



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES E ACÚSTICA

Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DO RUÍDO DE IMPACTO AO LONGO
DO TEMPO DE SISTEMAS DE CONTRAPISO FLUTUANTE**

Gleidson Martins Pinheiro
Orientador: Prof. Erasmo Felipe Vergara. Dr. Eng.

Florianópolis, 2019

Gleidson Martins Pinheiro

**AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DO RUÍDO DE IMPACTO AO LONGO
DO TEMPO DE SISTEMAS DE CONTRAPISO FLUTUANTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Erasmo Felipe Vergara.
Dr. Eng.

Florianópolis, 2019

Ficha de identificação da obra

Pinheiro, Gleidson Martins

AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DO RUÍDO DE IMPACTO AO LONGO DO TEMPO DE SISTEMAS DE CONTRAPISO FLUTUANTE / Gleidson Martins Pinheiro ; orientador, Erasmo Felipe Vergara Miranda

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Ruído de Impacto. 2. Piso flutuante. 3. Desempenho em longo prazo. 4. Mantas resilientes. I. Miranda, Erasmo Felipe Vergara, II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.III. Título .

Gledson Martins Pinheiro

**AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DO RUÍDO DE IMPACTO AO LONGO DO TEMPO DE
SISTEMAS DE CONTRAPISO FLUTUANTE**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros.

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Andrey Ricardo da Silva, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcos Lenzi, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em engenharia mecânica

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador do Programa

Prof. Erasmo Felipe Vergara. Dr. Eng.
Orientador

Florianópolis, Maio de 2019.

DEDICATÓRIA

- ∞ Dedico este trabalho ao meus pais, Raimundo Glison e Mirlânia Martins, que com muito amor, confiança e esforço, tornaram possível a realização do sonho de ser mestre em acústica e vibrações.
- ∞ Dedico também ao amigo e mestre Juan Camilo, quem nos deixou após intensa luta contra o câncer, porém não sem antes nos dar um exemplo de ternura, paz, amizade, respeito e algumas qualidades difíceis de nomeação, encontradas em pessoas com mente e espírito elevados.

AGRADECIMENTOS

- § A Deus, quem me capacitou em todos os momentos e providenciou cada experiência e encontro relevantes para a realização deste trabalho.
- § A toda minha família, pela união, educação, oração, paciência, confiança e todos os dons do mais puro e desmedido amor que alguém pode dar e receber.
- § À minha companheira Alessandra, pelo amor baseado na intercessão, na partilha, na espera, na doação e no perdão.
- § Ao professor Felipe Vergara, pela orientação, ajuda, paciência e confiança.
- § Ao professor Jonny da Silva, que em suas atividades enquanto coordenador, sempre agiu com compreensão e responsabilidade diante dos desafios e demandas para a realização deste trabalho.
- § Aos professores Arcanjo Lenzi, pelos ensinamentos de ciência e de vida, pelo exemplo de humanidade; e Andrey Ricardo, pelos conselhos, ensinamentos e postura humana e profissional.
- § Aos amigos cativados nesta jornada, Henrique Alende, Gildean, Plínio, Aldren, Wagner Santos, Márcio Santos, José Pedro, Matheus Veloso, Guilherme Zanotelli, Pedrão, Andressa, Emanuele, Priscila, Ingrid, Leandro. Vocês deram um profundo valor para esta conquista.
- § A todos os colegas, secretárias, professores, colaboradores, mestrandos, doutorandos e graduandos do Laboratório de Vibrações e Acústica, que tornam especial o convívio deste local de trabalho.

EPÍGRAFE

Só entendi o valor do silêncio quando precisei me calar pra não magoar alguém.

Jean Jacques Rousseau

RESUMO

Em sistemas de piso de edificações habitacionais, após a instalação de uma solução de contrapiso flutuante, a manta resiliente adotada estará sujeita a uma carga constante (imposta pelo contrapiso, piso e móveis) e às cargas acidentais, podendo gerar deformações excessivas no material vibroacústico que venham a prejudicar suas propriedades iniciais de isolamento de ruído. A NBR 15575: 2013 apresenta exigências mínimas de durabilidade, que no caso de sistemas de piso consistem em 13 anos. Nesse trabalho, foram realizados ensaios de bancada em mantas de Polietileno Expandido de Baixa Densidade (PEBD), de fibra de Lã de Pet (PET) e de Granulado de Pneu Reciclado (GP), para aferição de parâmetros como a rigidez dinâmica, a partir da qual pode ser estimado o nível de redução de ruído do sistema; a fluência à compressão, obtida para um carregamento estável semelhante ao normalmente proporcionado pelo piso e contrapiso (2 kPa); a compressibilidade; e a perda de transmissão de ruído, medida em bancada reduzida com a utilização da máquina de impacto padrão. Foi observado que os valores medidos da rigidez dinâmica variam positivamente ao longo do tempo para algumas amostras, e negativamente para outras, porém alcançou resultados inferiores quando a amostra foi sujeita a um carregamento acidental. No entanto, os valores obtidos para as mantas avaliadas após o teste de compressibilidade foram maiores em até $8 \text{ MN}/\text{m}^3$ em relação ao valor da manta virgem para um das amostras de PEBD de 10 cm. No teste da fluência à compressão, os resultados obtidos da manta de Lã de Pet (PET) atingiram a maior deformação relativa estimada para 13 anos (65 %). Por sua vez, a amostra de Granulado de Resíduo de Pneu (GP) manteve uma deformação aproximadamente nula ao longo do tempo de medição. A curva de redução de ruído estimado por meio da rigidez dinâmica apresentou-se próxima aos resultados medidos utilizando o modelo de bancada reduzida com o molde de contrapiso com tamanho $1,20 \text{ m} \times 0,80 \text{ m}$. Concluiu-se que, quando considerados os parâmetros de amortecimento dos materiais e a idade da amostra medida, os valores estimados de nível ponderado de redução do ruído de impacto se aproximaram dos medidos em bancada reduzida, exceto para o material de células abertas PET.

Palavras-chave: ruído de impacto, contrapiso flutuante, acústica das edificações.

ABSTRACT

In residential building floor systems, after an installation of a floating floor solution, an adopted resilient material is subject to a constant load and to accidental loads, which may lead to excessive resilient material deformations, impairing their initial properties of sound insulation. The NBR 15575: 2013 features durability minutiae, which for floor systems consisting of 13 years. In this research, tests were carried out on blankets of expanded low density polyethylene (PEBD), Pet wool fiber (PET) and granulated recycled tires (GP), to measure parameters such as dynamic stiffness, from which the noise reduction level of the system can be calculated; the compressive creep, obtained for a constant stress similar to the normal provided by the floor and subfloor (2 kPa); a compressibility; and the reduction of sound transmission, measured in small floor mock-up using the standard tapping machine. It was found that dynamic stiffness increases for some subjects by the time, but the results were lower when an accidental stress happened. However, the values obtained for the blankets evaluated after the compressibility test were higher at up to 8 % MN/m^3 relative to the virgin blanket value for 10 cm PEBD samples. In the compressive creep test, results obtained from PET were bigger than others samples for 13 years (65 %). The sample of GP has maintained no deformation measurable for the evaluation time. A reduction curve estimated by dynamic stiffness presented the results close to measured using the small floor mock-up model with floating size $1,20 \times 0,80 \text{ m}^2$. It was concluded that, using damping parameters of resilient materials, the results have come even closer, except for PET.

keywords: impact sound insulation, floating floor, building acous.

Lista de Figuras

1	Sistema de Contrapiso Flutuante.	34
2	Modelo de Bancada Reduzida.	36
3	Desempenho ao longo do tempo.	37
4	Transmissão do Ruído de Impacto em uma Edificação.	41
5	Modelo massa/mola representativo do sistema de contrapiso flutuante.	47
6	a - Correção com ajuste da rigidez dinâmica; b - Correção da inclinação da curva pelo fator de qualidade.	51
7	Modelo reduzido para medição da redução da transmissão sonora de impacto.	59
8	Comportamento dinâmico do sistema quando submetido a uma excitação pontual de impacto: (a) Função Resposta em Frequência em termos de aceleração; (b) Forma modal para a vibração massa-mola-massa; (c) Primeiro modo de vibração de flexão.	60
9	Curvas de Redução Sonora de Impacto Padrão para soluções de piso flutuantes obtidas pelos métodos padronizado e simplificado: (a) Manta resiliente de cortiça; (b) Manta resiliente de borracha reciclada.	60
10	Comparação entre os valores de Índice de Redução Sonora de Impacto Ponderado obtido pelos procedimentos da ISO 140-8 e da ISO 16251-1 para diferentes amostras ensaiadas.	61
11	Curvas de Redução Sonora de Impacto obtidas para lajes de concreto flutuantes com diferentes dimensões, utilizando: a) camada uniforme de borracha (4,5 mm de espessura); b) camada de borracha com espessura variável (15/7 mm).	61
12	Curvas de Redução Sonora de Impacto obtidas para lajes de concreto flutuantes sobre várias espumas flexíveis de poliuretano, com diferentes densidades e espessuras, utilizando dois procedimentos de medição.	62
13	Curvas de Redução Sonora de Impacto obtidas uma mesma solução de piso flutuante com diferentes áreas de amostra.	63
14	Comparação entre os valores de Índice de Redução Sonora de Impacto Ponderado para diferentes tamanho de amostras ensaiadas.	63
15	Bancada do teste de rigidez dinâmica.	68
16	Moldes para teste de rigidez dinâmica.	69
17	Bancada teste de rigidez dinâmica x fluência à compressão.	70
18	Ilustração das diferentes espessuras e deformações no ensaio de fluência à compressão.	71
19	Bancada do teste de Fluência à compressão.	74

20	Modelo de apresentação do resultado do teste de compressibilidade.	76
21	Ensaio de compressibilidade - Máquina de compressão.	76
22	Caixas para moldagem dos contrapisos.	79
23	Moldes de contrapisos.	79
24	Acelerômetros fixados abaixo da laje da bancada.	80
25	Testes de Redução de Ruído - Bancada Reduzida.	80
26	FRF - Linear (g/N) do ensaio de rigidez dinâmica da amostra M1 (4 dias).	84
27	PEBD1 10mm - Rigidez Dinâmica (s') em 13 dias.	85
28	FRF - Linear (g/N) do ensaio de rigidez dinâmica da amostra M3 (3 dias)	85
29	FRF - em dB do ensaio de rigidez dinâmica da amostra M1 (4 dias).	86
30	Valores de Q - Amostra PEBD1-M1.	87
31	Curvas de redução do nível de ruído mensurada e estimadas para amostra composta por dois materiais.	98
32	Fluência à compressão de PEBD1 e PEBD2 (em log), variação da temperatura e umidade ao longo do tempo (em log).	105
33	Estimativa da deformação relativa em 13 anos das amostras PEBD1, PEBD2 e PET .	107
34	Resultados de compressibilidade - Amostra 1 - PEBD2	115
35	Resultados de compressibilidade - Média das 3 amostras de PEBD2	116
36	Resultados de compressibilidade - Média das 3 amostras de PEBD1	117
37	Resultados experimentais de vibração da laje com máquina de impacto padrão. . . .	118
38	Resultados obtidos sem manta acústica entre contrapiso e bancada.	119
39	Níveis de aceleração de vibração (L_a) obtidos para excitação direta na laje e para contrapiso CP50 com e sem manta PEBD1-M10.	120
40	Níveis de aceleração de vibração (L_a) obtidos para excitação direta na laje e para contrapiso CP80 com e sem manta PEBD1-M10.	120
41	Níveis de aceleração de vibração (L_a) obtidos para excitação direta na laje e para contrapiso CP120 com e sem manta PEBD1-M10.	121
42	Resultados de Redução obtidos e estimados para manta PEBD1-10.	122
43	Resultados de ΔL obtido e estimado para PEBD1-M10 com CP120.	123
44	Resultados de ΔL obtido e estimados para manta PEBD1-M10 com ajuste pelo Fator de Qualidade (Q) [17].	124
45	Resultados de ΔL obtido e estimados para manta PEBD1-M10 com ajuste pelo fator de qualidade e rigidez dinâmica.	125

46	Resultados de ΔL medido com CP 120 e estimados para manta PEBD1-M10 com ajustes [17] e pelo modelo analítico de Schiavi (2018) [35].	125
47	Resultados de ΔL obtido com CP 120 e estimados para manta PEBD1 de 5 mm com ajustes [17] e pelo modelo analítico de Schiavi (2018) [35].	128
48	Resultados de ΔL medido com CP 120 e estimados para manta PEBD2 de 10 mm com ajustes [17] e pelo modelo analítico de Schiavi (2018) [35].	129
49	Resultados de ΔL medido com CP 120 e estimados para manta PET de 10 mm com ajustes [17] e pelo modelo analítico de Schiavi (2018) [35].	131
50	Resultados de ΔL medido com CP 120 e estimados para manta GP de 3 mm com ajustes [17] e pelos modelos analíticos de Schiavi (2018) [35].	133
51	Resultados de ΔL medido com CP 120 e estimados para amostra composta M8-2 pelo modelo empírico [17] e pelos modelos analíticos de Schiavi (2018) [35].	136

Lista de Tabelas

1	Critério e Nível de Pressão Sonora de Impacto Padrão Ponderado. . . .	45
2	Relação observada entre o Fator de Qualidade (Q) e o ΔL medido segundo a ISO 140-8.	52
3	Resultados de Redução Sonora de Ruído de Impacto, em dB, na frequência de 500 Hz, obtido pelo modelo semi-empírico para 3 dias; para 10 anos; e o resultado medido em laboratório.	56
4	Tabela com exemplo de horários de aferição da fluência.	72
5	Amostras PEBD1	83
6	Rigidez dinâmica (s') e fator de qualidade (Q) - Amostra PEBD1 - 5mm.	88
7	Rigidez dinâmica (s') e fator de qualidade (Q) - Amostra PEBD1 - 10 mm (amostras pré-comprimidas).	89
8	Descrição das amostras intactas e pré-comprimidas de PEBD2	90
9	Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade PEBD2 - 10 mm	91
10	Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade PEBD2 - 5 mm	91
11	Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade PEBD2 - 10 mm pré-comprimidas	92
12	Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade PET - 10 mm	93
13	Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade - GP (M1, M2 e M3).	95
14	Valores de ΔL_w obtidos a partir das médias de s' e de Q e para cada inclinação da curva de redução - GP.	96
15	Valores de ΔL_w obtidos a partir das médias de s' e de Q e para cada inclinação da curva de redução - PEBD1, PEBD2 e PET	97
16	Resultados da rigidez dinâmica mensurada dos compostos e calculada a partir das espécimes individuais	99
17	Resultados mensurados de Fluência à compressão - Amostra PEBD1	101
18	Parâmetros estatísticos obtidos a partir da fluência à compressão de PEBD1 - 123 dias de ensaio	102
19	Resultados da fluência à compressão de PEBD1 - 123 dias de ensaio	102
20	Parâmetros estatísticos obtidos a partir da fluência à compressão de PEBD2 - 123 e 168 dias de ensaio	103
21	Resultados da fluência à compressão de PEBD2 - 123 e 168 dias de ensaio	104
22	Resultados da fluência à compressão de PET - 123 e 168 dias de ensaio	106
23	Resultados estimados após 10 anos	109

24	PEBD2-M3 - Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade x fluência à compressão ao longo do tempo	111
25	Parâmetros estatísticos obtidos a partir da fluência à compressão e da rigidez dinâmica - PEBD2-M3 - 44 dias de ensaio	112
26	Resultados de rigidez dinâmica e fluência à compressão extrapolados para 3 anos e 7 meses	113
27	Resultados PET-M1 - Bancada Rigidez x Fluência x Tempo	114
28	Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material PEBD1 com 10 mm.	127
29	Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material PEBD1 com 5 mm. .	128
30	Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material PEBD2 com 10 mm. .	130
31	Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material PEBD2 com 5 mm. .	130
32	Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material PET com 10 mm. . .	132
33	Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material GP com 3 mm. . . .	134
34	Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material GP com 5 mm. . . .	134
35	Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material GP com 8 mm. . . .	135
36	Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para as amostras compostas pelos materiais GP com 3 mm e PEBD1 com 5 mm.	137
37	Valores de temperatura e umidade aferidos em cada leitura do teste de fluência à compressão	150
38	Parâmetro estatísticos obtidos a partir da fluência à compressão de PEBD1 - 168 dias de ensaio	151
39	Resultados mensurados de Fluência à compressão - Amostra PEBD2 .	151
40	Resultados mensurados de Fluência à compressão - Amostra PET . . .	152
41	Parâmetro estatísticos obtidos a partir da fluência à compressão de PET - 123 e 168 dias de ensaio	152
42	Resultados PEBD2-M3 em log - Bancada Rigidez x Fluência x Tempo	153
43	Resultado estimados do nível de redução do ruído de impacto - Amostra PEBD1-M10.	154
44	Tabela de Cálculo do Nível ponderado de Redução de Ruído de Impacto - Amostra PEBD1-M10 com CP120.	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR - Norma Brasileira.

PEBD - Polietileno Expandido de Baixa Densidade.

PET - Lã de Pet.

GP - Granulado de Resíduo de Pneu.

VP - Vida Útil.

VUP - Vida Útil de Projeto.

FRF - Função de Resposta em Frequência.

ISO - International Organization for Standardization

LISTA DE SÍMBOLOS

W_{rad} - potência sonora radiada para o interior da sala receptora.

$\langle v^2 \rangle$ - média espacial quadrática da velocidade transversal do piso impactado.

ρ - densidade do material.

c_L - velocidade de propagação da onda longitudinal.

σ_{rad} - eficiência de radiação do piso.

F_{rms}^2 - força média quadrática que impacta a laje.

Y - admitância de entrada pontual equivalente a uma placa grossa infinita.

ρ_s - massa por unidade de área do piso.

w - frequência angular.

η - fator de perda do sistema.

F_n - amplitude da força periódica representada pela série de Fourier em infinitas frequências discretas.

$f(t)$ - forma da força impulsiva típica em função do tempo.

T_r - o intervalo de tempo entre cada impacto.

f_r - frequência de impacto (10 Hz).

n - números inteiros naturais.

m - massa do martelo.

v_o - velocidade do martelo no momento do impacto.

h - altura da queda do martelo.

g - aceleração da gravidade.

S_f - média quadrática do espectro da força.

h - espessura do piso.

A_o - absorção normalizada ($10 m^2$).

$\langle p^2 \rangle$ - média espacial quadrática da pressão sonora no ambiente receptor.

L_n - nível de Ruído de Impacto Normalizado.

p_{ref}^2 - pressão de referência.

$L_{n,w,T}$ - Nível de Ruído de Impacto Padrão Ponderado.

ΔL - Nível de Redução do Ruído de Impacto.

L_{no} - nível de pressão sonora do ruído de impacto normalizado na ausência do contrapiso flutuante.

L_n - nível de pressão sonora do ruído de impacto normalizado na presença da solução acústica.

s' - rigidez dinâmica aparente.

F - força dinâmica atuando perpendicularmente na massa flutuante.

S - área da massa.

d - espessura da manta resiliente.

f_r - frequência de ressonância do sistema.

m'_t - massa por unidade de área usada no teste.

m' - massa total por unidade de área do piso flutuante.

f_0 - frequência natural do sistema real.

Q - fator de qualidade.

$f_{r_{pre}}$ - frequência natural do sistema após o pré-carregamento de 12 dias.

s'_a - Rigidez dinâmica por unidade de área do gás enclausurado (ar).

s'_t - Rigidez dinâmica por unidade de área da amostra testada.

s' - rigidez dinâmica por unidade de área do material resiliente instalado.

p_0 - pressão atmosférica.

d - espessura da amostra sob o carregamento estático aplicado.

ϵ - porosidade da amostra ensaiada.

d_S - espessura da amostra a ser ensaiada.

d_L - espessura da amostra sob a tensão de compressão do dispositivo de carregamento ("peso morto").

d_0 - espessura da amostra 60 segundos após o início da aplicação do carregamento constante.

d_t - espessura da amostra em um dado tempo, t [mm].

σ_c - Tensão de compressão.

X - deformação, dada pela variação da espessura da amostra.

ϵ : Deformação relativa.

X_0 - deformação inicial da amostra (60 segundos após o início da aplicação do carregamento).

X_t - deformação da amostra em um dado tempo, t .

X_{ct} - fluência à compressão da amostra submetida à tensão constante ao longo do tempo em condições específicas de temperatura e umidade.

n - número de valores.

x_t - logaritmo do tempo em horas.

y_t - logaritmo da fluência em milímetros.

x_m - média aritmética de x_t .

y_m - média aritmética de y_t .

Q_x - soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de x .

Q_y - soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de y .

Q_{xy} - soma dos desvios.

S_R^2 - variância.

S_R - desvio padrão.

r^2 - coeficiente de determinação.

r - coeficiente de correlação.

a - ponto de interceptação da curva na ordenada.

b - inclinação da curva.

m - 10^a .

d_L - espessura do produto sob um carregamento de 0,25 kPa.

d_F - espessura do produto sob um carregamento de 2 kPa.

d_B - espessura do produto sob um carregamento de 2 kPa após a aplicação em curto período de um carregamento adicional de 48 kPa.

c - compressibilidade.

$L'_{s,t,a}$ - níveis de aceleração da vibração.

T_m - tempo de integração.

a - aceleração.

a_o - aceleração de referência ($1 \times 10^6 \text{ m/s}^2$).

$\Delta L_{t,a}$ - redução do nível de impacto.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
1.1	JUSTIFICATIVA	37
1.2	OBJETIVOS	39
1.2.1	Objetivo geral	39
1.2.2	Objetivos específicos	39
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	40
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	41
2.1	Acústica das edificações	41
2.2	Ruído de impacto de pisos	42
2.3	Sistemas de contrapiso flutuantes	47
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	50
3.1	Estimativa da redução de ruído a partir da aferição da rigidez dinâmica	50
3.2	Avaliação das propriedades do material resiliente ao longo do tempo . .	54
3.3	Avaliação da redução de ruído de impacto em modelo de bancada re- duzida	58
4	MATERIAIS E METODOLOGIA DA PESQUISA	64
4.1	Mantas resilientes analisadas	64
4.1.1	Lã de pet	64
4.1.2	Polietileno expandido de baixa densidade	65
4.1.3	Manta de pneu reciclado	65
4.2	Procedimentos experimentais	66
4.2.1	Rigidez dinâmica	66
4.2.2	Fluência à compressão	70
4.2.3	Compressibilidade	75
4.2.4	Redução do ruído de impacto em bancada reduzida	77
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
5.1	Rigidez dinâmica	83
5.1.1	Material 1 de Polietileno Expandido de Baixa Densidade - PEBD1	83
5.1.2	Material 2 de Polietileno Expandido de Baixa Densidade - PEBD2	90
5.1.3	Material de Lã de Pet - PET	93

5.1.4	Material de Granulado de Pneu - GP	95
5.1.5	Compostos	98
5.2	Fluência à compressão	100
5.2.1	Material PEBD1	101
5.2.2	Material PEBD2	103
5.2.3	Material PET	106
5.3	Estimativa da rigidez futura a partir dos resultados de fluência	108
5.4	Testes bancada - Rigidez dinâmica x Fluência x Tempo	111
5.5	Compressibilidade	114
5.6	Redução de ruído de impacto em bancada	117
5.6.1	Caracterização da bancada reduzida	117
5.6.2	Material PEBD1	120
5.6.3	Material PEBD2	129
5.6.4	Material PET	131
5.6.5	Material GP	133
5.6.6	Compostos	136
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	139
6.1	Conclusões sobre a metodologia	140
6.2	Considerações quanto aos resultados	142
6.3	Sugestões e perspectivas futuras	144
	REFERÊNCIAS	145
7	APÊNDICE	150

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial da Saúde [1], a exposição descontrolada do ser humano ao ruído urbano pode causar distúrbios no sono (causando alterações no sistema imunológico), transtornos cardiovasculares, prejuízos cognitivos, alterações no humor (aborrecimento), zumbido e, em casos críticos, perda de audição induzida por ruído, o que classifica a poluição sonora como um problema de saúde pública. No caso do ruído gerado em edificações habitacionais verticais, outra consequência consiste nos problemas de convivência entre condôminos, tanto devido ao uso nocivo da propriedade, tanto pela não adoção de soluções construtivas que garantam níveis acústicos recomendáveis para cada ambiente, principalmente em dormitórios.

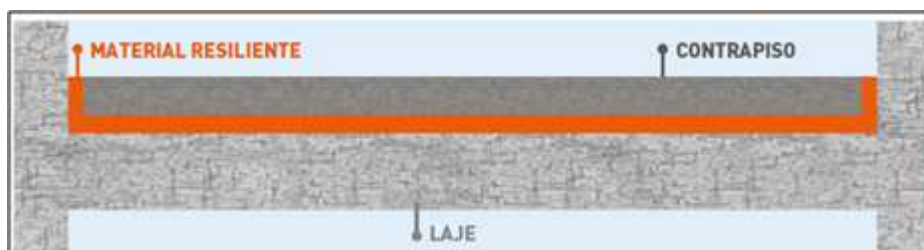
No Brasil, a resolução 1 do conselho nacional do meio ambiente [2], publicada em 8 de março de 1990, em seu item II, definiu que "são prejudiciais à saúde e ao sossego público os ruídos com níveis superiores aos considerados aceitáveis pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10151 - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade" [3]. Por sua vez, a norma "ABNT NBR 10.152:2017 - Níveis de Pressão Sonora em Ambientes Internos a Edificações" [4] estabelece valores de referência para os níveis de ruído no interior das edificações, de acordo com o tipo de uso, bem como apresenta a metodologia de ensaio para aquisição dos resultados em campo. Segundo Carneiro (2014) [5], estas duas normativas possuem aplicação jurídica nas perícias relativas à verificação do grau de exposição do indivíduo ao ruído, porém não apresentam definições em relação ao desempenho de materiais e sistemas construtivos.

Com a entrada em vigor das normas NBR 15575:2013 - Edificações Habitacionais - Desempenho [6], foram estabelecidos os critérios de avaliação do desempenho acústico dos diversos sistemas construtivos de um edifício, sendo definidos os níveis mínimos obrigatórios a serem garantidos ao consumidor nas condições de uso do imóvel, bem como os níveis intermediário e superior, indicativos para qualificação do padrão de desempenho da construção. Como repercussão da publicação desta normativa, é fomentado o interesse e a conscientização dos direitos, por parte dos usuários, em relação à qualidade acústica. Seja para atender às exigências dos clientes ou das legislações vigentes, o cenário da construção civil brasileira demanda por soluções e materiais que melhorem o desempenho acústico dos sistemas construtivos

de um edifício.

Em uma edificação de múltiplos andares, a transmissão do ruído gerado por impacto (também chamado de ruído estrutural) entre duas unidades autônomas de andares distintos pode ser atenuada através da adoção de um sistema de contrapiso flutuante. Esta técnica consiste em desacoplar estruturalmente o contrapiso e a laje estrutural, a partir da aplicação de uma manta resiliente, conforme ilustrado na [Figura 1](#), capaz de amortecer a vibração gerada por queda de objetos, arrastar de móveis, passos e demais formas de excitação direta sobre o piso. A capacidade desta solução em atenuar a vibração transmitida do contrapiso aos demais sistemas da edificação depende do tipo de material resiliente adotado e da espessura do mesmo. Para um dado material, quanto maior for sua espessura, melhor será a efetividade do isolamento. Em contrapartida, a adoção de uma manta muito espessa pode comprometer a rigidez estrutural do contrapiso, gerando patologias e fissuras evidentes. [7]

Figura 1: Sistema de Contrapiso Flutuante.



Fonte: Manual Proacústica (2015).

Após a instalação do contrapiso flutuante, nas condições de uso do imóvel, a manta resiliente adotada estará sujeita ao carregamento constante imposto pelo contrapiso, piso e móveis, além das cargas acidentais. Quando um material é submetido a uma compressão constante, ocorre uma deformação inicial proporcional à carga aplicada, seguida de uma deformação ao longo do tempo, fenômeno denominado fluência à compressão [8]. Tais alterações nas propriedades físicas e geométricas do material em longo prazo podem modificar a capacidade inicial de isolamento acústico do sistema. Segundo o modelo semi-empírico proposto por Schiavi (2007) [9], que desconsidera a variação da densidade do produto, a queda do desempenho acústico de algumas mantas resilientes, em termos de redução do nível de ruído de impacto ponderado, pode chegar a 3 dB após dez anos. Desta forma, um sistema de contrapiso flutuante que inicialmente atenderia às exigências da NBR 15575:2013, ou aos

padrões estabelecidos em projeto, pode perder sua efetividade ao longo do tempo, causando transtornos à construtora, aos fornecedores de materiais e, principalmente, aos usuários.

O parâmetro normativo que caracteriza acusticamente o sistema de piso consiste no nível de ruído de impacto padrão ponderado, segundo a tradução da NBR 15575:2013. Já a caracterização da solução acústica de piso consiste na redução no nível de ruído de impacto padrão, determinada em laboratório por meio de ensaios em câmaras sobrepostas, a partir dos resultados de desempenho da laje mensurados com e sem o sistema de contrapiso flutuante, conforme descrito na norma ISO 10140-8:2010 [10]. A avaliação do desempenho acústico em longo prazo das mantas utilizadas nestes sistemas deve ser realizada com dados medidos ao longo do tempo. No entanto, os procedimentos de ensaio [10] exigem alto investimento, além de serem realizados após 28 dias de cura do contrapiso flutuante, mantendo a câmara exclusivamente ocupada com uma única amostra por quase um mês.

Como forma alternativa à ISO 10140-8, as soluções de revestimento acústico de pisos podem ser avaliadas quanto ao nível de redução do ruído de impacto por meio de um ensaio em modelo de bancada reduzida, conforme estabelece o procedimento da norma ISO 1625-1:2014 [11]. Na [Figura 2](#), é ilustrada um modelo de bancada elaborado segundo esta norma, a qual, no entanto, desaconselha a utilização do método para caracterizar soluções de contrapiso flutuantes, considerando a interferência do tamanho do contrapiso nos valores dos resultados do teste, que podem se distanciar dos obtidos por meio da ISO 10140-8.

Neste contexto, pesquisas recentes ([30] e [12]) objetivaram validar um tamanho ideal de contrapiso para elaboração dos teste em bancada reduzida. Apesar das diferenças encontradas quanto à curva de redução de ruído no domínio da frequência se comparada à obtida em ensaios nas câmaras [10], os resultados do valor ponderado de nível da redução do ruído de impacto, por sua vez, foram bastante próximos para os dois métodos. Desta forma, dadas as suas limitações, a bancada reduzida pode oferecer condições viáveis para avaliação do contrapiso flutuante em longo prazo, considerando as necessidades logísticas e de recursos.

Nesta pesquisa, busca-se entender os processos físicos referentes à transmissão do ruído estrutural através do sistema de contrapiso flutuante, avaliando experimentalmente as características fundamentais de mantas acústicas adotadas pelo mercado brasileiro, e analisando como a variação ao longo do tempo das propriedades

Figura 2: Modelo de Bancada Reduzida.



