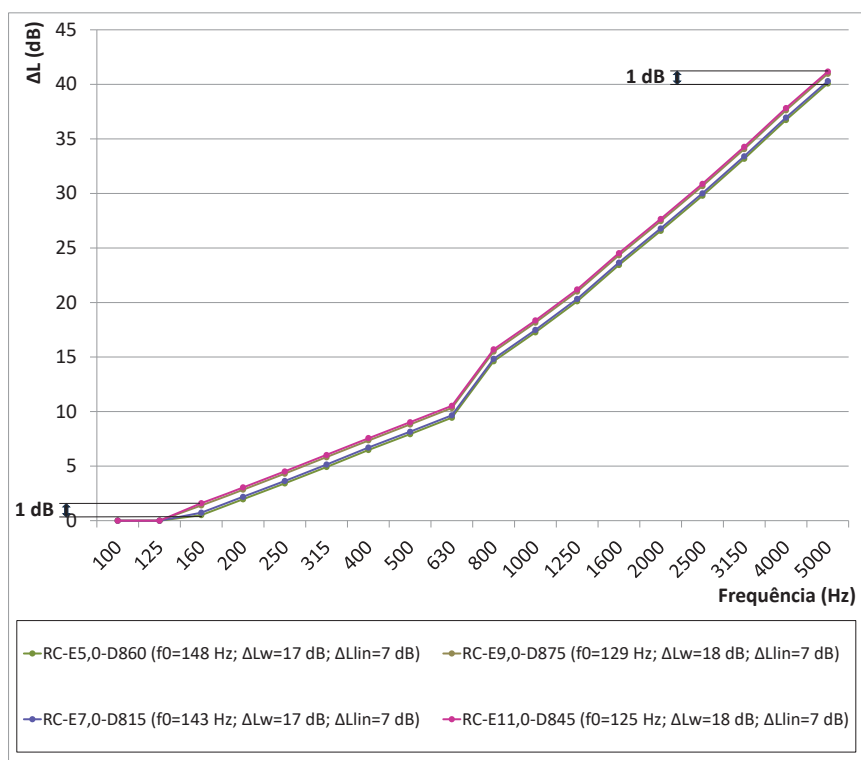
A linha de modificação da taxa esperada de aumento da capacidade de redução dos sons de impacto é graficamente visível entre a banda central de frequências de 630 e 800 Hz, causada pela frequência limite, sendo determinada a partir da interação da impedância da camada flutuante do revestimento compósito e os martelos da máquina de impactos. Pelo fato da camada flutuante ser a mesma para todas as composições de revestimento compósito, a frequência limite é a mesma para

todas as amostras ($f_{\text{limit}} = 701 \text{ Hz}$), caracterizando um mesmo comportamento espectral para as composições avaliadas.

Ainda, em relação à previsão da redução dos níveis de pressão sonora de impacto, um aumento na capacidade de atenuação é verificado com o acréscimo de espessura da camada resiliente, ocorrendo de forma sutil pela proximidade da espessura das composições (intervalos de 1 mm), mas resultando em uma diferença de 3 dB entre as composições extremas em termos de espessura.

Na mesma senda, na Figura 42 está presente a redução dos níveis de pressão sonora de impacto, estimada a partir do modelo proposto, das composições de revestimento compósito de piso de diferente densidade.

Figura 42 – Redução dos níveis de pressão sonora previstos para as composições de densidades diferentes



Fonte: Elaborado pelo autor

Em termos da frequência natural das composições de camada única (RC-E5,0-D860 e RC-E9,0-D875), seu valor é coerente com o resultado das composições de mesma espessura e menor densidade, sendo sutilmente mais elevada. Tal comportamento é reflexo da reduzida, porém mais elevada, rigidez advinda de uma maior densidade aparente. Ainda, quando da adição da camada de AB-E2,0-D705

nas composições de camada individual, a frequência natural do sistema foi reduzida em torno de 5 Hz.

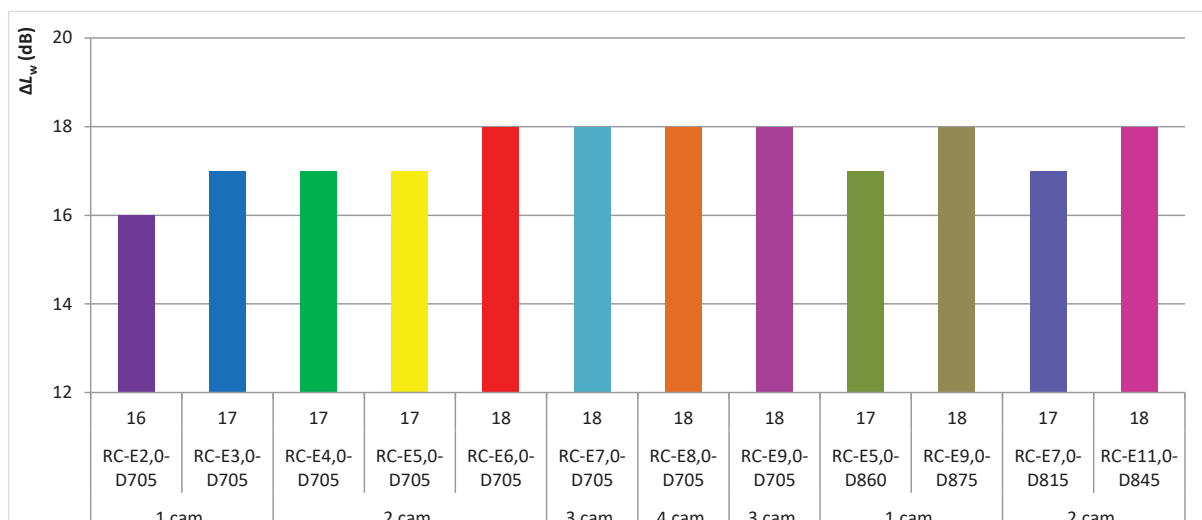
Em consonância com o comportamento verificado nas composições com densidade aparente de 705 kg/m^3 , as amostras presentes na Figura 42 apresentam um espectro de redução dos níveis de pressão sonora de impacto com duas taxas de aumento com as frequências. Tais taxas de carregamento diferentes são produto da função da consideração da impedância das solicitações de impacto pela menor rigidez e maior capacidade de dissipação interna da energia da camada leve que compõe a superfície flutuante dos revestimentos compósitos, conforme Cremer, Hackl e Petersson (2005), Hopkins (2007) e Vigran (2008), e ocorrem em intervalos de frequência delimitados pela frequência limite da camada de caminhamento.

Em relação à capacidade de redução dos níveis de pressão sonora de impacto, os resultados das composições de camada única (RC-E5,0-D860 e RC-E9,0-D875) e de duas camadas (RC-E7,0-D860 e RC-E11,0-D875), possuem resultados similares às composições de mesma espessura e densidade de 705 kg/m^3 , evidenciando uma pequena influência da densidade. Para as quatro composições analisadas, valores positivos da redução dos sons de impacto são verificados a partir da banda de frequências de 160 Hz, aumentando até o patamar de 40 dB na banda de frequências de 5.000 Hz. Considerando os resultados, a amplitude foi de 1 dB entre as composições com características extremas (RC-E5,0-D860 e RC-E11,0-D875).

Por fim, de modo a possibilitar uma avaliação global da capacidade de redução dos sons de impacto de todas as composições de revestimento compósito avaliadas, na Figura 43 está presente a redução dos níveis de pressão sonora de impacto ponderado obtida a partir dos resultados estimados por banda de frequências, para cada composição.

A partir dos resultados de redução do nível de pressão sonora de impacto ponderado obtidos pelas composições de revestimento compósito analisadas, fica visível a baixa influência dos incrementos de espessura das camadas resilientes. A diferença na espessura da camada resiliente resultou em uma amplitude máxima de 2 dB na avaliação global do desempenho do sistema, em termos do ΔL_w , evidenciando à similaridade das composições. Todavia, apesar da baixa diferença entre as composições, o comportamento verificado no espectro de cada composição culminou em maiores resultados ponderados com o aumento da espessura das composições.

Figura 43 – Redução dos níveis de pressão sonora ponderados previstos para todas as composições



Fonte: Elaborado pelo autor

As composições de revestimento compósito produzidas com manta de aglomerado de borracha reciclada e piso de porcelanato possuem desempenho equivalente a sistemas flutuantes como compósitos cerâmicos e de cortiça, indicados por Patrício (2018) e Damtec (2021), e sistemas flutuantes pesados, como revestimento cerâmico aderido em laje de concreto sobre feltro ou cortiça, indicados por Patrício (2018).

Desta forma, o potencial do revestimento desenvolvido é considerável, agregando ao mercado mais uma opção de revestimento de piso que agrega a redução na transmissão dos sons de impacto com a recircularidade dos materiais, atingida pela reutilização de resíduos como matéria prima.

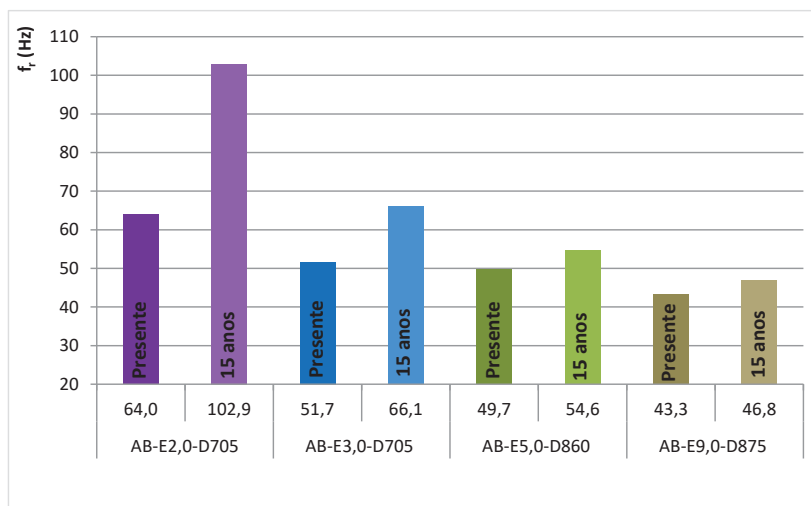
4.3.2 Conservação de desempenho sob carregamento prolongado

Como evidenciado por Hopkins (2007), a utilização de camadas elásticas (material resiliente) na composição de pisos flutuantes agrega desempenho, porém implica que esta necessite de resistência para suportar as cargas permanentes e de uso atuantes no sistema de piso ao longo do uso da edificação, ao mesmo tempo que deve manter a sua capacidade de isolamento aos sons de impacto.

Desta forma, de modo a verificar a manutenção do desempenho evidenciado no subitem anterior, as composições de camada única foram sujeitas ao ensaio de fluência à compressão, possibilitando a estimativa de um carregamento equivalente a

15 anos, estando presente na Figura 44 a frequência de ressonância das composições de aglomerado de borracha reciclada na condição atual e futura.

Figura 44 – Frequência de ressonância das composições (presente e futura)



Fonte: Elaborado pelo autor

Em termos da frequência de ressonância das composições, fica visível o aumento da frequência de ressonância estimada para carregamentos de 15 anos, ocorrendo em diferentes taxas entre as quatro composições.

A ocorrência de aumento na frequência de ressonância das composições era esperada, indo ao encontro de Caniato et al. (2016), que indicam que carregamentos prolongados causam modificações no arranjo da estrutura interna do material, impactando e prejudicando seu desempenho original a partir da redução de sua espessura. Tal redução da espessura, conforme esperado por Schiavi, Belli e Russo (2005) e Schiavi et al. (2007), resulta em redução da capacidade de amortecimento do sistema, uma vez que a rigidez dinâmica, produto da frequência de ressonância, é inversamente proporcional à espessura do material.

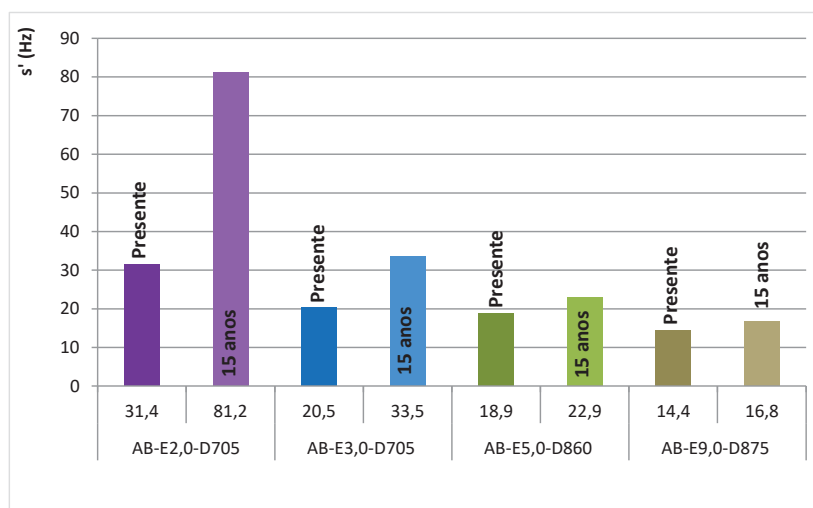
Neste caso, avaliando as quatro composições ensaiadas, estima-se que a composição AB-E2,0-D705 tenha um aumento de 39 Hz em sua frequência de ressonância após 15 anos de uso como camada resiliente em pisos flutuantes. Tal aumento na frequência de ressonância é menor na composição de mesma densidade e 1 mm mais espessa (AB-E3,0-D705), estando na ordem de 14 Hz. Esta diferença entre as composições de mesma densidade indica uma maior expectativa de perda de desempenho para a amostra AB-E2,0-D705, que pode ser explicada por sua menor

espessura, havendo menor capacidade de transferência do carregamento por sua estrutura interna.

No caso das composições de maior espessura e densidade, a estimativa do aumento da frequência de ressonância com o tempo foi muito menor, na ordem de 3 a 5 Hz, evidenciando uma maior resistência das composições a carregamentos prolongados. Este comportamento está provavelmente ligado a uma maior espessura da camada resiliente, atrelada a uma maior densidade, facilitando a transferência da solicitação, possibilitando menor deformação sob atuação do carregamento.

De forma análoga à análise da frequência de ressonância das composições, visando a avaliação da manutenção de desempenho, na Figura 45 estão presentes os resultados de rigidez dinâmica presente e estimada para carregamentos de 15 anos das composições analisadas.

Figura 45 – Rigidez dinâmica das composições (presente e futura)



Fonte: Elaborado pelo autor

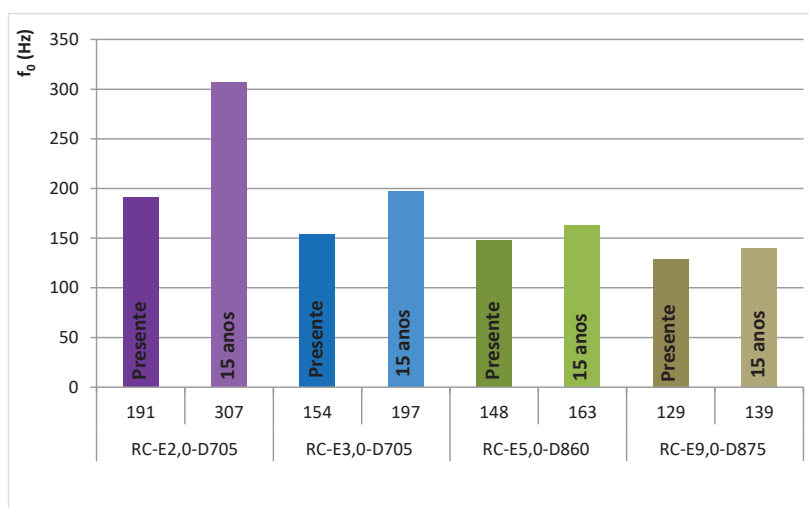
Como indicado na fundamentação teórica, a rigidez dinâmica de um material é inversamente proporcional a sua espessura, resultando em um aumento da rigidez dinâmica com a redução da espessura. Isto pode ocorrer de forma direta quando da ação de carregamento sobre o elemento resiliente, aumentando a sua pressão estática e, conseqüentemente, resultando em um acréscimo na velocidade de propagação de ondas vibracionais pelo material, reduzindo sua eficiência no amortecimento de vibrações (SCHIAVI; BELLÍ; RUSSO, 2005; SCHIAVI *et al.*, 2007; RINDEL, 2018).

Em termos da condição presente e estimada para 15 anos de uso em uma condição real, como produto da frequência de ressonância, a rigidez dinâmica das composições analisadas aumentou após o carregamento. Houve diferença na magnitude do impacto do carregamento prolongado na rigidez dinâmica, sendo mais acentuado quanto menor espessura e densidade a composição de aglomerado de borracha possuía.

No caso da composição AB-E2,0-D705 sua rigidez dinâmica é aproximadamente 2,5 vezes mais elevada após o carregamento de 15 anos do que inicialmente, indicando um provável impacto negativo no desempenho do material com o tempo, o que possivelmente será menos acentuado nas composições de maior densidade, que obtiveram menor redução de espessura com o tempo.

No âmbito da utilização das composições de borracha aglomerada reciclada em conjunto com a camada de caminhamento (porcelanato), formando o revestimento compósito, a frequência natural de vibração do sistema é determinante para a eficiência do sistema dentro da gama de frequências presente na acústica de edificações. Desta forma, na Figura 46 está presente a frequência natural de vibração dos revestimentos compósitos calculada para uma condição atual e futura, após um carregamento de 15 anos.

Figura 46 – Frequência natural dos revestimentos compósitos (presente e futura)



Fonte: Elaborado pelo autor

Avaliando a alteração na frequência natural de vibração dos sistemas de revestimentos compósitos, verifica-se que houve aumento da frequência natural em todas as quatro composições avaliadas, o que vai ao encontro do esperado, uma vez

que é produto da rigidez dinâmica, que aumentou após a estimativa de carregamento de 15 anos.

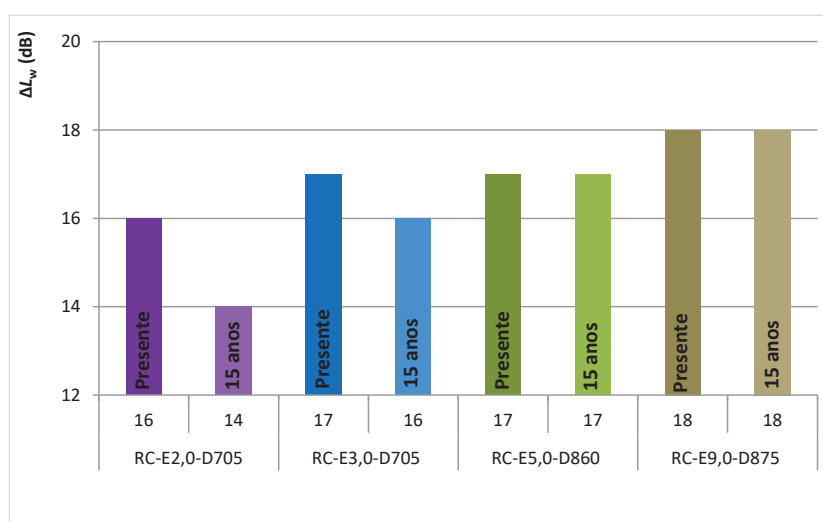
Seguindo o mesmo comportamento dos descritores anteriores, a maior variação, entre a condição presente e após um carregamento prolongado, foi evidenciada na composição RC-E2,0-D705. Neste caso, o aumento na frequência natural da composição RC-E2,0-D705 foi suficiente para reduzir a eficiência do sistema de revestimento compósito em duas bandas centrais de frequências de um terço de oitava. Apesar do efeito negativo, a perda de desempenho advinda do carregamento foi menos agravante na composição RC-E3,0-D705 e RC-E5,0-D860, resultando na perda de atuação na atenuação dos sons de impacto em apenas uma banda central de frequências de um terço de oitava.