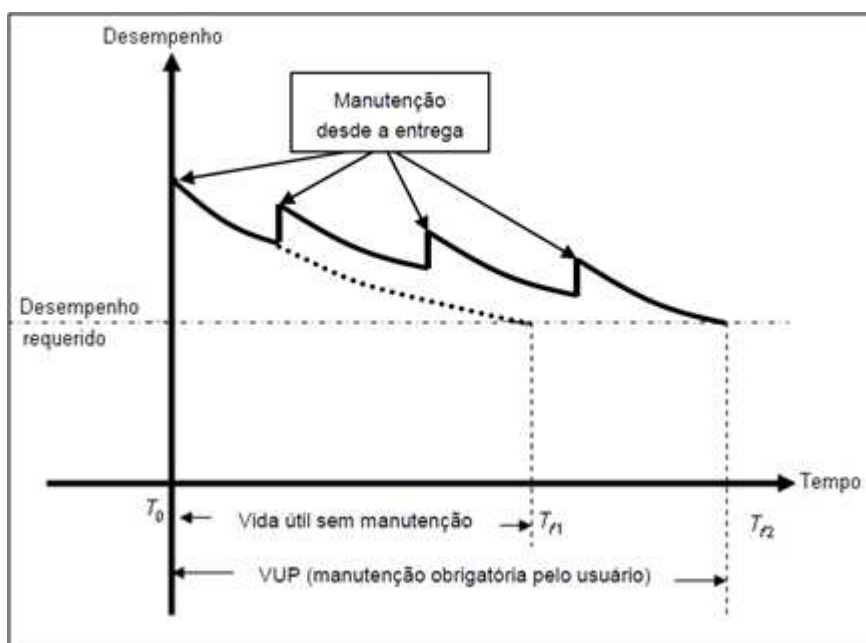
Fonte: O Autor.

dos materiais, sob condições similares à situação de uso, pode alterar a capacidade de atenuação acústica deste sistema, a fim de validar uma metodologia consistente de análise, baseada nos testes realizados e nos resultados obtidos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A NBR 15575:2013, comumente conhecida como norma de desempenho, surgiu com o objetivo de garantir qualidade aceitável às construções brasileiras no que diz respeito à segurança, à habitabilidade (na qual se enquadram os critérios de desempenho acústico) e à durabilidade. Este último configura-se como uma exigência econômica do usuário, pois, segundo as definições da própria norma, "está diretamente associada ao custo global do bem imóvel"[6]. A mesma estabelece dois conceitos importantes: a Vida Útil (VP), relacionada ao período entre o início de operação ou uso de um produto e o momento em que o seu desempenho deixa de atender às exigências do usuário pré-estabelecidas, e a Vida Útil de Projeto (VUP), que consiste em um valor teórico estabelecido pelos projetistas e incorporadores (ou construtores, quando em comum acordo). No caso dos sistemas de pisos, a VUP mínima estimada em projeto deve ser de 13 anos, período no qual os critérios de desempenho do sistema devem se manter acima do mínimo estabelecido, considerando possíveis intervenções de manutenção dos usuários, conforme pode ser visualizado na [Figura 3](#) a seguir.

Figura 3: Desempenho ao longo do tempo.



Fonte: NBR 15575-1:2013 - Edificações Habitacionais - Desempenho.

Os processos de manutenção devem ser especificados no manual de uso, operação e manutenção (conhecido como manual do proprietário para o caso das uni-

dades autônomas, e manual do síndico para as áreas comuns), documento que deve ser apresentado no ato da entrega do imóvel. Há também o conceito de Vida Útil Estimada (VUE), que consiste na durabilidade prevista para um dado produto, inferida a partir de dados históricos de desempenho do mesmo, ou de ensaios de envelhecimento acelerado (no caso de mantas acústicas, o ensaio de fluência à compressão pode ser considerado, com a ressalva de que tal resultado não possui uma relação direta conhecida para estimativa do desempenho quanto ao isolamento acústico).

Desta forma, cabe aos fabricantes de mantas resilientes para contrapiso flutuante oferecerem dados confiáveis da durabilidade dos seus produtos, conhecendo os seus limites de resistência à compressão constante, bem como a variação das propriedades físicas e dinâmicas ao longo do tempo, a fim de tornar possível ao projetista elaborar um plano de manutenção e apresentar um prazo de garantia para o sistema de piso do ponto de vista acústico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar as propriedades dos materiais resilientes usados em sistemas de contrapiso flutuante em curto e longo prazo quando submetidos à compressão constante, bem como validar a metodologia de medição em bancada reduzida, a fim de apresentar um procedimento de avaliação experimental e de previsão do desempenho acústico de contrapisos flutuantes ao longo do tempo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar experimentalmente as propriedades de compressão instantânea e ao longo do tempo de quatro amostras diferentes de mantas resilientes;
- Medir experimentalmente as propriedades dinâmicas das mantas resilientes antes e depois dos ensaios de compressão;
- Verificar experimentalmente, em bancada reduzida, a capacidade de redução do ruído de impacto causado pela máquina de impacto padrão para as diferentes amostras;
- Comparar os resultados estimados a partir das propriedades dinâmicas dos materiais mensuradas com os valores obtidos nos ensaios com bancada reduzida;
- Propor uma metodologia de avaliação experimental da variação do desempenho acústico dos sistemas de contrapiso flutuantes ao longo do tempo de uso.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Uma vez abordada a problemática da pesquisa, o Capítulo 2 a seguir apresenta a fundamentação teórica da acústica em edificações para o caso específico do ruído de impacto em pisos. Nesta sessão, são apresentadas as formulações físicas, bem como os principais parâmetros de interesse para análise do problema.

Já no Capítulo 3, são relatadas as referências bibliográficas relevantes para esta pesquisa, bem como os resultados encontrados em testes realizados de forma semelhante aos conduzidos neste trabalho. São discutidos também os modelos de referência para estimativa do desempenho acústico de mantas resilientes ao longo do tempo.

Após o esclarecimento do contexto científico, o Capítulo 4 é dedicado a descrever a metodologia e os materiais utilizados para a realização do trabalho. O resultados obtidos nos ensaios conduzidos e nos cálculos realizados são então revelados e discutidos no Capítulo 5.

No Capítulo 6, são abordadas as conclusões sobre a metodologia implementada, bem como sobre os resultados alcançados. As limitações da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros também são conteúdos deste capítulo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

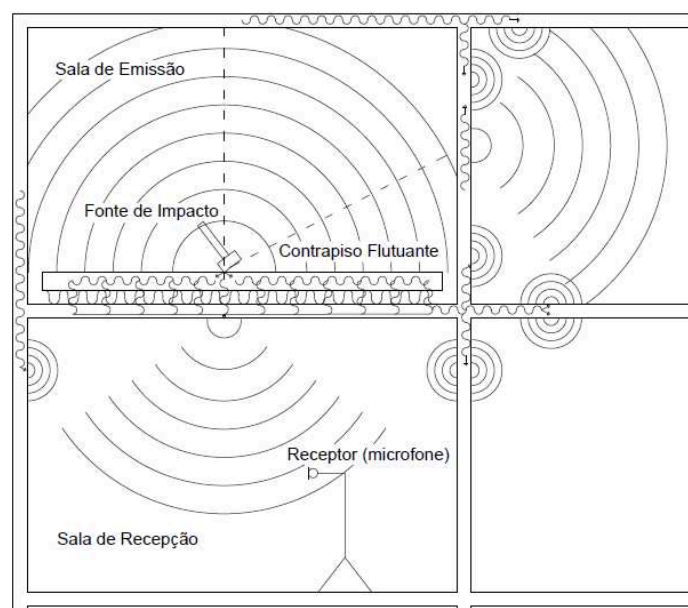
2.1 Acústica das edificações

O estudo da acústica das edificações habitacionais de múltiplos andares lida fundamentalmente com a transmissão da energia sonora entre recintos, bem como entre ambientes internos e externos da construção. Por mais que a percepção humana ocorra, em último estágio, no ar, ou seja, no interior da sala receptora, a energia acústica é constantemente convertida, desde sua geração, de ruído aéreo para estrutural, e vice-versa.

A resposta de uma dada estrutura ao ser submetida a um campo de pressão ou a forças dinâmicas é matéria da área de estudo denominada acústica estrutural, desde que dentro da faixa de frequência da sensibilidade humana, e para níveis desprezíveis em relação aos limites de segurança estrutural [14].

No âmbito da norma NBR 15575, não existe critério de avaliação da transmissão do ruído estrutural através de vedações verticais, mas apenas do ruído de impacto em pisos. A [Figura 4](#), ilustra o caminho de transmissão do ruído de impacto nas estruturas de uma edificação, bem como o ponto de aferição, no recinto inferior, do nível de ruído do desempenho do sistema de piso, sobre o qual há uma solução de contrapiso flutuante.

Figura 4: Transmissão do Ruído de Impacto em uma Edificação.



Fonte: O Autor.

2.2 Ruído de impacto de pisos

A formulação física [13] [14] para o problema do ruído estrutural em uma edificação consiste em analisar inicialmente a potência sonora radiada para o interior da sala receptora W_{rad} de uma laje submetida a uma dada excitação de impacto, que pode ser descrita pela [Equação 1](#).

$$W_{rad} = \langle v^2 \rangle \rho c A \sigma_{rad}, \quad (1)$$

onde $\langle v^2 \rangle$ (m/s)² é a média espacial quadrática da velocidade transversal do piso impactado; A (m^2) é a área da superfície do piso; ρ é a densidade do ar; c é velocidade de propagação do som; e σ_{rad} é a eficiência de radiação do piso.

Por meio de um balanço de energia, a velocidade transversal (m/s)² pode ser calculada considerando a potência de entrada do sistema e a potência dissipada pela laje, por meio da [Equação 2](#):

$$F_{rms}^2 Y = \langle v^2 \rangle \rho_s A w \eta, \quad (2)$$

onde F_{rms}^2 é a força média quadrática que impacta a laje; Y é a admitância de entrada pontual equivalente a uma placa fina infinita; ρ_s (kg/m^2) é a massa por unidade de área do piso; w (rad/s) é a frequência angular e η é o fator de perda do sistema. Logo,

$$\langle v^2 \rangle = F_{rms}^2 \left(\frac{Y}{\rho_s A w \eta} \right). \quad (3)$$

Portanto, relacionando as [Equações 1 e 3](#):

$$W_{rad} = F_{rms}^2 \left(\frac{Y \rho c \sigma_{rad}}{\rho_s w \eta} \right). \quad (4)$$

Desta forma, chega-se a uma relação entre a potência radiada no recinto inferior com a força de impacto na laje, como visto na [Equação 4](#). Na abordagem de desempenho das edificações habitacionais, como critério de energia de entrada no sistema, é utilizada a máquina de impacto padrão, conforme a ilustrada na [Figura 2](#). A padronização garantida por esta fonte sonora ocorre pois a mesma consiste em 5

martelos posicionados em linha equidistantes, cuja distância entre os dois martelos dos extremos é de 40 cm. Cada um deles possui uma massa de 0,5 kg, e caem por gravidade a uma altura de 4 cm de queda livre. A máquina é então programada para gerar uma frequência constante de 10 impactos por segundo [34].

A forma de avaliar este problema físico consiste em considerar uma placa sendo impactada por forças externas periódicas, o que pode ser abordado na forma da [Equação 5](#), onde a força periódica é representada pela série de Fourier em infinitas frequências discretas com amplitude F_n .

$$F_n = \frac{2}{T_r} \int_0^{T_r} f(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T_r} t\right) dt, \quad (5)$$

onde $f(t)$ é a forma da força impulsiva típica em função do tempo; $T_r = 1/f_r$ é o intervalo de tempo entre cada impacto, ; e n são os números inteiros = 1,2,3,4,5...

Segundo Cremer (1948) [15], na prática, a duração da força impulsiva na estrutura rígida é pequena se comparada ao período da maior frequência de interesse do teste de impacto, o que permite adotar uma largura efetiva de atuação da força de impulso como $\cos\left(\frac{2\pi n}{T_r} t\right) \approx 1$. A amplitude da força de impulso (F_n) torna-se, portanto:

$$F_n \approx \frac{2}{T_r} \int_0^{T_r} f(t) dt = \frac{2}{T_r} m v_o = \frac{2m}{T_r} (2gh)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

onde m é a massa do martelo, v_o é a velocidade do martelo no momento do impacto, h é a altura da queda do martelo e g é a aceleração da gravidade.

Para realizar a análise do espectro em banda de terço de oitava, adota-se a média quadrática do espectro da força (S_f), que é dada pela [Equação 7](#).

$$S_f = \frac{F_n^2}{2f_r}, \quad (7)$$

onde f_r é a frequência de 10 Hz, relacionada aos 10 impactos por segundo da máquina padrão. Aplicando, portanto, a [Equação 6](#) na [Equação 7](#), e substituindo os valores da fonte de impacto ($m = 0,5$ kg; $T_r = 0,1$ s e $h = 0,04$ m), a densidade espectral da força é dada segundo a [Equação 8](#).

$$S_f = 4 \left(\frac{N^2}{Hz} \right). \quad (8)$$

Logo, a força média quadrática (F_{rms}^2) que atua sobre a laje, em bandas de terço de oitava com frequência central f e largura de banda efetiva de $f/\sqrt{2}$ é dada por:

$$F_{rms}^2 = \left(\frac{4f}{\sqrt{2}} \right) f N^2. \quad (9)$$

Substituindo a [Equação 9](#) na [Equação 4](#), considerando a admitância de entrada pontual Y em termos das características físicas da laje, tem-se que a potência sonora radiada a partir do impacto da máquina padrão na sala inferior é dada por:

$$W_{rad} = \frac{\rho c \sigma_{rad}}{5,1 \rho_p^2 c_L \eta h^3}, \quad (10)$$

onde $\rho_p = \rho_s h$ é a densidade do material do piso (kg/m^2), h é a espessura do material (m) e c_L é a velocidade de propagação da onda longitudinal no meio do material da laje (m/s).

No interior de um campo difuso, considerando uma absorção normalizada (A_o) de 10 m^2 para a sala de recepção, a potência dissipada é dada por.

$$W_d = \left(\frac{\langle p^2 \rangle}{4\rho c} \right) A_o, \quad (11)$$

onde $\langle p^2 \rangle$ é a média espacial quadrática da pressão sonora no ambiente receptor. Portanto, igualando as potências radiada [Equação 10](#) e dissipada [Equação 11](#), para bandas de terço de oitava, tem-se que:

$$\langle p^2 \rangle = \frac{4}{5,1} \frac{(\rho c)^2 \sigma_{rad}}{\rho_p^2 c_L \eta h^3 A_o}. \quad (12)$$

Logo, o Nível de Ruído de Impacto Normalizado (L_n) em bandas de terço de oitava é dado por:

$$L_n = 10 \log \left(\frac{\langle p^2 \rangle}{p_{ref}^2} \right), \quad (13)$$

onde $p_{ref}^2 = 2 \times 10^{-5} \text{ N}/\text{m}^2$.

Finalmente, é obtido o nível do ruído de impacto padrão normalizado, em bandas de terço de oitava, para uma dada edificação, que é dado por:

$$L_n = 10 \log \left(\frac{4}{5,1} \frac{(\rho c)^2 \sigma_{rad}}{\rho_p^2 c_L \eta h^3 A_o p_{ref}^2} \right). \quad (14)$$

Este parâmetro pode ser medido em campo e em laboratório. A [Figura 4](#) ilustra um exemplo da situação de medição em campo do nível de ruído de impacto (uma máquina de impacto padrão deve ser utilizada como fonte) no recinto inferior.

A norma NBR 15575 adota como classificação de desempenho acústico do sistema de piso o parâmetro "Nível de Ruído de Impacto Padrão Ponderado" ($L_{n,w,T}$, em dB), um valor único calculado a partir do L_n medido conforme a ISO 10140, obtido por meio do procedimento de ponderação apresentado na norma ISO 717-2 [16]. A [Tabela 1](#) apresenta os critérios estabelecida pela normativa.

Tabela 1: Critério e Nível de Pressão Sonora de Impacto Padrão Ponderado.

Elemento	$L'_{nT,w}$ dB
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos	≤ 80
Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas	≤ 55

Fonte: NBR 15575:2013.

O parâmetro que classifica o desempenho das mantas resilientes utilizadas em sistemas de contrapiso flutuantes consiste no Nível de Redução do Ruído de Impacto Padrão ΔL , dado em bandas de terço de oitava, do qual pode ser obtido por meio da ISO 717-2 o valor ponderado ΔL_w do nível de redução. Esta caracterização (ΔL) informa a capacidade de atenuação do nível de pressão sonora fornecida pelo contrapiso flutuante a uma dada laje de referência [25], e é dado pela [Equação 15](#):

$$\Delta L = L_{no} - L_n, \quad (15)$$

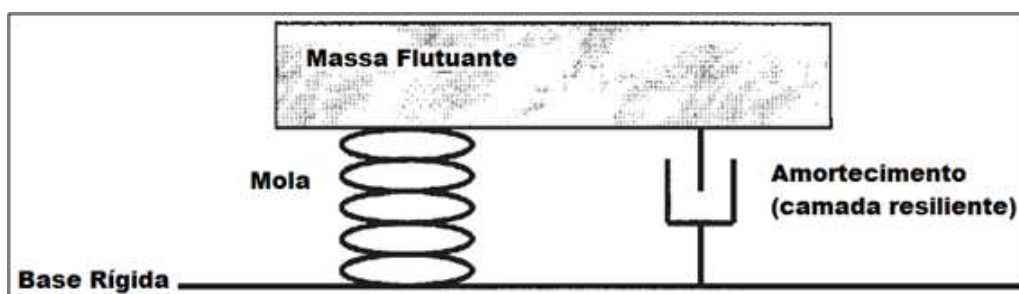
onde L_{no} é o nível de pressão sonora do ruído de impacto normalizado na ausência do

contrapiso flutuante; e L_n é nível de pressão sonora do ruído de impacto normalizado na presença da solução acústica.

2.3 Sistemas de contrapiso flutuantes

Uma solução utilizada para atenuar o ruído estrutural causado por impacto é o sistema de contrapiso flutuante, que consiste em desacoplar estruturalmente a camada de contrapiso e as vedações horizontal (laje estrutural) e verticais (alvenarias), mediante a colocação de uma manta contínua resiliente, ou seja, com capacidade de amortecimento, atenuando assim as vibrações que se propagam do recinto emissor do ruído para os demais sistemas do edifício. Segundo Schiavi et al (2005) [17], tal solução pode ser representada como um sistema massa-mola-amortecedor, onde a massa é dada pelo contrapiso flutuante, enquanto a manta resiliente é representada por suas propriedades de rigidez e amortecimento, conforme apresentado na [Figura 5](#) a seguir.

Figura 5: Modelo massa/mola representativo do sistema de contrapiso flutuante.



Fonte: Schiavi et al, 2005.

A capacidade de atenuação do ruído estrutural de um contrapiso flutuante pode ser relacionada com uma propriedade física do sistema composto pelo material resiliente e o carregamento axial, denominada Rigidez Dinâmica (s') por unidade de área [19], dada pela [Equação 16](#).

$$s' = \frac{F}{S \Delta d} \quad (16)$$

Onde a rigidez dinâmica aparente s' é dada em $[N/m^3]$; F é a força dinâmica atuando perpendicularmente na massa flutuante $[N]$; S é a área desta massa $[m^2]$ e d é a espessura da manta resiliente $[m]$.

A rigidez dinâmica de materiais resilientes usados em pisos flutuantes pode ser mensurada a partir do ensaio descrito na norma "ISO 9052-1:1989 - Acoustics - Method for the determination of dynamics stiffness - Part 1: Materials used under floa-

ting floors in dwellings" [20]. O parâmetro é obtido por meio da medição da frequência de ressonância do primeiro modo de vibração vertical de um sistema dado pela [Figura 5](#). A rigidez dinâmica aparente por unidade de área da amostra testada (s'_t) é então calculada a partir da [Equação 17](#).

$$s'_t = (2\pi f_r)^2 \cdot m'_t. \quad (17)$$

Onde f_r é a frequência de ressonância do sistema [Hz] e m'_t é a massa por unidade de área usada no teste (200 kg/m^2 , segundo as definições da referida norma).

A caracterização da manta acústica resiliente quanto a este parâmetro possibilita o cálculo da frequência natural de um sistema real (f_0 , dado em Hz) de cada caso específico de contrapiso flutuante analisado, em função do carregamento ocasionado pelo contrapiso de argamassa mais o piso. A frequência fundamental de ressonância real do sistema é dada pela [Equação 18](#).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{s' \cdot 10^6}{m'}} \approx 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}}. \quad (18)$$

Onde m' é a massa total por unidade de área do piso flutuante [kg/m^2].

A curva que representa a melhoria do isolamento do ruído de impacto de um piso flutuante, em função da frequência, possui uma inclinação positiva de 30 dB/década (aproximadamente 9 dB por banda de oitava), a partir da frequência natural (f_0) do sistema da manta resiliente sob o carregamento do piso flutuante ([21], [13], [17]), conforme apresentado na [Equação 19](#). Este modelo é baseado na teoria de placas paralelas continuamente acopladas com um material elástico entre a base inercial (laje) e a massa flutuante (contrapiso) [21], e não considera as propriedades de amortecimento do material resiliente. Não há atenuação na frequência de ressonância, nem em frequências abaixo desta.

$$\Delta L = 30 \log \left(\frac{f}{f_0} \right). \quad (19)$$

Onde ΔL é a redução do nível de pressão sonora de impacto padrão [dB], f é frequência central da banda de 1/3 de oitava [Hz] e f_0 é frequência de ressonância

do sistema [Hz], calculada a partir da rigidez dinâmica aparente segundo a [Equação 18](#).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

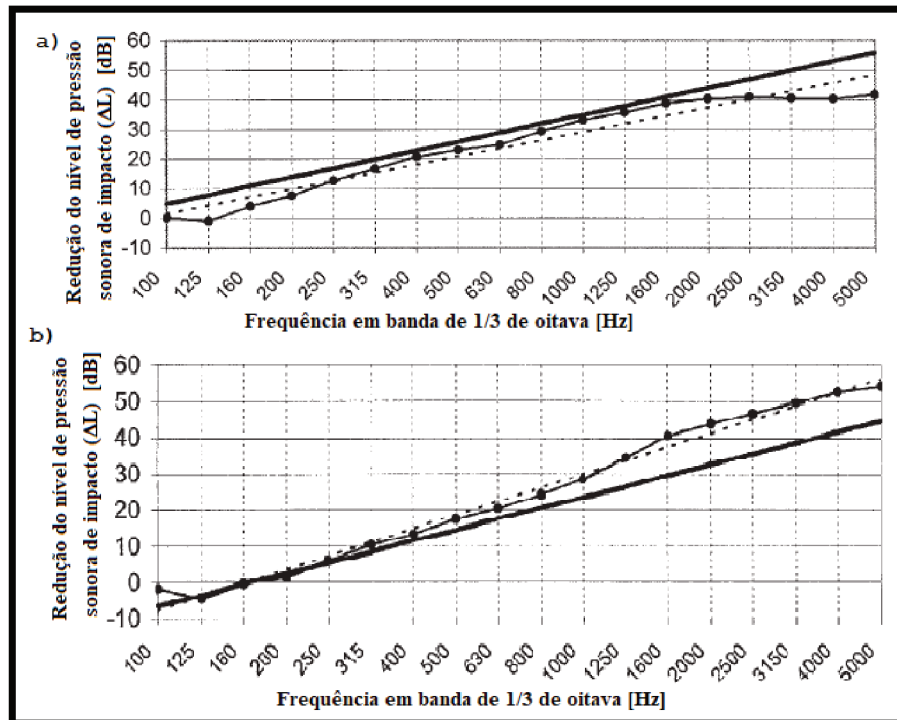
Neste capítulo, serão apresentadas algumas pesquisas realizadas no âmbito da avaliação de ruído de impacto de piso e materiais resilientes adotados em contrapisos flutuantes. A ordem de apresentação dos trabalhos científicos não foi realizada de forma cronológica, mas objetivando respeitar a linha de raciocínio para abordagem do contexto geral da linha de pesquisa.

3.1 Estimativa da redução de ruído a partir da aferição da rigidez dinâmica

Schiavi et al (2005) [17] compararam os resultados de redução do nível de pressão sonora de impacto (ΔL) de diferentes materiais resilientes obtidos a partir do modelo empírico apresentado na [Equação 19](#) com os resultados obtidos experimentalmente segundo o procedimento descrito na norma *"ISO 10140-8:2010 - Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 8: Laboratory measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a heavyweight standard floor"*. Foi constatado que dois fatores apresentaram divergências de resultados: a frequência de ressonância do sistema, justificada no trabalho pela diferença no tempo de carregamento estático entre as amostras ensaiadas pelas normas ISO 9052-1 e ISO 10140-8; e a inclinação da curva de redução de ruído, que, segundo o estudo, varia de acordo com o amortecimento interno da amostra resiliente, o que foi confirmado por estudos mais recentes ([42], [35]). A [Figura 6](#) ilustra os gráficos com estas constatações, onde são apresentadas curva de redução estimada pela método tradicional (linha contínua), a curva medida em laboratório (linha com pontos) e curva estimada com a correção proposta (linha pontilhada).

Para sanar as diferenças nos resultados da frequência de ressonância, foi conduzido [17] o ensaio de caracterização da rigidez dinâmica após um pré-carregamento estático de 12 dias, diferentemente da recomendação de outros autores, cujo período de espera para condução do ensaio é de 3 dias [18], tempo que leva em consideração a secagem do gesso, porém nada diz respeito à deformação na amostra. Já para conseguirem inclinações mais realistas da curva de redução do ruído de impacto, foram apresentados valores empíricos de ajustes em função das propriedades de amortecimento da manta resiliente, descrita pelo parâmetro Fator de Qualidade (Q), definido

Figura 6: a - Correção com ajuste da rigidez dinâmica; b - Correção da inclinação da curva pelo fator de qualidade.



Fonte: Schiavi et. al, 2005. [17]

por meio do método da banda de meia potência [17], conforme a [Equação 20](#). A [Tabela 2](#) apresenta a inclinação da curva de acordo com o valor de Q aferido durante o ensaio de rigidez dinâmica.

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (20)$$

Onde f_0 é a frequência de ressonância, f_1 é a frequência abaixo do pico com amplitude 3 dB menor, e f_2 a frequência acima de mesma diferença de magnitude.

A relação que descreve a curva de atenuação corrigida segundo estes autores é dada, portanto, pela [Equação 21](#).

$$\Delta L = \left[\frac{dB}{dec} \right]_Q \cdot \log \frac{f}{f_{r_{pre}}} \quad (21)$$

Onde $[dB/dec]_Q$ é obtido na [Tabela 2](#) de acordo com o valor do Fator de Qualidade (Q), que por sua vez é extraído a partir da medição da frequência natural do sistema após o pré-carregamento de 12 dias ($f_{r_{pre}}$), durante o procedimento de ensaio

Tabela 2: Relação observada entre o Fator de Qualidade (Q) e o ΔL medido segundo a ISO 140-8.

Fator de Qualidade	dB/década
$Q \approx 2$ (or < 2)	29
$2 < Q < 3$	30
$3 < Q < 4$	31
$4 < Q < 6$	32–33
$6 < Q < 7$	34–35
$Q \approx 7$ (or > 7)	35

Fonte: Schiavi et al, 2005.[17]

segundo a ISO 9052-1, por meio do método da banda de meia potência [14], [17].

Schiavi (2018) [35] propôs um modelo analítico de cálculo do nível de redução do ruído de impacto (ΔL) baseado na teoria da transmissibilidade de força [22], que considera a solução de contrapiso flutuante como um sistema amortecido com um grau de liberdade. Além da frequência de ressonância do contrapiso, obtido por meio da rigidez dinâmica do material resiliente e da massa do contrapiso, o modelo considera o fator de perda total (η), dado pelo inverso do fator de qualidade Q (Equação 20), sendo obtido por meio do método da banda de meia potência [14] [17]. As Equações 22 e 23 apresentam os níveis de redução do ruído de impacto (ΔL), em bandas de terço de oitava (Hz) baseado no modelo de Schiavi (2018), respectivamente para os casos de contrapiso reagindo ressonantemente e reagindo localmente [35].

$$\Delta L = -15 \log \left[\sqrt{\frac{1 + \eta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}{\eta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + \left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2}} \right] \quad (22)$$

$$\Delta L = -20 \log \left[\sqrt{\frac{1 + \eta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}{\eta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + \left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2}} \right] \quad (23)$$

No entanto, o modelo empírico dado pela Equação 19, o modelo corrigido dado na Equação 21 e o modelo analítico apresentado nas Equações 22 e 23 são válidos apenas para a estimativa do desempenho acústico das soluções de pisos flutuantes em curto prazo, uma vez que a espessura da amostra resiliente pode variar quando submetida ao carregamento estático por período prolongado, alterando assim a frequência fundamental do sistema e, conseqüentemente, a capacidade de atenua-

ção do ruído de impacto. Faz-se necessário, portanto, conhecer o comportamento das mantas resilientes quando submetidas à compressão constante ao longo do tempo, a fim de avaliar a durabilidade da redução sonora das soluções.

Diversos tipos de materiais resilientes são utilizados na construção civil para este fim, podendo ser classificados em duas categorias: de células abertas (porosos: lãs de rocha, de vidro ou de pet; feltro), e de células fechadas (impermeáveis: polímeros, reciclados de pneus, mantas asfálticas). Dependendo da tipologia, os materiais podem apresentar diferentes tendências em relação à deformação ao longo do tempo ocasionado pelo carregamento permanente.

3.2 Avaliação das propriedades do material resiliente ao longo do tempo

Objetivando avaliar a capacidade de preservar as propriedades mecânicas ao longo do tempo, Schiavi et al (2007) [9] avaliaram diferentes materiais resilientes quanto aos três seguintes parâmetros: rigidez dinâmica (ISO 9052-1 [20]), compressibilidade (BS EN 12431 [23]) e fluência à compressão (BS EN 1606 [24]). Também foi realizado o ensaio de redução do ruído de impacto (ISO 10140-8 [10]). A compressibilidade de uma amostra é obtida a partir de uma série de carregamentos estáticos, sendo mensurada a espessura relativa à cada carga aplicada e obtido um valor único referente à diferença algébrica entre duas das deformações ensaiadas. Já o teste de fluência à compressão é realizado em longo prazo, com a amostra sendo submetida à compressão constante de 2000 (± 20) Pa, que representa o carregamento convencionalmente atuante de um contrapiso de argamassa. A estimativa da deformação a longo período é obtida a partir de extrapolação dos resultados medidos. Os autores [9] afirmaram ser possível a aproximação, para alguns materiais, entre os valores de fluência estimados para 7 anos e os resultados de compressibilidade.

Os autores [9] apresentaram um modelo semi-empírico para estimar a rigidez dinâmica em longo prazo, e conseqüentemente a redução sonora de impacto padrão, a partir da estimativa da espessura futura, obtida pelos resultados de compressibilidade ou da fluência a compressão. Tal modelo despreza a variação do módulo de elasticidade e da densidade da amostra submetida à compressão constante ao longo do tempo, considerando apenas a variação da espessura. No anexo C.2 da norma EN 12354-2 [25], a rigidez dinâmica por unidade de área total (s'_{total} , em MN/m^3) para uma amostra composta por n mantas resilientes sobrepostas é dada por:

$$s'_{total} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{s'_i} \right)^{-1} \quad (24)$$

Desta forma, considerando uma série de mantas idênticas sobrepostas, utilizando as [Equações 24](#) e [16](#), tem-se que:

$$f_{res,n} = \frac{1}{\sqrt{n}} f_{res,1} \quad (25)$$

Onde $f_{res,n}$ é a frequência de ressonância do sistema massa-mola com n ca-

madas do mesmo material, e $f_{res,1}$ é a frequência de ressonância de uma amostra simples. Assim, pode-se considerar n como uma razão, em vez de uma quantidade de amostras idênticas sobrepostas, na forma $n = d_n/d_1$, onde d_n é a espessura total de n amostras, e d_1 é a espessura de uma única amostra. Logo,

$$f_{res,n} = \frac{1}{\sqrt{\frac{d_n}{d_1}}} f_{res,1}. \quad (26)$$

Na [Equação 26](#), existe portanto uma relação entre a frequência de ressonância referente a uma determinada espessura d_1 , e a frequência de ressonância para a espessura $d_n = n \cdot d_1$. Logo, é possível relacionar a frequência de ressonância da espessura futura do material estimada, a partir dos parâmetros dinâmicos do material nas condições iniciais, ou seja:

$$f_{res,t} = \frac{1}{\sqrt{\frac{d_t}{d_o}}} f_{res,o}. \quad (27)$$

Onde $f_{res,t}$ é a frequência de ressonância [Hz] do sistema estimada em t anos de carregamento estático; d_t é a espessura da amostra [mm] em t anos, determinada pelo teste de fluência à compressão, d_o é a espessura da amostra [mm] após 120 segundos de aplicação de um carregamento estático de 2 kPa; e $f_{res,o}$ é a frequência de ressonância do sistema medida quando a amostra é submetida à mesma carga (2kPa). Desta forma, a rigidez dinâmica do sistema (em MN/m³) após 10 anos ($s'_{t=10}$), por exemplo, pode ser estimada a partir da [Equação 28](#):

$$s'_{t=10} = (2\pi f_{res,t=10})^2 m'. \quad (28)$$

A [Tabela 3](#) a seguir apresenta os resultados de redução sonora de impacto padrão na frequência de 500 Hz, obtidos a partir do modelo semi-empírico utilizando a rigidez dinâmica mensurada em 3 dias de duração, de acordo com a ISO 9052-1; a partir do modelo semi-empírico utilizando a rigidez dinâmica estimada para 10 anos, a partir das [Equações 27](#) e [28](#); e mediante o ensaio em laboratório segundo a ISO 140-8.

Além da variação ao longo do tempo da rigidez dinâmica das mantas resilientes submetidas à compressão constante, há também uma variação desta propriedade devido às condições de pré-compressão das amostras. Dikavicius e Miskinis (2009) [26] avaliaram a rigidez dinâmica de diferentes amostras usadas em sistemas de piso

flutuantes antes e depois da realização do ensaio de compressibilidade. Segundo os autores, a rigidez dinâmica apresenta valores menores quando é determinada após a realização do teste de compressibilidade da mesma amostra, indicando que o material tende a apresentar uma melhor capacidade de redução do ruído de impacto após sofrer a sequência de compressões estabelecida pela norma [23]. Verificou-se, também, que os materiais de células abertas sofrem uma redução do valor da rigidez dinâmica mais acentuada que os de células fechadas [26].

Tabela 3: Resultados de Redução Sonora de Ruído de Impacto, em dB, na frequência de 500 Hz, obtido pelo modelo semi-empírico para 3 dias; para 10 anos; e o resultado medido em laboratório.

Materiais	3 dias	10 anos	ISO 140-8
Espuma de Poliuretano (1)	17,5	17,3	17,3
Espuma de Poliuretano (2)	21,6	21,4	21,3
Espuma de Poliuretano (3)	17,1	17,0	17,0
Espuma de Poliuretano (4)	19,6	19,4	19,5
Espuma de Poliuretano (5)	20,3	20,0	20,1
Fibra Sintética (1)	24,2	22,7	-
Fibra Sintética (2)	23,3	19,8	20,6
Fibra Sintética (3)	23,9	22,2	23,0
Fibra Sintética (4)	23,5	20,6	20,2
Fibra Sintética (5)	24,4	22,7	21,8
Resíduo de Pneu (1)	15,1	14,8	14,6
Resíduo de Pneu (2)	13,9	13,6	13,5
Resíduo de Pneu (3)	18,8	18,3	18,6
Lã de Vidro (1)	19,6	19,1	19,8
Lã de Vidro (2)	24,2	23,7	-
Lã Mineral	27,7	26,1	-
Cortiça	10,8	10,5	-
Resíduo de Lã Natural	18,7	18,1	18,5

Fonte: Schiavi et al, 2007. [9]

Caniato et al. (2016) [27] estudaram diversos tipos de mantas resilientes quanto à compressibilidade, fluência à compressão e rigidez dinâmica, afirmando que a análise completa de qualquer material a ser utilizado sob pisos flutuantes deve ser caracterizada por estes 3 parâmetros. Foi verificado que a densidade, a área de contato e espessura podem interferir positivamente em um dos parâmetros, porém negativamente nos demais, demonstrando comportamento conflitante entre a capacidade

de isolamento e a de manutenção das propriedades dinâmicas quando submetidas às cargas dinâmicas ou estáticas. Para a maioria dos materiais ensaiados [27], não se pôde afirmar ser possível substituir os valores de fluência a 7 anos pelos resultados obtidos no teste de compressibilidade, cujo período de ensaio é consideravelmente menor, contradizendo Schiavi et. al (2007) [9], não havendo uma regra geral para todos os materiais na correlação entre os dois ensaios. Nem todos os materiais apresentaram uma diminuição da rigidez dinâmica quando mensurada após o teste de compressibilidade. Também foi verificado que a rigidez dinâmica, em algumas amostras, aumentou após 90 dias, mas diminuiu após 120 dias, apresentando um comportamento imprevisível ao longo do tempo. Os autores [27] afirmaram que, para os materiais com resultados de fluência à compressão maiores que 20% após 10 anos, os valores estimados de nível ponderado de redução de transmissão são maiores do que 3 dB.

3.3 Avaliação da redução de ruído de impacto em modelo de bancada reduzida

A forma mais indicada para avaliar em laboratório a capacidade de atenuação sonora de uma solução de contrapiso flutuante consiste no procedimento de ensaio descrito nas normas *"ISO 10140-1:2016 - Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 1: Application rules for specific products"* [28] e *"ISO 10140-8:2010 - Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 8: Laboratory measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a heavyweight standard floor"* [10]. O resultado é obtido por meio da diferença entre os níveis de pressão sonora obtidos na câmara receptora com e sem a utilização da solução acústica, sendo utilizada a máquina de impacto padrão como fonte de excitação. Posteriormente, a norma ISO 717-2 [16] é aplicada para a obtenção do valor único ponderado de redução sonora. No entanto, a condução deste ensaio requer um alto investimento na construção de duas câmaras sobrepostas (com um volume mínimo de 50 m^3 para a sala superior), separadas por uma laje de concreto de aproximadamente 14 cm de espessura, o que acaba inviabilizando a sua realização em muitos casos. Uma vez que é de interesse dos fabricantes de mantas acústicas possuir sua própria bancada de ensaio, uma alternativa para avaliar a redução de ruído de impacto com menos custos consiste no ensaio em modelo de bancada reduzida apresentado na norma *"ISO 16251-1:2014 - Acoustics - Laboratory measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a small floor mock-up - Part 1: Heavyweight compact floor"* [11].

Pereira et al. (2014) [30] avaliaram e compararam os resultados de redução da transmissão sonora de impacto obtidos a partir dos procedimentos das normas ISO 140-8 [31] (versão anterior à ISO 10140-8) e ISO 16251 para soluções de revestimento de piso (como carpete, linóleo), pisos flutuantes e lajes flutuantes. A [Figura 7](#) apresenta o modelo de bancada reduzido utilizado, na qual pode ser visualizada a máquina de impacto padrão, a distribuição espacial dos acelerômetros e o material resiliente usado para garantir o isolamento tanto entre a bancada e o piso do laboratório quanto entre os pilares e a laje do modelo.

O resultado da redução sonora de impacto fornecido pela solução acústica, utilizando o modelo reduzido, é obtido de forma bastante similar ao procedimento da ISO 140-8, sendo que as medições realizadas são de aceleração em vez de nível de

Figura 7: Modelo reduzido para medição da redução da transmissão sonora de impacto.



Fonte: Pereira et al, 2014.

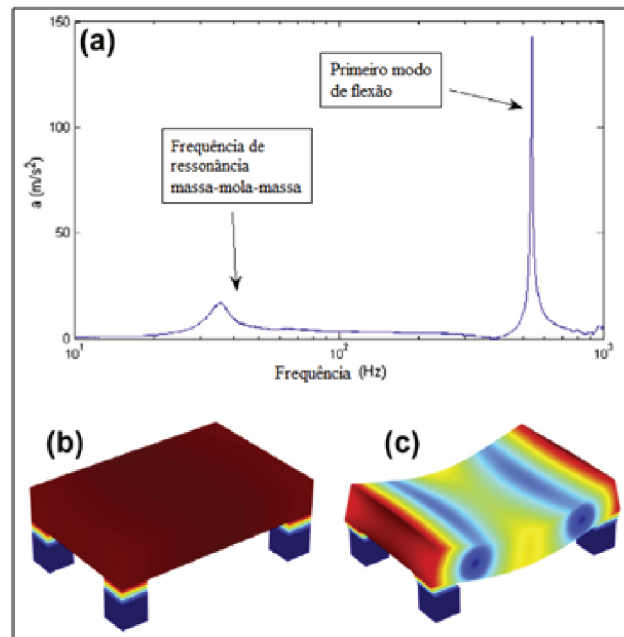
pressão sonora. A fim de caracterizarem as condições do modelo, os pesquisadores [30] inicialmente mensuraram o isolamento da vibração transmitida entre o piso do laboratório de ensaio e a bancada, bem como aferiram as primeiras frequências de ressonância do sistema da bancada, como pode ser analisado na [Figura 8](#).

Em seguida, foram avaliadas as influências nos resultados de redução sonora devido ao ruído de fundo (vibrações na sala) e ao posicionamento dos acelerômetros e da máquina de impacto padrão. Verificou-se que os resultados para as soluções de revestimento de piso e de contrapiso flutuante apresentaram pouca influência devido ao posicionamento da máquina de impacto, além de uma tendência bastante similar para o posicionamento dos acelerômetros (em cima e abaixo da laje do modelo). Já o ruído de fundo apresentou níveis médios sempre bastante inferiores (40 dB) aos níveis da vibração devido à máquina de impacto, dispensando a necessidade de correções.

Na [Figura 9](#), são apresentados os resultados da redução sonora de impacto fornecido por dois tipos de piso flutuantes, um com manta resiliente de cortiça, outro com manta de borracha reciclada. São notáveis as tendências similares das curvas de redução sonora obtidas pelas ISO 140-8 e ISO 16251, porém verificam-se maiores divergências entre os valores nas médias e altas frequências.

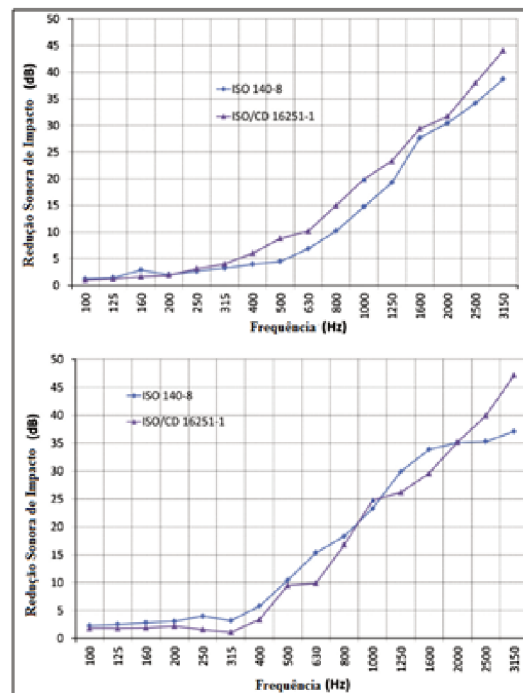
No entanto, ao comparar os resultados entre os valores únicos ponderados, após a aplicação da ISO 717-2, a maior diferença verificada foi de 2 dB , conforme

Figura 8: Comportamento dinâmico do sistema quando submetido a uma excitação pontual de impacto: (a) Função Resposta em Frequência em termos de aceleração; (b) Forma modal para a vibração massa-mola-massa; (c) Primeiro modo de vibração de flexão.



Fonte: Pereira et al, 2014. [30]

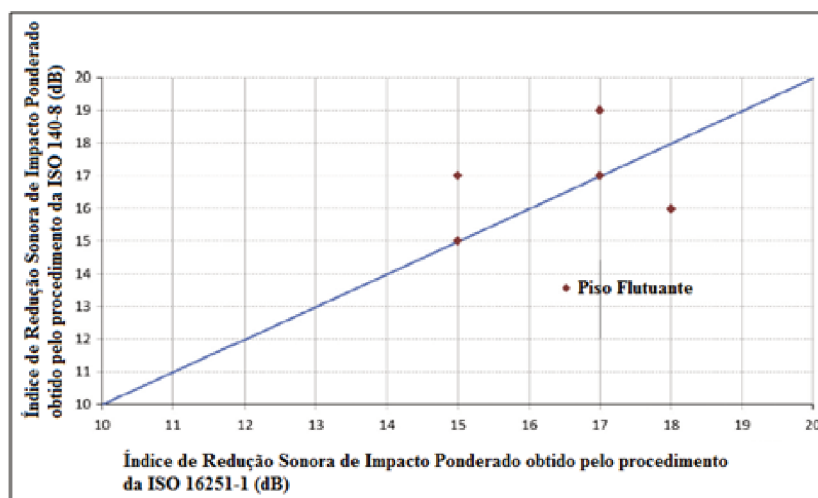
Figura 9: Curvas de Redução Sonora de Impacto Padrão para soluções de piso flutuantes obtidas pelos métodos padronizado e simplificado: (a) Manta resiliente de cortiça; (b) Manta resiliente de borracha reciclada.



Fonte: Pereira et al, 2014. [30]

pode ser visualizado na [Figura 10](#).

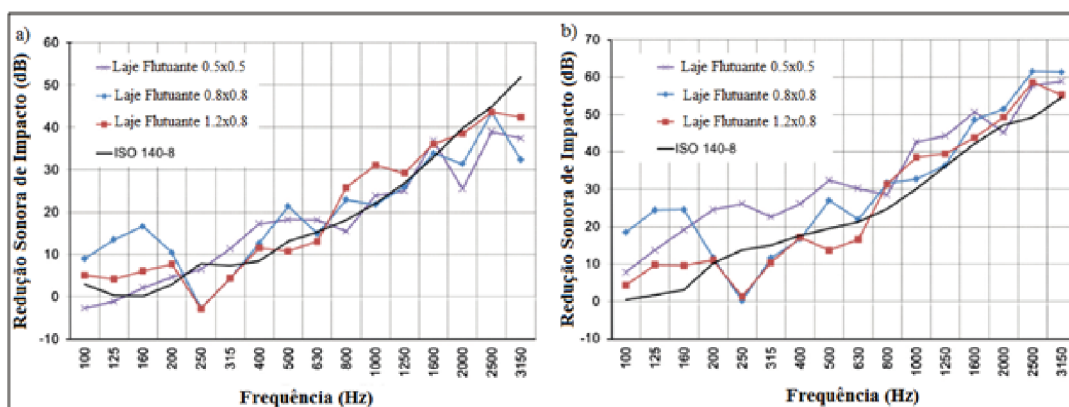
Figura 10: Comparação entre os valores de Índice de Redução Sonora de Impacto Ponderado obtido pelos procedimentos da ISO 140-8 e da ISO 16251-1 para diferentes amostras ensaiadas.



Fonte: Pereira et al, 2014. [30]

Na avaliação das soluções de laje flutuante, Pereira et al. (2014) também avaliaram a relação entre a área da solução alocada na parte superior do modelo simplificado e o valor de redução sonora medido, conforme apresentado na [Figura 11](#), onde também é exibido o valor medido pela ISO 140-8 [31]. É possível identificar que, utilizando as dimensões de 1,2 m \times 0,8 m de laje flutuante, obtêm-se resultados de redução sonora de impacto mais aproximados dos valores obtidos pela ISO 140-8.

Figura 11: Curvas de Redução Sonora de Impacto obtidas para lajes de concreto flutuantes com diferentes dimensões, utilizando: a) camada uniforme de borracha (4,5 mm de espessura); b) camada de borracha com espessura variável (15/7 mm).

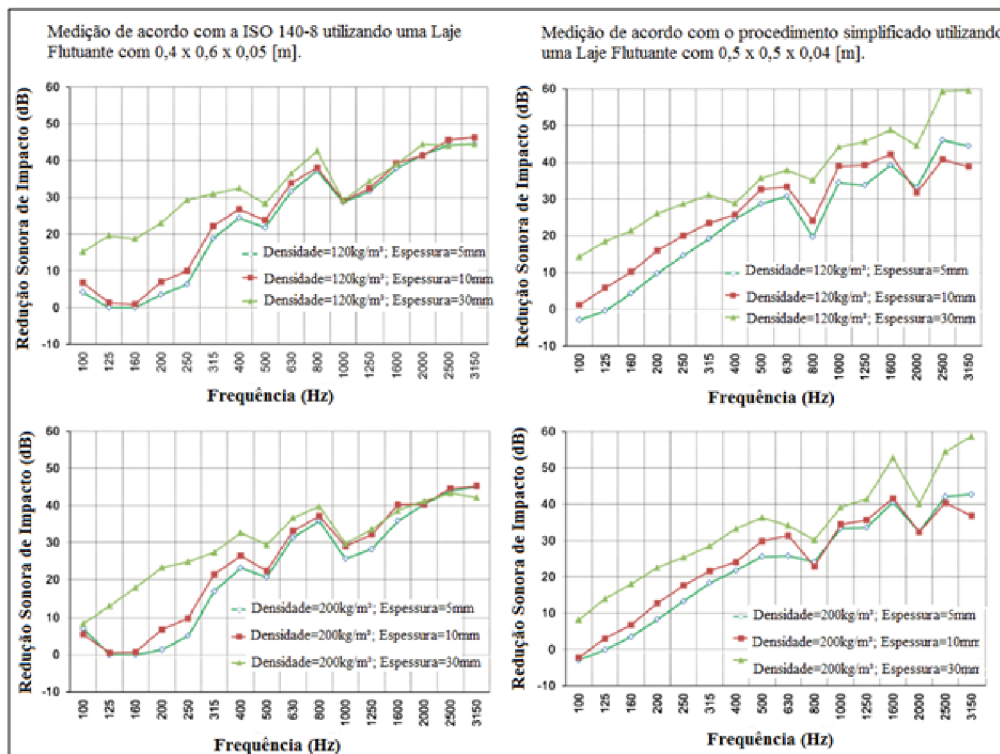


Fonte: Pereira et al, 2014. [30]

Outra análise abordada pelos autores [30] diz respeito ao comportamento das

curva de redução de ruído obtidas pelos dois procedimentos analisados (ISO 16261-1 e ISO 140-8) para diferentes espessuras de um mesmo material sob a laje flutuante. Conforme ilustrado na [Figura 12](#), os resultados obtidos pela ISO 140-8 apresentam diferenças de acordo com a espessura das amostras nas baixas e médias frequências, até a banda central de 800 Hz, porém nas altas frequências, a partir da banda central de 1000 Hz, a redução sonora de impacto pouco varia. Já nos resultados obtidos pelo método simplificado, o melhoramento da curva de redução sonora proporcional à espessura das amostras ocorre ao longo de todo espectro analisado, inclusive nas altas frequências.

Figura 12: Curvas de Redução Sonora de Impacto obtidas para lajes de concreto flutuantes sobre várias espumas flexíveis de poliuretano, com diferentes densidades e espessuras, utilizando dois procedimentos de medição.

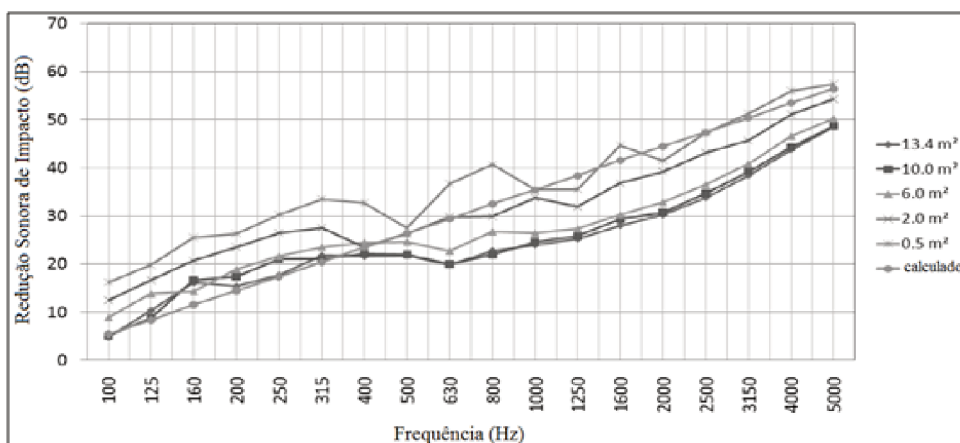


Fonte: Pereira et al, 2014. [30]

A análise sobre o tamanho das amostras apresentada na [Figura 12](#) diz respeito às soluções de laje flutuante. No entanto, esta abordagem não foi realizada para as soluções de piso flutuante em tal pesquisa. Miskinis et. al (2012) [32], por sua vez, realizou ensaios em campo, seguindo as considerações da ISO16283:2018 [33], a fim de avaliar a relação entre o tamanho das amostras de piso flutuante com a redução sonora de impacto agregada. A [Figura 13](#) apresenta os resultados de redução sonora

de impacto, obtidos para os diferentes tamanhos da mesma solução ensaiada, além de exibir a curva de redução sonora calculada. É possível verificar que os resultados obtidos para amostras com área reduzida tendem a ser superestimados, além de apresentarem oscilações.

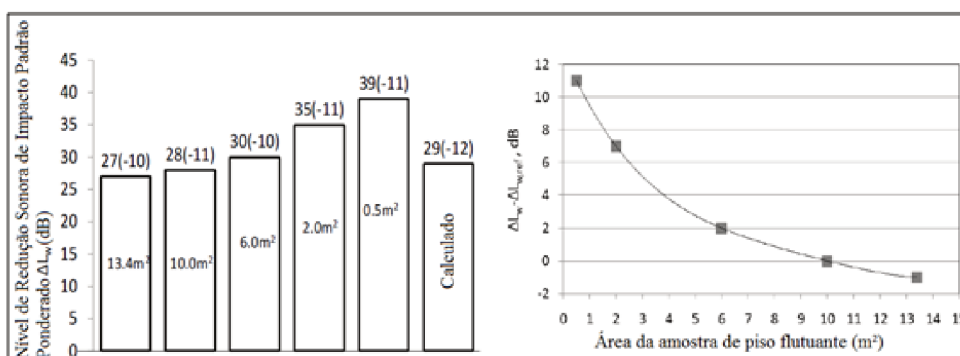
Figura 13: Curvas de Redução Sonora de Impacto obtidas uma mesma solução de piso flutuante com diferentes áreas de amostra.



Fonte: Miskinis et. al, 2011. [32]

Na Figura 14, são apresentados os valores do Índice de Redução Sonora de Impacto Padrão relacionados com a área da amostra ensaiada, onde podem ser verificados os resultados superestimados na medida em que se diminui a área de contrapiso.

Figura 14: Comparação entre os valores de Índice de Redução Sonora de Impacto Ponderado para diferentes tamanho de amostras ensaiadas.



Fonte: Miskinis et. al, 2011. [32]

4 MATERIAIS E METODOLOGIA DA PESQUISA

Nesta pesquisa, foram avaliadas amostras de mantas resilientes produzidas por quatro diferentes fabricantes, sendo que dois deles trabalham com um produto similar. Os materiais estudados foram: manta de lã de pet, manta de Polietileno Expandido de Baixa Densidade (PEBD) e manta de resíduos de pneu reciclado. As amostras foram submetidas a quatro ensaios normatizados de caracterização:

- Rigidez Dinâmica - *ISO 9052-1/1989: Acoustics - Determination of dynamic stiffness - Part 1: materials used under floating floors in dwellings*;
- Compressibilidade - *BS EN 12431/2013: Thermal insulating products for building applications - Determination of thickness for floating floor insulating products*;
- Fluência à Compressão - *ISO 20392/2007: Thermal-insulation materials - Determination of compressive creep*;
- Redução do Ruído de Impacto - *ISO 16251-1:2014: Acoustics - Laboratory measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a small floor mock-up - Part 1: Heavyweight compact floor*;

Após a realização dos ensaios de bancada, foram analisados alguns modelos propostos pela bibliografia recente para avaliação do desempenho em longo prazo das mantas resilientes submetidas ao carregamento contínuo, sendo comparados os resultados obtidos nesta pesquisa com os divulgados pelos autores de tais modelos.

4.1 Mantas resilientes analisadas

4.1.1 Lã de pet

A lã de pet é um material fibroso de células abertas composto a partir da reciclagem do polímero Tereftalato de Polietileno (PET), e é geralmente comercializada em forma de mantas ou painéis. Sua utilização como material acústico pode ser feita para os fins de tratamento e absorção sonora em ambientes internos, como revestimento de paredes, baffles e nuvens acústicas; de preenchimento de paredes leves para isolamento do ruído aéreo, como material adotado entre as placas de paredes do tipo dry-wall; e de amortecimento da vibração estrutural, como material resiliente para

contrapiso flutuante. Além do valor ambiental agregado por ser um produto reciclado, é um material hipoalérgico e inofensivo para a saúde do instalador (OLIVEIRA et al, 2017).

4.1.2 Polietileno expandido de baixa densidade

O Polietileno Expandido de Baixa Densidade (PEBD) é um polímero da classe dos termoplásticos obtido a partir do polietileno puro, que se configura como uma espuma células fechadas. Por ser um material leve (densidade média de 35 kgf/m^3) e sem porosidade, não possui aplicabilidade efetiva para absorção sonora de ambientes internos, ou para isolamento acústico ao ruído aéreo, porém apresenta boa resiliência para a utilização como material de amortecimento de vibrações para pisos flutuantes. Também se configura como hipoalérgico e inofensivo para a saúde do operador (MACHADO, 2003).

4.1.3 Manta de pneu reciclado

O material consiste em uma manta pré-fabricada de grânulos de pneus reciclados aglomerados com poliuretano. Não possui características porosas para aplicação como material de absorção sonora, mas, por ser mais denso que os descritos anteriormente (600 a 750 kg/m^3), pode ser utilizado para isolamento ao ruído aéreo. Por ser um produto reciclado, possui um valor ambiental agregado.

4.2 Procedimentos experimentais

4.2.1 Rigidez dinâmica

4.2.1.1 Revisão do procedimento normatizado A rigidez dinâmica por unidade de área de mantas resilientes usadas para isolamento acústico de pisos flutuantes pode ser obtida através da metodologia de ensaio proposta pela norma ISO 9052-1/1989. A norma apresenta as seguintes definições:

- a) s'_s : Rigidez dinâmica por unidade de área da estrutura do material [MN/m^3];
- b) s'_a : Rigidez dinâmica por unidade de área do gás enclausurado (ar) [MN/m^3];
- c) s'_t : Rigidez dinâmica por unidade de área da amostra testada [MN/m^3] ([Equação 17](#));
- d) s' : Rigidez dinâmica por unidade de área do material resiliente instalado [MN/m^3] ([Equação 18](#));
- e) f_0 : Frequência natural [Hz] (para um sistema real com oscilação livre, apresentada na [Equação 18](#));
- f) f_r : Frequência de ressonância [Hz] (obtida no teste para uma amostra ensaiada, conforme visto na [Equação 17](#));

Os parâmetros s'_s e s'_a são utilizados quando o material possui características de células abertas, o que permite o fluxo de ar através do mesmo quando submetido à carga da massa. O princípio do teste consiste em medir, através do método da ressonância, a frequência fundamental de ressonância vertical do sistema massa mola caracterizado por uma amostra resiliente com dimensões de $(200 \pm 3) \times (200 \pm 3)$ [mm] submetida ao carregamento estático de uma placa de aço com mesmas dimensões. O peso total, considerando a placa e os elementos de medição e/ou excitação deve ser de $(8 \pm 0,5)$ [kg]. O ensaio deve ser conduzido sobre uma base rígida, de forma que a velocidade de vibração em um ponto na mesma seja desprezível quando comparado com a ocorrida na placa de aço. O sinal de excitação do sistema pode ser dos tipos senoidal, ruído branco ou impacto impulsivo. A norma estabelece ainda que sejam ensaiadas no mínimo três amostras de um mesmo material, sendo o resultado final a média aritmética dos resultados parciais.

Através da aferição da f_r , pode-se obter a s'_t através da [Equação 18](#). A partir de então, a s' final será calculada dependendo da resistividade ao fluxo do ar (r em $[kPa \cdot \frac{s}{m^2}]$), que por sua vez pode ser mensurada através de acordo com os procedimentos descritos pela norma *ISO 9053:1991 "Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance"*. As relações entre tais parâmetros são:

$$s' = s'_t, \begin{cases} r \geq 100 \\ ou \\ r \leq 10, \end{cases} \quad (29)$$

$$s' = s'_t + s'_a, \quad \{ 100 \geq r \geq 10, \quad (30)$$

$$s'_a = \frac{p_0}{d\epsilon}. \quad (31)$$

Onde p_0 é a pressão atmosférica $[MPa]$; d é a espessura da amostra sob o carregamento estático aplicado $[mm]$; e ϵ é a porosidade da amostra ensaiada [adimensional].

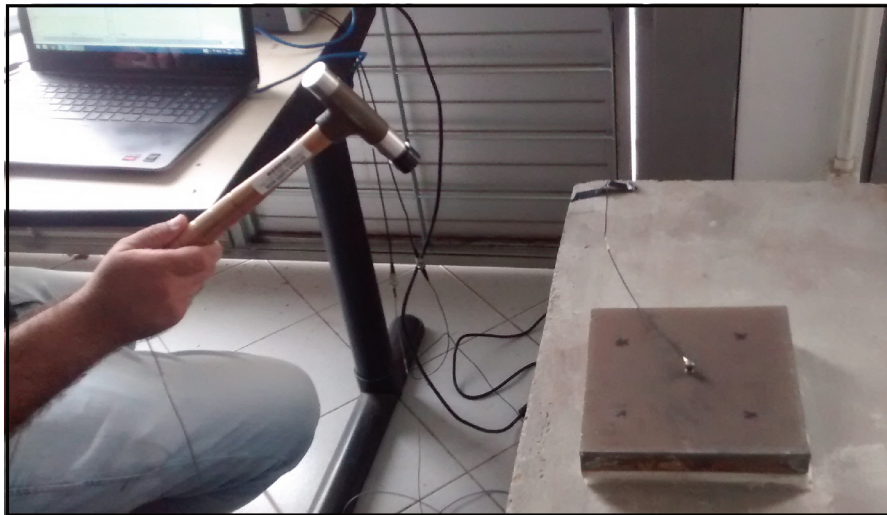
Para o caso de materiais com células fechadas (como por exemplo, o PEBD), a resistividade ao fluxo do ar é considerada infinita, e deve-se considerar a [Equação 29](#). Já para materiais de células abertas, deve verificar em que faixa o parâmetro r se enquadra. Mais detalhes sobre o procedimento do ensaio devem ser averiguados no texto completo da norma.