Para a composição RC-E9,0-D875 não houve perda na faixa de frequências nas quais o sistema possui eficiência para atenuação dos sons de impacto, preservando sua faixa operativa de frequências durante períodos de carregamento equivalentes a 15 anos.

Por fim, da mesma forma da análise da redução dos níveis de pressão sonora de impacto por banda de frequências na condição atual, presente na Figura 41 e Figura 42, o espectro de cada uma das composições após o carregamento estimado de 15 anos permaneceu com o mesmo comportamento, positivo e crescente a partir da frequência natural do sistema, possuindo duas taxas de aumento na capacidade de melhora no isolamento. Todavia, conforme esperado pelo aumento da rigidez dinâmica, houve redução na capacidade de redução dos sons de impacto em todas as bandas de frequências, sendo mais expressiva nas composições de menor espessura e densidade. Houve, ainda, perda de eficiência no domínio das frequências, em virtude do aumento da frequência natural.

Os gráficos da redução dos níveis de pressão sonora de impacto por banda de frequências, atuais e futuros, estão presentes na íntegra no “APÊNDICE B – DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERADOS DE BORRACHA”.

De modo a facilitar a visualização da perda de eficiência com a atuação do carregamento prolongado (15 anos), na Figura 47 estão expostos os resultados de redução dos níveis de pressão sonora de impacto ponderado das composições em condição atual e após o carregamento de 15 anos.

Figura 47 – ΔL_w dos revestimentos compósitos (presente e futuro)

Fonte: Elaborado pelo autor

Em termos da capacidade global da redução dos sons de impacto, por meio do descritor ΔL_w , a influência do carregamento prolongado estimado para quinze anos foi negativa, conforme o esperado pelas avaliações anteriores, reduzindo o desempenho de algumas composições com o tempo. Tal redução foi mais significativa na composição RC-E2,0-D705, havendo uma perda de 2 dB na sua redução dos níveis de pressão sonora de impacto ponderado. Uma perda inferior, de 1 dB, foi registrada pela composição RC-E3,0-D705, e o carregamento não teve influência na redução dos níveis de pressão sonora de impacto ponderado das composições RC-E5,0-D860 e RC-E9,0-D875.

Desta forma, a partir da perda da capacidade de isolamento dos sons de impacto com a ação de carregamentos prolongados sobre o revestimento composto, é possível realizar a seleção da composição que seja mais atrativa em termos da sua capacidade de desempenho original, mas também da sua capacidade de manutenção deste desempenho com o tempo.

Tal perda da capacidade de isolamento dos sons de impacto pode resultar em descontentamento por parte dos usuários com o passar do tempo de uso das unidades, sendo interessante a avaliação de um cenário prático de uso. Neste caso, a avaliação da perda de nível de desempenho, no domínio do tempo, está presente no item subsequente.

4.4 DESEMPENHO AOS SONS DE IMPACTO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS PESADOS COM O USO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO

Conforme descrito no método da pesquisa, para avaliação do revestimento compósito aplicado em uma edificação hipotética, foi selecionada apenas uma composição de revestimento, sendo o critério de escolha balizado na composição que teve a maior perda de desempenho advinda do carregamento prolongado. Neste caso, a partir do ensaio de fluência à compressão e avaliações subsequentes, a composição que sofreu maior perda em sua capacidade de redução dos níveis de pressão sonora de impacto foi a RC-E2,0-D705, sendo então utilizada em todas as avaliações presentes neste item.

De forma a não tornar a avaliação extensa, neste item estão presentes os principais dados que caracterizam as situações analisadas, estando os dados restantes presentes no “APÊNDICE C – DADOS DA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS COM O USO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO”.

4.4.1 Previsão de desempenho sem revestimento

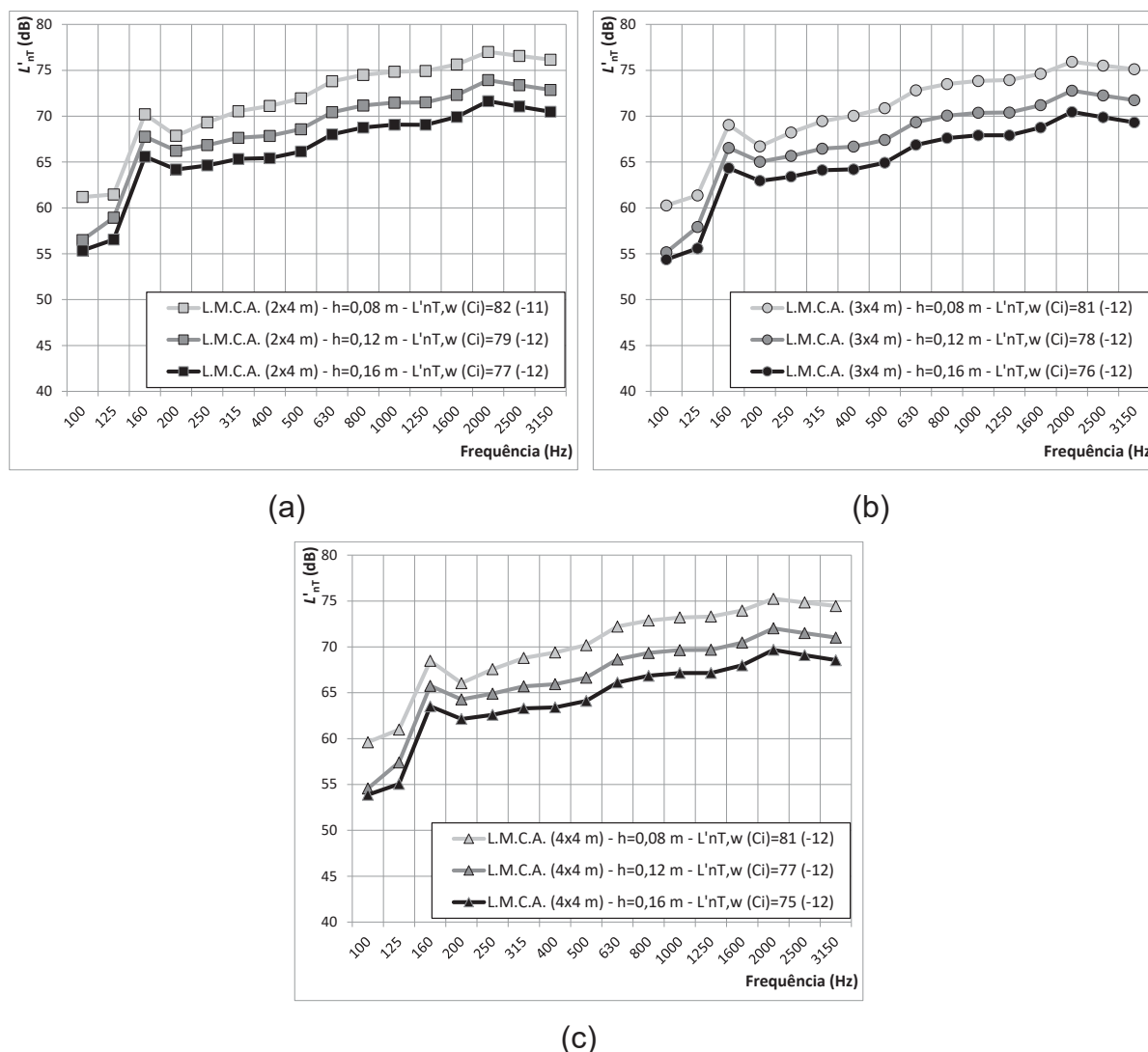
Primeiramente, de modo a verificar o comportamento dos níveis de pressão sonora de impacto padronizado das três composições de ambiente propostas, em conjunto com as três configurações de sistema de laje estrutural em concreto armado, na Figura 48 estão presentes os resultados calculados de nível de pressão sonora de impacto padronizado para as nove composições sem revestimento.

Analizando o espectro dos níveis de pressão sonora de impacto padronizado das nove configurações de ambiente com os sistemas estruturais de laje, são notáveis dois comportamentos distintos no domínio das frequências, estando a banda de frequências de 200 Hz no limite entre duas taxas de aumento do nível de pressão sonora de impacto com as frequências. Tal comportamento é atrelado à interação da *tapping machine* com a laje de piso e influência das transmissões indiretas entre a laje de piso e os dois ambientes.

Considerando a interação entre as propriedades físicas dos martelos da *tapping machine* e a impedância mecânica do sistema de laje, a duração do contato entre os martelos e a superfície da laje é alterada quando da modificação do sistema de laje de piso. Neste caso, ocorre uma mudança na quantidade de energia que é transferida

da fonte sonora de impacto para o sistema estrutural de piso em função da impedância mecânica do sistema de piso.

Figura 48 – L'_{nT} previsto dos sistemas estruturais sem revestimento: (a) DORM-2x4m, (b) DORM-3x4m, e (c) DORM-4x4m



Fonte: Elaborado pelo autor

Na mesma senda, outro componente de influência para o estabelecimento de espectros com tal comportamento é o fator de irradiação do sistema de laje, determinado pelas dimensões do ambiente e espessura do sistema de laje. Neste cenário, o aumento da espessura do sistema estrutural de laje ocasiona redução na frequência crítica do sistema de piso, influenciando no espectro de irradiação do sistema. É esperada uma maior irradiação em bandas de frequência na proximidade da frequência natural do sistema. Desta forma, fatores de irradiação elevados demonstram uma maior facilidade do sistema de piso em transferir a energia

vibracional estabelecida em sua estrutura para o campo sonoro ambiente inferior, prejudicando o isolamento contra os sons de impacto em virtude de maiores níveis de pressão sonora de impacto no ambiente inferior.

Considerando os sistemas de laje propostos, compostos pelo mesmo material (concreto armado), em que as únicas variáveis são as dimensões dos ambientes e a espessura dos sistemas estruturais de piso, conforme esperado pela teoria exposta por Hopkins (2007), a rigidez de contato da superfície do sistema de laje não possui influência entre as composições, uma vez que é caracterizada por particularidades intrínsecas do material (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson). Neste caso, a propriedade que possui influência no comportamento do sistema frente aos sons de impacto é a impedância mecânica do sistema de piso, obtida em função das constantes de densidade e velocidade de transmissão de ondas vibracionais do material e da variável espessura.

Desta forma, considerando os sistemas propostos, quanto maior é a espessura do sistema de piso maior é a sua impedância mecânica, reduzindo a força transmitida pelos martelos da *tapping machine* para o sistema estrutural de piso, gerando menores níveis sonoros de impacto no ambiente inferior.

Por fim, o comportamento por banda de frequências dos níveis de pressão sonora de impacto padronizado também é influenciado pelas transmissões indiretas, sendo fortemente ligadas à relação entre a capacidade de isolamento aos sons aéreos, em termos do índice de redução sonora, e da massa por unidade de área do elemento de partição direto (sistema de laje de piso) e elementos adjacentes (paredes), possuindo influências diferentes. Neste caso, considerando que o sistema de parede é padrão para todas as configurações de ambiente e é alterado apenas o sistema de laje (três espessuras), o aumento de espessura implica em maiores índices de redução sonora, que, quando comparados aos valores das paredes resultam em menores níveis de pressão sonora de impacto transmitidos pelos elementos de flanco (paredes).

Em contrapartida, considerando a interação da massa por unidade de área dos sistemas de laje e as paredes, configurações com lajes mais pesadas (com maior espessura) possuem maiores índices de redução de vibração entre o elemento direto e elemento de flanco (K_{ij}), resultando em uma maior diferença de nível de velocidade média entre o sistema de laje e as paredes ($D_{v,ij,situ}$). Sendo assim, maiores valores de

$D_{v,ij,situ}$, advindos de lajes mais espessas, auxiliam na redução dos níveis de pressão sonora de impacto padronizado.

Assim, através da interação entre a *tapping machine* e o sistema de laje, e da influência das características físicas do sistema de laje nas transmissões indiretas, é notável que nas três condições de ambientes analisados o aumento da espessura do sistema estrutural de piso resultou em redução nos níveis de pressão sonora padronizados por bandas de frequências e ponderados.

Acompanhando a análise de cada configuração de ambiente condicionada pela espessura dos sistemas de laje estrutural, na Figura 49 estão presentes os resultados de nível de pressão sonora de impacto padronizado setorizados por espessura do sistema de piso. Considerando os mesmos sistemas construtivos (paredes e piso), tais gráficos proporcionam a avaliação da influência das dimensões dos ambientes nos níveis de pressão sonora de impacto.

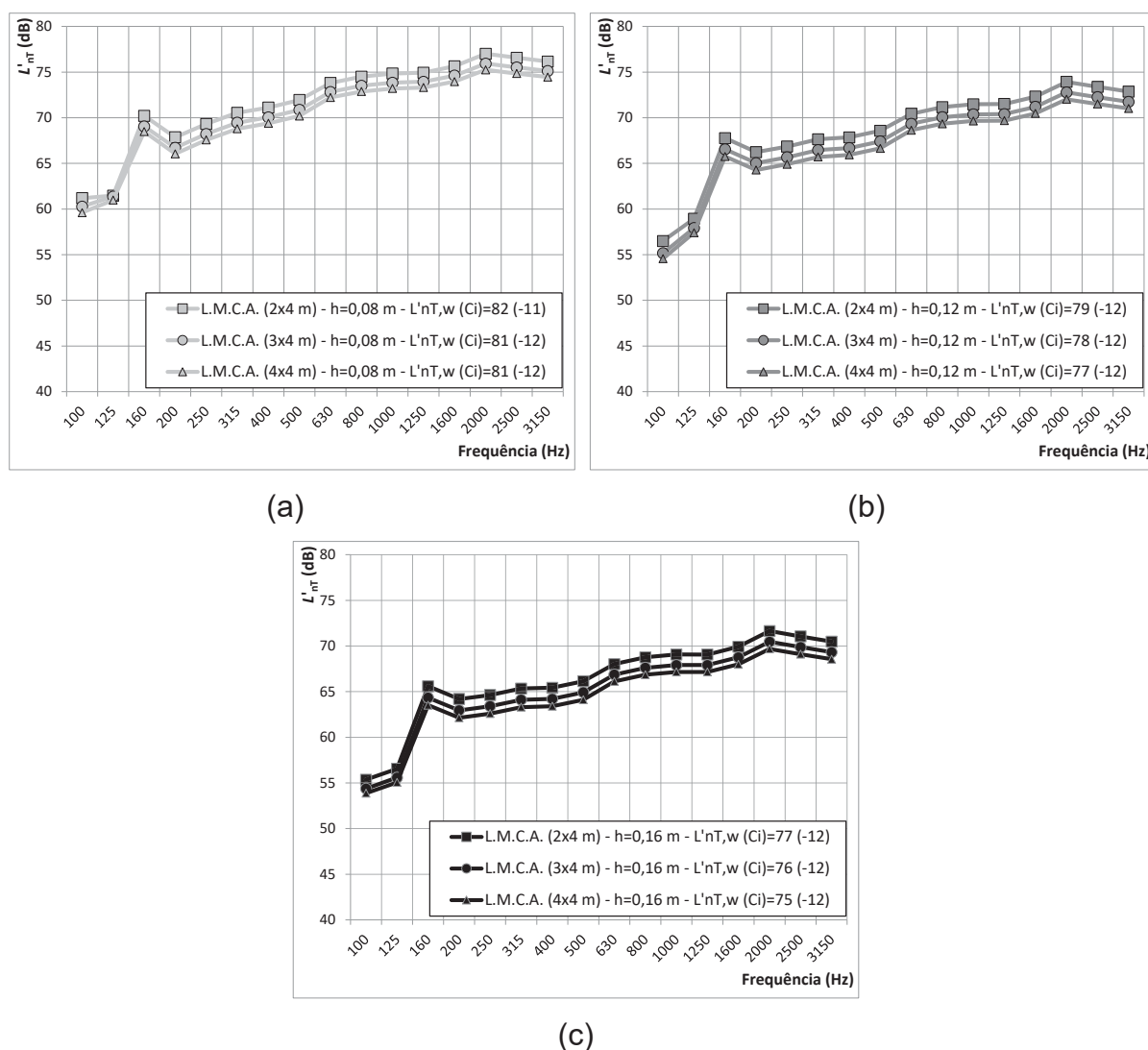
Baseado na teoria exposta por Hopkins (2007), as dimensões do sistema de laje de piso e, conseqüentemente, as dimensões de cada ambiente, em diferentes razões, acabam por influenciar diretamente nos níveis de pressão sonora de impacto padronizado. Na análise proposta, a espessura das lajes de piso é a mesma para cada cenário, variando apenas o comprimento e a largura do elemento e dos ambientes. Tal condição faz com que a quantidade de energia transferida pela *tapping machine* para o sistema de laje de piso seja a mesma para cada composição de espessura de laje. Isto ocorre pelo fato indicado na análise anterior, função da impedância mecânica do sistema de piso, influenciado por sua espessura.

Neste caso, a influência sobre os níveis de pressão sonora de impacto padronizado se dá pela largura e comprimento do sistema de laje, uma vez que a densidade modal do sistema de piso (N_1) aumenta quando suas dimensões são aumentadas. O acréscimo nas dimensões do ambiente também acarreta o aumento da densidade modal do ambiente receptor (N_2). Assim, de forma conjunta, ambos fatores aumentam a potência sonora transferida pelo sistema de piso ao ambiente receptor ($W_{net,12}$).

Todavia, apesar do acréscimo de dimensões do elemento de laje de piso e dos ambientes acarretar aumento da energia transferida pelo sistema estrutural para o ambiente receptor, tal aumento é muito baixo, aproximando-se de zero na maioria das bandas de frequências de interesse na acústica de edifícios, sendo reduzida com o aumento das frequências. Em bandas de baixa frequência, abaixo da frequência

crítica do sistema de piso, o fator de irradiação, condicionado pelas dimensões da laje, acaba até por reduzir a energia sonora transferida pelo sistema de piso ao ambiente receptor quando do incremento das dimensões.

Figura 49 – L'_{nT} previsto em função da configuração de ambiente para espessura da laje maciça de: (a) 8 cm, (b) 12 cm, e (c) 16 cm



Fonte: Elaborado pelo autor

Deste modo, fica evidente a baixa influência do comprimento e largura do elemento de laje de piso na quantidade de energia sonora transferida para o ambiente receptor. Neste caso, a contribuição principal na quantidade de energia estabelecida no ambiente receptor é função da alteração das dimensões e, consequentemente, volume do ambiente. Tal acréscimo de volume implica em um campo sonoro mais brando, o qual é excitado pela mesma quantidade de energia proveniente da *tapping*

machine, implicando no estabelecimento de níveis sonoros mais baixos com o aumento das dimensões do ambiente.

Assim, com sua parcela ínfima, o aumento da largura e comprimento de uma laje de piso ocasiona a transferência de maior energia sonora quando excitada com solicitações de impacto, e o acréscimo nas dimensões dos ambientes ocasiona aumento do campo sonoro, reduzindo consideravelmente a energia estabelecida no ambiente receptor. Tais fatores, cada qual com sua parcela e sentido de contribuição, acabam por resultar em menores níveis de pressão sonora de impacto quando do aumento das dimensões da laje de piso e do ambiente receptor.