4.2.1.2 Descrição dos ensaios realizados A seguir, são apresentados os recursos utilizados na execução dos ensaios de rigidez dinâmica. A [Figura 15](#) apresenta um molde durante a realização do ensaio.

- Martelo de Impacto, marca PCB, tipo 086D05;
- Acelerômetro piezoelétrico tipo 4519 da *Brüel e Kjær*;
- Analisador Siemens LMS Scadas mobile;

- Software Scadas;
- Placa de aço (200 x 200 mm x 25,4mm , 8 kg).

Figura 15: Bancada do teste de rigidez dinâmica.



Fonte: O Autor.

Para extração dos dados, o acelerômetro foi posicionado no centro geométrico da placa, e o impacto com martelo foi realizado sempre entre 1,0 cm a 1,5 cm de distância do acelerômetro, a fim de enaltecer a resposta do modo vertical fundamental. Para cada amostra, foi obtida uma média de 3 pontos de impacto, com 5 medições em cada ponto.

Os ensaios de rigidez dinâmica foram conduzidos de três formas. Primeiramente, foram executados os testes seguindo o procedimento normatizado para todas as amostras fornecidas pelos fabricantes: duas espessuras de PEBD1, duas de PEBD2, uma de PET e três de GP (um total de oito amostras distintas), além de testes em seis amostras de compostos entre dois materiais distintos, e de testes em duas amostras pré-comprimidas após submetidas ao ensaio de compressibilidade. No total, 16 espécimes foram ensaiadas desta forma, sendo mantidas algumas amostras ao longo do tempo, com medições diárias. Enquanto que, para os testes realizados nos primeiros dias após a execução dos provetes, amostras idênticas foram ensaiadas, a fim de obter uma média dos resultados, nos testes ao longo dos dias, apenas as amostras com picos de ressonância mais regulares foram mantidas.

Na [Figura 16](#), são ilustrados 5 moldes preparados para extração dos resultados. Uma vez que estes testes foram conduzidos para várias amostras e ao longo

do tempo, na indisponibilidade da bancada rígida mostrada na [Figura 15](#), utilizada para os ensaios de redução do ruído de impacto, os testes de rigidez dinâmica foram conduzidos no chão, a fim de manter um base com alta rigidez.

Figura 16: Moldes para teste de rigidez dinâmica.



Fonte: O Autor.

Em uma segunda análise, foram ensaiadas as quatro amostras submetidas aos experimentos de fluência à compressão após os 180 dias de teste. Apesar de a placa de aço utilizada em ambos os ensaios ser idêntica, no teste da fluência não há a camada de gesso entre a peça e o material resiliente, o que pode interferir na comparação dos resultados. Segundo a norma, o objetivo da camada de gesso é garantir um contato mais homogêneo entre placa e manta. No entanto, os testes foram conduzidos com a finalidade de verificar possíveis variações da rigidez dinâmica após as amostras serem submetidas a um carregamento constante por 6 meses.

A terceira forma de ensaio, também com divergências entre a norma técnica devido à ausência de gesso, foi realizada em uma amostra de PEBD1 e em outra de PET, ambas com 10 mm de espessura. Foram instalados relógios comparadores com base magnética para mensurar a variação da espessura ao longo de 30 dias, à medida em que os testes de rigidez dinâmica eram conduzidos simultaneamente. Devido ao estresse aplicado pelo martelo de impacto nas amostras durante os procedimentos, bem como à compressão exercida no ato da aplicação dos acelerômetros, os dados do relógio comparador foram sendo extraídos antes e depois de cada ensaio. A [Figura 17](#) apresenta a bancada para avaliação simultânea da fluência e da rigidez dinâmica. Os dados de umidade e temperatura foram avaliados em cada medição.

Figura 17: Bancada teste de rigidez dinâmica x fluência à compressão.



Fonte: O Autor.

4.2.2 Fluência à compressão

4.2.2.1 Revisão do procedimento normatizado

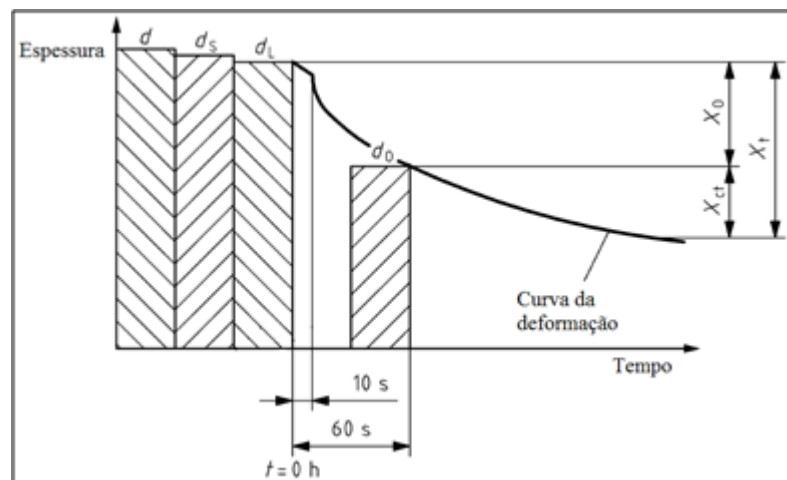
A fluência à compressão de mantas resilientes usadas em contrapiso flutuantes pode ser obtida através da metodologia de ensaio proposta pela norma BS EN 1606:2013. São apresentadas na norma as seguintes definições:

- a) d : Espessura original do produto [mm];
- b) d_S : Espessura da amostra a ser ensaiada [mm];
- c) d_L : Espessura da amostra sob a tensão de compressão do dispositivo de carregamento ("peso morto") [mm].
- d) d_0 : Espessura da amostra 60 segundos após o início da aplicação do carregamento constante [mm];
- e) d_t : Espessura da amostra em um dado tempo, t [mm];
- f) σ_c : Tensão de compressão, dada pela razão entre a força de compressão aplicada e a área de superfície inicial do corte transversal da amostra [Pa].

- g) X : Deformação, dada pela variação da espessura da amostra [mm];
- h) ε : Deformação relativa, dada pela razão entre X e d_s , medida na direção do carregamento [%];
- i) X_0 : Deformação inicial da amostra (60 segundos após o início da aplicação do carregamento) [mm];
- j) X_t : Deformação da amostra em um dado tempo, t [mm];
- k) X_{ct} : Fluência à compressão da amostra submetida à tensão constante ao longo do tempo em condições específicas de temperatura e umidade [mm].

A fluência à compressão X_{ct} é dada pela diferença algébrica entre X_t e X_0 . A [Figura 18](#) apresenta um gráfico que ilustra, ao longo do tempo, os parâmetros acima mencionados.

Figura 18: Ilustração das diferentes espessuras e deformações no ensaio de fluência à compressão.



Fonte: BS EN 1606/2013.

As amostras a serem ensaiadas devem ser quadradas, e algumas dimensões são recomendadas pela norma, sendo adotado nesta pesquisa 200 mm de lado. As condições de temperatura e umidade durante a execução dos testes devem ser, respectivamente, de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e $(50 \pm 5) \%$, semelhante às condições de ensaio do teste de compressibilidade.

Após a instalação da bancada de ensaio, a deformação axial da amostra, aferida por um relógio comparador, é registrada ao longo do tempo em horas específicas, determinadas pela norma, conforme pode ser visto na [Tabela 4](#), onde é apresentado

um exemplo de horários para extração dos dados do relógio comparador, no caso de um ensaio iniciado às 10:00 de uma segunda feira.

Tabela 4: Tabela com exemplo de horários de aferição da fluência.

Day	Time	Duration in hours	Weekday
0	10:00	0 (loading)	Monday
0	10:01	0,017	Monday
0	11:00	1,0	Monday
0	15:00	5,0	Monday
1	10:00	24	Tuesday
2	10:00	48	Wednesday
4	14:00	100	Friday
7	10:10	168	Monday
9	10:00	216	Wednesday
11	10:00	264	Friday
14	10:00	336	Monday
18	10:00	432	Friday
24	10:00	576	Thursday
32	10:00	768	Friday
42	10:00	1 008	Monday
53	10:00	1 272	Friday
65	10:00	1 560	Wednesday
80	10:00	1 920	Thursday
100	10:00	2 400	Wednesday
123	10:00	2 952	Friday
156	10:00	3 744	Wednesday
190	10:00	4 560	Tuesday
231	10:00	5 544	Monday
295	10:00	7 080	Tuesday
365	10:00	8 760	Tuesday

Fonte: BS EN 1606/2013.

A partir dos valores mensurados durante o tempo de ensaio, são extraídos, por meio de uma regressão linear dos resultados em escala logarítmica, os parâmetros estatísticos que serão adotados para estimativa da fluência à compressão, segundo as orientações da norma EN 1606/2013, conforme apresentado nas [Equações 32 a 43](#).

$$y = a + bx, \quad (32)$$

$$x_m = \sum \frac{x_t}{n}, \quad (33)$$

$$y_m = \sum \frac{y_t}{n}, \quad (34)$$

$$Q_x = \sum x_t^2 - \frac{\sum x_t^2}{n}, \quad (35)$$

$$Q_y = \sum y_t^2 - \frac{\sum y_t^2}{n}, \quad (36)$$

$$Q_{xy} = \sum x_t y_t - \frac{\sum x_t \sum y_t}{n}, \quad (37)$$

$$s_R^2 = (Q_y - \frac{Q_{xy}^2}{Q_x}) / (n - 2), \quad (38)$$

$$s_R = \sqrt{s_R^2}, \quad (39)$$

$$r^2 = \frac{Q_{xy}}{(Q_x \cdot Q_y)}, \quad (40)$$

$$r = \sqrt{r^2}, \quad (41)$$

$$b = \frac{Q_{xy}}{Q_x}, \quad (42)$$

$$a = y_m - b x_m. \quad (43)$$

Onde, n é o número de valores; x_t é o logaritmo do tempo em horas ($\log t$); y_t é o logaritmo da fluência em milímetros ($\log X_{ct}$); x_m é a média aritmética de x_t ; y_m é a média aritmética de y_t ; Q_x é a soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de x ; Q_y é a soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de y ; Q_{xy} é a soma dos desvios; S_R^2 é a variância; S_R é o desvio padrão; r^2 é o coeficiente de determinação; r é o coeficiente de correlação; a é o ponto de interceptação da curva na ordenada; b é a inclinação da curva.

Por meio da [Equação 44](#), denominada Equação de Findley, pode-se estimar a deformação do material ao longo de 30 vezes o tempo de medição.

$$X_t = X_o + m t^b \quad \text{ou} \quad \log(X_t - X_o) = \log(m) + b \log(t). \quad (44)$$

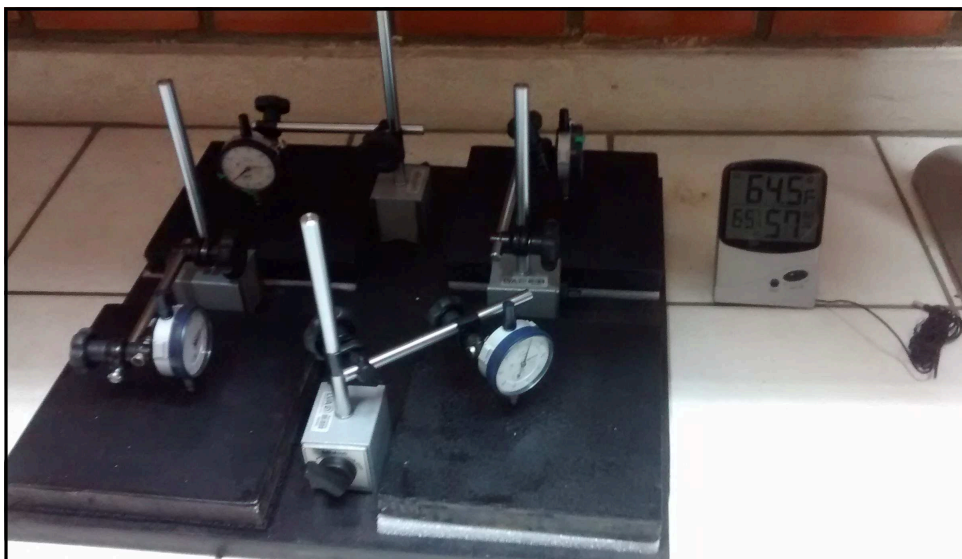
Onde $m = 10^a$, sendo a e b extraídos da regressão e t dado em horas.

4.2.2.2 Descrição dos ensaios realizados

Para a realização dos ensaios de fluência à compressão, foram utilizados os seguintes recursos. A [Figura 19](#) apresenta a bancada de ensaio conduzido simultaneamente em quatro amostras.

- Relógios comparadores analógicos Mitutoyo, precisão 0,01/10mm;
- Suporte de Medição - Bases magnéticas Mitutoyo ;
- Placas de aço tamanhos (200 x 200 mm, 8 kg);
- Base de aço (500 x 500 mm, 8 kg);
- Medidor de temperatura e umidade.

Figura 19: Bancada do teste de Fluência à compressão.



Fonte: O Autor.

O ensaio foi realizado para uma amostra de cada material fornecidos pelos 4 fabricantes de mantas. Foram avaliadas duas amostras de 10 mm de PEBD1 e PEBD2, uma amostra de 5 mm de GP e uma de PET com 10 mm. O teste foi conduzido ao longo de 183 dias.

4.2.3 Compressibilidade

4.2.3.1 Revisão do procedimento normatizado

A compressibilidade de mantas resilientes usadas para isolamento acústico de pisos flutuantes pode ser obtida através da metodologia de ensaio proposta pela norma BS EN 12431:2013. São apresentadas na norma as seguintes definições:

- a) d_L : Espessura do produto sob um carregamento de 0,25 kPa [mm];
- b) d_F : Espessura do produto sob um carregamento de 2 kPa [mm];
- c) d_B : Espessura do produto sob um carregamento de 2 kPa após a aplicação em curto período de um carregamento adicional de 48 kPa [mm].

A compressibilidade de um produto consiste em avaliar, a partir de uma série de carregamentos estáticos, a variação da sua espessura em decorrência de cada um dos esforços aplicados, através de um dispositivo para mensuração que deve permitir uma leitura com precisão de $\pm 0,1$ mm. Desta forma, é medida a espessura d_L da amostra após 120 segundos da aplicação de uma carga de (250 ± 5) Pa; a espessura d_F após 120 segundos da aplicação de uma carga de (2000 ± 20) Pa; a espessura d_B após 120 segundos da aplicação de uma carga de (2000 ± 20) Pa, depois da aplicação de 120 segundos e remoção de uma carga de (50000 ± 50) Pa. A compressibilidade c do material é dada por [9]:

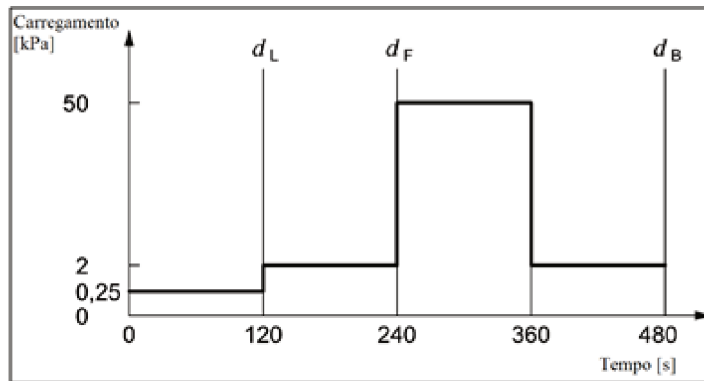
$$c = d_L - d_F. \quad (45)$$

As amostras a serem ensaiadas devem possuir dimensões de (200 ± 1) mm x (200 ± 1) mm. As condições de temperatura e umidade durante a execução dos testes devem ser, respectivamente, de (23 ± 2) °C e (50 ± 5) %, e as amostras devem ser mantidas por pelo menos seis horas antes dos ensaios em ambiente com temperatura de (23 ± 5) °C. A [Figura 20](#) a seguir apresenta o gráfico a ser gerado para a apresentação dos resultados do ensaio.

4.2.3.2 Descrição dos ensaios realizados

Foram ensaiadas 3 amostras de PEBD1 com 10 mm de espessura, e 3 do material PEBD2, todas com 10 mm de espessura. Foi utilizada uma máquina de compressão modelo MTS Criterion 45, com capacidade máxima de aplicação de 100 kN,

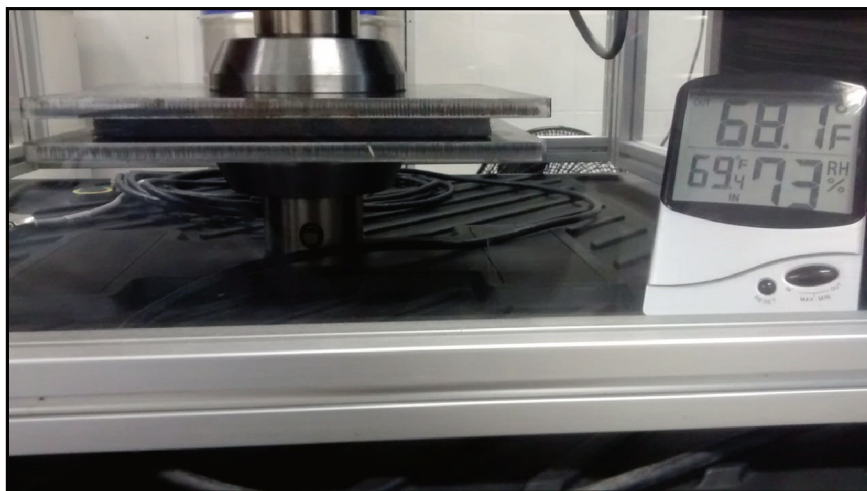
Figura 20: Modelo de apresentação do resultado do teste de compressibilidade.



Fonte: BS EN 12431:2013.

para aferição da deformação dos materiais sob cargas constantes. O teste foi conduzido de forma que cada carga aplicada era completamente retirada após 120s de atuação constante, e em seguida o carregamento seguinte era aplicado. A Figura 21 ilustra uma amostra sob avaliação no equipamento de ensaio.

Figura 21: Ensaio de compressibilidade - Máquina de compressão.



Fonte: O Autor.

Devido à alta rigidez das mantas de PET e GP, ao serem submetidas ao elevado carregamento de 50 kN, estes materiais não foram ensaiados, a fim de não comprometer a integridade da máquina de compressão.

4.2.4 Redução do ruído de impacto em bancada reduzida

4.2.4.1 Revisão do procedimento normatizado

A redução do nível do ruído de impacto através da adoção de materiais de isolamento acústico de pisos pode ser mensurada por meio de um procedimento alternativo utilizando bancada de laje de concreto em modelo reduzido, cujas definições são abordadas na norma ISO 16251-1. O método foi concebido tendo com base a norma ISO 10140-3 [29], na qual são mensurados os níveis de pressão sonora em recinto inferior com e sem a presença da solução acústica sobre a laje de separação das câmaras, utilizando uma máquina de impacto padrão [34] como fonte de excitação do sistema. No teste com a bancada reduzida, por sua vez, a redução de energia proporcionada pela solução acústica é analisada por meio da aferição do nível de aceleração na superfície inferior da laje. Utilizando no mínimo duas posições de máquina de impacto padrão e quatro acelerômetros, são medidos os níveis de aceleração da vibração ($L'_{s,t,a}$) da laje, segundo a [Equação 46](#).

$$L'_{s,t,a} = 10 \log \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} \frac{a_t^2 dt}{a_o^2}. \quad [dB] \quad (46)$$

Onde T_m é o tempo de integração, em segundos; a é a aceleração, em m/s^2 ; e a_o é a aceleração de referência ($1 \cdot 10^6 m/s^2$). O índice s recebe o valor $s = 0$ para a ausência da solução acústica, e $s = 1$ para a espécime sob avaliação; o índice t é referente à posição da máquina de impacto, e a simboliza a especificação do acelerômetro. Já a marca ' indica que o nível deve ser corrigido caso haja interferência significativa do ruído de fundo [11], o qual, por sua vez, deve ser mensurado sem qualquer excitação com máquina de impacto sobre a laje.

Desta forma, para cada acelerômetro e posição de máquina de impacto, a redução do nível de impacto ($\Delta L_{t,a}$) é dada pela [Equação 47](#):

$$\Delta L_{t,a} = L_{0,t,a} - L_{1,t,a}. \quad (47)$$

Por fim, o valor da redução de nível de impacto proporcionado pela solução acústica é dada pela [Equação 48](#).

$$\Delta L = \frac{1}{ta} \sum_t \sum_a \Delta L_{t,a}. \quad (48)$$

4.2.4.2 Descrição dos ensaios realizados

Para a realização dos ensaios de redução do ruído de impacto da solução de contrapiso flutuante, foram utilizados os seguintes recursos.

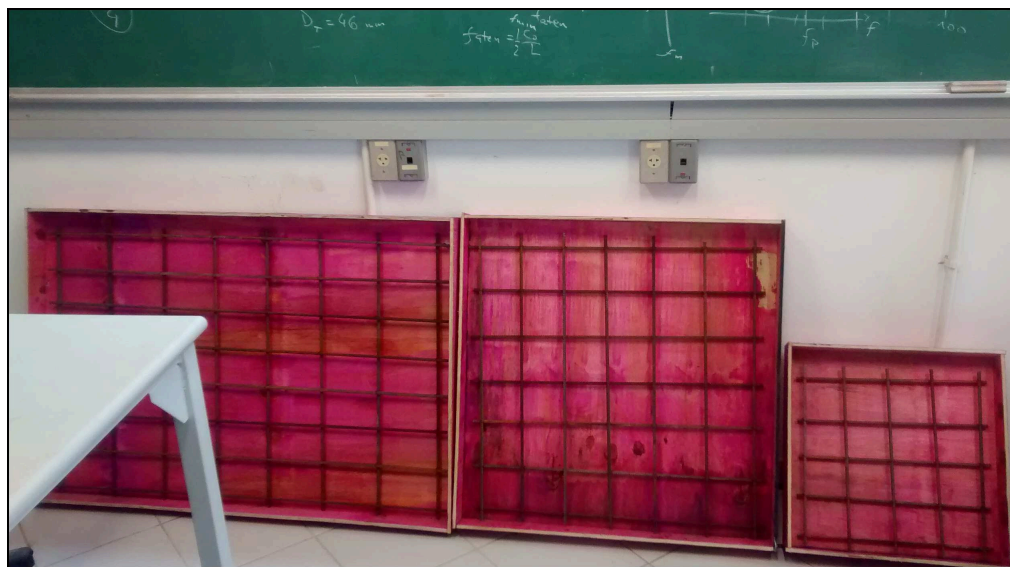
- Bancada Reduzida construída conforme (ISO 16251-1:2014);
- Moldes de contrapiso em 3 tamanhos;
- Máquina de impacto padrão (*Tapping Machine*), tipo 3207 *Brüel e Kjær*;
- 4 Acelerômetros piezoelétricos tipo 4519 da *Brüel e Kjær*, previamente calibrados com equipamento 2894 da *PCB Piezotronics*;
- Analisador Siemens LMS Scadas mobile;
- *Software Scadas*.

A bancada de laje reduzida foi utilizada para aferição dos níveis de ruído de impacto medidos com e sem os moldes de contrapiso, em tamanhos de 50 cm x 50 cm, 80 cm x 80 cm e 80 cm x 120 cm, sobre os diferentes compostos de mantas resilientes avaliados. Os contrapisos foram moldados em argamassa de cimento e areia, com armação de aço CA 50 8mm, conforme apresentado nas [Figuras 22 e 23](#). As peças foram feitas com ganchos para facilitar a substituição das amostras durante os ensaios.

Foram posicionados quatro acelerômetros na superfície inferior da laje, fixados com cola, conforme apresentado na [Figura 24](#). Foram adotadas 3 posições de fonte (máquina de impacto padrão) para os ensaios diretos sobre a laje e para os testes com contrapiso flutuante de 80 cm x 120 cm (CP120). Já para os ensaios com contrapiso 80 cm x 80 cm (CP80), duas posições de fonte foram adotadas, e apenas uma posição para o contrapiso menor (CP50).

A [Figura 25](#) apresenta a bancada durante a condução dos ensaios, com um molde de contrapiso CP80 sobre duas mantas acústicas diferentes (PEBD1 + GP).

Figura 22: Caixas para moldagem dos contrapisos.



Fonte: O Autor.

Figura 23: Moldes de contrapisos.



Fonte: O Autor.

Figura 24: Acelerômetros fixados abaixo da laje da bancada.



Fonte: O Autor.

Para cada configuração testada, foi obtida a média de 3 medições de 60 segundos de funcionamento da máquina. Foram colocadas mantas de GP de 8mm entre a laje e os 4 pilares da bancada.

Figura 25: Testes de Redução de Ruído - Bancada Reduzida.



Fonte: O Autor.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados todos os resultados obtidos a partir dos procedimentos de ensaio descritos na sessão de metodologia. Foram analisados três tipos de materiais, fornecidos por quatro empresas do mercado brasileiro de mantas vibroacústicas aplicadas em contrapiso flutuantes. Dois fabricantes cederam mantas de PEBD, os quais são diferenciados pela nomenclatura PEBD1 e PEBD2, ambos com amostras nos tamanhos de 5 e 10 milímetros, enquanto outro fabricante forneceu amostras de 10 mm de fibra de lã de Pet, um material que, diferentemente do PEBD, apresenta composição estrutural de células abertas. O quarto fabricante cedeu mantas de um material granulado de pneus reciclados, em amostras de 3, 5 e 8 milímetros.

Nos ensaios de rigidez dinâmica, além dos testes realizados ao longo de até quinze dias em algumas amostras, duas espécimes selecionadas, uma de PEBD e outra de PET, foram mantidas sob uma carga de 2 kPa, aplicada pela peça de aço sobre a qual um relógio comparador foi utilizado para mensurar a variação da espessura simultaneamente aos testes de rigidez dinâmica ao longo do tempo. Para fins de comparação com resultados obtidos pela bibliografia, também foram realizados ensaios de rigidez dinâmica em amostras compostas por dois materiais diferentes. O mesmo foi feito durante os testes de perda de transmissão realizados na bancada reduzida, que, por sua vez, foi realizado com três áreas diferentes de amostras e de contrapiso. Tais procedimentos objetivaram verificar a influência da aplicação em série de mantas diferentes e do tamanho das amostras nos valores dos resultados.

Os resultados de perda de transmissão obtidos pelos testes na bancada reduzida foram comparados com os valores estimados analiticamente por meio da rigidez dinâmica mensurada, bem como com os resultados fornecidos por um dos fabricantes em relatório de ensaio laboratorial seguindo o método da norma ISO 10140, em câmaras sobrepostas.

Um metodologia de avaliação experimental, bem com um modelo válido para estimar o desempenho das mantas resilientes ao longo do tempo, consistem nos principais interesses desta pesquisa. O teste normatizado de fluência à compressão apenas avalia a variação de espessura, e o valor de rigidez dinâmica fornecidos pelas empresas brasileiras apenas possibilita o cálculo do desempenho imediato do produto. Estimar a variação da espessura ao longo do tempo é possível por meio do modelo de

Findley devido à correlação obtida na regressão linear. Portanto, nos casos em que os dados de rigidez dinâmica medidos ao longo do tempo apresentem uma curva com comportamento semelhante, é possível estimar o desempenho acústico ao longo do tempo. A rigidez dinâmica, no entanto, é um parâmetro indireto de avaliação das mantas, diferentemente da perda de transmissão obtida na bancada reduzida, mesmo que com limitações em relação ao teste em câmaras sobrepostas ou em campo. No entanto, para fins de avaliação de amostras quanto à variação do desempenho em longo período, objetivando o desenvolvimento tecnológico e o melhoramento de soluções e materiais, o uso da bancada possibilita uma contundente avaliação do problema.

5.1 Rigidez dinâmica

5.1.1 Material 1 de Polietileno Expandido de Baixa Densidade - PEBD1

O fabricante do material PEBD1 forneceu amostras de 5 e 10 mm de espessura. Foram conduzidos os testes de acordo com a ISO 9052:1 em três amostras de 10 mm (M1 a M3), três de 5 mm (M4 a M6) e duas de 10 mm pré-comprimidas após o teste de compressibilidade (Mp1 e Mp2). A [Tabela 5](#) a seguir apresenta as espécimes ensaiadas.

Tabela 5: Amostras PEBD1

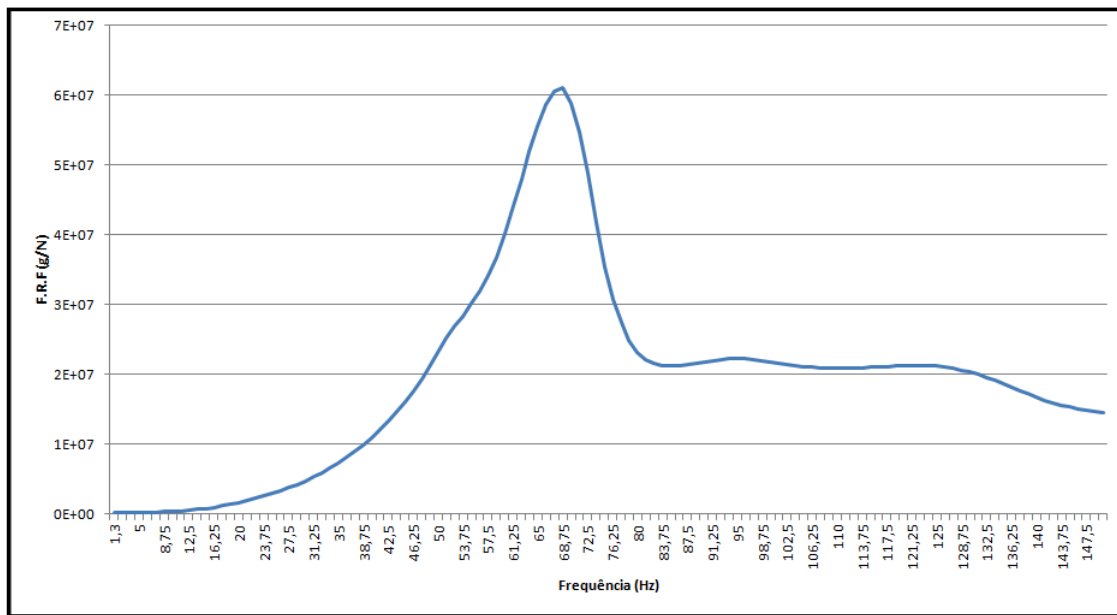
Material PEBD1	
Amostra	Espessura (mm)
M1	10
M2	10
M3	10
M4	5
M5	5
M6	5
Mp1	10
Mp2	10

Fonte: O Autor.

A amostra M1 foi avaliada durante 13 dias após sua preparação. Os primeiros ensaios ocorreram depois de quatro dias, tempo necessário para secagem do gesso. Em seguida, foram extraídos dos resultados modais após 5, 6, 10, 11, 12 e 13 dias. O gráfico da [Figura 26](#) apresenta a Função de Resposta em Frequência (FRF) obtida na média de uma das posições de impacto dos testes conduzidos no quarto dia de idade da amostra.

Foram consideradas 3 posições de impacto do martelo, enquanto o acelerômetro foi mantido no centro da placa, e a média de cinco impactos para cada posição foi extraída. A frequência do pico de maior amplitude da resposta obtida no gráfico ([Fig. 26](#)) é de aproximadamente 69 Hz, o que resulta em uma rigidez dinâmica de 37 MN/m^3 , calculado por meio da [Equação 17](#). As outras duas posições de impacto resultaram em 35 e 37 MN/m^3 , logo a média de M1 em 4 dias foi $36,4 \text{ MN/m}^3$. No quinto dia, o resultado da média de M1 pouco variou, subindo para $36,8 \text{ MN/m}^3$. Já

Figura 26: FRF - Linear (g/N) do ensaio de rigidez dinâmica da amostra M1 (4 dias).



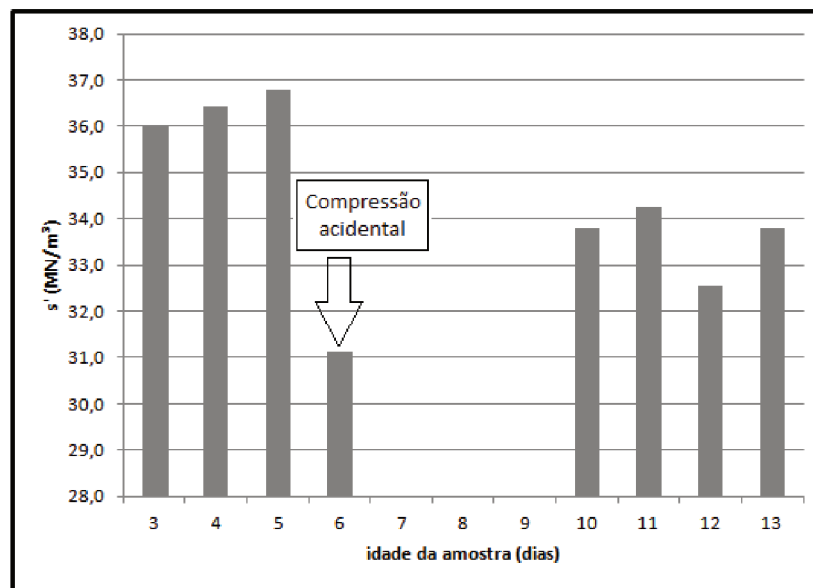
Ensaio Rigidez Dinâmica - Amostra M1 (4 dias)

a na amostra M2, idêntica à anterior, o valor da rigidez dinâmica no terceiro dia após a preparação foi de $36,0 \text{ MN}/\text{m}^3$.

A norma deste ensaio não estabelece idade de referência para a extração dos resultados de um material, porém o comportamento crescente verificado nos primeiros 5 dias de ensaio nestas amostras condizem com as conclusões e sugestões das referências bibliográficas (Schiavi 2005, Schiavi 2007).

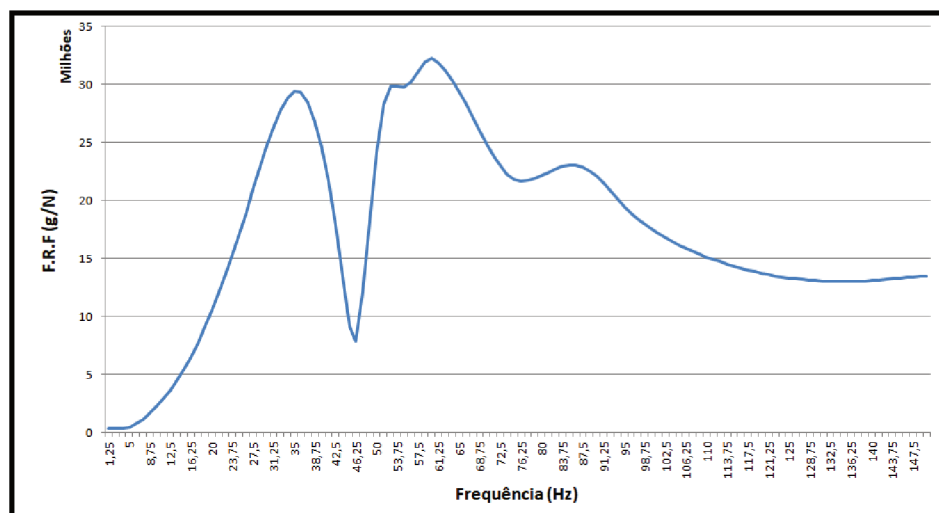
No sexto dia de idade, a amostra M1 sofreu um estresse de compressão acidental, o que pôde ser verificado nos resultados de rigidez dinâmica obtidos em teste realizado algumas horas depois desta carga externa, apresentando uma média de $31,1 \text{ MN}/\text{m}^3$. Tal variação do parâmetro após um carregamento instantâneo de compressão foi observado em trabalhos referenciados nesta pesquisa (V. Dikavicius e K. Miskinis, 2009), onde constatou-se que a rigidez dinâmica diminuiu após as amostras serem submetidas aos ensaios de compressibilidade. Nos dias 10, 11, 12 e 13 de idade, os resultados de M1 foram de $33,8 \text{ MN}/\text{m}^3$, $34,2 \text{ MN}/\text{m}^3$, $32,5 \text{ MN}/\text{m}^3$ e $33,8 \text{ MN}/\text{m}^3$, respectivamente. A [Figura 27](#) apresenta o gráfico com os resultados médios de M1 e M2 ao longo dos 13 dias.

O corpo de ensaio da amostra M3 apresentou desnivelamento e espaços não preenchidos pelo gesso moldado, gerando uma excentricidade que resultou em uma resposta modal inconsistente, como pode ser visualizado na [Figura 28](#) diferentemente

Figura 27: PEBD1 10mm - Rigidez Dinâmica (s') em 13 dias.

Fonte: O Autor.

do evidente pico da curva de M1 (Fig. 26). Por não obter valores, esta amostra foi dispensada das médias de PEBD1 com 10 mm resumida em Fig. 27.

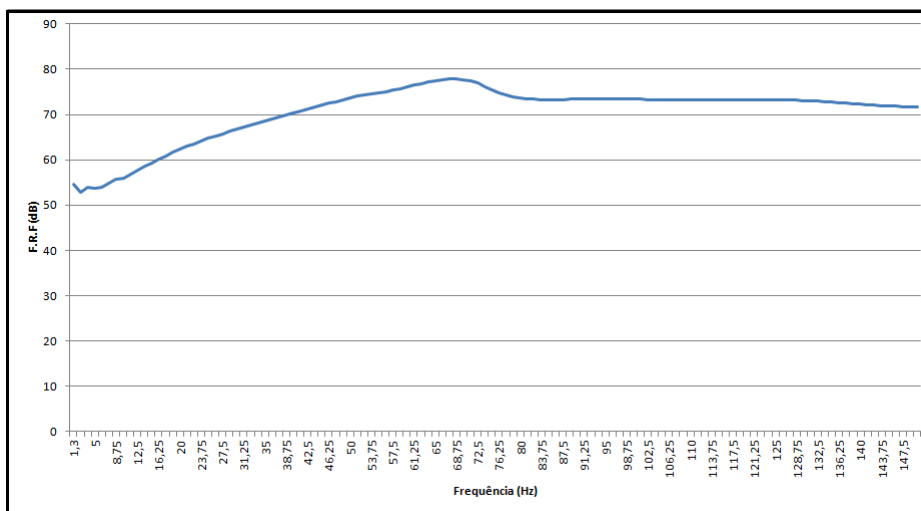
Figura 28: FRF - Linear (g/N) do ensaio de rigidez dinâmica da amostra M3 (3 dias)

Fonte: O Autor.

Os parâmetros de amortecimento do modelo (manta/gesso/placa) podem ser extraídos dos dados obtidos no teste de rigidez dinâmica por meio do método da banda de meia potência ([35], [36], e [14]), sendo possível obter Fator de Perda Interno (η) [35], ou Fator de Qualidade (Q) [17], conforme apresentado na Equação 20. Tais valores fornecem importantes informações sobre o desempenho da amostra, uma vez

que estão correlacionados com a inclinação da curva de desempenho da redução de ruído de impacto estimada por meio da rigidez dinâmica (Schiavi, 2005; Schiavi, 2007 e Schiavi, 2018). O método para cálculo do Fator de Perda (Q) consiste em determinar as duas frequências acima e abaixo da frequência de ressonância do sistema massa mola cujas magnitudes de amplitude diferem em 3 dB em relação ao pico (Equação 20). A Figura 29 apresenta o gráfico da FRF em escala dB do mesmo resultado de PEBD1-M1 em 4 dias (Fig. 26). Neste caso, o ponto central do modo é (69 Hz ; 77,9 dB).

Figura 29: FRF - em dB do ensaio de rigidez dinâmica da amostra M1 (4 dias).



Fonte: O Autor.

Para o gráfico de M1 (Fig. 29), f_1 é 55,00 Hz e f_2 76,25 Hz, resultando em um fator de qualidade de 3,24 para a média em um dos pontos de impacto. A média dos 3 pontos resulta um fator de qualidade de 3,15. Nos casos onde haja falta de simetria no pico de ressonância, o valor corrigido Q^* é dado por meio da Equação 49 sugerida por Schiavi (2005), na qual é desconsiderada a frequência inferior ao pico. Esta escolha deve ser baseada na análise do gráfico, verificando a existência de superposição de outros picos de resposta nas adjacências da ressonância.

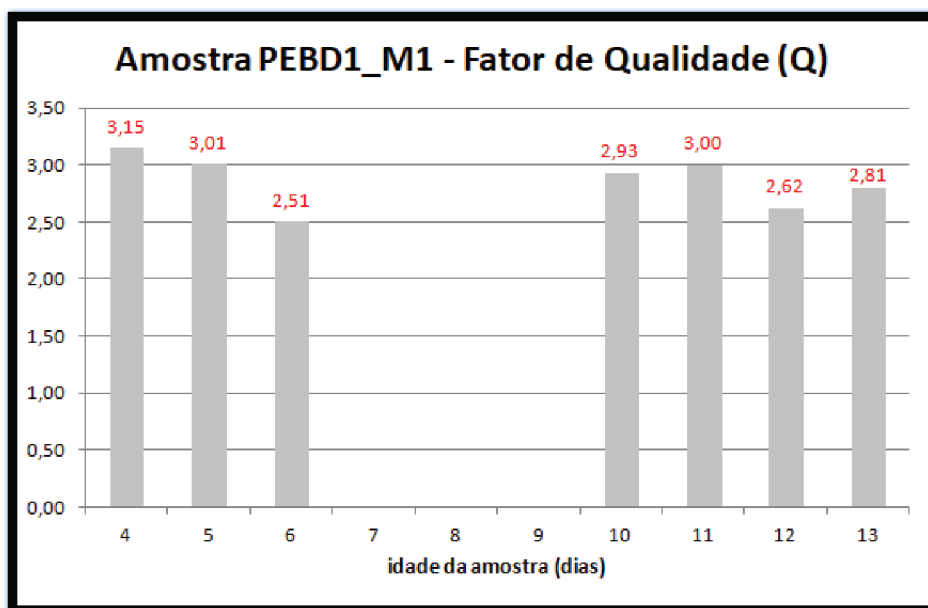
$$Q^* = \frac{f_0}{2(f_2 - f_0)}. \quad (49)$$

Desta forma, a curva de redução de nível de ruído de impacto teria uma inclinação positiva de 31 ($Q = 3,15$) dB/década, corrigida por meio do método de Schiavi

(2005) apresentado na [Tabela 2](#), a partir da frequência de ressonância do contrapiso real, calculada por meio da rigidez dinâmica da amostra ($36,4 \text{ MN/m}^2$).

No dia 5, o resultado de Q da amostra M1 variou para 3,0. Já no sexto dia, após sofrer a carga externa acidental e mitigar os resultados de rigidez dinâmica (um decréscimo de $5,7 \text{ Mn/m}^2$), M1 apresentou um fator de qualidade de 2,50, a partir do qual, pela [Tabela 2](#), a inclinação da curva de redução seria de 30 dB/década. Observe, portanto, que as variações das propriedades dinâmicas do material quando submetido à carregamentos externos pode melhorar seus resultados quanto ao início da curva de redução de nível de pressão sonora (estimado pela rigidez dinâmica), porém mitigar o desempenho ao diminuir a inclinação da curva em dB/década (por meio dos parâmetros de amortecimento). A [Figura 30](#) apresenta a variação dos valores de fator de qualidade de M1 ao longos dos 13 dias de análise.

Figura 30: Valores de Q - Amostra PEBD1-M1.



fonte: O Autor.

As amostras M4, M5 e M6, por serem de 5 mm, apresentaram maiores valores de rigidez dinâmica, conforme esperado levando em consideração a [Equação 5](#). Os valores de fator de qualidade, por sua vez, foram menores em relação aos resultados para 10 mm. Os resultados podem ser vistos na [Tabela 6](#).

O valores de rigidez dinâmica obtidos para a amostra M4 apresentaram um comportamento decrescente ao longo do tempo, diminuindo $5,3 \text{ MN/m}^3$ do terceiro para o sétimo dia de idade da amostra. Já o fator de qualidade manteve valores entre

Tabela 6: Rigidez dinâmica (s') e fator de qualidade (Q) - Amostra PEBD1 - 5mm.

PEBD1 - 5 mm					
M4	s' (MN/m ³)	64,6	64,0	62,8	59,3
	Q	2,39	2,6	2,63	2,34
	idade da amostra (dias):	3	4	6	7
M5	s' (MN/m ³)	52,9	52,7	50,5	-
	Q	2,23	2,40	2,83	-
	idade da amostra (dias):	4	8	27	-
M6	s' (MN/m ³)	66,5	-	-	-
	Q	3,1	-	-	-
	idade da amostra (dias):	5	-	-	-

fonte: O Autor.

2,3 e 2,6 (30 dB/década). No caso da amostra M5, a rigidez dinâmica decresceu ao longo do tempo, porém com uma variação menor que a apresentada por M4, mesmo com uma maior de diferença de idade entre a primeira e última aferição. O inverso ocorreu com o fator de qualidade, que apresentou comportamento crescente ao longo do tempo.

Com a variação positiva nos valores de fator de qualidade e negativa nos resultados de rigidez dinâmica para a amostra M5, a estimativa da redução de ruído de impacto fornecida pelo material resiliente tenderia a apresentar uma evolução ao longo do tempo de 27 dias de ensaio. No entanto, para a variação constatada (2,4 MN/m³ do dia 4 para o dia 27 de idade da amostra, e fator de qualidade permanecendo na faixa entre 2 e 3), a redução ponderada de ruído de impacto, estimada pela [Equação 18](#) e aplicando o método da ISO 717-2, mantém-se em 21 dB, considerando um contrapiso de 4 cm (82 kg/m²). Para a amostra M6, que apresentou o melhor resultado de fator de qualidade, maior o pior de rigidez dinâmica, dentre as amostras de PEBD1 de 5 mm, o nível de redução de impacto padrão ponderado foi de 19 dB, para um mesmo contrapiso.

Segundo Schiavi (2005), "quando a frequência do pico de ressonância é perceptivelmente assimétrica, o termo $2(f_2 - f_0)$ pode ser usada no lugar de Δf " ([Equações 20 e 49](#)). O fator de qualidade obtido pelo teste de impacto na amostra PEBD1-M5 ao quarto dia de idade, por exemplo, foi obtido considerando apenas a frequência inferior ao pico (f_1), aplicando-a no lugar de f_2 na [Equação 49](#), na qual f_1 é desconsiderada. Este procedimento foi realizado em todas as amostras que apresentaram comportamentos antissimétricos semelhantes em suas FRF's.

As amostras de PEBD1 pré-comprimidas, Mp1 e Mp2, foram submetidas aos

carregamentos proporcionados pelo teste de compressibilidade, cuja compressão máxima aplicada à amostra é de 50 kPa (vinte e cinco vezes maior do que a carga promovida pela placa de aço utilizada nos testes de rigidez dinâmica e de fluência à compressão). A [Tabela 7](#) apresenta os resultados obtidos por meio do teste com martelo de impacto. Observa-se que os valores de rigidez dinâmica nos primeiros dias de idade são maiores do que os obtidos para as amostras intactas M1 e M2, porém o comportamento decrescendo dos valores é bem mais evidente, reduzindo 9,8% do primeiro ao quinto dia de idade da amostras Mp1, e 11,47% do terceiro ao sétimo dia para a amostra Mp2. No caso da amostra M1, entre os dias 4 e 13 de idade, a variação negativa observada foi de 7,22%, porém a amostra sofreu um carregamento accidental. Já quanto ao fator de qualidade, para as amostras pré-comprimidas foram observados valores médios maiores do que os obtidos para as amostras intactas.

Tabela 7: Rigidez dinâmica (s') e fator de qualidade (Q) - Amostra PEBD1 - 10 mm (amostras pré-comprimidas).

PEBD1 - 10 mm - Amostras pré-comprimidas (50 kPa)					
Mp1	s' (MN/m ³)	43,9	42,0	39,6	-
	Q	2,76	2,9	3,21	-
	idade da amostra (dias):	1	2	5	-
Mp2	s' (MN/m ³)	39,2	37,3	36,0	34,7
	Q	2,69	2,80	2,84	2,62
	idade da amostra (dias):	3	4	6	7

fonte: O Autor.

5.1.2 Material 2 de Polietileno Expandido de Baixa Densidade - PEBD2

Foram ensaiadas cinco amostras de PEBD2 com 10 mm de espessura, sendo três intactas (M1 a M3) e duas pré-comprimidas (Mp1 e Mp2). Uma das amostras intactas de 10 mm foi preparada com uma bancada na qual um relógio comparador foi instalado para aferir a deformação axial da amostra ao longo de 44 dias. Duas amostras intactas de PEBD2 com 5 mm de espessura (M4 e M5) também foram avaliadas. A [Tabela 8](#) a seguir apresenta as espécimes ensaiadas.

Tabela 8: Descrição das amostras intactas e pré-comprimidas de PEBD2

Material PEBD2	
Amostra	Espessura (mm)
M1	10
M2	10
M3	10
M4	5
M5	5
Mp1	10
Mp2	10

Fonte: O Autor.

Apesar de serem do mesmo material, os resultados de rigidez dinâmica obtidos para PEBD2 apresentaram valores e comportamentos distintos em relação aos discutidos anteriormente para PEBD1. Os resultados de rigidez dinâmica medidos ao longo de 13 dias para a amostra M1, conforme abordado na [Tabela 9](#), apresentaram um comportamento crescente aos longo do tempo, cuja taxa de crescimento foi 17,80% do dia 1 ao dia 13. O valor de rigidez dinâmica obtido ao segundo dia aumentou em relação ao primeiro, porém reduziu ao terceiro dia. o que também ocorreu nas demais amostras de 10 mm do material PEBD2, incluindo as pré-comprimidas.

A amostra M2 apresentou valores inferiores à M1, apesar de serem idênticas, porém também foi verificado um comportamento crescente. Os resultados do fator de qualidade obtidos, apesar de serem um pouco inferiores em relação às amostras de 10 mm do material PEBD1, mantiveram-se na margem cuja inclinação da redução de ruído estimada é de 30 dB/década. A [Tabela 9](#) apresenta os resultados obtidos para as amostras com 10 mm de PEBD2 intactas. A média dos valores da rigidez de

Tabela 9: Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade PEBD2 - 10 mm

PEBD2 - 10 mm									
M1	s' (MN/m ³)	36,9	41,5	39,5	42,5	42,9	43,0	42,9	43,4
	Q	2,13	2,46	2,25	2,46	2,61	2,46	2,61	2,48
	idade da amostra (dias):	1	2	3	7	8	9	10	13
M2	s' (MN/m ³)	26,0	30,0	29,7	-	-	-	-	-
	Q	1,96	2,12	2,02	-	-	-	-	-
	idade da amostra (dias):	1	2	3	-	-	-	-	-

Fonte: O Autor.

dinâmica das amostras M1 e M2 ao terceiro dia de idade é $34,60 \text{ MN/m}^3$, sendo que a diferença entre os dois resultados é de aproximadamente 10 MN/m^3 . Em termos de nível de redução de ruído estimada para contrapiso de 4 mm, o resultado para M1 (3 dias - $39,5 \text{ MN/m}^3$) seria de 22 dB, enquanto para M2 (3 dias - $29,7 \text{ MN/m}^3$) seria de 24 dB. Considerando a variação dos valores obtidos para M1 ao longo dos 13 dias, o nível da redução de ruído estimada para o primeiro dia é de 23 dB, enquanto que, para 13 dias de idade, o nível de redução seria 22 dB.

O comportamento crescente da rigidez dinâmica observado para as amostras de 10 mm do PEBD2 não se repetiu para as espécimes de 5 mm. A Tabela 10 apresenta os resultados de M4 e M5. Nos dois casos, houve uma redução da rigidez dinâmica entre o primeiro e último dia de aferição. Para M4, do dia 4 para o dia 14 de idade, houve uma redução de 14,75%, enquanto que para M5, do quarto para o sétimo dia a redução foi de 10,14%. Avaliando a estimativa do nível de redução de ruído, para M4 ao quarto dia seria de 20 dB, aumentando para 21 dB para a estimativa do dia 14. Já para M5, o nível de redução seria de 21 dB para o quarto dia, e atingindo 22 dB para o sétimo dia.

Tabela 10: Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade PEBD2 - 5 mm

PEBD2 - 5 mm									
M4	s' (MN/m ³)	59,9	62,8	58,2	54,3	56,0	51,1	54,4	51,1
	Q	2,33	2,78	2,58	2,55	2,56	2,34	2,41	2,51
	idade da amostra (dias):	4	5	6	7	10	11	13	14
M5	s' (MN/m ³)	50,5	47,9	49,0	45,4	-	-	-	-
	Q	2,09	1,99	2,05	1,90	-	-	-	-
	idade da amostra (dias):	4	5	6	7	-	-	-	-

Fonte: O Autor.

Os resultados das duas amostras pré-comprimidas de 10 mm são apresen-

tados na Tabela 11. Uma das amostras foi avaliada ao longo de 8 dias, enquanto a amostra Mp2 foi analisada apenas nos 3 primeiros dias. A média da rigidez dinâmica obtida ao terceiro dia de idade foi $38,27 \text{ MN/m}^3$, um pouco superior à média obtida para as amostras intactas. Foi observado um comportamento crescente para a amostra Mp1, com uma taxa de 11,23 % do primeiro ao oitavo dia.

Tabela 11: Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade PEBD2 - 10 mm pré-comprimidas

PEBD2 - 10 mm - Amostras pré-comprimidas (50 kPa)						
Mp1	s' (MN/m ³)	32,3	35,2	33,9	34,7	36,0
	Q	2,25	2,38	2,23	2,52	2,70
	idade da amostra (dias):	1	2	3	7	8
Mp2	s' (MN/m ³)	44,4	44,7	42,7	-	-
	Q	2,29	2,90	2,29	-	-
	idade da amostra (dias):	1	2	3	-	-

Fonte: O Autor.

A amostra M3, avaliada ao longo de 44 dias juntamente com a variação de espessura por meio do relógio comparador, será discutida nas sessões posteriores, após a apresentação dos resultados do teste de fluência à compressão.

5.1.3 Material de Lã de Pet - PET

Diferentemente das amostras de polietileno expandido apresentadas nesta sessão, o material PET possui células abertas. Desta forma, a rigidez dinâmica da amostra deve ser corrigida pelas [Equações 30 e 31](#). Segundo as informações fornecidas pelo fabricante, a porosidade da amostra é de $\varepsilon = 0,9$, e foi considerada a pressão atmosférica de referência, sugerida pela norma ISO 9052-1 [20], de $p_o = 0,1 \text{ MPa}$. A espécime atingiu a espessura d de 4,1 mm após a colocação da placa de aço durante os testes. Substituindo estes valores na [Equação 31](#), tem-se que a rigidez dinâmica média do ar existente nos poros da amostras é de 27 MN/m^3 .

Foram analisadas três amostras do material (M1, M2 e M3), todas com 10 mm de espessura. Uma das espécimes (amostra M1) foi avaliada ao longo de 44 dias, juntamente com um relógio comparador para análise da variação da espessura, de forma idêntica ao realizado com a amostra PEBD2-M3. Os resultados destas duas amostras serão discutidos posteriormente. [A Tabela 12](#) apresenta os resultados do teste com martelo de impacto nas amostras de PET.

Tabela 12: Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade PET - 10 mm

PET - 10 mm							
M2	s' (MN/m ³)	33,8	33,6	33,0	32,0	32,0	32,0
	Q	2,20	2,30	2,75	3,33	3,02	2,86
	idade da amostra (dias):	1	3	4	8	12	31
M3	s' (MN/m ³)	34,2	33,9	30,1	-	-	-
	Q	1,44	1,45	1,75	-	-	-
	idade da amostra (dias):	1	3	4	-	-	-

Fonte: O Autor.

O ensaio de rigidez dinâmica considera a contribuição do ar existente nos poros do material, que apesar de não ser aferido no teste com o martelo de impacto, terá sua influência em resultados de campo, uma vez que ao ser instalado abaixo do contrapiso, não haverá fluxo de ar. Desta forma, os resultados obtidos para o fator de qualidade obtida no ensaio também pode não representar o comportamento real do material em uso. Nos dias 8 e 12 de idade, os resultados caracterizam o desempenho com inclinação de 31 dB/década, e nos demais dias, a inclinação da curva estimada permanece com 30 dB/década.

A média das amostras ao terceiro dia é $33,75 \text{ MN/m}^3$. Observou-se uma pequena redução dos resultados de rigidez dinâmica ao longo do período de ensaio

realizado (menos de 1,5% de decaimento do primeiro ao dia 31 para a amostra M2). É possível verificar que os resultados dos dias 8, 12 e 31 da amostra não altera quanto à rigidez dinâmica, porém apresenta variação do fator de qualidade, alterando a inclinação da curva de redução de ruído estimada a depender da escolha do dia de ensaio.

5.1.4 Material de Granulado de Pneu - GP

Foram avaliadas três espessuras de mantas de Granulado de Pneu (GP). Durante o ensaio de fluência à compressão, como será discutido na sessão 5.2, a amostra de GP com 5 mm apresentou variação de apenas 0,01 mm da sua espessura inicial (um decréscimo de 0,2 %) ao longo de 168 dias no teste, aferido com relógio comparador, bem inferior ao observado para os materiais PEBD1 (3,14 %), PEBD2 (4,63 %) e PET (2,10 %). Considerando a teoria de elasticidade dos materiais [8], uma vez que as amostras diferem apenas em espessura, para o mesmo módulo de elasticidade característico do material, a amostra mais espessa entre as analisadas, a com 8 mm (GP-M3), é mais sensível à deformação elástica para uma mesma tensão de compressão, e por esta razão foi mantida sob avaliação por um período mais prolongado (até 27 dias de idade), objetivando analisar se há variação da rigidez dinâmica ao longo do tempo por influência da deformação da amostra, submetida ao carregamento constante e aos testes com martelo de impacto. Já as amostras de 3 mm (GP-M1) e de 5 mm (GP-M2) foram aferidas com 4 e 8 dias de idade. A [Tabela 13](#) apresenta os valores parâmetros obtidos nos ensaios para as três espécimes.

Tabela 13: Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade - GP (M1, M2 e M3).

GP - 3, 5 e 8 mm				
M1 (3 mm)	s' (MN/m ³)	56,2	55,4	-
	Q	1,94	2,21	-
	idade da amostra (dias):	4	8	-
M2 (5 mm)	s' (MN/m ³)	43,0	49,5	-
	Q	2,15	2,32	-
	idade da amostra (dias):	4	8	-
M3 (8 mm)	s' (MN/m ³)	36,6	39,2	33,8
	Q	2,42	2,49	2,28
	idade da amostra (dias):	4	8	27

fonte: O Autor.

Da mesma forma que as amostra de PEBD1 e PEBD2, os valores da rigidez dinâmica obtidos para as mantas ensaiadas foram maiores quanto menos espessa a espécime, evidenciando o melhor desempenho em termos de redução do ruído de impacto para mantas com maior espessura, de forma análoga ao encontrado por pesquisas semelhantes ([27], [32], [17], [35]). As médias dos valores de rigidez dinâmica de todos os ensaios realizados para cada amostra de 3, 5 e 8 mm foram respectiva-

mente $55,84 \text{ MN/m}^3$; $46,24 \text{ MN/m}^3$ e $36,54 \text{ MN/m}^3$.

Os resultados médios dos valores de fator de qualidade também apresentaram um tendência a aumentarem com a espessura das amostras. As médias dos valores de Q apresentados na [Tabela 13](#) para as espécimes M1, M2 e M3 ao longo do período de análise foram respectivamente 2,08; 2,23 e 2,40. A amostra M1, no entanto, apresentou ao quarto dia de idade um resultado de fator de qualidade que enquadra a inclinação da curva estimada de redução do ruído em 29 dB/década. Esta constatação evidencia que a influência desta variável (fator de qualidade) no desempenho de redução do material depende tanto da espessura da amostra quanto da idade da mesma.

Na [Tabela 14](#), são apresentadas as médias dos resultados de todas as medições realizadas ao longo do tempo para cada amostra de GP, sendo destacado, à direita da tabela, o número de amostras que apresentaram a inclinação da curva de redução estimada pelo fator de qualidade aferido. Também são apresentados os resultados estimados do nível de redução do ruído de impacto ponderado (ΔL_w), obtido para os parâmetros médios por meio da [Equação 21](#), e aplicando a ponderação definida pela norma ISO 717-2 [16], bem como para cada inclinação destacada. Mais detalhes sobre o procedimento de ponderação serão abordados na sessão 5.6.

Tabela 14: Valores de ΔL_w obtidos a partir das médias de s' e de Q e para cada inclinação da curva de redução - GP.

GP							
Amostra	s' média [MN/m ³]	Q médio	ΔL_w (s' e Q médios)	29 dB/década	30 dB/década	31 dB/década	
M1 (3 mm)	55,8	2,08	20 dB	1	1	0	número de amostras
				20 dB	20 dB	-	ΔL_w
M2 (5 mm)	46,2	2,23	22 dB	0	2	0	número de amostras
				-	22 dB	-	ΔL_w
M3 (8 mm)	36,5	2,40	23 dB	0	3	0	número de amostras
				-	23 dB	-	ΔL_w

fonte: O Autor.