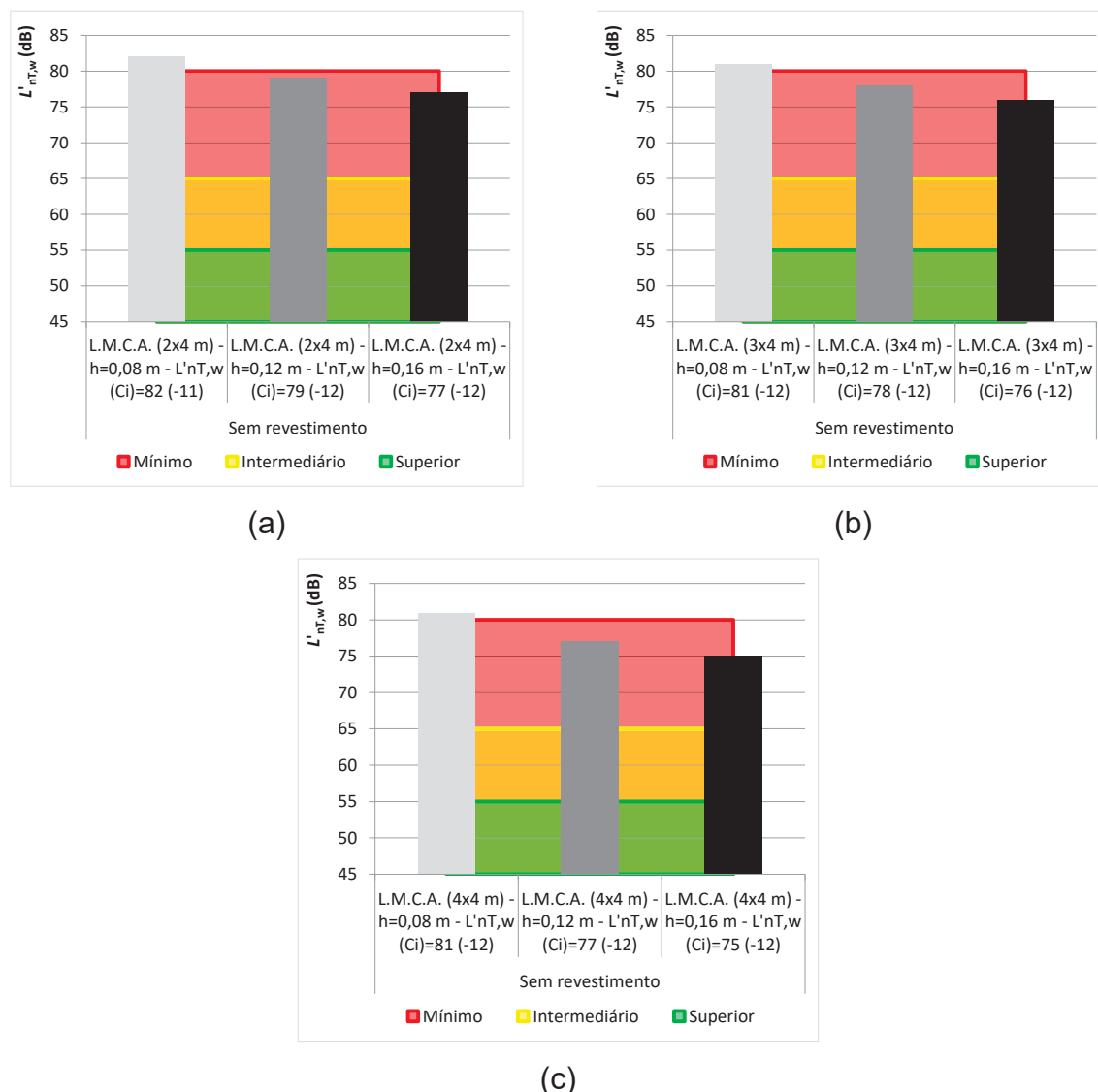
Desta forma, para uma mesma composição de laje estrutural de piso, sua capacidade de isolamento frente aos sons de impacto irá aumentar quando da sua aplicação em ambientes de maiores dimensões. Tal cenário é evidenciado nas três composições de laje de piso propostas (8, 12 e 16 cm de espessura), nas quais o aumento nas dimensões da laje e dos ambientes resultou na redução dos níveis de pressão sonora de impacto padronizado em todas as bandas de frequências e nos níveis de pressão sonora de impacto padronizado ponderados.

Por fim, de modo a avaliar a influência da espessura dos sistemas de laje de piso propostos no desempenho dos sistemas frente aos sons de impacto, na Figura 50 estão presentes os níveis de pressão sonora de impacto padronizado ponderado de cada composição, setorizados em função das dimensões da laje e do ambiente. A análise pretende avaliar o nível de desempenho atingido pelas diferentes composições de laje de piso quando utilizadas em ambientes de mesma configuração.

Em termos do nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado das composições de laje de piso (concreto armado maciço) e ambientes de mesmas dimensões, a variação de espessura dos sistemas de laje acarretou mudanças significativas. Neste caso, houve redução do $L'_{nT,w}$ quando do aumento da espessura da laje, conforme esperado pelas análises anteriores. O aumento da espessura de 8,0 cm para 16,0 cm resultou em uma redução de 5 a 6 dB no $L'_{nT,w}$ entre as configurações de ambiente avaliadas.

Neste caso, em relação ao desempenho, considerando a norma NBR 15575-3 (ABNT, 2021b), o sistema de laje de piso em concreto armado maciço com espessura de 8,0 cm não possui uma capacidade de isolamento aos sons de impacto adequada para cumprimento do nível mínimo de desempenho ($L'_{nT,w} \leq 80$ dB) para nenhuma das configurações de dimensões do sistema e dos ambientes.

Figura 50 – Nível de desempenho dos sistemas estruturais sem revestimento: (a) DORM-2x4m, (b) DORM-3x4m, e (c) DORM-4x4m



Fonte: Elaborado pelo autor

E, em relação às composições de laje de piso de concreto armado maciças com espessura de 12,0 e 16,0 cm, o nível de desempenho mínimo foi atendido por todas as configurações de dimensões do sistema de piso e dos ambientes. Todavia, apesar da previsão do atendimento do nível de desempenho mínimo com o sistema estrutural de piso sem revestimento, deve-se ter atenção na seleção do revestimento a ser utilizado. Isto é importante pois determinados tipos de revestimentos podem reduzir a capacidade de isolamento aos sons de impacto em determinadas bandas de frequências, ao exemplo das cerâmicas, conforme dados de Rambaldi, Prete e Bignozzi (2015) e Warnock e Fasold (1997).

4.4.2 Modificação e conservação de desempenho com aplicação do revestimento compósito

Considerando as três configurações de ambientes e as três composições de laje estrutural de piso propostas, este subitem objetiva avaliar a influência da utilização do revestimento compósito de piso na composição RC-E2,0-D705 nos níveis de pressão sonora de impacto padronizado, no momento presente e após carregamentos prolongados equivalentes a 15 anos.

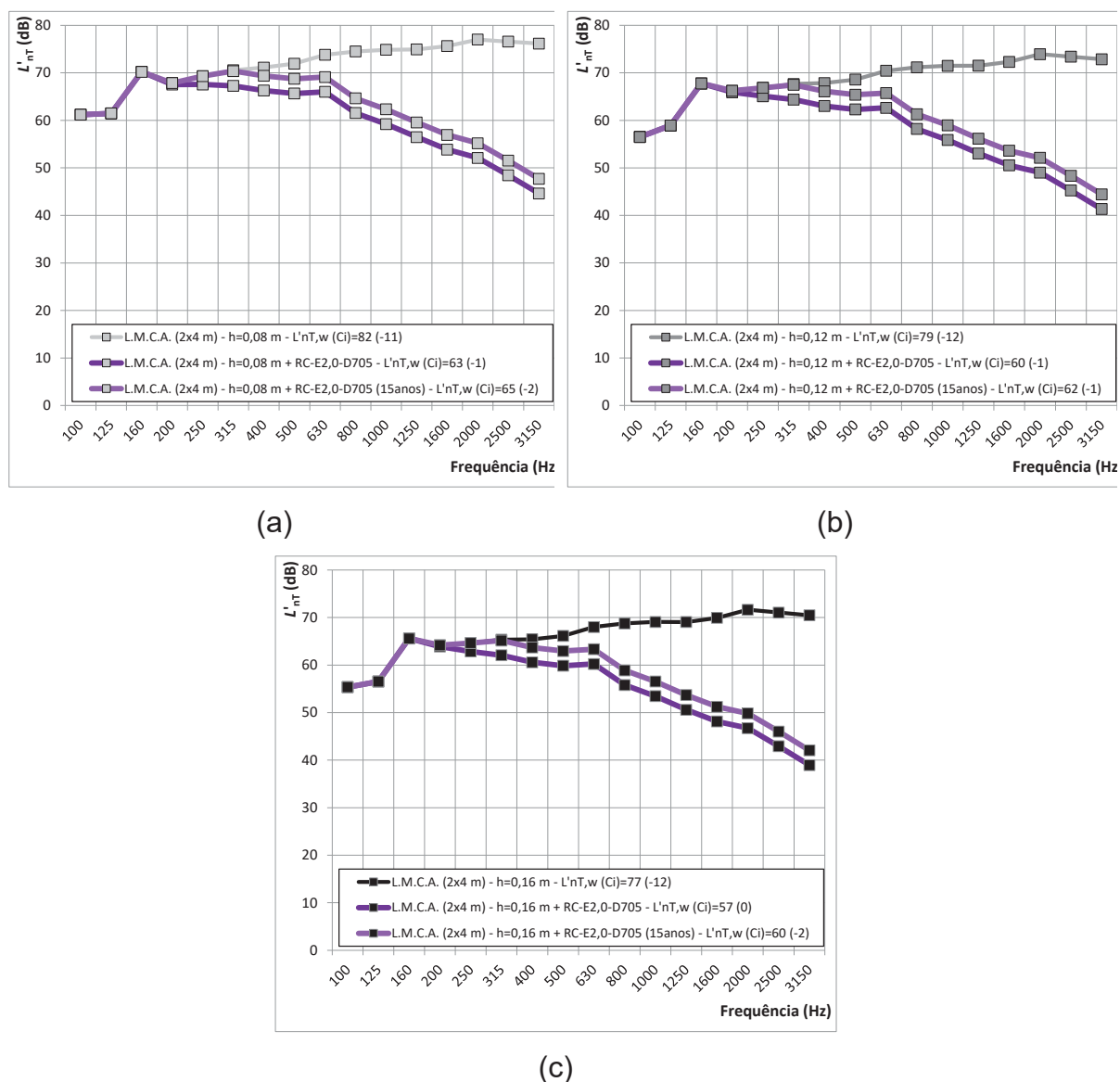
De modo a não tornar a avaliação extensiva, a avaliação por bandas de frequências foi desenvolvida somente para a composição de ambiente com dimensões de 2,0x4,0 metros, estando os dados completos das outras configurações de ambiente presente no “APÊNDICE C – DADOS DA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS COM O USO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO”.

Tal decisão visa sumarizar as análises, uma vez que o comportamento do sistema de piso nas demais dimensões já foi avaliado no subitem anterior e neste caso o interesse é verificar a redução dos níveis de pressão sonora de impacto promovida pelo sistema de revestimento. Sendo assim, na Figura 51 está presente o L'_{nT} de cada configuração de laje estrutural com a aplicação do revestimento compósito, em ambientes com dimensões de 2,0x4,0 metros.

Avaliando a influência da inserção do revestimento compósito de piso RC-E2,0-D705 no espectro dos níveis de pressão sonora de impacto padronizado previstos para os ambientes, fica claro o aumento do isolamento frente aos sons de impacto em todas as bandas de frequência partindo da frequência natural do revestimento compósito de piso (200 Hz).

Neste caso, conforme esperado pelo espectro da redução dos níveis de pressão sonora calculados para a composição de revestimento (Figura 41), com um aumento crescente da capacidade de atenuação dos sons de impacto com o crescimento das frequências, o sistema de revestimento agrega redução dos níveis de pressão sonora de impacto padronizado a partir da banda de frequências de 630 Hz, atingindo uma redução em torno de 32 dB na banda de frequências de 3150 Hz.

Figura 51 – L'_{nT} previsto para a configuração DORM-2x4m com revestimento na condição presente e após 15 anos de carregamento sobre laje maciça de espessura de: (a) 8 cm, (b) 12 cm, e (c) 16 cm



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a condição de desempenho acústico após carregamentos prolongados, de 15 anos neste caso, pode-se verificar no espectro de cada uma das configurações de laje estrutural que a eficiência do sistema na banda de frequências de 200 Hz foi nula. Tal fator ocorre devido ao aumento com o tempo da rigidez dinâmica da camada resiliente sob carregamento, aumentando também a frequência natural de vibração do revestimento compósito de piso, promovendo melhoria no isolamento aos sons de impacto apenas a partir da banda de frequências de 315 Hz.

Nas demais bandas de frequência, o comportamento do espectro dos níveis de pressão sonora de impacto padronizado dos sistemas revestidos não se alterou após o carregamento previsto de 15 anos. Todavia, devido ao aumento da rigidez dinâmica da camada resiliente após a estimativa de 15 anos, os níveis de pressão sonora de impacto padronizado aumentaram em 3 dB em todas as bandas de frequências a partir de 315 Hz. Isto demonstra um comportamento esperado pelas análises desenvolvidas nos subcapítulos anteriores, de perda de eficiência sob carregamento do sistema de revestimento de piso com o tempo.

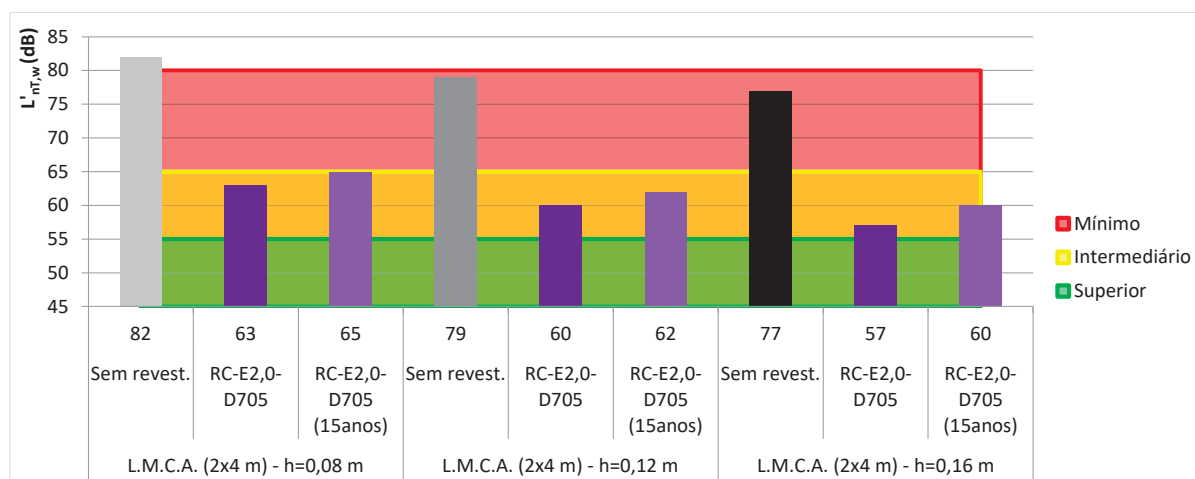
Por fim, o termo de adaptação de espectro (C_i) indica que a aplicação do revestimento compósito sobre a laje estrutural de piso resulta em níveis de pressão sonora de impacto similares quando de sua excitação por meio do caminhar real de uma pessoa ou pela *tapping machine*. Tal cenário não se repete quando da avaliação dos sistemas estruturais de piso sem revestimento, em que são previstos menores níveis de pressão sonora de impacto quando da ocorrência de uma excitação por caminhar, em comparação com a *tapping machine*.

Assim, de modo a avaliar a influência desta perda de eficiência na redução dos sons de impacto sob períodos prolongados de carregamento (15 anos), na Figura 52 estão presentes os níveis de pressão sonora de impacto padronizado ponderado de todas as composições de laje estrutural e de ambientes sem e com a aplicação do revestimento compósito de piso RC-E2,0-D705. Tal avaliação tem o objetivo de verificar a perda em termos do nível de desempenho dos sistemas frente aos requisitos da norma NBR 15575-3 (ABNT, 2021b).

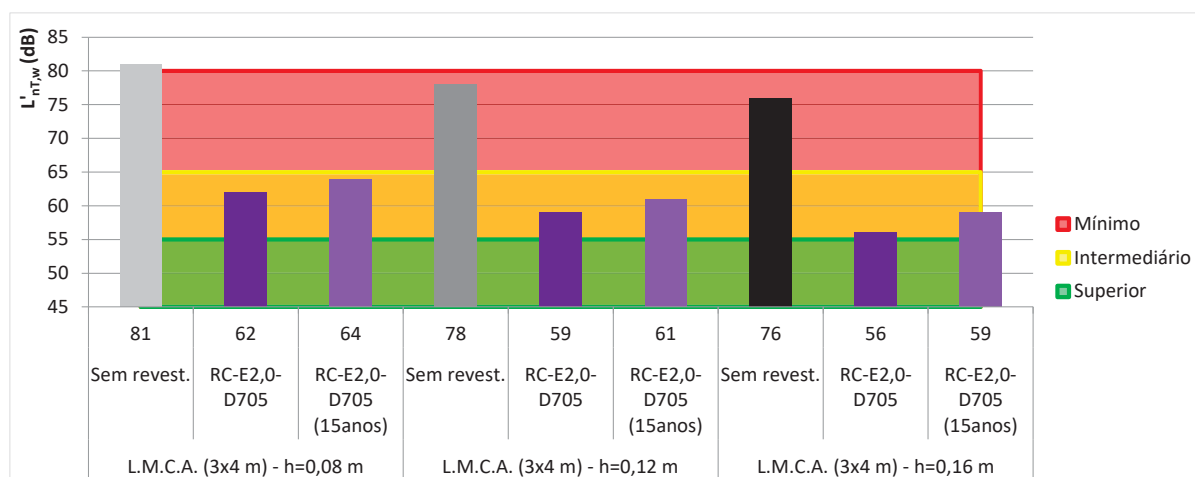
Inicialmente, avaliando os níveis de pressão sonora de impacto padronizado ponderado das composições de laje estrutural de piso sem revestimento para cada composição de dimensões, pode-se verificar que a laje de concreto armado com espessura de 8,0 cm não possui nível mínimo de desempenho frente os sons de impacto em nenhuma das três composições de ambiente.

Já no caso dos sistemas de laje estrutural com espessura de 12,0 e 16,0 cm, mesmo sem a aplicação do revestimento compósito de piso, para as três composições de dimensões o nível de desempenho mínimo frente aos sons de impacto foi atingido.

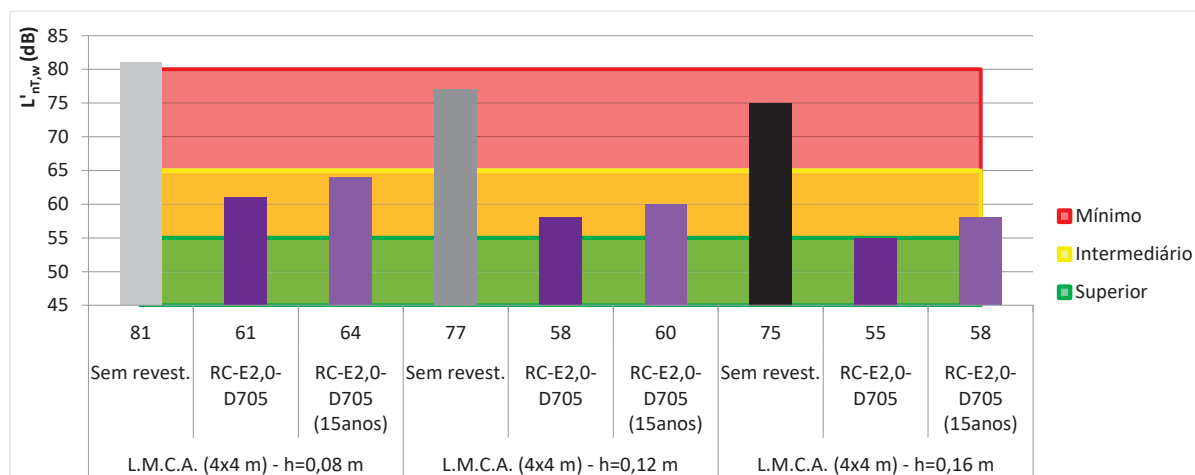
Figura 52 – Nível de desempenho dos sistemas estruturais com revestimento na condição presente e após 15 anos de carregamento: (a) DORM-2x4m, (b) DORM-3x4m, e (c) DORM-4x4m



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pelo autor

Com a aplicação do revestimento compósito de piso RC-E2,0-D705, na condição presente de carregamento, a redução no nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado foi de aproximadamente 20 dB em todas as composições, reafirmando o potencial do produto para redução da transmissão dos sons de impacto. Neste caso, a aplicação do revestimento compósito de piso, na condição atual de carregamento, fez com que as composições com laje estrutural de piso de 8,0 cm de espessura passassem a desenvolver um nível intermediário de desempenho, cumprindo então com os requisitos da norma NBR 15575-3 (ABNT, 2021b).

No caso das composições com laje estrutural de piso com espessura de 12,0 e 16,0 cm, a aplicação do revestimento compósito de piso RC-E2,0-D705, na condição presente de carregamento, aumentou o nível de desempenho de mínimo para intermediário. Ainda, na composição de ambiente com maiores dimensões (4x4 metros), a laje estrutural de piso com uso do revestimento compósito aumentou seu nível de desempenho de mínimo para superior.

Por fim, avaliando a situação futura do desempenho das composições revestidas frente aos sons de impacto, após a ação de 15 anos de carregamento sobre o sistema de revestimento compósito de piso, para todas as composições foi apresentado um acréscimo de 2 a 3 dB no nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado das composições. Neste caso, em termos dos níveis de desempenho da norma NBR 15575-3 (ABNT, 2021b), o aumento nos níveis de pressão sonora de impacto padronizado ponderado acarretou perda de nível de desempenho apenas na composição formada pelo revestimento de piso sobre uma laje de 16,0 cm de espessura e ambientes de 4,0x4,0 metros, tendo seu nível de desempenho reduzido de superior para intermediário.

De modo geral, o potencial de desempenho do revestimento compósito de piso é evidente, possibilitando o cumprimento dos requisitos de desempenho em níveis mínimos para sistemas estruturais de piso com deficiência de isolamento aos sons de impacto, além de aumentar o desempenho para níveis intermediários e superiores em sistemas que já cumprem com o requisito mínimo. Ainda, mesmo considerando a composição com maior perda de eficiência na atenuação da transmissão dos sons de impacto, a redução na eficiência do revestimento compósito de piso após carregamentos prolongados de até 15 anos não resultou em perda de nível de desempenho, atestando a manutenção do desempenho para o intervalo em oito das nove composições.

Ainda, cabe ressaltar que a norma NBR 17170 (ABNT, 2022b), que trata de prazos recomendados e diretrizes para estabelecimento da garantia das edificações e seus componentes, indica que a estrutura de pisos deve possuir garantia de cinco anos em relação à solidez e segurança. Neste quesito, não é mencionada garantia que envolva parâmetros de desempenho acústico, porém, é indicado que tal especificação seja informada aos usuários.

No que tange a NBR 15575-1 (ABNT, 2021a), a vida útil mínima para os sistemas de revestimento de piso é de 13 anos, havendo atendimento do requisito quando da avaliação frente ao aspecto de habitabilidade (desempenho acústico) do revestimento compósito proposto, uma vez que sua composição promoveu a manutenção do desempenho para períodos de até 15 anos.

Tal indicação merece atenção especial nos casos em que já seja prevista perda do nível de desempenho sob carregamentos prolongados, demandando instruções para substituição dos pisos na periodicidade prevista para manutenção do nível de desempenho, havendo indicação no Manual de Uso, Operação e Manutenção, conforme norma NBR 14037 (ABNT, 2024).

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um adequado isolamento acústico frente aos sons de impacto por parte dos sistemas de piso é necessário para garantir níveis sonoros condizentes em todos os cômodos de um edifício durante a execução de atividades habituais. Neste caso, pisos flutuantes leves, na forma de revestimentos compósitos, são soluções eficientes para aumento da capacidade de isolamento sonoro aos sons de impacto do sistema de piso do edifício.

Considerando o revestimento compósito desenvolvido nesta pesquisa, formado por uma camada rígida de porcelanato e camada resiliente composta por aglomerado de borracha reciclada, seu desempenho se demonstrou promissor, evidenciando a possibilidade de utilização no contexto do isolamento aos sons de impacto de forma eficiente.

A caracterização física e acústica dos aglomerados de borracha demonstrou que o material possui comportamento intrínseco à materiais resilientes, com melhoria da capacidade de amortecimento vibracional a partir do aumento da espessura das composições.

Ainda, a partir de ensaios laboratoriais, um modelo de previsão da redução dos níveis de pressão sonora de impacto foi desenvolvido e calibrado, resultando em estimativas precisas de desempenho entre as composições analisadas. Neste caso, o modelo calibrado de previsão possui certo grau de inovação, uma vez que a configuração de revestimento compósito desenvolvido não havia sido avaliada de forma extensiva, servindo como uma base sólida para dimensionamento de revestimentos com camada cerâmica e aglomerado de borracha com diferentes configurações.

A redução dos níveis de pressão sonora de impacto promovida pelos revestimentos compósitos foi determinada para a condição atual e futura, estimando seu comportamento para um período de 15 anos em condição real de uso. Como esperado pela literatura, materiais resilientes possuem deformação sob carregamento, que ocorre instantaneamente e pode ser agravada com o tempo, reduzindo a capacidade de amortecimento do material. Para todas as composições

avaliadas houve perda na redução dos níveis de pressão sonora de impacto, sendo mais acentuada em composições mais finas e menos densas.

Quando da aplicação do revestimento compósito em um cenário real, por meio de simulação, o acréscimo de isolamento aos sons de impacto é considerável, possibilitando o cumprimento do nível de desempenho mínimo com sistemas estruturais deficientes. Ainda, considerando sistemas de laje com capacidade de cumprimento do nível mínimo de desempenho frente aos sons de impacto, a utilização dos revestimentos compósitos agrega maior eficiência ao sistema, possibilitando o atendimento do nível de desempenho intermediário e superior.

Em termos da manutenção do desempenho em situações reais de uso, quando há a aplicação de carregamentos sobre o sistema de piso, por períodos prolongados de até 15 anos, mesmo considerando a composição com maior perda de eficiência, os revestimentos compósitos analisados não sofreram uma degradação acústica suficiente para redução do nível de desempenho dos sistemas.

Neste sentido, o sistema de revestimento compósito de piso, desenvolvido a base de peça cerâmica de porcelanato e manta de aglomerado de borracha reciclada demonstrou potencial para utilização na redução da transmissão dos sons de impacto, agregando a recircularidade dos materiais às soluções acústicas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A necessidade de soluções que agreguem eficiência na atenuação dos sons de impacto é cada vez mais notável no mercado, sendo um ponto de interesse para inserção de um revestimento de piso que necessita de pouca intervenção no local, baixo acréscimo de carga sobre a estrutura e reflete em melhora considerável de desempenho, além de promover a recircularidade dos materiais. Assim, de modo a superar as limitações impostas por esta pesquisa, sugere-se para pesquisas futuras:

- a) Verificar a aplicabilidade do revestimento compósito do ponto de vista mecânico, em termos de sua aderência ao substrato (laje estrutural ou camada de regularização) e comportamento com aplicação de rejunte entre as peças, por exemplo;
- b) Verificar a influência de outros métodos de fixação das mantas de aglomerado de borracha nas placas cerâmicas, considerando o uso de

outros materiais além do epóxi e abrangendo outras configurações de aplicação do material, visando maior facilidade e viabilidade executiva;

- c) Verificar a assertividade do modelo de previsão proposto com uso de diferentes tipos de revestimento cerâmico no revestimento compósito com aglomerado de borracha;
- d) Estimar o desempenho futuro do revestimento compósito para períodos maiores, demandando ensaios de fluência à compressão mais extensos, de modo a verificar a condição do sistema ao longo de toda a vida útil de projeto da edificação.

REFERÊNCIAS

- ADDIS, B. **Building with reclaimed components and materials**: a design handbook for reuse and recycling. 1. ed. London: Earthscan, 2006.
- ADHIKARI, B.; DE, D.; MAITI, S. Reclamation and recycling of waste rubber. **Progress in Polymer Science**, v. 25, p. 909-948, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00020-4). Acesso em: 21 mai. 2025.
- ALFAYEZ, S.; SULEIMAN, A. R.; NEHDI, M. L. Recycling tire rubber in asphalt pavements: state of the art. **Sustainability**, v. 12, n. 21, 9076, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12219076>. Acesso em: 21 mai. 2025.
- ALLEN, E.; IANO, J. **Fundamentals of building construction**: materials and methods. 7. ed. New Jersey: John Wiley and Sons Inc., 2019.
- ALONSO, A.; PATRICIO, J.; SUÁREZ, R. On the efficiency of impact sound insulation systems on prefabricated lightweight floor and on standard homogeneous base-floor. **Engineering Structures**, v. 191, p. 649-657, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.070>. Acesso em: 21 mai. 2025.
- ALONSO, A.; PATRICIO, J.; SUÁREZ, R. ESCANDÓN, R. Acoustical retrofit of existing residential buildings: requirements and recommendations for sound insulation between dwellings in europe and other countries worldwide. **Building and Environment**, v. 174, 106771, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106771>. Acesso em: 24 jun. 2025.
- ALSALEH, A.; SATTler, M. L. Waste tire pyrolysis: influential parameters and product properties. **Current Sustainable/Renewable Energy Reports**, v. 1, n. 12, p. 129-135, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40518-014-0019-0>. Acesso em: 21 mai. 2025.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM C1202**: standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Philadelphia: ASTM, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM R6270**: standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications. Washington: ASTM, 2020.
- AMORÓS, J. L.; ORTS, M. J.; GOZALBO, A.; MONTIEL, E. Acordo esmalte-suporte (III): elasticidade dos suportes e vidrados cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 2, n. 3/4, p. 19-27, 1997. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587656fd7f8c9d6e028b45eb>. Acesso em: 21 mai. 2025.
- ANTÓNIO, J. Acoustic behaviour of fibrous materials. In: FANGUEIRO, R. **Fibrous and composite materials for civil engineering applications**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011.

ARENAS, J. P.; SEPULVEDA, L. F. Impact sound insulation of a lightweight laminate floor resting on a thin underlayment material above a concrete slab. **Journal of Building Engineering**, v. 45, 103537, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103537>. Acesso em: 21 mai. 2025.

ASDRUBALI, F.; D'ALESSANDRO, F. Impact sound insulation and viscoelastic properties of resilient materials made from tyre granules. **International Journal of Acoustics and Vibration**, v. 16, n. 3, p. 119-125, 2011. Disponível em: ISSN 1027-5851. Acesso em: 21 mai. 2025.

ASSELINEAU, M. **Building acoustics**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120**: ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8802**: concreto endurecido: determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 10545**: placas cerâmicas: parte 2: determinação das dimensões e qualidade superficial. Rio de Janeiro: ABNT, 2020b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 10545**: placas cerâmicas: parte 3: determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 12154**: determinação da densidade por deslocamento volumétrico: densidade-esqueleto por picnometria a gás. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 12354**: acústica de edificações: estimativa do desempenho acústico nas edificações por meio do desempenho de elementos: parte 1: isolamento a ruído aéreo entre ambientes. Rio de Janeiro: ABNT, 2023a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 12354**: acústica de edificações: estimativa do desempenho acústico nas edificações por meio do desempenho de elementos: parte 2: isolamento a ruído de impacto entre ambientes. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 13006**: placas cerâmicas: definições, classificação, características e marcação. Rio de Janeiro: ABNT, 2020a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 13753**: revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 13818**: placas cerâmicas para revestimento: especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14037**: diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações: Requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575**: edificações habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575**: edificações habitacionais: desempenho: parte 3: requisitos para sistemas de pisos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16283**: acústica: medições de campo do isolamento acústico nas edificações e nos elementos de edificações: parte 2: isolamento ao ruído de impacto. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 17170**: edificações: garantias: prazos recomendados e diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b.

BAJAJ, A.; KROUSGRILL, C. M. Nonlinear system resonance phenomena. *In*: BRAUN, S. **Encyclopedia of vibration**. 1. ed. London: Academic Press, 2002.

BANERJEE, B. Rubbers, compounding ingredients and their criterion in tyre retreading. *In*: BANERJEE, B. **Tyre retreading**. 1. ed. Shropshire: Smithers Rapra Technology Ltd., 2015. p. 1-29.

BANERJEE, B. Manufacturing technology for tyre retreading. *In*: BANERJEE, B. **Tyre retreading**. 1. ed. Shropshire: Smithers Rapra Technology Ltd., 2015. p. 1-29.

BARRON, R. F. **Industrial noise control and acoustics**. 1. ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2003.

BEARDS, C. F. **Structural vibration**: analysis and damping. 1. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.

BERGE, B. **The ecology of building materials**. 2. ed. Burlington: Architectural Press, 2009.

BIES, D. A.; HANSEN, C. H.; HOWARD, C. Q.; HANSEN, K. L. **Engineering noise control**. 6. ed. Boca Raton: CRC Press, 2023.

BIJINA, V.; JANDAS, P. J.; JOSEPH, S.; GOPU, J.; ABHITHA, K.; JOHN, H. Recent trends in industrial and academic developments of green tyre technology. **Polymer Bulletin**, 30 p., 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04445-2>. Acesso em: 21 mai. 2025.

BOCH, P.; NIEPCE, J. C. **Ceramic materials**: processes, properties and applications. London: ISTE Ltd, 2007.

BRAVO, M.; BRITO, J. Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 25, n. 4, p. 42-50, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.066>. Acesso em: 21 mai. 2025.

CANIATO, M.; BETTARELLO, F.; MARSICH, L.; FERLUGA, A.; SBAIZERO, O.; SCHMID, C. Time-depending performance of resilient layers under floating floors. **Construction and Building Materials**, v. 102, n. 1, p. 226-232, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.176>. Acesso em: 21 mai. 2025.

CHATTERJEE, T.; NASKAR, K. Green tyre retread technology. *In*: BANERJEE, B. **Tyre retreading**. 1. ed. Shropshire: Smithers Rapra Technology Ltd., 2015. p. 85-121.

CONZATTI, L.; COSTA, G.; FALQUI, L.; TURTURRO, A. Microscopic imaging of rubber compounds. *In*: WHITE, J.; DE, S. K.; NASKAR, K. **Rubber technologist's handbook**. v. 2. Shropshire: Smithers Rapra Technology Limited, 2009. p. 1-28.

COWAN, J. P. **The effects of sound on people**. 1. ed. Chichester: John Wiley and Sons, 2016.

COX, T. J.; D'ANTONIO, P. **Acoustic absorbers and diffusers**: theory, design and application. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2017.

CREMER, L.; HECKL, M.; PETERSSON, B. A. T. **Structure-Borne sound**. 3. ed. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2005.

CUNLIFFE, A. M.; WILLIAMS, P. T. Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 44, n. 2, p. 131-152, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(97\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(97)00085-5). Acesso em: 21 mai. 2025.

DB COVER (dB Cover Acoustic Protection Solutions). **dB impact**: impact sound insulation product data. Elda: DB COVER, 2018. Disponível em: <https://dbcover.com/acoustic-solutions/impact-sound-insulation-solutions/>. Acesso em: 21 mai. 2025.

DE SILVA, C. W. **Vibration: fundamentals and practice**. 1. ed. New Yor: CRC Press: 2000.

DUGGAL, S. K. **Building materials**. 3. ed. New Delhi: New Age International (P) Limited Publishers, 2008.

KRAIBURG RELASTEC GMBH CO (DAMTEC). **Damtec Standard**: product data sheet n° 9401-R-09. Salzwedel: DAMTEC, 2021. Disponível em: <https://www.kraiburg-relastec.com/damtec/en/standard/>. Acesso em: 21 mai. 2025.

DE WILDE, P. **Building performance analysis**. 1. ed. Oxford: John Wiley and Sons Ltd, 2018.

DRYDEN, D. M.; LUCHINI, J. R.; OUYANG, G. B. Trends in Tyre Technology. *In*: DE, S. K; WHITE, J. R. **Rubber technologist's handbook**. 1. ed. Shropshire: Rapra Technology Limited, 2001. p. 351-400.

EGAN, M. D. **Architectural acoustics**. 1. ed. Fort Lauderdale: J. Ross Publishing, 2007.

ELIANE (Eliane Revestimentos Cerâmicos Ltda). **Filtro de produtos cerâmicos**. Disponível em: <https://www.eliane.com/produtos>. Acesso em: 21 mai. 2025.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 16354**: laminate floor coverings – underlays – specification, requirements and test methods. Brussels: EN, 2018.

EWINS, D. J. Damping measurement. *In*: BRAUN, S. **Encyclopedia of vibration**. 1. ed. London: Academic Press, 2002.

FARRIS, R. J.; MORIN, J. E. Thermoset recycling methods. **Patent US 2002/0101004/A1**, 2002.

FARRIS, R. J.; WILLIAMS, D. E.; TRIPATHY, A. R. Recycling cross-linked networks via high-pressure, high-temperature sintering. *In*: DE, S. K.; ISAYEV, A. I.; KHAIT, K. **Rubber recycling**. 1. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005.

FAZLI, A.; RODRIGUE, D. Recycling waste tires into ground tire rubber (GTR)/rubber compounds: a review. **Journal of Composites Science**, v. 4, n. 3, 103, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs4030103>. Acesso em: 21 mai. 2025.

FERDOUS, W.; MANALO, A.; SIDDIQUE, R.; MENDIS, P.; ZHUGE, Y.; WONG, H. S.; LOKUDE, W.; ARAVINTHAN, T.; SCHUBEL, P. Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – a review on global waste generation, performance, application and future opportunities. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 179, n. 10, 105745, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105745>. Acesso em: 21 mai. 2025.

FIKSEL, J.; BAKSHI, B. R.; BARAL, A.; GUERRA, E.; DEQUERVAIN, B. Comparative life cycle assessment of beneficial applications for scrap tires. **Clean**

Technologies and Environmental Policy, v. 13, p. 19-35, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-010-0289-1>. Acesso em: 21 mai. 2025.

FLINDELL, I. Human response to sound. *In*: FAHY, F.; THOMPSON, D. **Fundamentals of sound and vibration**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 311-362.

FOREMAN, J. E. K. **Sound analysis and noise control**. 1. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

GENTA, G. **Vibration dynamics and control**. 1. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2009.

GARCÍA-COBOS, F. J.; MADERUELO-SANZ, R. Using different waste as resilient layers for impact sound insulation improvement: new alternative to commercial layers?. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 43, n. 3, p. 407-417, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/01436244211053719>. Acesso em: 21 mai. 2025.

GERRETSEN, E. Predicting the sound reduction of building elements from material data. **Building Acoustics**, v. 6, n. 3, p. 225-234, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1260/1351010991501428>. Acesso em: 21 mai. 2025.

GETZNER WERKSTOFFE GMBH (GETZNER). **Acoustic Floor Mat 23**: product data sheet. Bürs: GETZNER, 2017a. Disponível em: <https://www.getzner.com/en/products/construction-products/acoustic-floor-mat-23>. Acesso em: 21 mai. 2025.

GETZNER WERKSTOFFE GMBH (GETZNER). **Acoustic Floor Mat 26**: product data sheet. Bürs: GETZNER, 2017b. Disponível em: <https://www.getzner.com/en/products/construction-products/acoustic-floor-mat-26>. Acesso em: 21 mai. 2025.

GETZNER WERKSTOFFE GMBH (GETZNER). **Acoustic Floor Mat 29**: product data sheet. Bürs: GETZNER, 2020. Disponível em: <https://www.getzner.com/en/products/construction-products/acoustic-floor-mat-29>. Acesso em: 21 mai. 2025.

HAMED, G. R. Materials and compounds. *In*: GENT, A. N. **Engineering with rubber: how to design rubber components**. 2. ed. Cincinnati: HanserGardner Publications Inc., 2001. p. 11-34.

HANSEN, C. H.; HANSEN, K. L. **Noise control**: from concept to application. 2. ed. New York: Taylor & Francis Inc, 2021.

HARRIS, D. A. **Noise control manual**: guidelines for problem-solving in the industrial/commercial acoustical environment 1. ed. New York: Springer Science+Business Media, 1991.