Foi observado que, mesmo com a verificação simultânea da diminuição da rigidez dinâmica e do aumento do fator de qualidade entre os resultados do quarto dia ($s' = 56,2 \text{ MN/m}^3$ e $Q = 1,94$) para o oitavo dia ($s' = 55,4 \text{ MN/m}^3$ e $Q = 2,21$) da amostra GP-M1, conforme apresentado na [Tabela 13](#), o nível de redução ponderado estimado manteve-se com o valor de $\Delta L_w = 20 \text{ dB}$. De forma semelhante, na [Tabela](#)

15 são apresentados os resultados dos materiais PEBD1, PEBD2 e PET, previamente analisados, onde também é destacada a média das amostras de mesma espessura.

Tabela 15: Valores de ΔL_w obtidos a partir das médias de s' e de Q e para cada inclinação da curva de redução - PEBD1, PEBD2 e PET

PEBD1										
Amostra	s' média [MN/m ³]		Q médio		ΔL_w (s' e Q médios)	29 dB/década	30 dB/década	31 dB/década		
M1 (10 mm)	34,2	35,0	2,86	2,53	23 dB	0	4	3	número de amostras	
							-	23 dB	24 dB	ΔL_w
M2 (10 mm)	35,7	2,20		0		1	0	número de amostras		
				-		23 dB	-	ΔL_w		
M4 (5 mm)	62,7	60,4	2,48	2,70	20 dB	0	4	0	número de amostras	
							-	20 dB	-	ΔL_w
M5 (5 mm)	52,0		2,49				0	3	0	número de amostras
							-	21 dB	-	ΔL_w
M6 (5 mm)	66,5	3,15				0	0	1	número de amostras	
				-		-	19 dB	ΔL_w		
Mp1 (10 mm)	41,8	39,3	2,96	2,82		23 dB	0	2	1	número de amostras
								-	22 dB	22 dB
Mp2 (10 mm)	36,8	2,67		0	4		0	número de amostras		
				-	23 dB		-	ΔL_w		
PEBD2										
	s' média [MN/m ³]		Q médio		ΔL_w (s' e Q médios)	29 dB/década	30 dB/década	31 dB/década		
M1 (10 mm)	41,6	36,2	2,43	2,26	23 dB	0	8	0	número de amostras	
							-	22 dB	-	ΔL_w
M2 (10 mm)	28,6		2,03				1	2	0	número de amostras
							24 dB	25 dB	-	ΔL_w
M3 (10 mm)	38,6	2,31				1	14	0	número de amostras	
				23 dB		23 dB	-	ΔL_w		
M4 (5 mm)	56,0	52,1	2,51	2,26		21 dB	0	8	0	número de amostras
								-	20 dB	-
M5 (5 mm)	48,2		2,01				2	2	0	número de amostras
							21 dB	21 dB	-	ΔL_w
Mp1 (10 mm)	34,4	39,2	2,42	2,46	23 dB		0	5	0	número de amostras
								-	23 dB	-
Mp2 (10 mm)	43,9	2,49		0			3	0	número de amostras	
				-			22 dB	-	ΔL_w	
PET										
	s' média [MN/m ³]		Q médio		ΔL_w (s' e Q médios)	29 dB/década	30 dB/década	31 dB/década		
M1 (10 mm)	30,9	31,84	1,66	2,20	24 dB	15	0	0	número de amostras	
							24 dB	-	-	ΔL_w
M2 (10 mm)	32,7	2,74		0		4	2	número de amostras		
				-		24 dB	24 dB	ΔL_w		

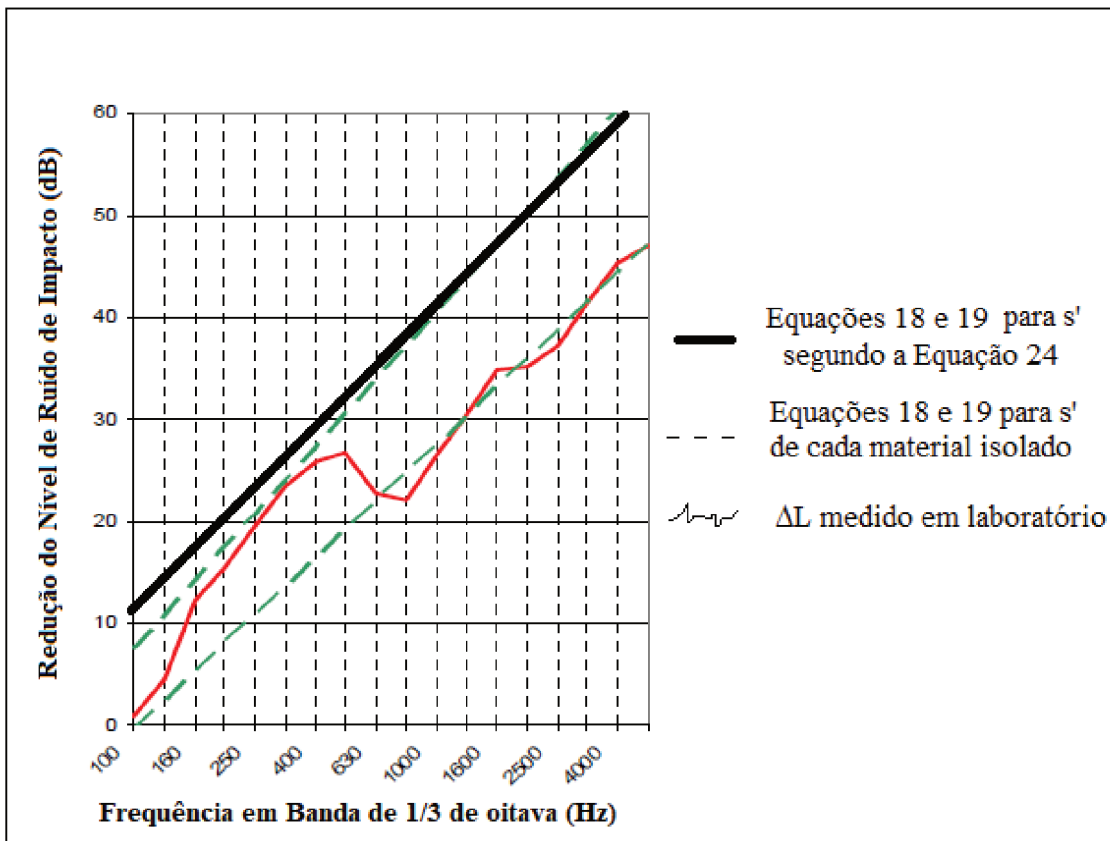
fonte: O Autor.

É possível verificar na Tabela 15 que para duas amostras (PEBD1-M1 e PEBD2-M2), ou seja, pouco mais que 10 % em relação às 19 avaliadas, houve a variação de 1 dB no valor estimado de ΔL_w devido apenas ao valor da inclinação da curva de redução.

5.1.5 Compostos

Nos resultados alcançados por Schiavi (2010), as curvas de redução do ruído de impacto obtidas em testes de laboratório (ISO 10140-8) para amostras com multicamadas de materiais distintos não apresentaram o mesmo comportamento da curva estimada a partir da rigidez dinâmica total, calculada por meio da [Equação 24](#) mediante os valores de rigidez dinâmica de cada amostra. A [Figura 31](#) ilustra um exemplo de resultados para uma amostra composta por dois materiais, na qual em pontilhado são apresentadas as curvas de redução estimadas por meio da rigidez dinâmica de cada um dos materiais isolados; a linha reta contínua simboliza a curva estimada considerando a rigidez dinâmica total dos dois materiais em série ([Equação 24](#)), e a curva irregular representa os valores obtidos no ensaio em laboratório. Segundo os autores [37], tal comportamento ocorre devido ao efeito do campo das ondas estacionárias no material resiliente [38].

Figura 31: Curvas de redução do nível de ruído mensurada e estimadas para amostra composta por dois materiais.



Fonte: Schiavi, 2010 [37].

A fim de verificar se os ensaios de perda de transmissão conduzidos na ban-

cada reduzida para amostras compostas (sessão 5.6.6) também apresentam comportamento semelhante ao verificado em [37], bem como de avaliar a validade da [Equação 24](#), foram conduzidos testes de rigidez dinâmicas com espécimes compostas de duas mantas de fabricantes diferentes. No total, 6 amostras compostas foram avaliadas: C1 (GP/3 mm + PEBD1/5 mm); C2 (GP/8 mm + PEBD1/5 mm); C3 (GP/5 mm + PEBD1/5 mm); C4 (PEBD1/5 mm + GP/3 mm); C5 (PEBD1/5 mm + PEBD2/5 mm); C6 (PET/10 mm + PEBD1/5 mm); sendo o primeiro material informado significa que o mesmo está abaixo do segundo. Na [Tabela 16](#), são informados os resultados da rigidez dinâmica mensurados e os calculado a partir das médias dos parâmetros aferidos ao longo do tempo para as mantas simples, já apresentados nas [Tabelas 14 e 15](#), utilizando a [Equação 24](#). A informação relacionada à espessura total das amostras compostas, na [Tabela 16](#), não leva em consideração a deformação das espécimes quando submetidas ao peso da placa de aço durante os testes, mas somente a soma simples das espessuras nominais das amostras.

Tabela 16: Resultados da rigidez dinâmica mensurada dos compostos e calculada a partir das espécimes individuais

COMPOSTOS MEDIDOS				PARÂMETROS MÉDIOS DAS AMOSTRAS SIMPLES E RIGIDEZ DINÂMICA CALCULADA			
GP (3 mm) + PEBD1 (5 mm) = 8 mm	C1	s' (MN/m ³)	-	30,9	GP (3 mm):	55,8 MN/m ³	2,08
		Q	-	2,68	PEBD1 (5 mm):	60,4 MN/m ³	2,70
		idade da amostra (dias):	-	2	s' (calculado):	29,0 MN/m ³	
GP (8 mm) + PEBD1 (5 mm) = 13 mm	C2	s' (MN/m ³)	-	23,5	GP (8 mm):	36,5 MN/m ³	2,40
		Q	-	2,85	PEBD1 (5 mm):	60,4 MN/m ³	2,70
		idade da amostra (dias):	-	2	s' (calculado):	22,8 MN/m ³	
GP (5 mm) + PEBD1 (5 mm) = 10 mm	C3	s' (MN/m ³)	25,7	-	GP (5 mm):	46,2 MN/m ³	2,23
		Q	2,80	-	PEBD1 (5 mm):	60,4 MN/m ³	2,70
		idade da amostra (dias):	1	-	s' (calculado):	26,2 MN/m ³	
PEBD1 (5 mm) + GP (3 mm) = 8 mm	C4	s' (MN/m ³)	-	24,3	PEBD1 (5 mm):	60,4 MN/m ³	2,70
		Q	-	2,84	GP (3 mm):	55,8 MN/m ³	2,08
		idade da amostra (dias):	-	2	s' (calculado):	29,0 MN/m ³	
PEBD1 (5 mm) + PEBD2 (5 mm) = 10 mm	C5	s' (MN/m ³)	41,0	38,7	PEBD1 (5 mm):	60,4 MN/m ³	2,70
		Q	2,19	2,40	PEBD2 (5 mm):	52,1 MN/m ³	2,26
		idade da amostra (dias):	1	2	s' (calculado):	28,0 MN/m ³	
PET (10 mm) + PEBD1 (5 mm) = 15 mm	C6	s' (MN/m ³)	-	30,9	PET (10 mm):	31,8 MN/m ³	2,20
		Q	-	1,90	PEBD1 (5 mm):	60,4 MN/m ³	2,70
		idade da amostra (dias):	-	2	s' (calculado):	20,8 MN/m ³	

fonte: O Autor.

5.2 Fluência à compressão

Os resultados dos ensaios de fluência à compressão foram realizados em quatro materiais: PEBD1 com 10 mm; PEBD2 com 10 mm; PET com 10 mm; e GP com 5 mm. Os testes foram conduzidos simultaneamente para as 4 amostras, mantendo as mesmas condições de contorno (temperatura e umidade). Apesar da norma BS EN 1606:2013 estabelecer a condução de 3 espécimes idênticas para aferição média, buscou-se garantir as mesmas condições de ensaio para as diferentes amostras, a fim de ensaiar as quatro mantas resilientes com os recursos e tempo disponíveis, possibilitando a comparação entre os resultados obtidos.

Uma das limitações apresentadas na condução destes procedimentos diz respeito às condições de temperatura e umidade. A norma BS EN 1606:2013 estabelece que, durante todo o ensaio, as amostras devem ser mantidas sob temperatura entre 21 a 25 °C e umidade entre 45 a 55 %. No entanto, na ausência de câmara específica para controle da temperatura e, principalmente, da umidade, ao longo do tempo de condução do experimento a temperatura ambiente variou entre 19 e 21 °C, ficando levemente abaixo da especificação, e a umidade variou entre 65 e 83 %, distanciando da sugestão da norma [24]. Tais condições interferiram nos resultados, como será discutido. No entanto, para fins de pesquisa do fenômeno e de comparação entre as amostras ensaiadas sob as mesmas características externas, os resultados obtidos foram satisfatórios e próximo às condições reais dos materiais em uso. Os valores de temperatura e umidade são ilustrados na [Tabela 37](#), presente no Apêndice.

Cada um dos três tipos de materiais avaliados nas 4 amostras testadas apresentou uma tendência peculiar. As amostras PEBD1 e PEBD2 (ambas de 10 mm), por exemplo, tiveram uma pequena deformação inicial com a carga de compressão aplicada, quando comparado com o comportamento da amostra PET (10 mm). Esta, no entanto, sofreu uma menor deformação por fluência ao longo do tempo que as duas primeiras. Já a amostra GP (5 mm) não apresentou variação mensurável com a aplicação da carga inicial, e após os 180 dias de medição da espessura, variou apenas 0,01 mm (valor idêntico à própria precisão do instrumento de medição), ou seja, somente 0,20 % de deformação relativa ao final do teste. A fluência à compressão (X_{ct}) para esta amostra permaneceu nula até 39 dias de ensaio, o que impossibilitou a aplicação do modelo de extrapolação da norma EN 1606 (Equações 32 a 43), uma vez que é adotado o logaritmo de (X_{ct}) para tratamento dos dados. Por esta razão, foi conside-

rado que a amostra de 5 mm de GP não apresentou deformação instantânea ou por fluência para a carga de 2 kPa aplicada, durante o período de avaliação realizado. No entanto, isto não significa que o material GP com 5 mm não terá alteração das suas propriedades de redução do ruído de impacto ao longo do tempo, um vez que, segundo Caniato (2015), mesmo se a redução da espessura (durante o teste de fluência à compressão) não é tão evidente, o material pode sofrer algum reajustamento interno e, conseqüentemente, um aumento da sua rigidez dinâmica [27]. Segundo Shin (2017), para alguns materiais, um outro fator que pode ocasionar um aumento da rigidez dinâmica, mesmo sem alterações de espessura da manta, consiste na variação das condições de temperatura [40].

5.2.1 Material PEBD1

Na [Tabela 17](#), são apresentados os resultados das medições ao longo do tempo da espessura da amostra PEBD1, informando as deformações relativas e fluência à compressão a partir do 6º dia de ensaio, em conformidade as definições da norma [24].

Tabela 17: Resultados mensurados de Fluência à compressão - Amostra PEBD1

Amostra PEBD1					
Tempo (horas)	Log t	Deformação Xt (mm)	Deformação Relativa et (%)	Fluência à Compressão Xct (mm)	Log Xct
144	2,1584	0,756	7,557	0,16	-0,7959
192,5	2,2844	0,769	7,687	0,17	-0,7620
265	2,4232	0,771	7,707	0,18	-0,7570
312	2,4942	0,796	7,957	0,20	-0,6990
433	2,6365	0,816	8,157	0,22	-0,6576
530	2,7243	0,773	7,727	0,18	-0,7520
648	2,8116	0,815	8,147	0,22	-0,6596
798	2,9020	0,846	8,457	0,25	-0,6021
931	2,9689	0,836	8,357	0,24	-0,6198
1107	3,0441	0,876	8,757	0,28	-0,5528
1296	3,1126	0,801	8,007	0,21	-0,6882
1445	3,1599	0,896	8,957	0,30	-0,5229
1630,5	3,2123	0,886	8,857	0,29	-0,5376
2302	3,3621	0,913	9,127	0,32	-0,4989
2778,5	3,4438	0,901	9,007	0,31	-0,5157
2952	3,4701	0,876	8,757	0,28	-0,5528
3171	3,5012	0,866	8,657	0,27	-0,5686
3189	3,5037	0,846	8,457	0,25	-0,6021
3403	3,5319	0,906	9,057	0,31	-0,5086
3666	3,5642	0,866	8,657	0,27	-0,5686
4033	3,6056	0,906	9,057	0,31	-0,5086
4345	3,6380	0,896	8,957	0,30	-0,5229
4460,5	3,6494	0,910	9,097	0,31	-0,5031

Fonte: O Autor

A partir dos dados medidos ao longo do tempo, a curva logarítmica da deformação por fluência à compressão ($\log X_{ct} \times \log t$) permite a extração dos dados da regressão linear, seguindo o modelo desenvolvido por Findley (1944) [39], estabelecido pela norma EN 1606. Para os resultados de PEBD1 apresentados na [Tabela 17](#) até 123 dias de ensaio (2952 horas), aplicando as [Equações 32 a 43](#), são obtidos os parâmetros estatísticos apresentados na [Tabela 18](#).

Tabela 18: Parâmetros estatísticos obtidos a partir da fluência à compressão de PEBD1 - 123 dias de ensaio

PEBD1 (dados até 123 dias de ensaio)										
Média aritmética dos valores $\log t$ (t em horas)	Média aritmética dos valores $\log X_{ct}$ (Xct em mm)	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de $\log t$	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de $\log X_{ct}$	Soma dos desvios	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de determinação	Coefficiente de correlação	Inclinação da curva	Ponto de interceptação da curva na ordenada
X_m	Y_m	Q_x	Q_y	Q_{xy}	S_r^2	S_r	r^2	r	b	a
2,88803	-0,63586	2,49692	0,14822	0,54587	0,00206	0,04542	0,80517	0,89731	0,21862	-1,26724

Fonte: O Autor

Os resultados estimados de fluência da PEBD1, considerando os dados estatísticos obtidos para os 123 dias de ensaio, permitem a avaliação em até 10 anos e 40 dias (30 vezes o período de medição). Conforme exposto na [Tabela 18](#), o coeficiente de determinação (r^2) atingiu 80,5 %, inferior ao mínimo exigido pela norma EN 1606 (90 %) para extrapolação dos resultados do ensaio. Esta amostra apresentou o menor coeficiente entre as três ensaiadas que sofreram a fluência (uma vez que a amostra GP não apresentou deformação expressiva). A [Tabela 19](#) resume os resultados da fluência à compressão estimada para 10 anos, obtida por meio da [Equação 44](#). A deformação por fluência ao longo do período considerado apresentou-se maior do que a deformação devido à carga inicial.

Tabela 19: Resultados da fluência à compressão de PEBD1 - 123 dias de ensaio

PEBD1										
Parâmetros estatísticos da análise de regressão linear		Fatores da Fórmula de Findley (Equação 42)			Deformação por fluência à compressão extrapolada para 10 anos (87600 horas)		Deformação total extrapolada para 10 anos (87600 horas)		Espessura da amostra sob 2 kPa extrapolada para 10 anos (87600 horas)	
a	r^2	m	b	X_o (mm)	X_{c87600} (mm)	ϵ_{c87600} (%)	X_{87600} (mm)	ϵ_{87600} (%)		
-1,26724	0,80517	0,05405	0,21862	0,60	0,65	6,5	1,25	12,5	8,75 mm	

Fonte: O Autor.

Para estimar a deformação em 13 anos, período exigido da durabilidade de pisos pela norma NBR 15575 [6], os dados estatísticos extraídos considerando 168 dias de ensaio (4033 horas), resultam em um coeficiente de determinação $r^2 = 76,9\%$ (ver [Tabela 38](#) no Apêndice), inferior ao obtido para os dados com 123 dias, não possibilitando, de acordo com o modelo, a extrapolação para o período de interesse. Uma razão para os valores de coeficiente abaixo da exigência normativa consiste na variação das condições de temperatura e, principalmente, da umidade, como pode ser visto na [Tabela 37](#) (Apêndice). O resultado estimado para 13 anos, mesmo com a baixa correlação, foi de $X_{ct} = 0,57$ mm, ou seja, inferior ao valor estimado para 10 anos considerando os 123 dias de medições. Os altos valores de umidade relativa do ar observados nos últimos dois dias de verificação da fluência, 82 % em 153 dias (3666 horas) e 80 % em 168 dias (4033), contribuíram para a expansão observada nas leituras de espessura da amostra, prejudicando assim os resultados da extrapolação.

5.2.2 Material PEBD2

Para a amostra PEBD2, a partir dos resultados aferidos apresentados na [Tabela 39](#) (Apêndice), foram obtidos os parâmetros estatísticos considerando 123 e 168 dias de medição, resumidos na [Tabela 20](#) a seguir.

Apesar de serem o mesmo material, a amostra PEBD2 apresentou melhores

Tabela 20: Parâmetros estatísticos obtidos a partir da fluência à compressão de PEBD2 - 123 e 168 dias de ensaio

PEBD2 (dados até 123 dias de ensaio)										
Média aritmética dos valores log t (t em horas)	Média aritmética dos valores log Xct (Xct em mm)	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log t	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log Xct	Soma dos desvios	Variância	Desvio Padrão	Coeficiente de determinação	Coeficiente de correlação	Inclinação da curva	Ponto de interseção da curva na ordenada
Xm	Ym	Qx	Qy	Qxy	Sr ²	Sr	r ²	r	b	a
2,88803	-0,42249	2,49692	0,04307	0,30900	0,00035	0,01858	0,88785	0,94226	0,12375	-0,77989
PEBD2 (dados até 168 dias de ensaio)										
Média aritmética dos valores log t (t em horas)	Média aritmética dos valores log Xct (Xct em mm)	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log t	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log Xct	Soma dos desvios	Variância	Desvio Padrão	Coeficiente de determinação	Coeficiente de correlação	Inclinação da curva	Ponto de interseção da curva na ordenada
Xm	Ym	Qx	Qy	Qxy	Sr ²	Sr	r ²	r	b	a
3,04357	-0,40724	4,13050	0,06087	0,47214	0,00036	0,01906	0,88658	0,94158	0,11431	-0,75514

Fonte: O Autor.

resultados de correlação do que os obtidos para PEBD1, atingindo valores de coeficiente de determinação de aproximadamente $r^2 = 89\%$ tanto para o tratamento com 123 dias quanto com 168. A Tabela 21 apresenta os resultados de PEBD2 estimados por meio da Equação 44, calculados para 10 anos (123 dias de ensaio) e para 13 anos (168 dias de ensaio). Os valores de fluência à compressão estimados para 13 anos também foram inferiores aos obtidos pela extrapolação para 10 anos, devidos às mesmas razões comentadas para PEBD1 (altas condições de umidade relativa nos últimos dias de medição, e a consequente diminuição dos valores da fluência devido à expansão da amostra).

Tabela 21: Resultados da fluência à compressão de PEBD2 - 123 e 168 dias de ensaio

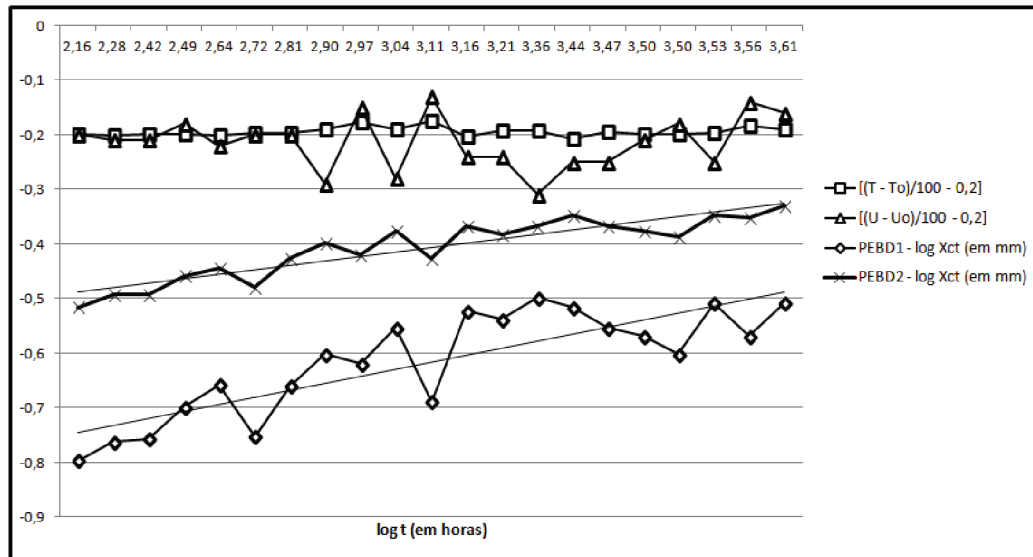
PEBD2 (10 anos)									
Parâmetros estatísticos da análise de regressão linear		Fatores da Fórmula de Findley (Equação 42)			Deformação por fluência à compressão extrapolada para 10 anos (87600 horas)		Deformação total extrapolada para 10 anos (87600 horas)		Espeçura da amostra sob 2 kPa extrapolada para 10 anos (87600 horas)
a	r ²	m	b	X ₀ (mm)	X _{c87600} (mm)	ε _{c87600} (%)	X ₈₇₆₀₀ (mm)	ε ₈₇₆₀₀ (%)	
-0,77989	0,88785	0,16600	0,12375	0,74	0,68	6,8	1,42	14,20	8,58 mm
PEBD2 (13 anos)									
Parâmetros estatísticos da análise de regressão linear		Fatores da Fórmula de Findley (Equação 42)			Deformação por fluência à compressão extrapolada para 13 anos (113880 horas)		Deformação total extrapolada para 13 anos (113880 horas)		Espeçura da amostra sob 2 kPa extrapolada para 13 anos (113880 horas)
a	r ²	m	b	X ₀ (mm)	X _{c113880} (mm)	ε _{c113880} (%)	X ₁₁₃₈₈₀ (mm)	ε ₁₁₃₈₈₀ (%)	
-0,75514	0,88658	0,17574	0,11431	0,74	0,67	6,7	1,41	14,06	8,59 mm

Fonte: O Autor.

O gráfico apresentado na Figura 32 ilustra a variação da fluência à compressão ao longo do tempo de ensaio para os materiais PEBD1 e PEBD2, com as respectivas linhas de tendência destes resultados, simultaneamente às variações de temperatura (T) e umidade (U), que tiveram seus valores ponderados, variando em relação ao valor no início do tratamento dos dados (6º dia), a fim de possibilitar visualizar a comparação entre os parâmetros em um mesmo gráfico. Por meio desta análise, pôde-se verificar que, nas condições de maiores valores da umidade relativa, menores foram os resultados de fluência à compressão, devido à expansão das amostras. De forma análoga, ambos os materiais apresentaram maiores valores de deformação quando aferidos durante as menores condições de umidade. A temperatura, por sua vez, variou pouco em relação ao valor medido inicialmente. É possível notar que, ape-

sar de manterem a mesma tendência, o material PEBD1 mostrou-se mais sensível à influência da variação da umidade relativa em relação à PEBD2.

Figura 32: Fluência à compressão de PEBD1 e PEBD2 (em log), variação da temperatura e umidade ao longo do tempo (em log).



Fonte: O Autor.

5.2.3 Material PET

Na [Tabela 40](#), presente no Apêndice, são apresentados os valores de fluência à compressão aferidos para a amostra PET. Aplicando-os nas [Equações 32 a 43](#), para 123 e 168 dias de medição, foram obtidos os resultados de correlação mais favoráveis dentre as espécimes avaliadas, atingindo coeficientes de determinação próximos a $r^2 = 97\%$, conforme apresentado na [Tabela 41](#) (Apêndice), ou seja, muito superior ao encontrado para as amostras de PEBD1 e PEBD2, e alcançando valores dentro da exigência da norma EN 1606. Desta forma, conclui-se que o material de fibra de lã de Pet é menos suscetível à influência das condições externas de temperatura e umidade do que o material PEBD.

Por meio da fórmula de Findley ([Equação 44](#)), são encontrados os resultados da fluência à compressão do material PET estimados para 10 e 13 anos, conforme apresentado na [Tabela 22](#). Diferentemente das amostras PEBD1 e PEBD2, a extração da fluência à compressão de PET para 13 anos resultou em uma deformação maior do que a estimada para 10 anos, reforçando a conclusão de que este material não sofreu influência da variação da umidade relativa, a ponto de prejudicar a análise para o período de interesse.

Tabela 22: Resultados da fluência à compressão de PET - 123 e 168 dias de ensaio

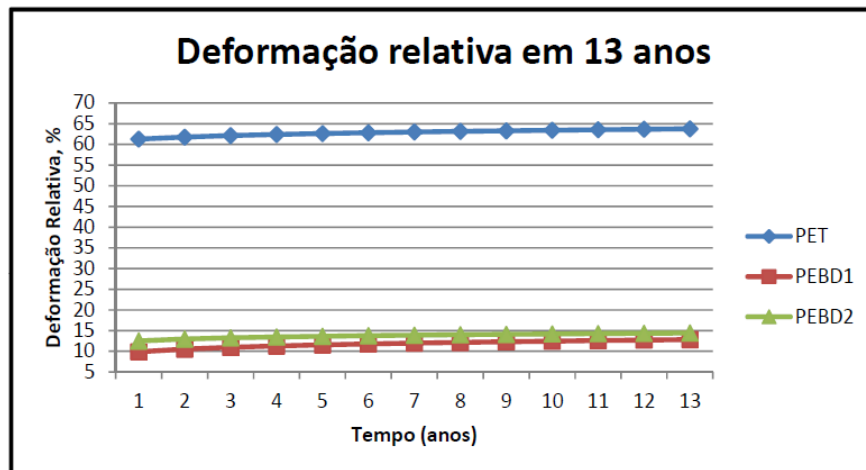
PET (10 anos)									
Parâmetros estatísticos da análise de regressão linear		Fatores da Fórmula de Findley (Equação 42)			Deformação por fluência à compressão extrapolada para 10 anos (87600 horas)		Deformação total extrapolada para 10 anos (87600 horas)		Espessura da amostra sob 2 kPa extrapolada para 10 anos (87600 horas)
a	r^2	m	b	Xo (mm)	Xc87600 (mm)	Ec87600 (%)	X87600 (mm)	E87600 (%)	
-1,77134	0,96701	0,01693	0,28487	5,90	0,43	4,3	6,33	63,33	3,67 mm
PET (13 anos)									
Parâmetros estatísticos da análise de regressão linear		Fatores da Fórmula de Findley (Equação 42)			Deformação por fluência à compressão extrapolada para 13 anos (113880 horas)		Deformação total extrapolada para 13 anos (113880 horas)		Espessura da amostra sob 2 kPa extrapolada para 13 anos (113880 horas)
a	r^2	m	b	Xo (mm)	Xc113880 (mm)	Ec113880 (%)	X113880 (mm)	E113880 (%)	
-1,78285	0,97669	0,01649	0,28915	5,90	0,48	4,8	6,38	63,78	3,62 mm

Fonte: O Autor.