HIBBELER, R. C. **Structural analysis**. 11. ed. Indianapolis: Pearson, 2023.

HONGISTO, V.; SAARINEN, P.; ALAKOIVU, R.; HAKALA, J. Acoustic properties of commercially available thermal insulators: an experimental study. **Journal of Building Engineering**, v. 54, 104588, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104588>. Acesso em: 21 mai. 2025.

HOPKINS, C. **Sound insulation**. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2007.

HOPKINS, C. Sound insulation in buildings. *In*: XIANG, N. **Architectural acoustics handbook**. 1. ed. Plantation: J. Ross Publishing, 2017. p. 137-172.

HOROSHENKOV, K. V.; SWIFT, M. J. The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates. **Applied Acoustics**, v. 62, n. 6, p. 665-690, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00069-4](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00069-4). Acesso em: 21 mai. 2025.

INMAN, D. J. **Vibration with control**. 1. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 717**: acoustics: rating of sound insulation in buildings and of building elements: part 2: impact sound insulation. Geneva: ISO, 2020a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 9052**: acoustics: Determination of airflow resistance: part 1: static airflow method. Geneva: ISO, 1989.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 9053**: acoustics: determination of dynamic stiffness: part 1: materials used under floating floors in dwellings. Geneva: ISO, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10140**: acoustics: laboratory measurement of sound insulation of building elements: part 1: application rules for specific products. Geneva: ISO, 2021a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10140**: acoustics: laboratory measurement of sound insulation of building elements: part 3: measurement of impact sound insulation. Geneva: ISO, 2021b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10140**: acoustics: laboratory measurement of sound insulation of building elements: part 4: measurement procedures and requirements. Geneva: ISO, 2021c.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10140**: acoustics: laboratory measurement of sound insulation of building elements: part 5: requirements for test facilities and equipment. Geneva: ISO, 2021d.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10848**: acoustics: laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms: part 1: frame document. Geneva: ISO, 2017a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 16534**: thermal insulating products for building applications: determination of compressive creep. Geneva: ISO, 2020c.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 29470**: thermal insulating products for building applications: determination of the apparent density. Geneva: ISO, 2022d.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 29768**: thermal insulating products for building applications: determination of linear dimensions of test specimens. Geneva: ISO, 2022e.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 29770**: thermal insulating products for building applications: determination of thickness for floating-floor insulating products. Geneva: ISO, 2022b.

KIM, K.W.; JEONG, G. C.; YANG, K. S.; SOHN, J. Correlation between dynamic stiffness of resilient materials and heavyweight impact sound reduction level. **Building and Environment**, v. 44, p. 1589-1600, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.10.005>. Acesso em: 21 mai. 2025.

KNC (Kinetics Noise Control). Airborne sound transmission loss and impact sound transmission measurements performed on one floor assembly for Kinetics Noise Control. **Client Report B-3463.12 (National Research Council of Canada)**, 11 p., 2007a. Disponível em: <https://kineticsnoise.com/isolayment/low-profile-underlayment>. Acesso em: 21 mai. 2025.

KNC (Kinetics Noise Control). Airborne sound transmission loss and impact sound transmission measurements performed on one floor assembly for Kinetics Noise Control. **Client Report B-3463-1F (National Research Council of Canada)**, 5 p., 2007b. Disponível em: <https://kineticsnoise.com/soundmatt/resilient-underlayment>. Acesso em: 21 mai. 2025.

KNIGHT, L. J.; PARKER-JURD, F. N. F.; AL-SID-CHEIKH, M.; THOMPSON, R. C. Tyre wear particles: an abundant yet widely unreported microplastic?. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 18345-18354, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08187-4>. Acesso em: 21 mai. 2025.

KOLE, P. J.; LÖHR, A. J.; VAN BELLEGHEM, F. G. A. J.; RAGAS, M. J. Wear and tear of tyres: a stealthy source of microplastics in the environment. **Environmental Research and Public Health**, v. 14, n. 10, 31 p., 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>. Acesso em: 21 mai. 2025.

LECHNER, N. **Plumbing, electricity, acoustics**: sustainable design methods for architecture. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2012.

LEE, H.; JU, M.; KIM, Y. Estimation of emission of tire wear particles (TWPs) in Korea. **Waste Management**, v. 108, p. 154-159, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.037>. Acesso em: 21 mai. 2025.

LONG, M. **Architectural acoustics**. 2. ed. Oxford: Elsevier Inc., 2014.

LYON, R. E. Plastics and rubber. *In*: HARPER, C. A. **Handbook of building materials for fire protection**. 1. ed. New York: McGraw-Hill Companies Inc., 2004. p. 3.1-3.46.

MACE, B. Fundamentals of vibration. *In*: FAHY, F.; THOMPSON, D. **Fundamentals of sound and vibration**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 311-362.

MADERUELO-SANZ, R.; MARTÍN-CASTIZO, M.; VÍLCHEZ-GÓMEZ, R. The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction. **Applied Acoustics**, v. 72, n. 11, p. 823-828, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.05.004>. Acesso em: 21 mai. 2025.

MADERUELO-SANZ, R.; MORILLAS, J. M. B.; MARTÍN-CASTIZO, M.; ESCOBAR, V. G.; GOZALO, G. R. Acoustical performance of porous absorber made from recycled rubber and polyurethane resin. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 10, n. 3, p. 585-600, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1679-78252013000300008>. Acesso em: 21 mai. 2025.

MENDIS, P.; NGO, T. Vibration and shock problems in civil engineering structures. *In*: **Vibration and shock handbook**. 1. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005.

METHA, M.; SCARBOROUGH, W.; ARMPRIEST, D. **Building construction: principles, materials, and systems**. 3. ed. New Jersey: Pearson Education Inc., 2017.

METZEN, H. A. Estimation of the reduction in impact sound pressure level of floating floors from the dynamic stiffness of insulation layers. **Building Acoustics**, v. 3, n. 1, p. 33-53, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1351010X9600300104>. Acesso em: 21 mai. 2025.

MORIN, J. E.; WILLIAMS, D. E.; FARRIS, R. J. A novel method to recycle scrap tires: high-pressure high-temperature sintering. **Rubber Chemistry and Technology**, v. 75, n. 5, p. 955-968, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.5254/1.3547695>. Acesso em: 21 mai. 2025.

MÖSER, M. **Engineering acoustics: an introduction to noise control**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2009.

NEUFERT, E. **A arte de projetar em arquitetura**. 42. ed. Porto Alegre: Bookman, 2022.

NEWELL, P. **Recording studio design**. 4. ed. Oxford: Elsevier Ltd., 2017.

NILSSON, A.; LIU, B. **Vibro-Acoustics**: volume I. Beijing: Science Press: 2015.

NOORDERMEER, J. W. M.; DIERKES, W. K. Silica-filled rubber compounds. *In*: WHITE, J.; DE, S. K.; NASKAR, K. **Rubber technologist's handbook**. v. 2. Shropshire: Smithers Rapra Technology Limited, 2009. p. 59-96.

NORTON, M. P.; KARCZUB, D. G. **Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

OIKONOMOU, N.; MAVRIDOU, S. The use of waste tyre rubber in civil engineering works. **Sustainability of Construction Materials**, p. 213-238, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9781845695842.213>. Acesso em: 21 mai. 2025.

OLIVEIRA, M. F.; HEISSLER, R. F.; LIMA, F. S.; PACHECO, F.; TUTIKIAN, B. F. Desempenho acústico de laje com vigota e lajota: isolamento ao som aéreo e de impacto. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 243-254, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000300549>. Acesso em: 21 mai. 2025.

OLIVEIRA, M. F. de; KLIPPEL FILHO, S.; PACHECO, F.; PATRÍCIO, J. V.; TUTIKIAN, B. F. Influence of ceramic block geometry and mortar coating on the sound reduction of walls. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 195-207, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000200521>. Acesso em: 21 mai. 2025.

OLIVEIRA, N. P.; RODRIGUES, G. F. C.; RODRIGUEZ, C. M. T. Impacts of green tire technology: case study of environmental and customer perspectives. **American Journal of Environmental Science and Engineering**, v. 6, n. 1, p. 22-29, 2022. Disponível em: <https://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=529&doi=10.11648/j.ajese.20220601.14>. Acesso em: 21 mai. 2025.

PANKO, J. M.; CHU, J.; KREIDER, M. L.; UNICE, K. M. Measurement of airborne concentrations of tire and road wear particles in urban and rural areas of France, Japan, and the United States. **Atmospheric Environment**, v. 72, n. 6, p. 192-199, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.040>. Acesso em: 21 mai. 2025.

PATRÍCIO, J. **Acústica nos edifícios**. 7. ed. Porto: Quântica Editora, 2018.

PFRETZSCHNER, J.; RODRIGUEZ, R. M. Acoustic properties of rubber crumbs. **Polymer Testing**, v. 18, n. 2, p. 81-92, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(98\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(98)00009-9). Acesso em: 21 mai. 2025.

POHL, J. **Building science: concepts and application**. 1. ed. Chichester: John Wiley Ltd, 2011.

RAM, Y. M. Inverse problems. In: BRAUN, S. **Encyclopedia of vibration**. 1. ed. London: Academic Press, 2002.

RAMARAD, S.; KHALID, M.; RATNAM, C. T.; CHUAH, A. L.; RASHMI, W. Waste tire rubber in polymer blends: a review on the evolution, properties and future. **Progress in Materials Science**, v. 72, n. 7, p. 100-140, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.02.004>. Acesso em: 21 mai. 2025.

RAMBALDI, E.; PRETE, F.; BIGNOZZI, M. C. Acoustic and thermal performances of ceramic tiles and tiling systems. **Ceramics International**, v. 41, n. 6, p. 7252-7260,

2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.03.032>. Acesso em: 21 mai. 2025.

RASMUSSEN, B. Sound insulation between dwellings – requirements in building regulations in Europe. **Applied Acoustics**, v. 71, n. 6, p. 373-385, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.08.011>. Acesso em: 21 mai. 2025.

RASMUSSEN, B.; RINDEL, J. H. Sound insulation between dwellings – descriptors applied in building regulations in Europe. **Applied Acoustics**, v. 71, n. 3, p. 171-180, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.05.002>. Acesso em: 21 mai. 2025.

RASMUSSEN, B. Sound insulation between dwellings – comparison of national requirements in Europe and interaction with acoustic classification schemes. *In*: International Congress on Acoustics, 2019. **Anais [...]** Aachen: ICA, 2019. Disponível em: 10.18154/RWTH-CONV-239983. Acesso em: 21 mai. 2025.

RATNER, B. The correlation coefficient: its values ranger between +1/-1, or do they?. **Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing**, v. 17, n. 2, p. 139-142, 2009. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1057/jt.2009.5>. Acesso em: 21 mai. 2025.

RINDEL, J. H. Sound insulation of buildings. *In*: Inter-Noise, 2007. **Anais [...]** Istanbul: Inter-Noise, 2007. Disponível em: https://www.academia.edu/51112647/Sound_insulation_of_buildings. Acesso em: 21 mai. 2025.

RINDEL, J. H. **Sound insulation in buildings**. 1. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC, 2018.

ROUSE, M. W. Manufacturing practices for the development of crumb rubber materials from whole tires. *In*: DE, S. K.; ISAYEV, A. I.; KHAIT, K. **Rubber recycling**. 1. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005.

SABINE, W. C. **Collected papers on acoustics**. 1. ed. Cambridge: Harvard University Press, 1922.

SATHISKUMAR, C.; KARTHIKEYAN, S. Recycling of waste tires and its energy storage application of by-products – a review. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 22, e00125, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00125>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SCHIAVI, A. Improvement of impact sound insulation: a constitutive model for floating floors. **Applied Acoustics**, v. 129, p. 64-71, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.07.013>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SCHIAVI, A.; BELLI, A. P.; RUSSO, F. Measurement of dynamic stiffness to estimate the reduction in impact sound pressure level. *In*: EURONOISE, 2003. **Anais [...]** Naples: EURONOISE, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259921665_Measurement_of_dynamic_stiff

ness_to_estimate_the_reduction_in_impact_sound_pressure_level. Acesso em: 21 mai. 2025.

SCHIAVI, A.; BELLI, A. P.; RUSSO, F. Estimation of acoustical performance of floating floors from dynamic stiffness of resilient layers. **Building Acoustics**, v. 12, n. 2, p. 99-113, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1260/1351010054037938>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SCHIAVI, A.; BELLI, A. P.; RUSSO, F.; CORALLO, M. Acoustical and mechanical characterization of an innovative expanded sintered elasticized polystyrene (EPS-E) used as underlayer in floating floors. *In*: International Congress on Acoustics, 2007. **Anais** [...] Madrid: International Congress on Acoustics, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/259921595>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SCHIAVI, A.; BELLI, A. P.; CORALLO, M.; RUSSO, F. Acoustical performance characterization of resilient materials used under floating floors in dwellings. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 93, n. 3, p. 477-485, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262104059_Acoustical_Performance_Characterization_of_Resilient_Materials_used_under_Floating_Floors_in_Dwellings. Acesso em: 21 mai. 2025.

SCHIAVI, A.; GUGLIELMONE, C.; MIGLIETTA, P. Effect and importance of static-load on airflow resistivity determination and its consequences on dynamic stiffness. **Applied Acoustics**, v. 72, n. 9, p. 705-710, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.03.009>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SCHIAVI, A.; PRATO, A.; BELLI, A. P. The “dust spring effect” on the impact sound reduction measurement accuracy of floor coverings in laboratory. **Applied Acoustics**, v. 97, n. 10, p. 115-120, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.04.011>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SEDDEQ, H. S. Technical note: controlling the impact sound insulation of concrete slab floors. **Building Acoustics**, v. 13, n. 3, p. 243-251, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1260/135101006778605361>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SEN, D.; KUJUR, A. Modelling and simulation of 3-DOF mass spring system equivalent of 3-storey building by using Ansys 18.1. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 9, n. 9, p. 1751-1754, 2018. Disponível em: https://www.ijser.org/research-paper-publishing-september-2018_page5.aspx. Acesso em: 21 mai. 2025.

SHULMAN, V. L. Tyre recycling. **Rapra Review Reports**, v. 15, n. 7, 134 p., 2004. Disponível em: ISBN 1-85957-489-0. Acesso em: 21 mai. 2025.

SIENKIEWICZ, M.; JANIK, H.; BORZEDOWSKA-LABUDA, K.; KUCINSKA-LIPKA, J. Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, n. 3, p. 560-571, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.121>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SIENKIEWICZ, M.; KUCINSKA-LIPKA, J.; JANIK, H.; BALAS, A. Progress in used tyres management in the European union: a review. **Waste Management**, v. 32, p. 1742-1751, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010>. Acesso em: 21 mai. 2025.

STEWART, M. A.; MACKENZIE, R. K. A comparison of the predicted dynamic stiffness of resilient layers with calculated values obtained from the measured acceleration response. **Building Acoustics**, v. 7, n. 4, p. 297-213, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1260/135101000150167>. Acesso em: 21 mai. 2025.

THOMPSON, D. Noise control. *In*: FAHY, F.; THOMPSON, D. **Fundamentals of sound and vibration**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 213-310.

TOCCI, G. C. Noise control in U.S. building codes. *In*: CROCKER, M. J. **Encyclopedia of Acoustics**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1997. p. 1205-1218.

TURNER, J. D.; PRETLOVE, A. J. **Acoustics for engineers**. 1. ed. Hampshire: Macmillan Education Ltd, 1991.

UNGAR, E. E. Damping materials. *In*: BRAUN, S. **Encyclopedia of vibration**. 1. ed. London: Academic Press, 2002.

VÉR, I. L. Impact noise isolation of composite floors. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 50, n. 4, p. 1043-1050, 1971a. Disponível em: <https://doi.org/10.1121/1.1912726>. Acesso em: 21 mai. 2025.

VÉR, I. L. Relation between the normalized impact sound level and sound transmission loss. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 50, n. 6, p. 1414-1417, 1971b. Disponível em: <https://doi.org/10.1121/1.1912783>. Acesso em: 21 mai. 2025.

VIGRAN, T. E. **Building acoustics**. 1. ed. Oxon: Taylos & Francis, 2008.

WARD-HARVEY, K. **Fundamental building materials**. 4. ed. Boca Raton: Universal Publishers, 2009.

WARNOCK, A. C. C. Controlling the transmission of impact sound through floors. **Construction Technology Update nº 35 (National Research Council of Canada)**, v. 35, 6 p., 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.4224/40002834>. Acesso em: 21 mai. 2025.

WARNOCK, A. C. C.; FASOLD, W. Sound insulation: airborne and impact. *In*: CROCKER, M. J. **Encyclopedia of Acoustics**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1997. p. 1129-1160.

WASIAK, M.; SUDOL, E. Resistance of direct underlayments used for wood floating floors to static loads. *In*: Annals of Warsaw University of Life Sciences (SGGW) - Forestry and Wood Technology, 2018. **Anais [...]** Warsaw: Warsaw University of Life Science Press, 2018. Disponível em:

<https://wulsannals.com/resources/html/article/details?id=214107>. Acesso em: 21 mai. 2025.

WATERS, T. Vibration testing. *In*: FAHY, F.; THOMPSON, D. **Fundamentals of sound and vibration**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 443-482.

WEAVER, W.; TIMOSHENKO, S.; YOUNG, D. H. **Vibration problems in engineering**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1991.

WENNEKES, W.; DATTA, R. N. Fibres in the rubber industry. *In*: WHITE, J.; DE, S. K.; NASKAR, K. **Rubber technologist's handbook**. v. 2. Shropshire: Smithers Rapra Technology Limited, 2009. p. 97-158.

YANG, B. Theory of vibration. *In*: BRAUN, S. **Encyclopedia of vibration**. 1. ed. London: Academic Press, 2002.

ZEITLER, B.; NIGHTINGALE, T. R. T.; SCHOENWALD, S. Effect of floor treatments on direct impact sound pressure level. *In*: EURONOISE, 2009. **Anais** [...] Edinburgh: EURONOISE, 2009. Disponível em: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=e927ee9c-863a-4753-a5e2-b9d37f28a365>. Acesso em: 21 mai. 2025.

ZHANG, H. **Building materials in civil engineering**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011.

ZINI, A.; ZUCHETTO, L. K.; OLIVEIRA, M. F. O.; GRISA, A. M. C.; PAGNUSSAT, D. T.; ZENI, M. Sound insulation of floors: a new composite with a resilient layer of recycled polymer. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 10, p. 861-869, 2013. Disponível em: 10.17265/1934-7359/2016.08.001. Acesso em: 21 mai. 2025.

APÊNDICE A – DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO PISO DE PORCELANATO

Tabela A. 1 – Espessura

Característica	Exemplar							s	T (°C)	UR (%)	Data
	1	2	3	4	5	6	7				
E1 (mm)	9,24	9,22	9,43	9,23	9,38	9,22	9,42	9,31	0,10		
E2 (mm)	9,46	9,26	9,18	9,31	9,46	9,26	9,28	9,32	0,11		
E3 (mm)	9,22	9,28	9,43	9,26	9,39	9,18	9,32	9,30	0,09	24,8	06/01/2025
E4 (mm)	9,42	9,27	9,25	9,34	9,43	9,24	9,26	9,32	0,08		
E _{méd} (mm)	9,34	9,26	9,32	9,29	9,42	9,23	9,32	9,31	0,06		

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A. 2 – Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente

Característica	Exemplar							s	T (°C)	UR (%)	Data
	1	2	3	4	5	6	7				
m _s (g)	851,1	823,3	844,8	818,7	832,7	819,0	834,7	-	-	20,2	09/01/2025
m _{sat} (g)	854,0	826,3	847,7	821,7	835,2	821,7	837,3	-	-		
m _i (g)	494,7	480,0	492,0	477,2	485,2	477,1	486,1	-	-	21,1	16/01/2025
E _v (%)	0,34	0,36	0,34	0,37	0,30	0,33	0,31	0,34	0,02		
Ω (%)	0,81	0,87	0,82	0,87	0,71	0,78	0,74	0,80	0,06	-	-
ρ (g/cm³)	2,36877	2,37742	2,37504	2,37649	2,37914	2,37667	2,37671	2,37575	0,00331		

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A. 3 – Velocidade de propagação de onda ultrassônica

Característica	Exemplar							$\bar{x}$	s	T (°C)	UR (%)	Data
	1	2	3	4	5	6	7					
t (s)	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	-	-			
L (m)	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093	0,0094	0,0092	0,0093	-	-	24,8	78,4	06/01/2025
c _L (m/s)	4667,5	4628,8	4661,3	4642,5	4707,5	4612,5	4660,0	4654,29	30,62			

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE B – DADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERADOS DE BORRACHA

Tabela B. 1 – Densidade aparente

Amostra	Característica	Exemplar					T (°C)	UR (%)	Data
		1	2	3	4	5			
AB-E2,0-D705	Espessura (mm)	2,1	2,2	2,2	2,1	2,1	23,1	54,0	31/07/2023
	Comprimento 1 (mm)	200,9	199,1	200,4	198,7	200,4	-	-	-
	Comprimento 2 (mm)	199,8	201,2	201,8	202,6	199,9	-	-	-
	Área (cm²)	401,4	400,6	404,4	402,6	400,6	-	-	-
	Massa (g)	60,0	61,5	62,8	58,4	60,4	-	-	-
AB-E3,0-D705	p (kg/m³)	711,9	698,2	706,2	690,7	717,4	704,87	10,65	-
	Espessura (mm)	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	0,0	-
	Comprimento 1 (mm)	202,2	201,5	199,4	200,6	201,2	-	-	-
	Comprimento 2 (mm)	197,0	197,8	200,5	201,2	199,7	-	-	-
	Área (cm²)	398,3	398,6	399,8	403,6	401,8	-	-	-
AB-E5,0-D860	Massa (g)	91,1	89,8	90,5	90,3	89,4	-	-	-
	p (kg/m³)	714,4	703,8	707,3	698,9	695,5	703,99	7,37	-
	Espessura (mm)	5,2	5,3	5,2	5,3	5,2	5,2	0,1	-
	Comprimento 1 (mm)	198,5	200,2	199,4	199,6	200,6	-	-	-
	Comprimento 2 (mm)	198,3	199,2	204,3	202,1	202,3	-	-	-
AB-E9,0-D875	Área (cm²)	393,6	398,8	407,4	403,4	405,8	-	-	-
	Massa (g)	175,9	181,3	183,4	180,1	183,1	-	-	-
	p (kg/m³)	859,2	857,8	865,9	842,2	867,8	858,60	10,09	-
	Espessura (mm)	9,2	9,2	9,2	9,3	9,2	9,2	0,0	-
	Comprimento 1 (mm)	198,7	198,9	200,9	198,9	199,3	-	-	-
AB-E9,0-D875	Comprimento 2 (mm)	200,7	199,6	199,0	198,4	199,9	-	-	-
	Área (cm²)	398,8	397,0	399,8	394,6	398,4	-	-	-
	Massa (g)	317,6	316,1	324,1	323,4	324,3	-	-	-
	p (kg/m³)	865,7	865,4	881,3	881,1	884,7	875,64	9,30	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela B. 2 – Massa específica

Amostra	Característica	Exemplar				$\bar{x}$	s	Data
		1	2	3	4			
Grânulos de borraça reciclados		1148,50	-	-	-	-	0,80	11/08/2023
		-	1148,00	-	-	-	0,80	
		-	-	1145,60	-	-	1,40	
		-	-	-	1144,90	-	1,00	
		-	-	-	-	1146,75	1,77	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela B. 3 – Porosidade

Amostra	Característica	Exemplar					$\bar{x}$	s	Data
		1	2	3	4	5			
AB-E2,0-D705	ρ (kg/m³)	711,92	698,18	706,20	690,69	717,38	-	-	31/07/2023
	μ (kg/m³)	1146,75					-	-	11/08/2023
	Porosidade (Ω)	0,38	0,39	0,38	0,40	0,37	0,39	0,01	-
	ρ (kg/m³)	714,38	703,85	707,31	698,93	695,47	-	-	31/07/2023
AB-E3,0-D705	μ (kg/m³)	1146,75					-	-	11/08/2023
	Porosidade (Ω)	0,38	0,39	0,38	0,39	0,39	0,39	0,01	-
	Porosidade (Ω)	0,38	0,39	0,38	0,39	0,38	0,39	0,01	
	ρ (kg/m³)	859,22	857,81	865,91	842,25	867,82	-	-	31/07/2023
AB-E5,0-D860	μ (kg/m³)	1146,75					-	-	11/08/2023
	Porosidade (Ω)	0,25	0,25	0,24	0,27	0,24	0,25	0,01	-
	ρ (kg/m³)	865,74	865,39	881,28	881,13	884,65	-	-	31/07/2023
	μ (kg/m³)	1146,75					-	-	11/08/2023
AB-E9,0-D875	Porosidade (Ω)	0,25	0,25	0,23	0,23	0,23	0,24	0,01	-

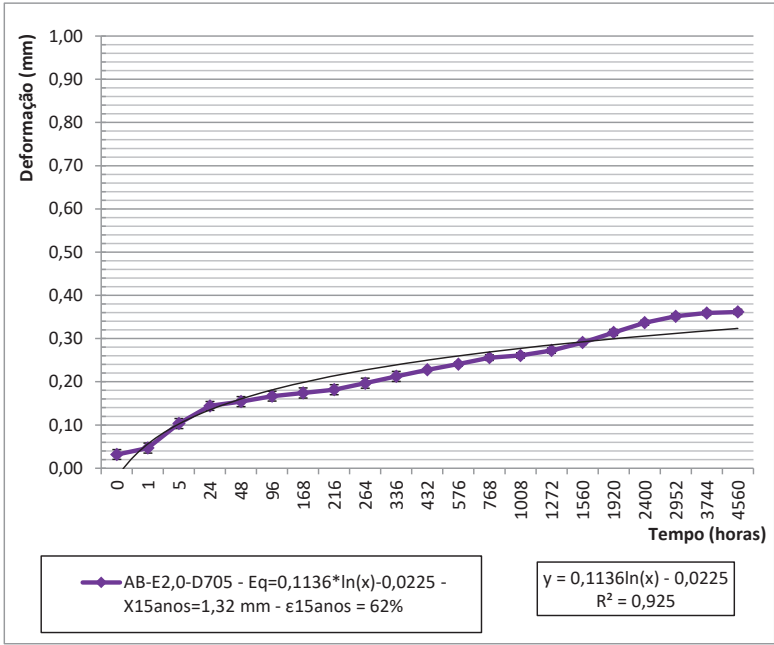
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela B. 4 – Resistência à compressão

Amostra	Característica	Exemplar			$\bar{x}$	s	Data
		1	2	3			
AB-E2,0-D705	F_{10} (N)	4582,3	5400,1	5577,6	-	-	17/05/2024
	Área (mm ²)	40139,8	40058,9	40440,7	-	-	
	σ_{10} (kPa)	114,2	134,8	137,9	129,0	12,9	
AB-E3,0-D705	F_{10} (N)	6506,2	6368,6	6243,3	-	-	17/05/2024
	Área (mm ²)	39833,4	39856,7	39979,7	-	-	
	σ_{10} (kPa)	163,3	159,8	156,2	159,8	3,6	
AB-E5,0-D860	F_{10} (N)	5770,2	5906,8	5660,1	-	-	17/05/2024
	Área (mm ²)	39362,6	39879,8	40737,4	-	-	
	σ_{10} (kPa)	146,6	148,1	138,9	144,5	4,9	
AB-E9,0-D875	F_{10} (N)	7607,8	8168,3	7222,4	-	-	17/05/2024
	Área (mm ²)	39879,1	39700,4	39979,1	-	-	
	σ_{10} (kPa)	190,8	205,7	180,7	192,4	12,6	

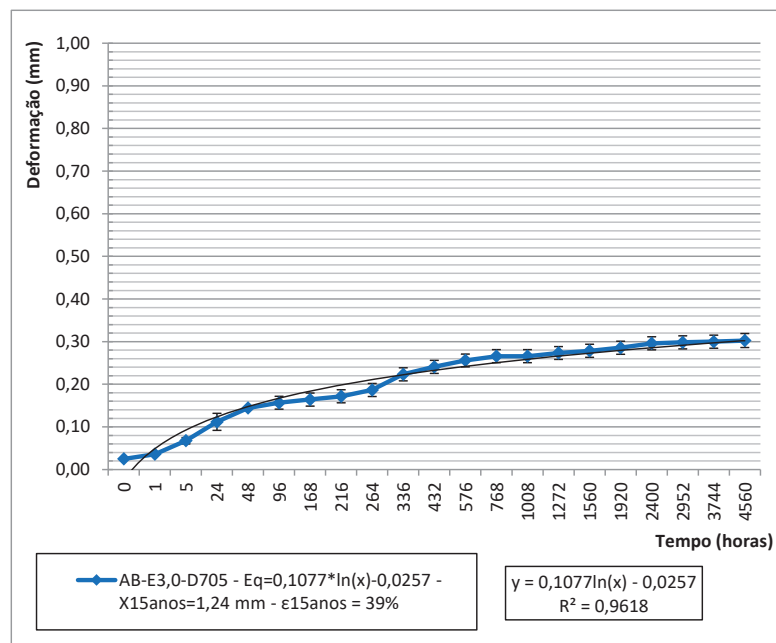
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B. 1 – Fluência à compressão da amostra AB-E2,0-D705



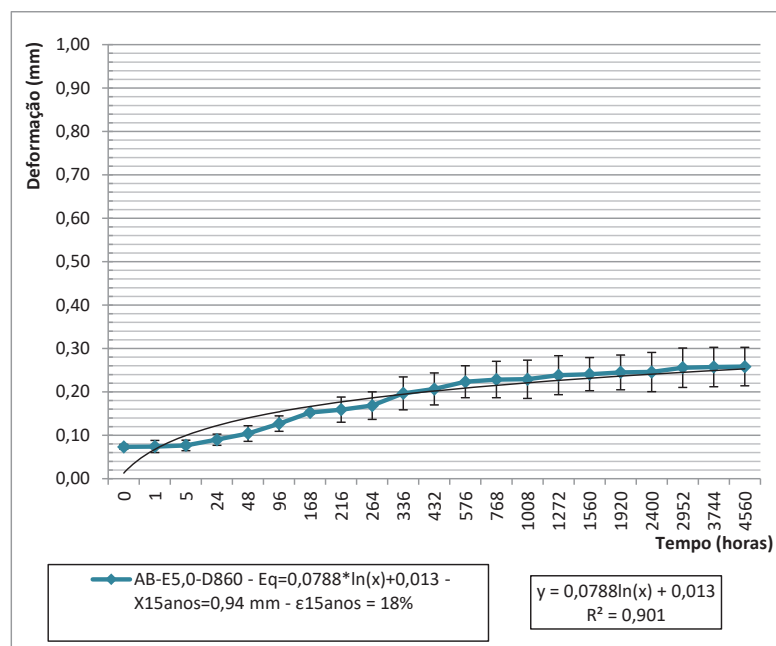
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B. 2 – Fluência à compressão da amostra AB-E3,0-D705



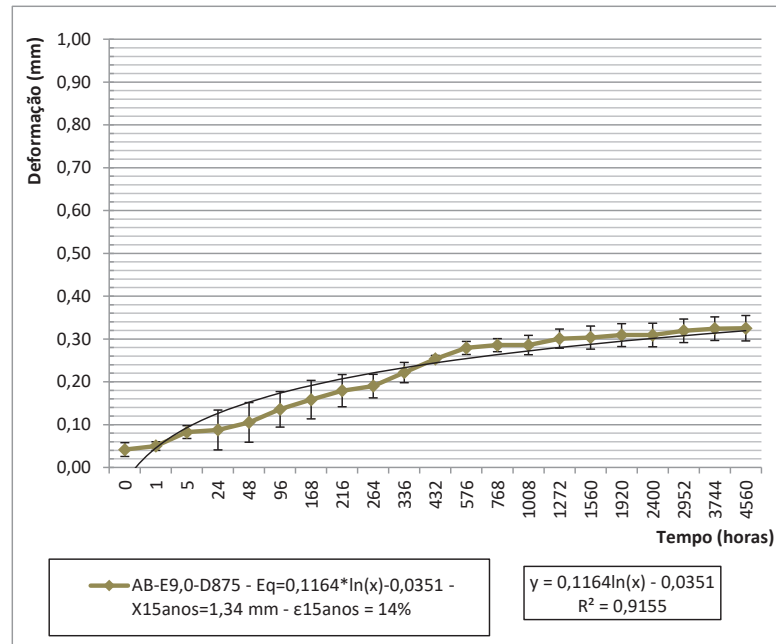
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B. 3 – Fluência à compressão da amostra AB-E5,0-D860



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B. 4 – Fluência à compressão da amostra AB-E9,0-D875



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela B. 5 – Capacidade de amortecimento vibracional

Amostra	Característica	Exemplar			$\bar{x}$	s	Data
		1	2	3			
AB-E2,0-D705	f_r (Hz)	63,00	63,00	66,00	64,0	1,7	04/04/2024
	f_1 (Hz)	54,53	53,14	60,82	56,2	4,1	
	f_2 (Hz)	69,90	73,18	72,77	72,0	1,8	
	m'_t (kg/m ²)	194,07			-	-	
	s' (MN/m ³)	30,41	30,41	33,37	31,4	1,7	
	$f_{r,15\text{anos}}$ (Hz)	101,33	101,33	106,16	102,9	2,8	-
	$s'_{15\text{anos}}$ (MN/m ³)	78,67	78,67	86,34	81,2	4,4	
	ζ	0,12	0,16	0,09	0,12	0,03	
	η	0,24	0,32	0,18	0,25	0,07	
	E_{din} (MPa)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,00	
AB-E3,0-D705	Q	4,10	3,14	5,52	4,26	1,20	04/04/2024
	f_r (Hz)	50,00	54,00	51,00	51,7	2,1	
	f_1 (Hz)	44,69	48,52	46,12	46,4	1,9	
	f_2 (Hz)	53,91	59,12	55,62	56,2	2,7	
	m'_t (kg/m ²)	194,07			-	-	
	s' (MN/m ³)	19,15	22,34	19,93	20,5	1,7	-
	$f_{r,15\text{anos}}$ (Hz)	63,92	69,04	65,20	66,1	2,7	
	$s'_{15\text{anos}}$ (MN/m ³)	31,31	36,51	32,57	33,5	2,7	
	ζ	0,09	0,10	0,09	0,09	0,00	
	η	0,18	0,20	0,19	0,19	0,01	
	E_{din} (MPa)	0,06	0,07	0,06	0,07	0,01	-
	Q	5,42	5,09	5,37	5,30	0,18	

(continuação)

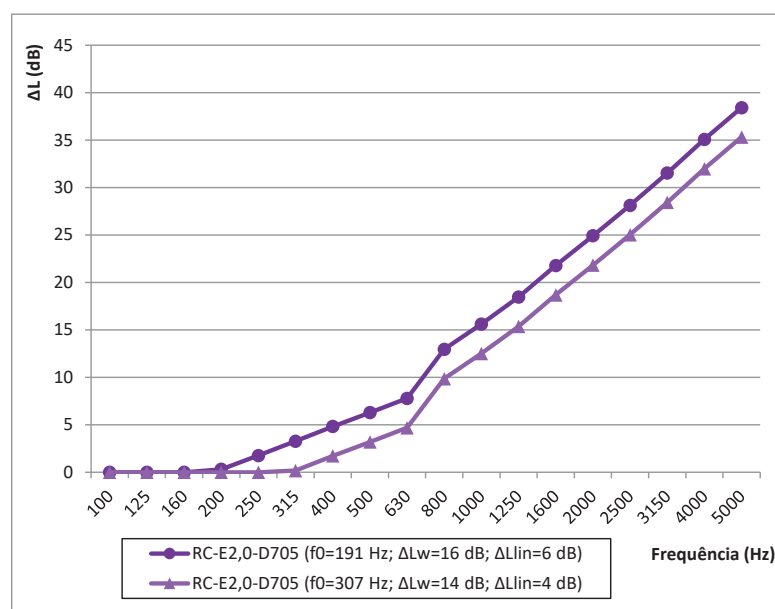
Amostra	Característica	Exemplar			$\bar{x}$	s	Data
		1	2	3			
AB-E4,0-D705 (2 x AB-E2,0-D705)	f_r (Hz)	56,00	54,00	54,00	54,7	1,2	04/04/2024
	f_1 (Hz)	49,43	48,59	48,36	48,8	0,6	
	f_2 (Hz)	60,70	58,56	59,00	59,4	1,1	
	m'_t (kg/m ²)	194,07			-	-	
	s' (MN/m ³)	24,03	22,34	22,34	22,9	1,0	
	ζ	0,10	0,09	0,10	0,10	0,00	
	η	0,20	0,18	0,20	0,19	0,01	
	E_{din} (MPa)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	
	Q	4,97	5,42	5,08	5,15	0,23	
AB-E5,0-D705 (AB-E2,0-D705 + AB-E3,0-D705)	f_r (Hz)	47,00	50,00	48,00	48,3	1,5	04/04/2024
	f_1 (Hz)	42,88	44,01	43,02	43,3	0,6	
	f_2 (Hz)	51,79	53,90	53,23	53,0	1,1	
	m'_t (kg/m ²)	194,07			-	-	
	s' (MN/m ³)	16,92	19,15	17,65	17,9	1,1	
	ζ	0,09	0,10	0,11	0,10	0,01	
	η	0,19	0,20	0,21	0,20	0,01	
	E_{din} (MPa)	0,09	0,10	0,09	0,10	0,01	
	Q	5,27	5,06	4,70	5,01	0,29	
AB-E6,0-D705 (2 x AB-E3,0-D705)	f_r (Hz)	46,00	46,00	47,00	46,3	0,6	04/04/2024
	f_1 (Hz)	41,94	41,63	41,99	41,9	0,2	
	f_2 (Hz)	49,23	49,55	50,39	49,7	0,6	
	m'_t (kg/m ²)	194,07			-	-	
	s' (MN/m ³)	16,21	16,21	16,92	16,4	0,4	
	ζ	0,08	0,09	0,09	0,08	0,01	
	η	0,16	0,17	0,18	0,17	0,01	
	E_{din} (MPa)	0,10	0,10	0,11	0,11	0,00	
	Q	6,31	5,81	5,60	5,90	0,37	
AB-E7,0-D705 (AB-E2,0-D705 + AB-E3,0-D705 + AB-E2,0-D705)	f_r (Hz)	45,00	46,00	46,00	45,7	0,6	04/04/2024
	f_1 (Hz)	41,22	41,70	41,31	41,4	0,3	
	f_2 (Hz)	49,24	49,50	49,56	49,4	0,2	
	m'_t (kg/m ²)	194,07			-	-	
	s' (MN/m ³)	15,51	16,21	16,21	16,0	0,4	
	ζ	0,09	0,08	0,09	0,09	0,00	
	η	0,18	0,17	0,18	0,18	0,01	
	E_{din} (MPa)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,00	
	Q	5,61	5,90	5,58	5,69	0,18	

(continuação)