Klippel et al (2017) avaliaram amostras de lã de PET. No gráfico da [Figura 33](#), são apresentadas as deformações relativas extrapoladas para 13 anos das três amostras analisadas. Para as amostras de polietileno expandido, foram utilizados os dados estatísticos em 123 dias de medição, uma vez que os mesmos apresentaram me-

lhores coeficientes de determinação quando comparados aos obtidos para 168 dias, conforme discutido anteriormente. Já para a amostra PET, foram utilizados os dados de 168 dias, o que gerou a estimativa mais confiável da avaliação realizada.

Figura 33: Estimativa da deformação relativa em 13 anos das amostras PEBD1, PEBD2 e PET .



Fonte: O Autor.

5.3 Estimativa da rigidez futura a partir dos resultados de fluência

Conforme abordado na sessão 3.2 deste trabalho, de acordo com Schiavi et. al (2007), que desconsidera a variação da densidade do material ao longo do tempo, mas apenas da sua espessura [9], é possível estimar, por meio das Equações 26 e 28, a rigidez dinâmica de uma amostra em longo prazo a partir dos resultados obtidos no teste de fluência à compressão.

Para a amostra avaliada de PEBD2, por exemplo, a estimativa da deformação após 10 anos a partir fluência à compressão mensurada é de $X_{t=10anos} = 1,42$ mm, ou seja, atingindo a espessura (d_{10anos}) de 8,58 mm (Tabela 21). A espessura desta amostra após a compressão de 2 kPa (d_0) é 9,26 mm. Considerando a rigidez dinâmica da amostra PEBD2-M1 na última aferição realizada, obtida ao 13º dia de idade, cujo valor é 43,4 MN/m^3 , e aplicando as Equações 26 e 28 [9], a rigidez dinâmica estimada para 10 anos $s'_{t=10anos}$ é de 46,9 MN/m^3 , ou seja, um aumento de 3,5 unidades.

Utilizando as Equações 18 e 19, a partir dos resultados de rigidez dinâmica e da massa do contrapiso flutuante, pode-se estimar o desempenho da amostra em termos de nível de redução do ruído de impacto ΔL , em bandas de terço de oitava, e em seguida, aplicando o procedimento descrito na norma ISO 717 [16], obtém-se um valor único, o nível ponderado de redução do ruído de impacto ΔL_w . Mais detalhes sobre o cálculo deste parâmetro (ΔL_w) serão abordados no capítulo 5 deste trabalho (Tabela 44).

Adotando uma massa de contrapiso de 100 kg/m^2 (norma 10140-8 [10]), e desconsiderando qualquer variação da inclinação da curva de redução (caracterizada por parâmetros de amortecimento, como o fator de qualidade Q), para a rigidez dinâmica ao 13º dia (43,4 MN/m^3), o ΔL_w obtido é de 23 dB, o mesmo para o valor estimado com 10 anos (46,9 MN/m^3). A norma para aferição da rigidez dinâmica [20], no entanto, não apresenta definições sobre o tempo entre a preparação da amostra e a execução dos ensaios, e, conforme as sugestões bibliográficas ([27], [17], [9], [18]), bem como os próprios resultados experimentais abordados na sessão 5.1 deste trabalho, a rigidez dinâmica apresenta valores distintos de acordo com a idade da amostra. O tempo ideal para a aferição deste parâmetro ainda diverge entre as pesquisas sobre o tema (1 dia [18], 2 dias ([19]), 3 a 4 dias [9], 12 dias [17])

Considerando a rigidez dinâmica ao terceiro dia, que para PEBD2-M1 é 39,5 MN/m^3 , é obtida uma de estimativa de ΔL_w de 24 dB. Desta forma, há um redução de

1 dB de desempenho entre a estimativa que considera um período maior de avaliação da rigidez dinâmica e os resultados de fluência à compressão. Este resultado condiz com as conclusões de Caniato et al (2016) [27] de que, para uma deformação por fluência menor que 12 % em 7 anos, a redução do desempenho é inferior a 3 unidades para tal período. Para o material em questão (PEBD2), conforme apresentado na [Tabela 21](#), a deformação por fluência em 10 anos é 6,8 %.

A [Tabela 23](#) apresenta os resultados de rigidez dinâmica estimados a partir da amostra PEBD2-M1, discutidos nos parágrafos anteriores, bem como para as amostras PEBD1-M1 e PET-M2, juntamente com o nível ponderado de redução do ruído (ΔL_w) e o nível de redução de ruído na frequência de 500 Hz (o que permite a análise com uma casa decimal [9]). Os valores de espessura apresentados são referentes às amostras sob carga de 2 kPa.

Tabela 23: Resultados estimados após 10 anos

Amostra	Espessura inicial (mm)	Rigidez dinâmica medida (MN/m ³)	Nível de redução de ruído de impacto em 500 Hz (dB)	Nível ponderado de redução de ruído de impacto (dB)	Espessura estimada para 10 anos (mm)	Rigidez Dinâmica estimada para 10 anos (MN/m ³)	Nível de redução de ruído de impacto em 500 Hz estimado para 10 anos (dB)	Nível ponderado de redução de ruído de impacto estimado para 10 anos (dB)
PEBD1 - M1	9,40	36,8 (5º dia)	21,4	24	8,75	39,5	20,9	24
PEBD2 - M1	9,26	39,5 (3º dia)	20,9	24	8,58	46,9	19,8	23
		43,4 (13º dia)	20,3	23				
PET - M2	4,10	32 (12º dia)	22,3	25	3,63	36,2	21,5	24

Fonte: O Autor.

A estimativa da rigidez dinâmica do material PEBD1 após 10 anos, a partir fluência à compressão avaliada e da rigidez dinâmica da amostra PEBD1-M1 ao quinto dia de idade (último resultado aferido antes da compressão acidental sofrida pela amostra), apesar de apresentar-se quase 3 unidades superior, não apresenta variação em termos de nível de redução ponderado, pois ambos os valores resultam em ΔL_w igual a 24 dB.

No caso da amostra PET, cuja composição estrutural é de células abertas, a análise da variação rigidez dinâmica a partir da fluência de espessura do material deve considerar tanto alteração da rigidez dinâmica aparente, aferida durante os ensaios, quanto da rigidez dinâmica do ar existente nos poros da amostra, calculada pela

Equação 31. A rigidez dinâmica da amostra PET-M2 aferida a partir do oitavo dia de medição (ver **Tabela 12**) é $32,0 \text{ MN/m}^3$, sendo $27,1 \text{ MN/m}^3$ a parcela referente ao ar contido nos poros, e $4,9 \text{ MN/m}^3$ a rigidez dinâmica aparente, referente à frequência de ressonância $f_{res,o}$ de 25 Hz. Desta forma, considerando a espessura (d_{10anos}) de 3,63 mm, por meio da **Equação 31**, é obtida uma rigidez dinâmica referente ao ar contido nos poros da amostra de $30,6 \text{ MN/m}^3$. Já a frequência de ressonância estimada após 10 anos $f_{res,10anos}$, por meio da **Equação 26** é 26,6 Hz, o que resulta, utilizando a **Equação 28**, em uma rigidez dinâmica aparente de $5,6 \text{ MN/m}^3$. Somando as duas parcelas calculadas, é obtida a rigidez dinâmica estimada para 10 anos $s'_{t=10anos}$ de $36,2 \text{ MN/m}^3$, ou seja, um resultado 4,2 unidades superior ao obtido experimentalmente até 31 dias de idade da espécime. Em termos do nível ponderado de redução do ruído ΔL_w , o decréscimo do desempenho acústico da amostra é de apenas 1 dB, conforme apresentado na **Tabela 23**.

Utilizando o mesmo método, dentre 7 diferentes materiais avaliados, a maior diferença encontrada por Schiavi et al (2007) [9] entre o ΔL_w calculado para a rigidez dinâmica mensurada e para a estimada em 10 anos foi de 3 dB, para um material de fibra sintética. Materiais com composição parecida com a lã de PET (lã de rocha, lã de vidro) apresentaram resultados semelhantes (1 dB de diferença).

5.4 Testes bancada - Rigidez dinâmica x Fluência x Tempo

Conforme comentado nas sessões anteriores, as amostras PET-M1 e PEBD2-M3 foram avaliadas durante 44 dias em bancada especial para aferição simultânea da rigidez dinâmica e da fluência à compressão (ver Figura 17). A Tabela 24 apresenta os resultados aferidos durante o período de análise da amostra PEBD2-M3, onde também são informadas as condições de temperatura e umidade relativa observadas durante as medições.

Tabela 24: PEBD2-M3 - Resultados de rigidez dinâmica e fator de qualidade x fluência à compressão ao longo do tempo

PEBD2-M3					
idade da amostra (dias)	Rigidez dinâmica (MN/m ³)	Fator de Qualidade	Fluência à compressão (mm)	Umidade Relativa (%)	Temperatura (°C)
1	32,9	1,99	0,28	59	22,2
2	37,3	2,40	0,31	61	21,7
3	35,3	2,14	0,32	71	21,7
7	38,0	2,42	0,40	69	21,6
8	37,3	2,04	0,41	62	21,3
9	38,7	2,44	0,39	65	21,2
10	38,0	2,22	0,41	67	21,7
13	40,8	2,40	0,44	66	21,1
14	39,4	2,46	0,44	65	21,2
16	40,8	2,50	0,46	61	21,5
17	40,1	2,19	0,45	63	21,9
21	40,1	2,28	0,44	59	22,1
25	41,5	2,53	0,48	43	21,1
44	39,4	2,26	0,48	66	23,1

Fonte: O Autor

Devido à força aplicada durante a colocação dos acelerômetros em cima da placa de aço, bem como o próprio esforço fornecido pelo martelo de impacto durante a medição da frequência de ressonância das amostras, os resultados de fluência à compressão não podem ser considerados como submetidos à condição exclusiva de compressão constante. Ademais, a ausência do gesso entre as amostras e a placa de

aço, condição exigida pela norma de aferição rigidez dinâmica, pode causar diferenças nos resultados obtidos devido à não homogeneização do contado entre os elementos.

A partir dos valores exibidos na [Tabela 24](#), foram extraídos os parâmetros estatísticos por meio das [Equações 32 a 43](#), de forma análoga ao procedimento realizado para estimativa da fluência à compressão, no qual são utilizados para a regressão os valores em logaritmo de base 10, expressos na [Tabela 42](#) contida no Apêndice. Os parâmetros obtidos para $y = \log(X_{ct})$ e para $y = \log(s')$, considerando 44 dias de medição, são apresentados na [Tabela 25](#) a seguir.

Tabela 25: Parâmetros estatísticos obtidos a partir da fluência à compressão e da rigidez dinâmica - PEBD2-M3 - 44 dias de ensaio

PEBD2-M3 (dados da fluência à compressão)										
Média aritmética dos valores log t (t em horas)	Média aritmética dos valores log Xct (Xct em mm)	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log t	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log Xct	Soma dos desvios	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de determinação	Coefficiente de correlação	Inclinação da curva	Ponto de interceptação da curva na ordenada
Xm	Ym	Qx	Qy	Qxy	Sr ²	Sr	r ²	r	b	a
2,34727	-0,39441	2,58757	0,07175	0,42138	0,00026	0,01616	0,95634	0,97792	0,16285	-0,77666
PEBD2-M3 (dados da rigidez dinâmica)										
Média aritmética dos valores log t (t em horas)	Média aritmética dos valores log Xct (Xct em mm)	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log t	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log Xct	Soma dos desvios	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de determinação	Coefficiente de correlação	Inclinação da curva	Ponto de interceptação da curva na ordenada
Xm	Ym	Qx	Qy	Qxy	Sr ²	Sr	r ²	r	b	a
2,34727	1,58518	2,58757	0,00957	0,13725	0,00019	0,01381	0,76090	0,87230	0,05304	1,46068

Fonte: O Autor

Desta forma, é verificada uma correlação alta para os valores de fluência à compressão ($r^{2'} = 95,6\%$), dentro da margem de 90% ou mais estabelecida na norma EN 1606 [24], a qual, no entanto, exige no mínimo 90 dias de medição. Já a correlação referente aos dados de rigidez dinâmica apresenta-se menor ($r^{2'} = 76,09\%$). Considerando a possibilidade de extrapolar o período de ensaio em 30 vezes o tempo de medição realizado, são estimadas a fluência à compressão e a rigidez dinâmica para 1320 horas, ou seja, aproximadamente 3 anos e 7 meses. Os resultados são apresentados na [Tabela 26](#)

Observa-se que o valor da rigidez dinâmica estimada para 1320 horas ($50,05 \text{ MN}/\text{m}^3$) é 8,5 unidades superior ao maior valor de rigidez dinâmica aferido durante o período de ensaio, ao 25º dia de idade ($41,5 \text{ MN}/\text{m}^3$, conforme [Tabela 24](#)), o que significa um aumento de 20,6%. Em termos de nível ponderado da redução do ruído

Tabela 26: Resultados de rigidez dinâmica e fluência à compressão extrapolados para 3 anos e 7 meses

PEBD2-M1			
Deformação por fluência à compressão extrapolada para 3 anos e 7 meses (31680 horas)	Deformação total extrapolada para 3 anos e 7 meses (31680 horas)	Espessura da amostra sob 2 kPa extrapolada para 3 anos e 7 meses (31680 horas)	Rigidez dinâmica extrapolada para 3 anos e 7 meses (31680 horas)
0,90 mm	1,64 mm	8,36 mm	50,05 MN/m ³

Fonte: O Autor

de impacto (ΔL_w), a diferença é de 1 dB, reduzindo de 22 dB para 21 dB. Desta forma, atingiu-se a mesma variação de desempenho que a obtida pelo método de Schiavi (2007) [9] para o período de 10 anos, apresentado na sessão anterior para PEBD2, porém para um tempo bastante inferior (3 anos e 7 meses).

Já para a amostra PET-M1, os resultados do experimento são apresentados na [Tabela 27](#). Diferentemente da amostra PEBD2-M1, não foi verificada variação considerável da rigidez dinâmica ao longo do período de ensaio, impossibilitando assim qualquer estimativa de aumento nos valores do parâmetro ao longo do tempo por meio do método aplicado na amostra anterior, uma vez que, ao segundo dia de aferição, já foi obtido o maior resultado de rigidez dinâmica. Observa-se, portanto, que o comportamento da rigidez dinâmica ao longo do tempo varia de material para material (conforme observado por [27]), e não depende apenas da variação de sua espessura, uma vez que os valores da fluência à compressão para as duas amostras (PEBD2-M1 e PET-M1) são quase iguais ao 44º dia (último dia de análise).

Tabela 27: Resultados PET-M1 - Bancada Rigidez x Fluência x Tempo

PET-M1					
idade da amostra (dias):	s' (MN/m ²)	Q	Fluência à compressão (mm)	Umidade Relativa (%)	Temperatura (°C)
1	30,6	1,70	0,08	59	22,2
2	31,1	1,90	0,25	61	21,7
3	30,9	1,75	0,28	71	21,7
7	31,1	1,90	0,32	69	21,6
8	30,6	1,70	0,34	62	21,3
9	30,6	1,70	0,35	65	21,2
10	30,9	1,60	0,35	67	21,7
13	31,1	1,75	0,38	66	21,1
14	31,1	1,64	0,38	65	21,2
16	31,1	1,50	0,39	61	21,5
17	30,9	1,60	0,40	63	21,9
21	31,1	1,51	0,41	59	22,1
25	31,1	1,54	0,42	43	21,1
44	31,1	1,65	0,47	66	23,1

Fonte: O Autor

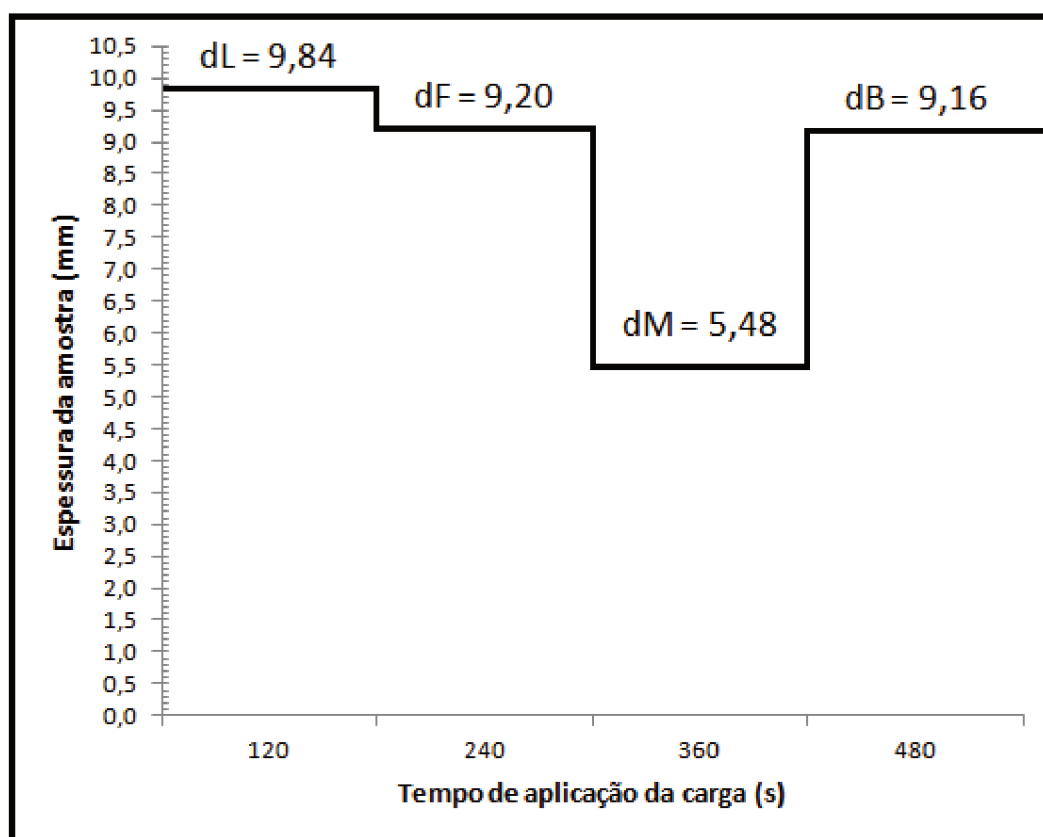
5.5 Compressibilidade

Os ensaios de compressibilidade foram conduzidos apenas nas amostras de 10 cm de PEBD1 e PEBD2, utilizando a carga gerada por máquina de compressão automática. Por motivos de integridade da máquina, uma vez que uma alta carga de compressão é aplicada durante o ensaio (50 kPa), as amostras de GP e PET não foram analisadas, por serem menos elásticas e conseqüentemente não oferecerem resistência no contato entre as peças de aço do instrumento adotado.

Outra limitação do uso de equipamento de geração da carga foi a incapacidade de garantir um retorno de uma carga para outra sem zerar a pressão aplicada, condição exigida pela norma EN12413 [23]. No entanto, o procedimento foi essencial para os objetivos da pesquisa devido à aplicação das cargas necessárias nas amostras com alta precisão, permitindo a comparação entre os resultados dos ensaios de rigidez dinâmica para tais amostras submetidas à pré-compressão e as espécimes intactas.

A [Figura 34](#) apresenta o gráfico dos resultados do teste de compressibilidade para uma das amostras de PEBD2 ensaiadas. A temperatura do ambiente durante o ensaio variou em torno de 21 (+- 1) °C, enquanto umidade do ambiente durante o ensaio variou em torno de 79 (+- 2) % HR. Após 120 segundos com a carga de 0,25 kPa, a espessura da amostra (d_L) foi 9,84 mm; após 120s com 2,0 kPa, a espessura (d_F) foi 9,20 mm; após 120 s com 48 kPa, a espessura verificada na amostra foi 5,48 mm, sendo esta denominada d_M . Após a espécime ser novamente submetida à compressão de 2,0 kPa, a espessura (d_B) foi 9,16 mm.

Figura 34: Resultados de compressibilidade - Amostra 1 - PEBD2

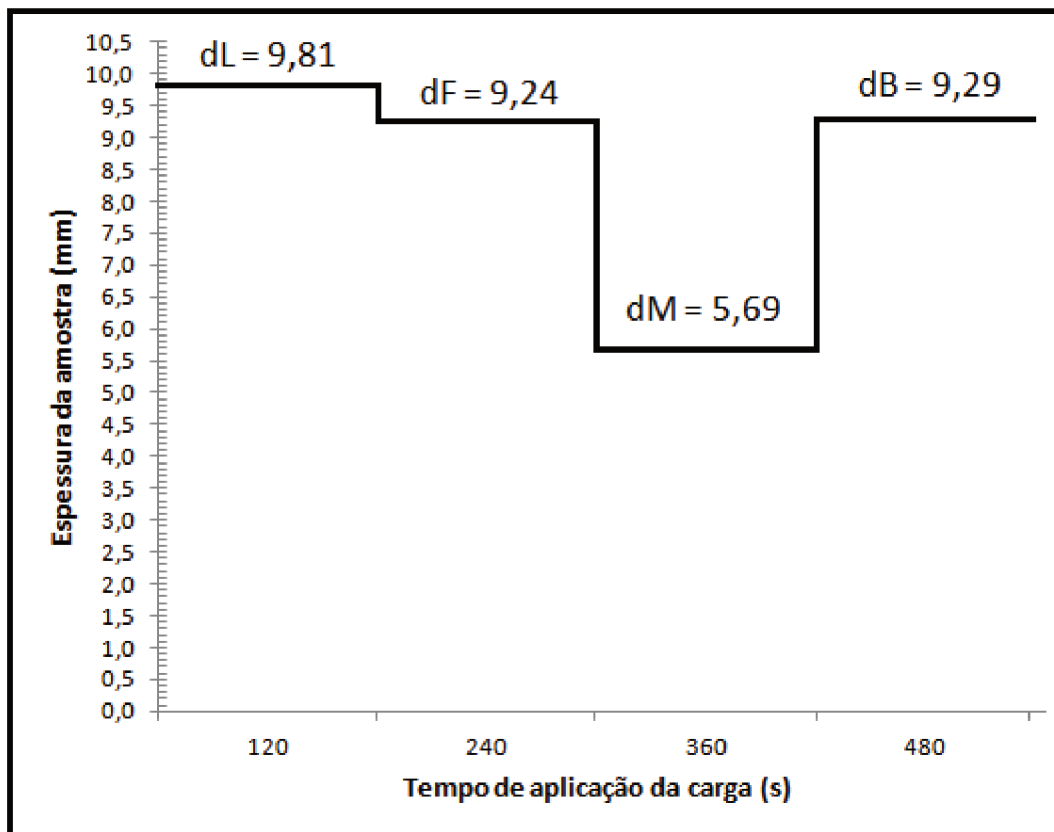


Fonte: O Autor

Apesar de ilustrado de forma contínua no gráfico da [Figura 34](#), após a compressão de 48 kPa, a espécime foi completamente descomprimida, e em seguida comprimida novamente com 2 kPa. Desta forma, devido à elasticidade do material, sua capacidade de restauração das dimensões após descompressão, na maioria dos resultados obtidos, as amostras apresentaram a espessura d_B maior do que a espessura d_F , aferida antes da compressão máxima (48 kPa), diferentemente dos resultados observados em pesquisas anteriores [9] [27].

A [Figura 35](#) apresenta o resultado médio das três amostras de PEBD2 ensaiadas. Diferentemente da amostra 1 apresentada na [Figura 34](#), nas outras duas amostras foram observados valores de d_B (compressão de 2,0 kPa ao final do ensaio) maior do que de d_F (compressão de 2,0 kPa antes da aplicação da carga de 48 kPa).

Figura 35: Resultados de compressibilidade - Média das 3 amostras de PEBD2

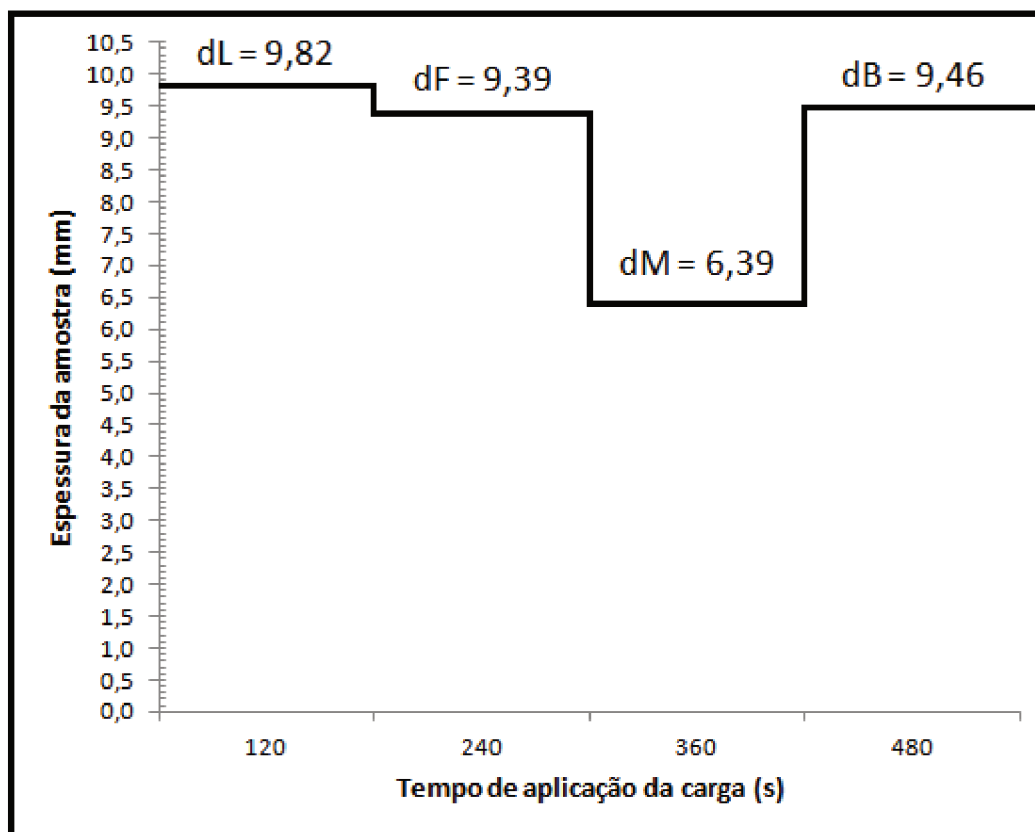


Fonte: O Autor

A compressibilidade c do material PEBD2 com 10 cm, dado pela diferença entre d_L (espessura da amostra após 120 segundos com a carga de 0,25 kPa) e d_B ([Equação 45](#)), é 0,52 mm. Segundo Schiavi et. al (2007), este resultado, para alguns materiais, apresentou-se aproximado à deformação do material após 7 anos de compressão constante de 2,0 kPa. No entanto, o valor estimado a partir dos ensaios de fluência à compressão para PEBD2, conforme apresentado anteriormente, é $X_{t=7anos} = 1,18$ mm.

Para as amostras de PEBD1, os resultados médios obtidos para as três espécimes analisadas são apresentados no gráfico da [Figura 36](#). A compressibilidade c deste material é 0,36 mm.

Figura 36: Resultados de compressibilidade - Média das 3 amostras de PEBD1



Fonte: O Autor

5.6 Redução de ruído de impacto em bancada

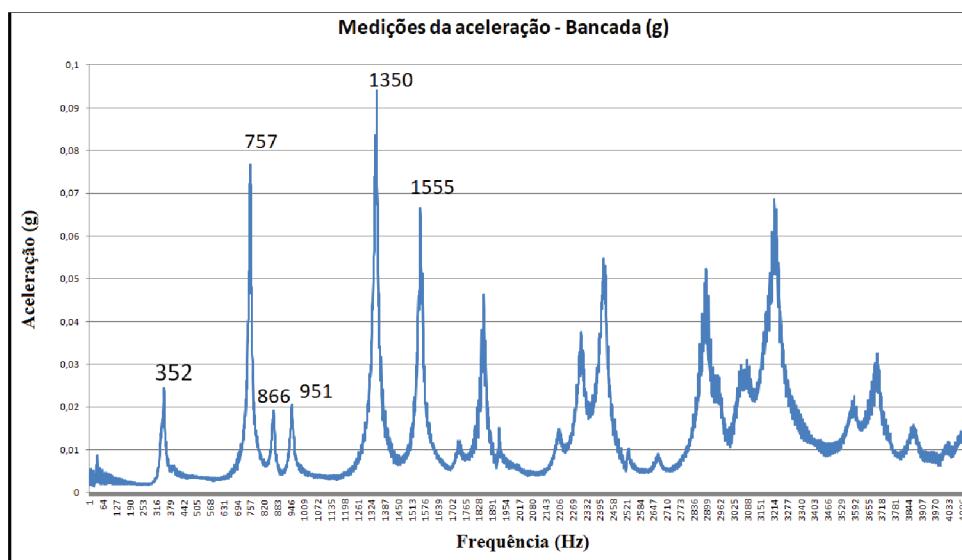
5.6.1 Caracterização da bancada reduzida

Os resultados acústicos obtidos por meio do modelo de laje reduzida podem sofrer indesejáveis interferências nos resultados devido aos modos de vibração da bancada ([30], [12]). Desta forma, mesmo na ausência de definições na norma ISO 16251-1, em se tratando das formas modais da laje, foram realizadas medições da resposta da bancada ao impacto. As características vibratórias da bancada podem ser evidenciadas nas curvas de níveis de redução do ruído, que diverge da obtida em câmaras de laboratório, conforme observado por Pereira et al (2014) e Foret et al (2011).

A resposta da aceleração média (g) no domínio da frequência obtida experimentalmente por 4 acelerômetros fixados na superfície inferior da laje, por meio da utilização de uma máquina de impacto sobre a laje, pode ser visualizada no gráfico da [Figura 37](#), evidenciando as primeiras ressonâncias modais de flexão da laje apoiada.

Nestes ensaios, foram colocadas mantas de GP com 8 mm de espessura amortecendo cada contato da laje com os pilares, conforme as determinações da norma ISO 16251 [11].

Figura 37: Resultados experimentais de vibração da laje com máquina de impacto padrão.



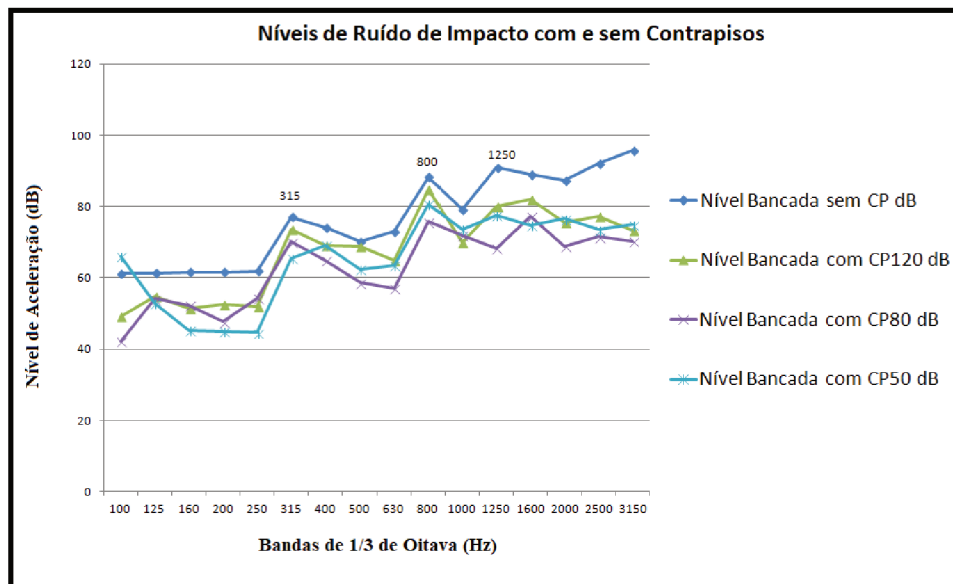
Fonte: O Autor

Antes de verificar a redução de energia promovida pelo sistema de contrapiso flutuante, foram medidos os níveis do ruído de impacto nos testes da máquina sobre a bancada com os três tamanhos de contrapiso sobre a laje, porém sem nenhuma manta resiliente abaixo dos moldes de contrapiso, a fim de verificar se as ressonâncias também são evidenciadas após a aplicação de contrapiso entre a laje e a máquina de impacto. A Figura 38 apresenta os níveis de aceleração em dB, para a aceleração de referência de $10^{-6} m/s^2$, em bandas de terço de oitava (Hz) das médias obtidas nos testes para as 3 configurações de contrapiso (CP 50, CP 80 e CP 120), bem como os resultados da máquina de impacto diretamente sobre a laje.