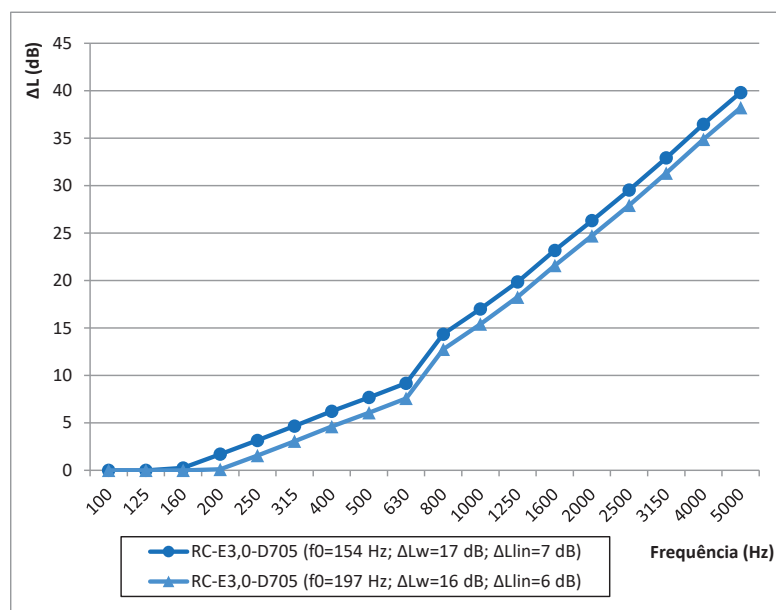
Amostra	Característica	Exemplar			$\bar{x}$	s	Data
		1	2	3			
AB-12,0-D705	f_r (Hz)	38,00	38,00	38,00	38,0	0,0	04/04/2024
	f_1 (Hz)	34,40	34,68	34,31	34,5	0,2	
	f_2 (Hz)	40,37	40,95	40,74	40,7	0,3	
	m'_t (kg/m ²)	194,07			-	-	
(4 x AB-E3,0-D705)	s' (MN/m ³)	11,06	11,06	11,06	11,1	0,0	
	ζ	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	
	η	0,16	0,17	0,17	0,16	0,01	
	Q	6,37	6,06	5,91	6,11	0,23	

Fonte: Elaborado pelo autor

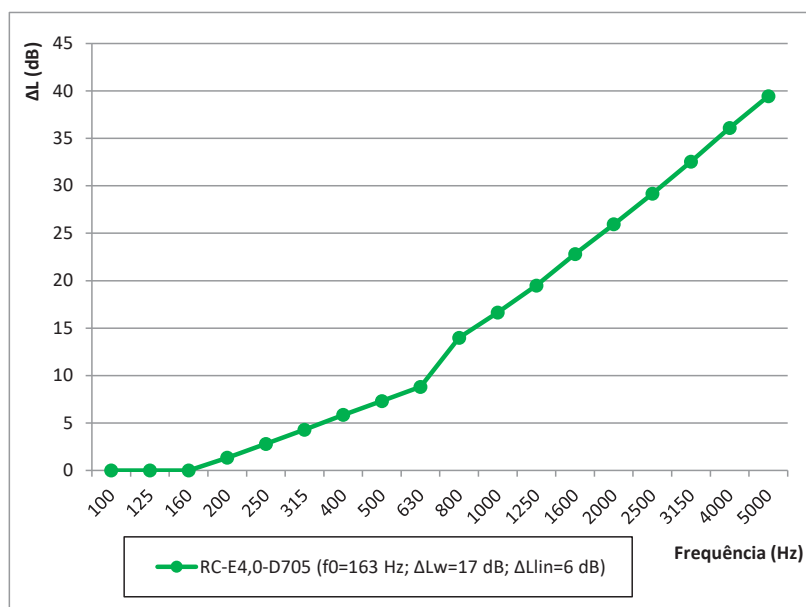
Figura B. 5 – Redução dos níveis de pressão sonora de impacto da composição RC-E2,0-D705 (presente e futura)



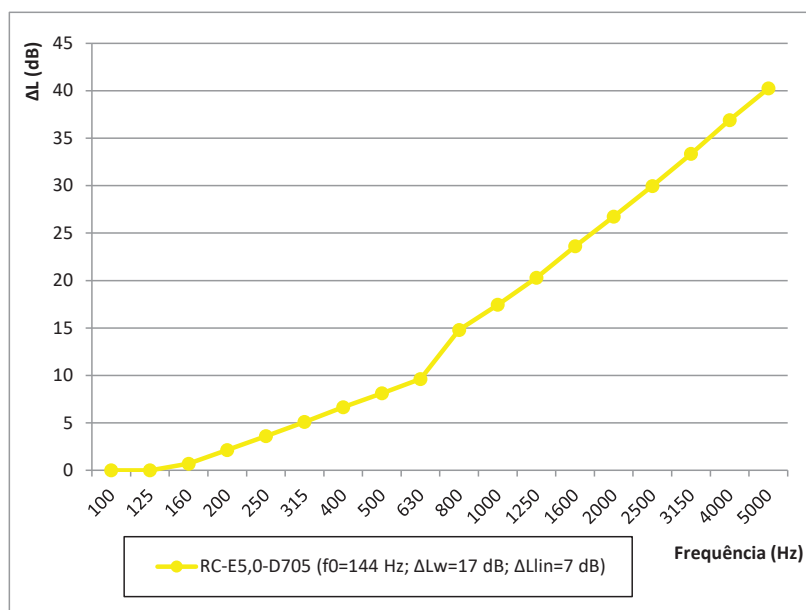
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B. 6 – ΔL da composição RC-E3,0-D705 (presente e futura)

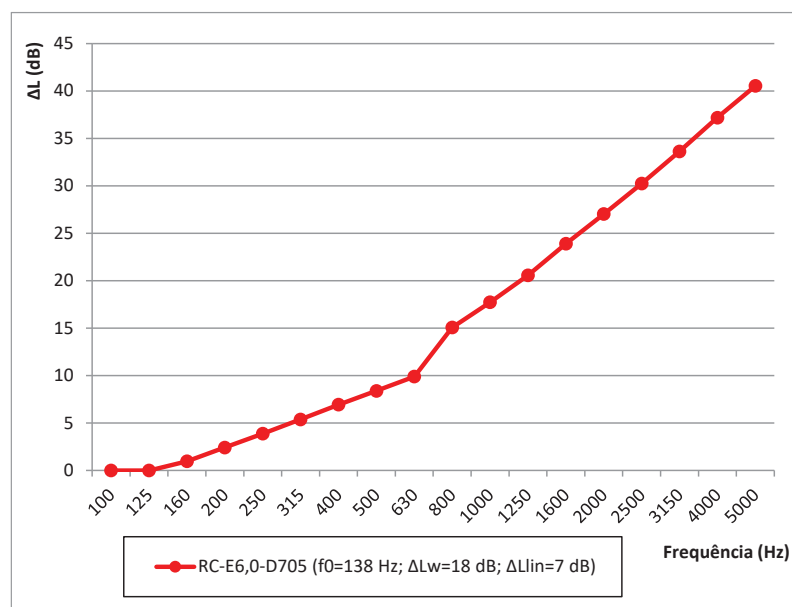
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B. 7 – ΔL da composição RC-E4,0-D705

Fonte: Elaborado pelo autor

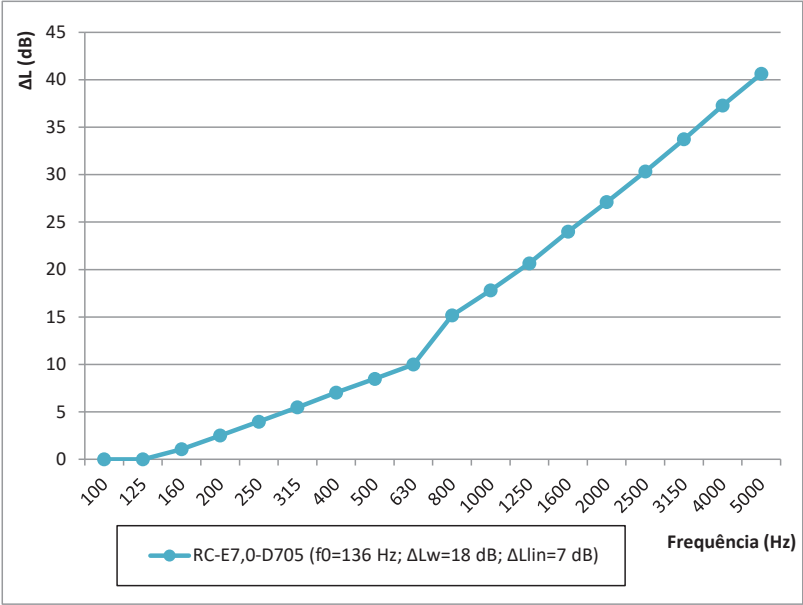
Figura B. 8 – ΔL da composição RC-E5,0-D705

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B. 9 – ΔL da composição RC-E6,0-D705

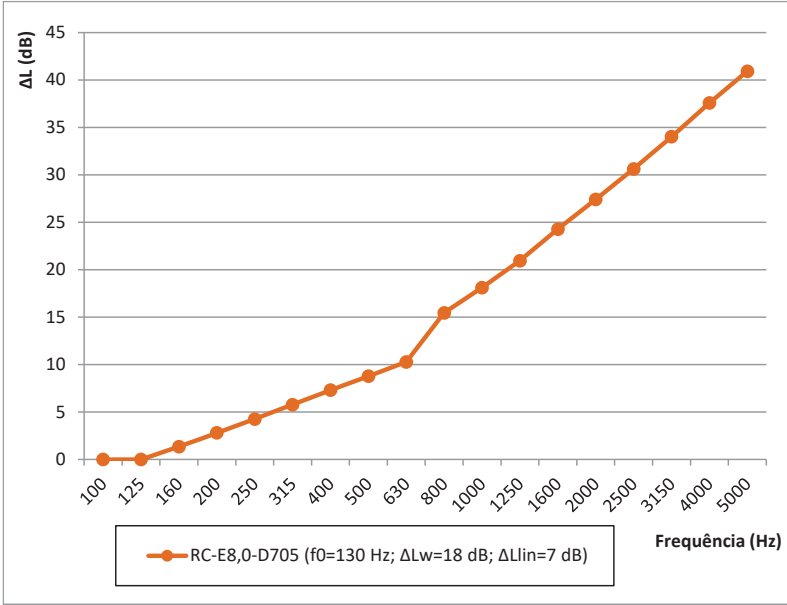
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B. 10 – ΔL da composição RC-E7,0-D705

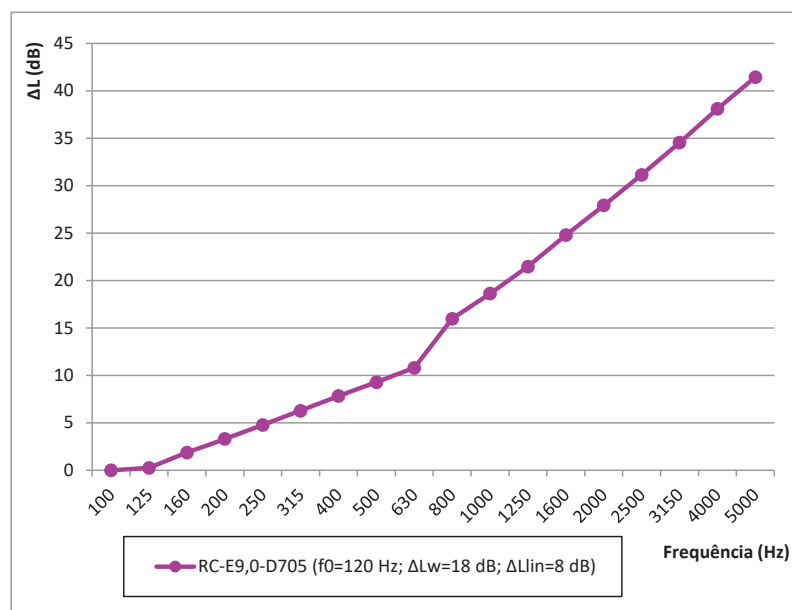


Fonte: Elaborado pelo autor

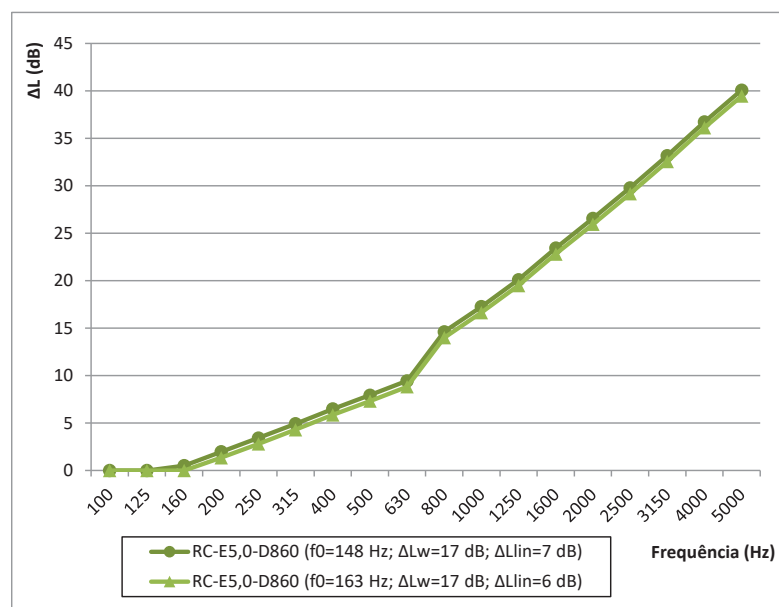
Figura B. 11 – ΔL da composição RC-E8,0-D705



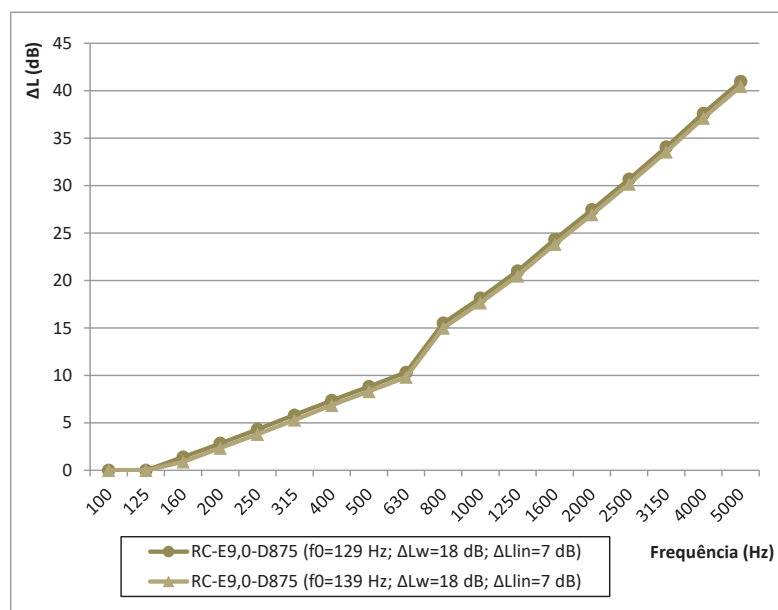
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B. 12 – ΔL da composição RC-E9,0-D705

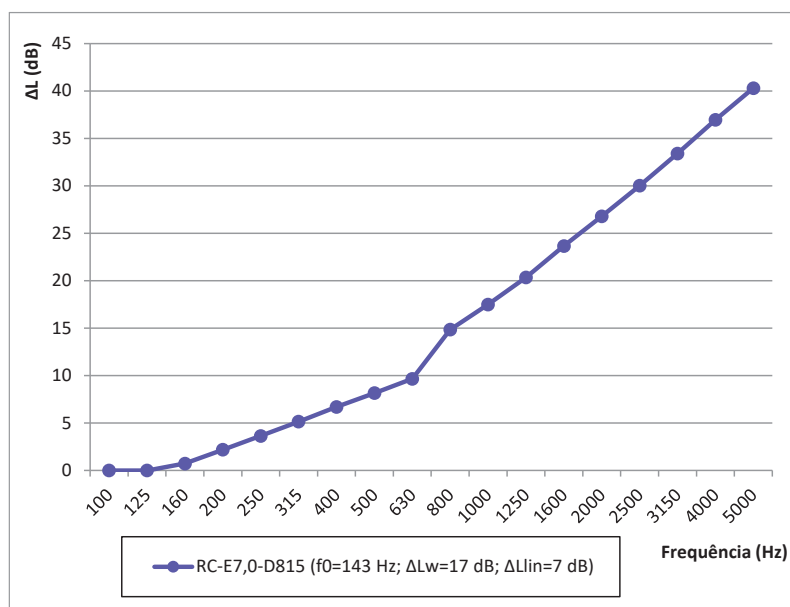
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B. 13 – ΔL da composição RC-E5,0-D860 (presente e futura)

Fonte: Elaborado pelo autor

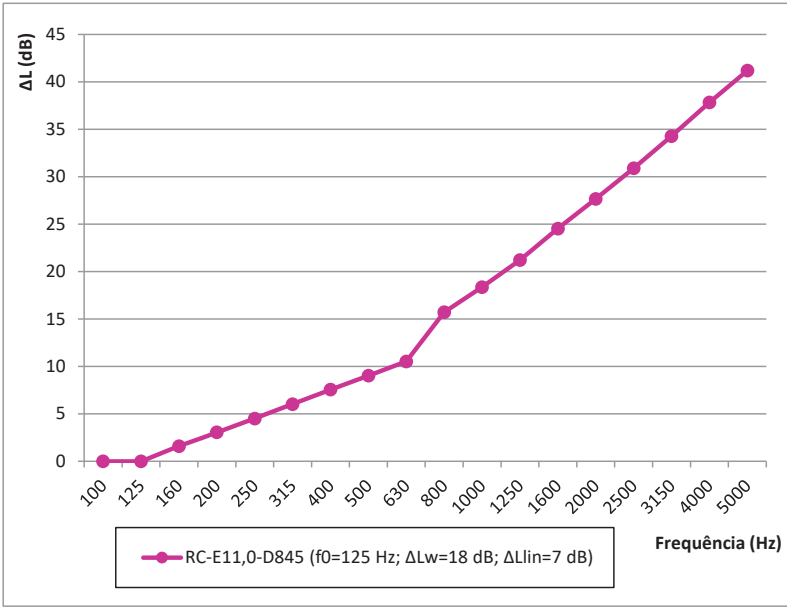
Figura B. 14 – ΔL da composição RC-E9,0-D875 (presente e futura)

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B. 15 – ΔL da composição RC-E7,0-D815

Fonte: Elaborado pelo autor

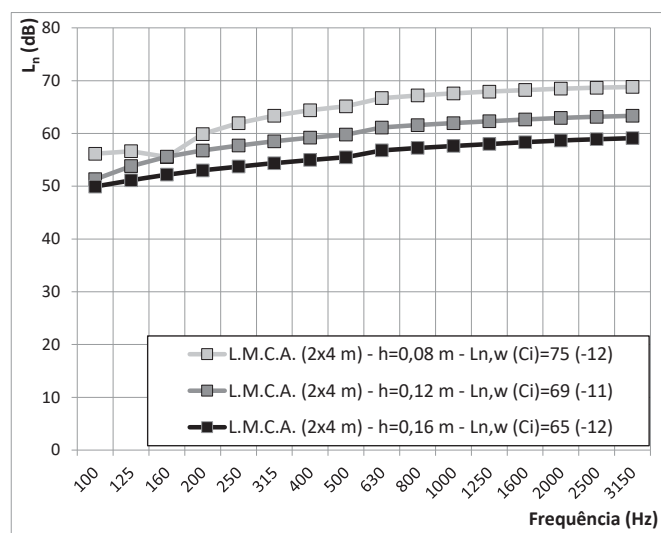
Figura B. 16 – ΔL da composição RC-E11,0-D845



Fonte: Elaborado pelo autor

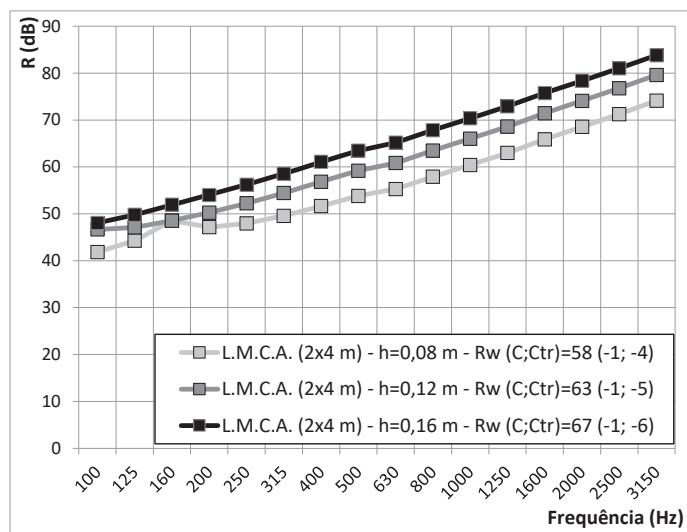
APÊNDICE C – DADOS DA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS COM O USO DO REVESTIMENTO COMPÓSITO

Figura C. 1 – Nível de pressão sonora de impacto normalizado previsto dos sistemas estruturais sem revestimento (DORM-2x4m)



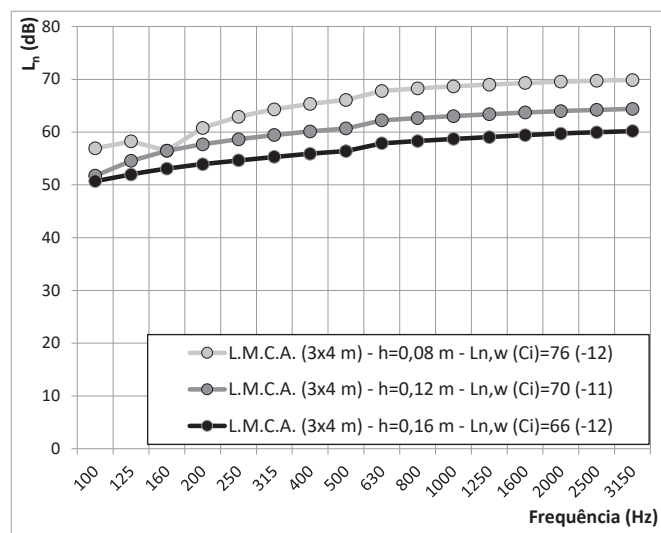
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 2 – Índice de redução sonora previsto dos sistemas estruturais sem revestimento (DORM-2x4m)



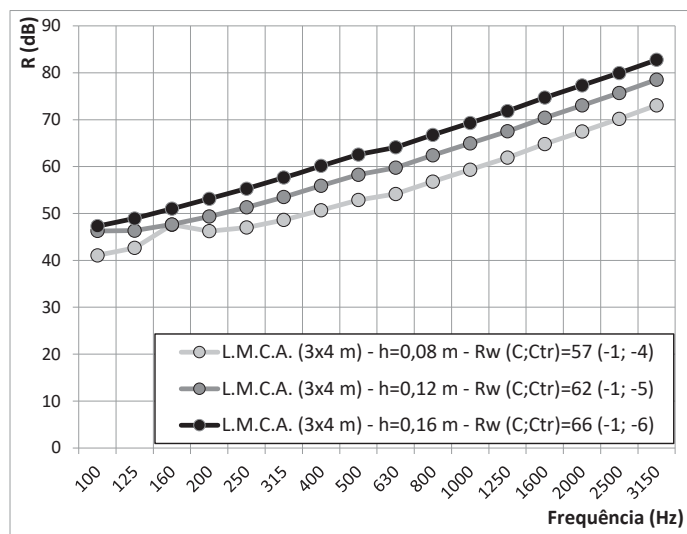
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 3 – Nível de pressão sonora de impacto normalizado previsto dos sistemas estruturais sem revestimento (DORM-3x4m)



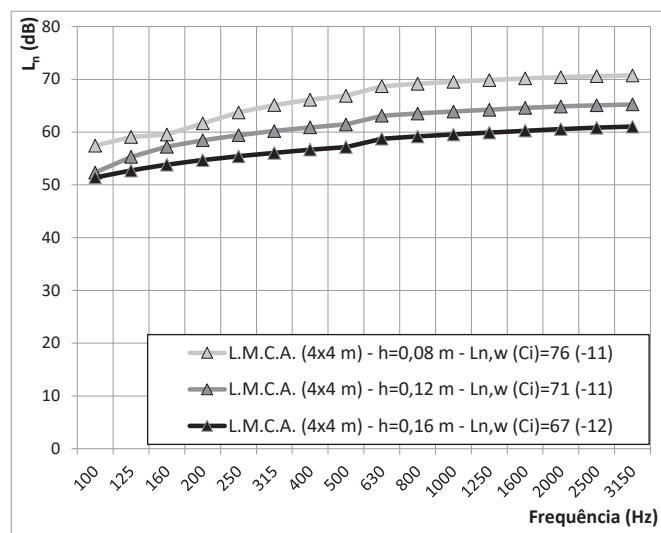
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 4 – Índice de redução sonora previsto dos sistemas estruturais sem revestimento (DORM-3x4m)



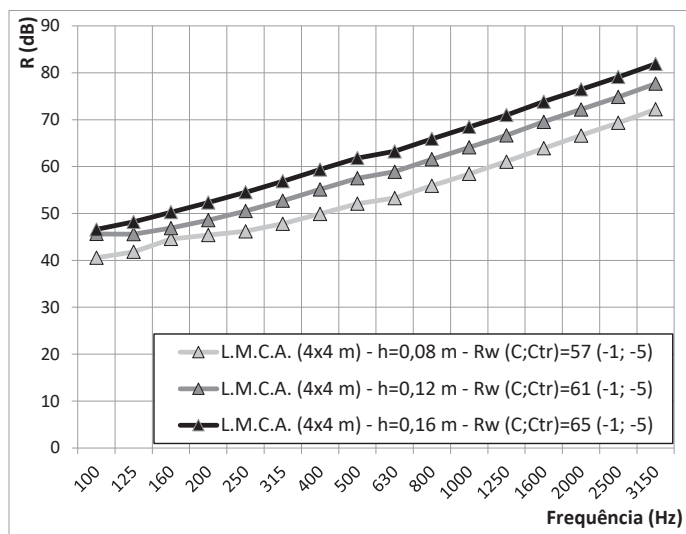
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 5 – Nível de pressão sonora de impacto normalizado previsto dos sistemas estruturais sem revestimento (DORM-4x4m)



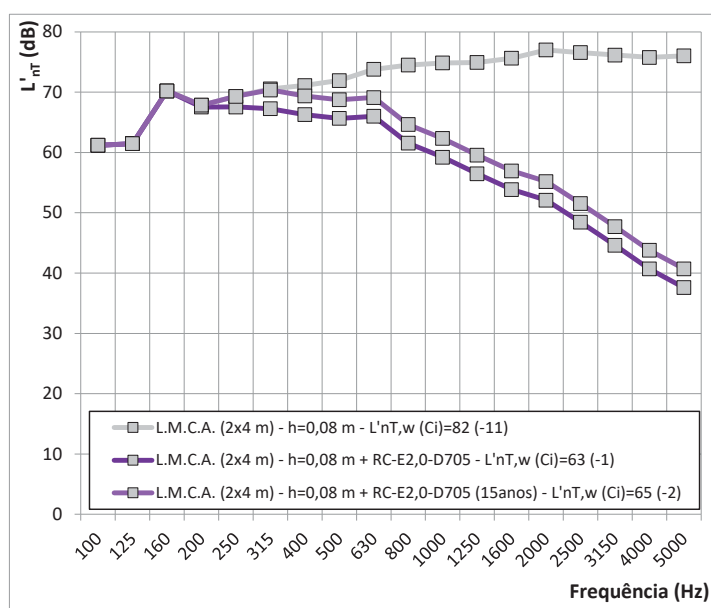
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 6 – Índice de redução sonora previsto dos sistemas estruturais sem revestimento (DORM-4x4m)



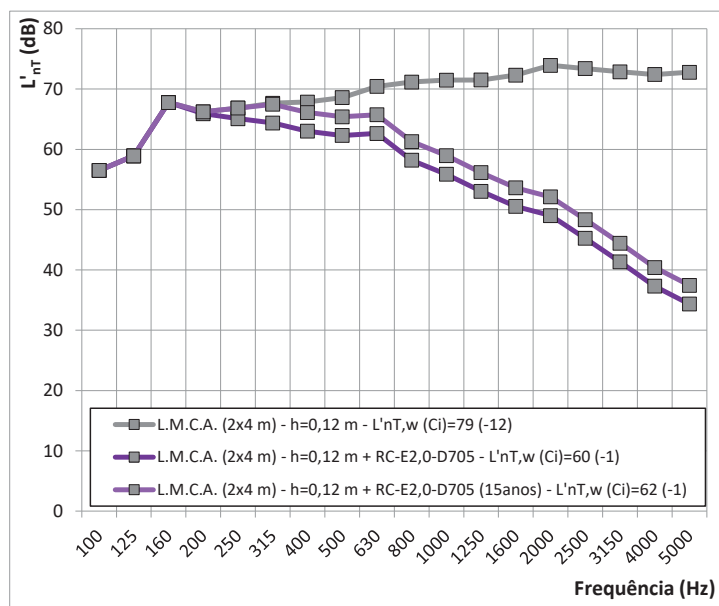
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 7 – Nível de pressão sonora de impacto padronizado previsto para a laje maciça com 8 cm de espessura revestida (DORM-2x4m)



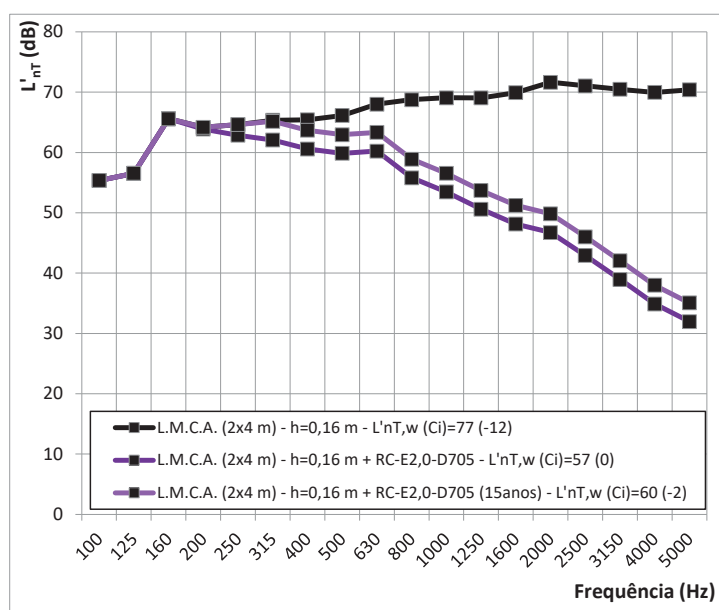
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 8 – Nível de pressão sonora de impacto padronizado previsto para a laje maciça com 12 cm de espessura revestida (DORM-2x4m)



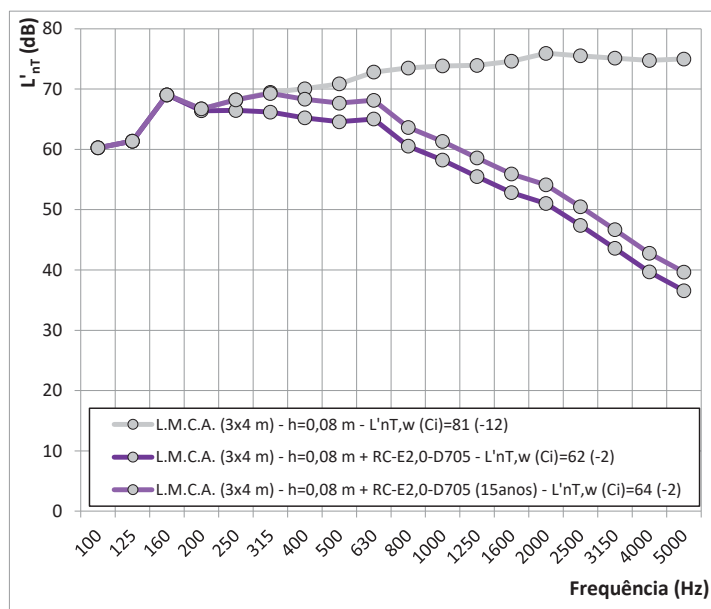
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 9 – Nível de pressão sonora de impacto padronizado previsto para a laje maciça com 16 cm de espessura revestida (DORM-2x4m)



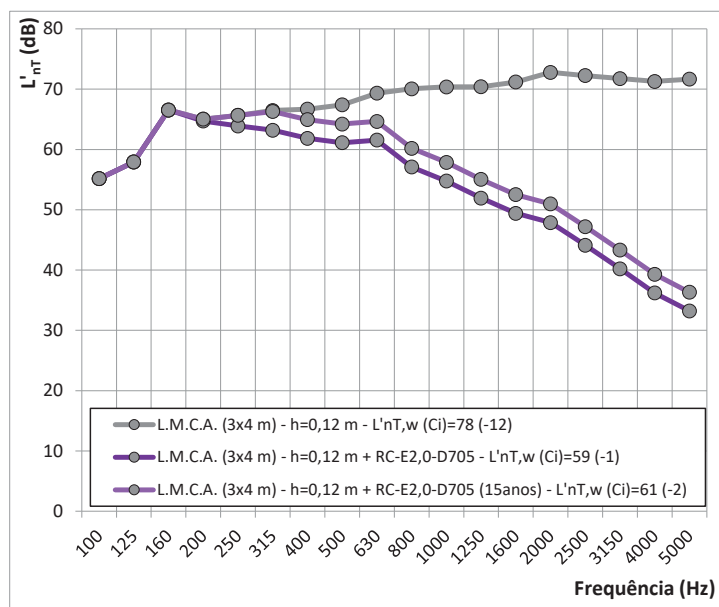
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 10 – Nível de pressão sonora de impacto padronizado previsto para a laje maciça com 8 cm de espessura revestida (DORM-3x4m)



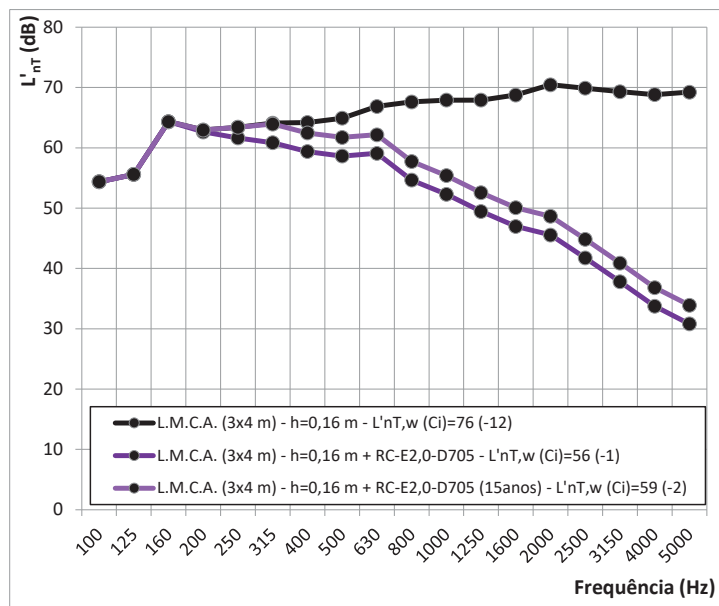
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 11 – Nível de pressão sonora de impacto padronizado previsto para a laje maciça com 12 cm de espessura revestida (DORM-3x4m)



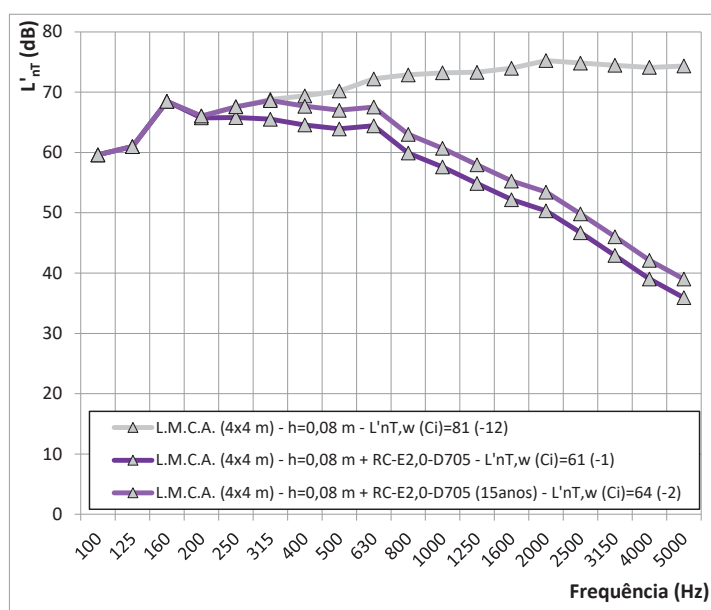
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 12 – Nível de pressão sonora de impacto padronizado previsto para a laje maciça com 16 cm de espessura revestida (DORM-3x4m)



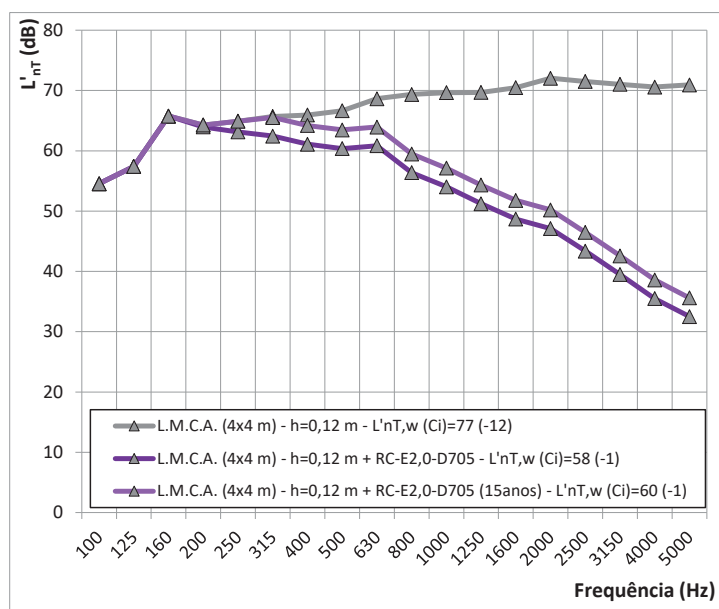
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 13 – Nível de pressão sonora de impacto padronizado previsto para a laje maciça com 8 cm de espessura revestida (DORM-4x4m)



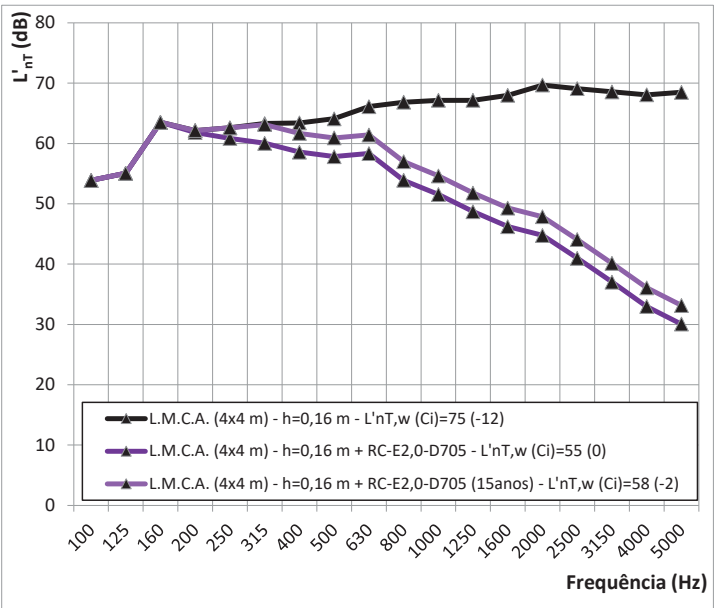
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 14 – Nível de pressão sonora de impacto padronizado previsto para a laje maciça com 12 cm de espessura revestida (DORM-4x4m)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura C. 15 – Nível de pressão sonora de impacto padronizado previsto para a laje maciça com 16 cm de espessura revestida (DORM-4x4m)



Fonte: Elaborado pelo autor