Os picos evidenciados nas curvas em bandas de 1/3 de oitava apresentados na Figura 38 condizem com as ressonâncias mensuradas da bancada. Percebe-se que a curva do nível dos testes com o contrapiso CP120 apresenta maiores valores nas ressonâncias se comparados aos obtidos para os testes com CP80 e CP50. Desta forma, a redução do ruído de impacto medida com o maior tamanho de contrapiso foi menor nas frequências de ressonância da bancada.

A redução de energia promovida pelos moldes de contrapiso ocorre devido ao aumento da massa do sistema, ao acoplamento entre o molde de contrapiso e

Figura 38: Resultados obtidos sem manta acústica entre contrapiso e bancada.



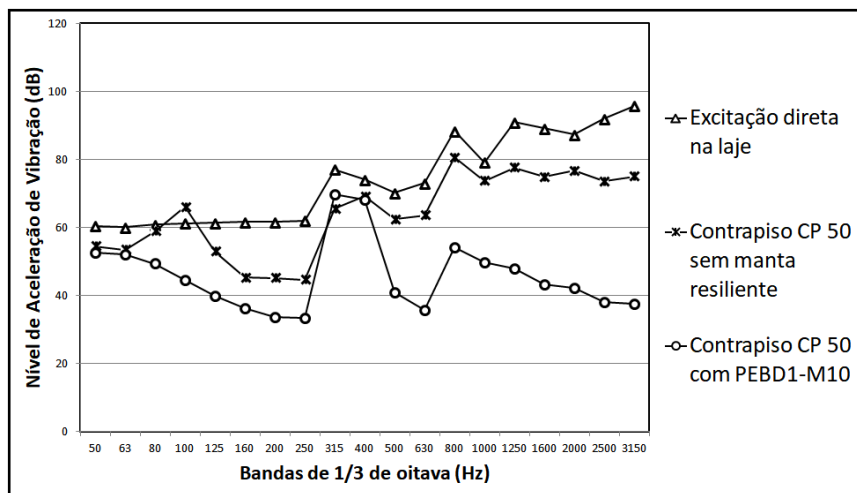
Fonte: O Autor

a laje da bancada. Diferentemente de um contrapiso em condições reais, moldado e endurecido acima da estrutura (laje / material acústico), os moldes (Figuras 23 e 25) não possuem um acoplamento regular com a laje, principalmente na ausência de manta resiliente.

5.6.2 Material PEBD1

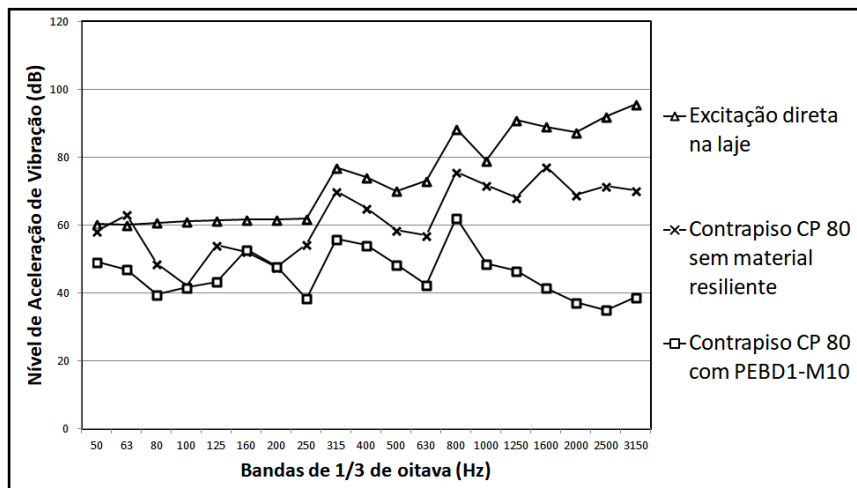
Para o material PEBD1, foram avaliadas amostras com 5 e 10 mm de espessura, nomeadas respectivamente de PEBD1-M5 e PEBD1-M10. O mesmo padrão de nomenclatura foi adotado para os demais materiais, destacando a espessura da amostra. Os resultados de nível de aceleração de vibração (L_a) obtidos para PEBD1-M10 foram comparados aos apresentados na Figura 38. As Figuras 39, 40 e 41 informam os níveis em cada configuração de contrapiso.

Figura 39: Níveis de aceleração de vibração (L_a) obtidos para excitação direta na laje e para contrapiso CP50 com e sem manta PEBD1-M10.



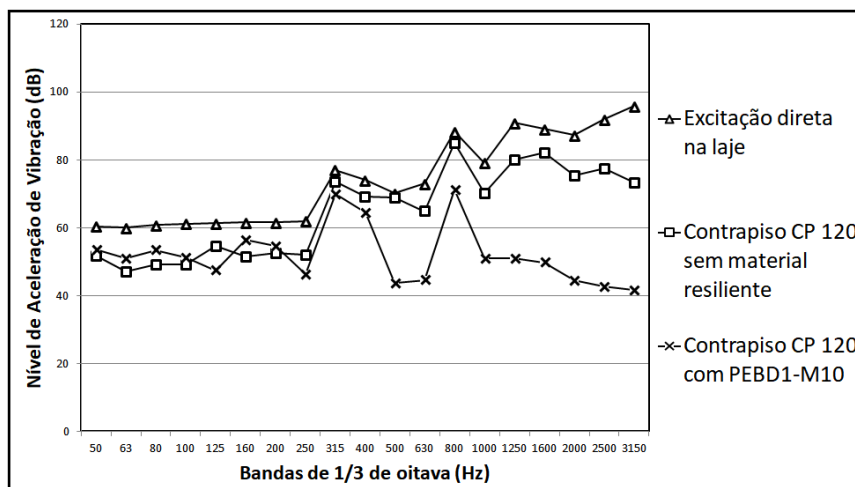
Fonte: O Autor

Figura 40: Níveis de aceleração de vibração (L_a) obtidos para excitação direta na laje e para contrapiso CP80 com e sem manta PEBD1-M10.



Fonte: O Autor

Figura 41: Níveis de aceleração de vibração (L_a) obtidos para excitação direta na laje e para contrapiso CP120 com e sem manta PEBD1-M10.



Fonte: O Autor

Comparando as curvas em tais configurações, percebe-se que quanto menor o tamanho do contrapiso, maior é a redução de nível do sistema nas baixas frequências. Outra evidência diz respeito ao alto nível de transmissão na ressonância da banda de 800 Hz para o contrapiso flutuante PEBD1-M10 com CP120 quando comparados aos demais tamanhos.

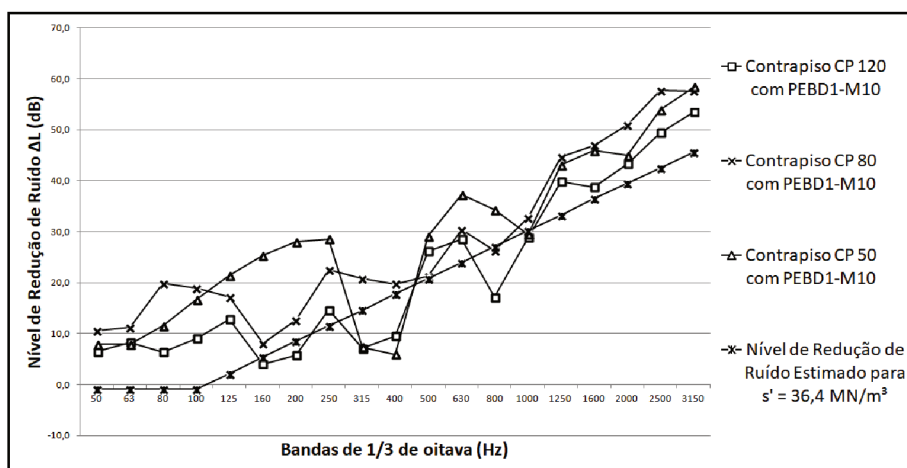
O primeiro objetivo da análise do modelo com a bancada reduzida consistiu em validar o melhor tamanho de contrapiso, considerando a aproximação entre as curvas de redução do ruído aferidas com os resultados obtidos em laboratório por meio das normas ISO 10140 (fornecido pelo fabricante); com as estimativas de redução utilizando a rigidez dinâmica aferidas; e com os resultados de pesquisas recentes [30], [12], [35].

Conforme apresentado na [Figura 27](#), a rigidez dinâmica obtida para a amostra PEBD1 de 10 cm (M1) foi de $36,4 \text{ MN}/\text{m}^2$ ao quarto dia. Considerando que, para o contrapiso adotado de 4 cm, a densidade superficial da massa flutuante é $82 \text{ Kg}/\text{m}^2$, por meio das [Equações 18](#) e [19](#), são estimados os valores da curva de redução de ruído do contrapiso flutuante. Os resultados obtidos por bandas de terço de oitava podem ser visualizados na [Tabela 43](#), presente no Apêndice.

A comparação entre as curvas de redução mensuradas para PEBD1-M10 com os três tamanhos de contrapiso (obtidos por meio da [Equação 48](#)) e a curva estimada ([Tabela 43](#)) é apresentada no gráfico da [Figura 42](#). Pode-se perceber que a curva

com CP120 é a que apresenta maior proximidade com a curva de redução estimada, em concordância com as conclusões de [30] e [32]. Como o modelo empírico de Cremer [15] (Equação 19) só considera os níveis de redução para as frequências acima da frequência de ressonância do contrapiso, os valores abaixo desta foram adotados como nulos.

Figura 42: Resultados de Redução obtidos e estimados para manta PEBD1-10.



Fonte: O Autor

O parâmetro de redução do ruído de interesse para comparação com as exigências da norma brasileira (NBR 15575:2013) consiste no valor ponderado do nível do ruído de impacto, obtido por meio da metodologia determinada pela norma ISO 717:2. Adotando este procedimento de cálculo, é possível determinar os níveis ponderados de redução do ruído de impacto para os resultados medidos na bancada e os estimados a partir da rigidez dinâmica. A Tabela 44 (Apêndice) apresenta os valores usados para ponderação do nível de redução do ruído de impacto (ΔL_n) aferido para PEBD1-M10 com CP120, obtido a partir da diferença de nível entre as medições com (L_n) e sem ($L_{n,o}$) a solução acústica, expostas na Figura 41. O resultado ponderado encontrado foi de 24 dB.

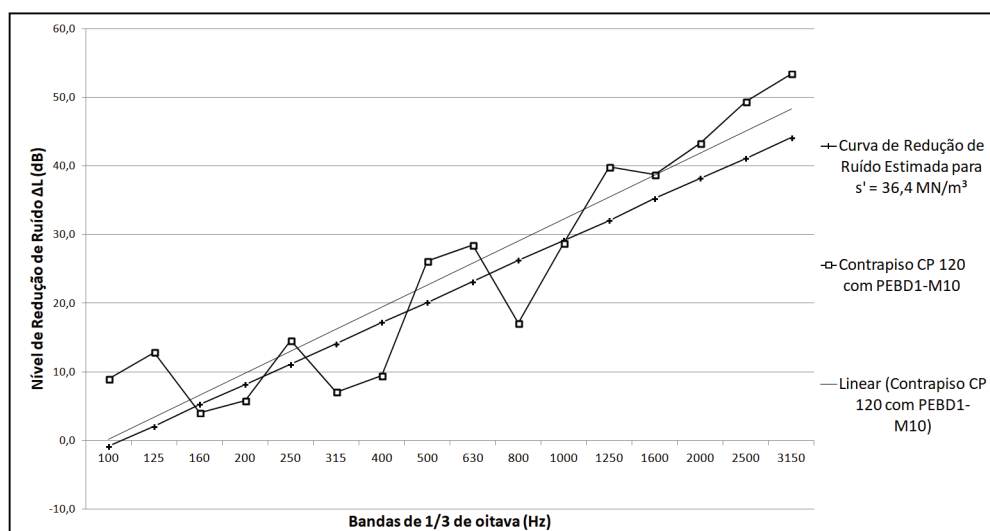
Aplicando o mesmo método nas curvas de redução estimadas a partir dos parâmetros obtidos para PEBD1-M1, em todas as medições de rigidez dinâmica realizadas entre os dias 6 e 13 de idade da amostra, também é obtido um nível ponderado de 24 dB de redução. No entanto, adotando valores médios, abordados na Tabela 15, ou qualquer resultado de PEBD1-M1 obtido nos primeiros 5 dias de idade da amostra, o nível ponderado é 23 dB.

Os níveis ponderados de redução do ruído de impacto para amostra PEBD1-

M10 com os contrapisos CP50 e CP80 foram, respectivamente, 31 dB e 32 dB. Desta forma, evidencia-se que os resultados obtidos com CP120 são os únicos adequados para uma aferição confiável do desempenho das mantas resilientes, conforme abordado nas conclusões de Pereira et al. (2014) [30] e de Miskinis et al. (2012) [32].

Comparando a linha de tendência dos valores mensurados para o contrapiso CP120 e a curva da redução de ruído estimada pela Equação 19 [15], conforme resultados em bandas de terço de oitava apresentados na Tabela 43, é possível avaliar a proximidade quanto à inclinação e quanto à magnitude, como pode ser melhor visualizado no gráfico da Figura 43. A inclinação da curva dos resultados mensurados apresentou-se um pouco maior do que a da curva estimada.

Figura 43: Resultados de ΔL obtido e estimado para PEBD1-M10 com CP120.

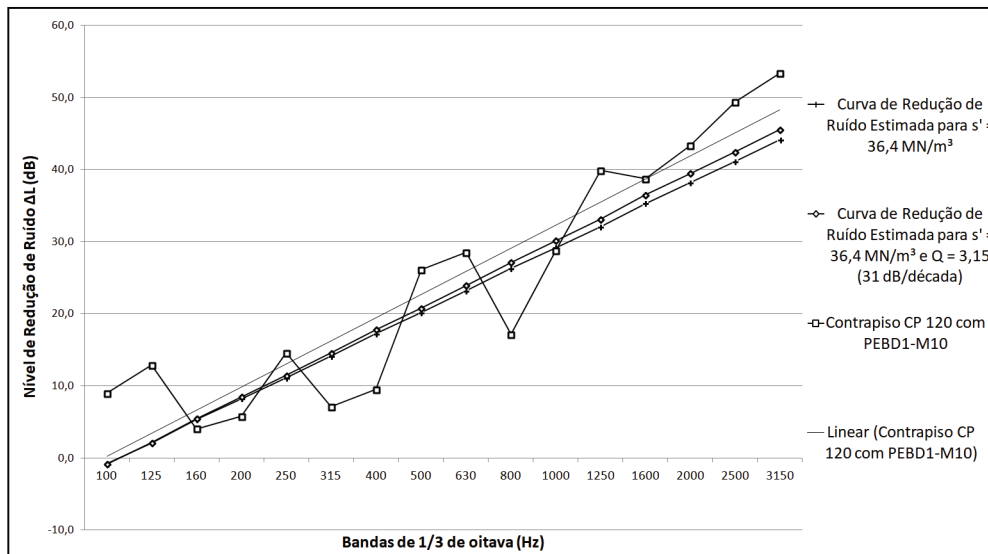


Fonte: O Autor

Conforme discutido por Schiavi (2005), os parâmetros de amortecimento da amostra influenciam neste aspecto (coeficiente angular da curva de redução). Adotando o Fator de Qualidade (Q) de 3,15 para a amostra PEBD1-M1, obtida por meio da resposta do material ao quarto dia de idade (Figura 30), a curva apresentaria um crescimento de 31 dB/década. Utilizando esta inclinação, é possível verificar a aproximação entre a linha de tendência da curva medida e a linha estimada, conforme pode ser visto na Figura 44.

Apesar de apresentarem aproximadamente a mesma inclinação, as curvas ilustradas na Figura 44 diferem em termos de magnitude, o que pode ser justificado pelo valor da rigidez dinâmica mensurada, que, por sua vez, apresentou variações ao longo do tempo. Um importante fator responsável pela alteração da rigidez durante as

Figura 44: Resultados de ΔL obtido e estimados para manta PEBD1-M10 com ajuste pelo Fator de Qualidade (Q) [17].



Fonte: O Autor

medições foi o carregamento acidental ocorrido, verificado no sexto dia de análise da amostra PEBD1-M1, conforme apresentado na Figura 27. Adotando o valor de $31,1 \text{ MN/m}^2$ da rigidez dinâmica de PEBD1-M1, extraída após a carga acidental, a curva de redução do ruído, conforme a Equação 21, se aproxima ainda mais da linha de tendência dos resultados mensurados, conforme pode ser visualizado na Figura 45.

O modelo empírico de Cremer (Equação 19), e mesmo o modelo ajustado por Schiavi (2005) (Equação 21), não permitem a análise da transmissão vibratória para faixa de frequência igual ou abaixo da frequência de ressonância do sistema, uma vez que nesta faixa a redução de ruído é definido como sendo nula, diferentemente do modelo proposto por Schiavi (2018) [35] (Equações 22 e 23). Neste modelo, o parâmetro de amortecimento adotado é o Fator de Perda Total (η), que é dado pelo inverso do Fator de Qualidade (Q). A Figura 46 a seguir ilustra os níveis de redução (ΔL) mensurado, calculado com ajustes de [17] (conforme exposto na Figura 45) e os obtidos pelo método analítico de Schiavi (2018), tanto para contrapiso reagindo ressonantemente, quanto para reagindo localmente. O fator de perda (η) adotado foi de 0,3174 (inverso de $Q = 3,15$). Bem como nas estimativas anteriores, a massa do contrapiso adotada foi de $82,04 \text{ kg/m}^2$ (4 cm).

De acordo com a Figura 46, observa-se que a curva mensurada para contrapiso C120 com PEBD1-M10 não apresenta, em nenhuma frequência, valores nulos

Figura 45: Resultados de ΔL obtido e estimados para manta PEBD1-M10 com ajuste pelo fator de qualidade e rigidez dinâmica.

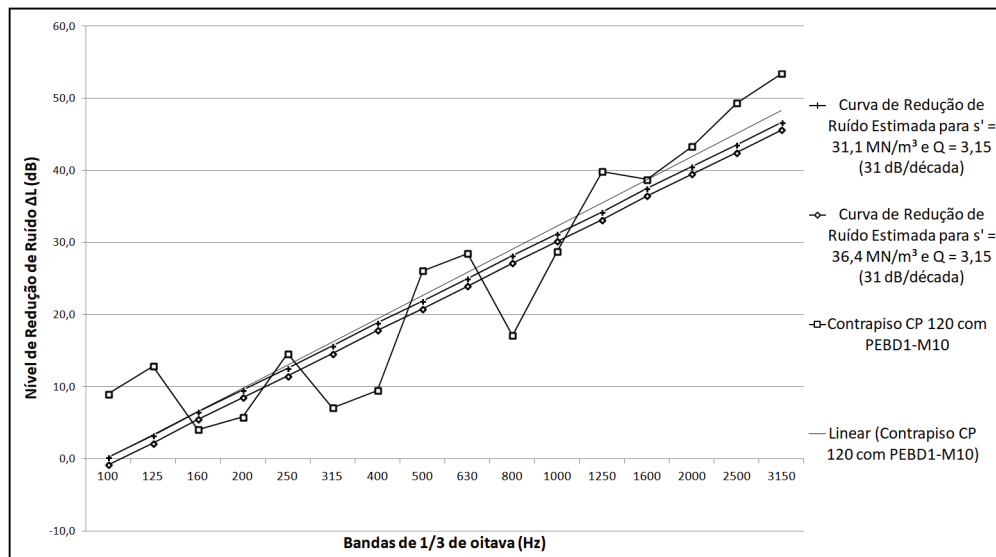
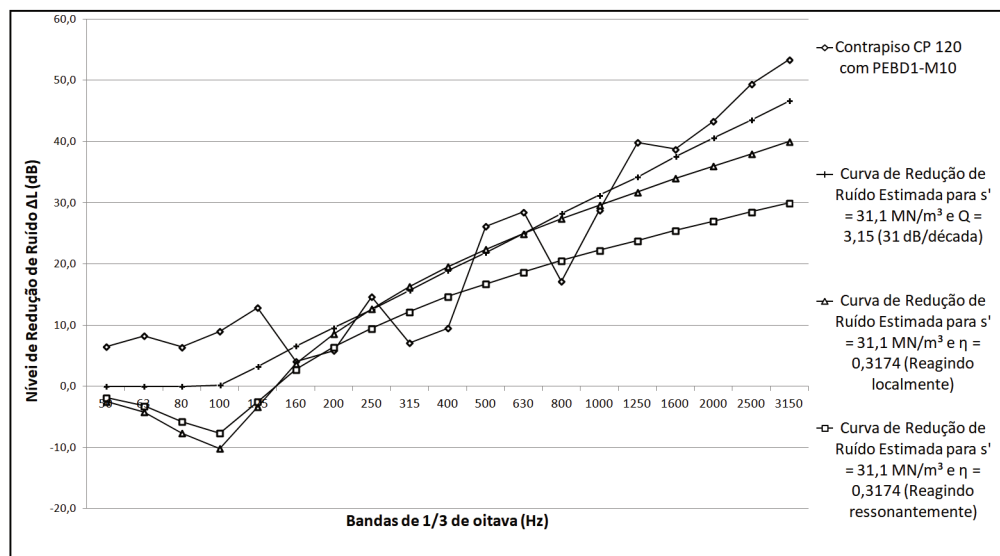


Figura 46: Resultados de ΔL medido com CP 120 e estimados para manta PEBD1-M10 com ajustes [17] e pelo modelo analítico de Schiavi (2018) [35].



ou negativos, inclusive na frequência de ressonância calculada para o contrapiso, ou abaixo desta. Acima da banda de 1000 Hz, os níveis de redução obtidos experimentalmente são maiores do que os resultados estimados pelos modelos empírico, ajustado pelo fator de qualidade (Equação 21), e analíticos (Equações 22 e 23), que consideram o decaimento da redução para altas frequências. Segundo Schiavi (2018), os

desvios verificados nas altas frequências ocorrem principalmente devido às propriedades mecânicas do contrapiso flutuante adotado no ensaio, tais como a composição do concreto, o tempo de cura e pequenas fissuras na sua estrutura [35].

Outra observação importante na [Figura 46](#) diz respeito à comparação entre as curvas estimadas pelo modelo analítico de Schiavi (2018) para contrapiso reagindo ressonantemente e localmente, sendo este último bem mais próximo aos resultados obtidos experimentalmente. Segundo Hopkins (2007), uma superfície que reage localmente é aquela na qual a componente normal da velocidade da vibração depende unicamente da região da superfície onde a força é incidente [14]. A norma que regulamenta o uso da bancada reduzida para aferição da redução de vibração proporcionada por soluções acústicas para piso, a ISO 16251 [11], aponta que a metodologia proposta é válida apenas para soluções que reagem localmente. Uma das razões experimentais para tal comportamento diz respeito à irregularidade do contato entre o contrapiso e a manta resiliente em comparação com situações reais, uma vez que o molde de CP 120 é sobreposto ao material vibroacústico, diferentemente de um contrapiso moldado no local.

Durante os ensaios na bancada com contrapiso CP120, a compressão imposta inicialmente na amostra no ato da colocação manual do molde pode interferir na estrutura do material de forma sensível, semelhante ao verificado nos testes de rigidez dinâmica no caso da amostra que sofreu uma carga externa acidental, cujos os valores estimados nesta ocasião se aproximaram das medições da bancada. Desta forma, o valor ponderado do nível de redução de ruído, segundo o cálculo da [Tabela 44](#), para a curva corrigida considerando os parâmetros de amortecimento (Q) e de compressão (s' após carga acidental) resultou em 24 dB, o mesmo valor obtido experimentalmente.

A [Tabela 28](#) resume os resultados discutidos para a amostra PEBD1 com 10 mm, apresentando alguns valores estimados a partir dos parâmetros dinâmicos e os mensurados em bancada de nível de redução do ruído de impacto padrão ponderado. São apresentados os dois modelos de cálculo de redução analisados, e observa-se que o modelo analítico baseado na teoria da transmissibilidade de força [22] [35] se distancia dos resultados de nível de redução ponderado (ΔL_w) obtidos experimentalmente e através do modelo empírico de Cremer corrigido [17], conforme já visualizado nas curvas de redução apresentadas na [Figura 46](#). As estimativas de (ΔL_w) obtidas pelo modelo de Schiavi (2005) para a amostra PEBD1-M1 mensurada pelo teste com martelo de impacto [20] a partir do 6º dia de idade se igualam ao valor obtido expe-

rimentalmente com contrapiso CP 120. Em oposição aos resultados subestimados pelo modelo analítico de Schiavi (2018), os resultados experimentais de (ΔL_w) para os contrapisos CP 80 e CP 50 foram superestimados.

Tabela 28: Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material PEBD1 com 10 mm.

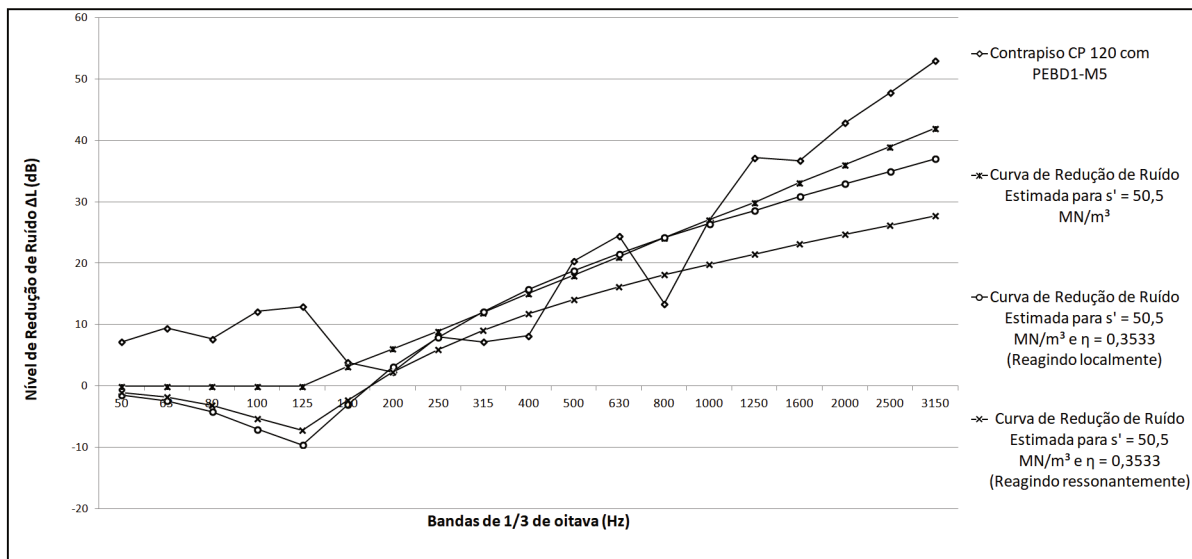
Material	Amostra	Rigidez Dinâmica (MN/m ³)	Parâmetro de Amortecimento		Contrapiso	Nível de redução do ruído de impacto ponderado (ΔL_w)		
			Fator de Qualidade (Q)	Fator de Perda Total (η)		ΔL_w - Modelo Empírico ajustado Schiavi (2005)	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Ressonantemente	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Localmente
PEBD1	M10	(S't)	Fator de Qualidade (Q)	Fator de Perda Total (η)	CP120	24		
					CP80	32		
					CP50	31		
	M1	36,8	3,01 (31 dB/década)	0,3322	23	18	18	
					(5 dias)	24	19	19
					(12 dias)	24	18	20
	M1	31,1	1,57 (29 dB/década)	0,6369	24	18	20	
(6 dias)								

Fonte: O Autor

Para as amostra de PEBD1 com espessura de 5 milímetros (PEBD1-M5), as curvas de redução de ruído obtidas experimentalmente para o contrapiso CP 120 e as estimadas a partir dos parâmetros obtidos pelo teste de impacto (amostra M5 com 27 dias Tabela 6) são apresentadas no gráfico da Figura 47. As conclusões são as mesmas obtidas para a amostra de PEBD1 com 10 mm, sendo a curva estimada pelo modelo empírico corrigido pelo fator de qualidade (Equação 21) a mais próxima da obtida pela bancada reduzida.

Os resultados de ΔL_w obtidos para a amostra PEBD1-M5 também apresentaram a mesma tendência das amostras com 10 mm, atingindo valores superestimados de nível ponderado da redução do ruído de impacto para CP 50 e CP 80 (29 e 30 dB, respectivamente). Já os resultados com CP 120 foram próximos aos estimados a partir dos parâmetros dinâmicos aferidos, diferindo o nível ponderado em apenas 1 dB, conforme pode ser visualizado na Tabela 29. É interessante notar que, apesar de a curva estimada pelo método de Schiavi (2018) para contrapiso reagindo localmente

Figura 47: Resultados de ΔL obtido com CP 120 e estimados para manta PEBD1 de 5 mm com ajustes [17] e pelo modelo analítico de Schiavi (2018) [35].



Fonte: O Autor

apresentar melhores valores de redução para médias e altas frequências (Figura 47), ao comparada à curva para o contrapiso reagindo ressonantemente, o resultado ponderado de ΔL_w , por sua vez, é maior para o contrapiso reagindo ressonantemente, devido aos valores de redução nas baixas frequências, que possuem maior peso na ponderação.

Tabela 29: Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material PEBD1 com 5 mm.

Material	Amostra	Rigidez Dinâmica (MN/m ³)	Parâmetro de Amortecimento		Contrapiso	Nível de redução do ruído de impacto ponderado (ΔL_w)	
PEBD1	M5	(S't)	Fator de Qualidade (Q)	Fator de Perda Total (η)	CP120	22	
					CP80	29	
					CP50	29	
					ΔL_w - Modelo Empírico ajustado Schiavi (2005)	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Ressonantemente	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Localmente
	M5 (27 dias)	50,5	2,83 (30 dB/década)	0,3534	21	16	16
	M6 (5 dias)	66,5	3,15 (31 dB/década)	0,3175	19	15	14

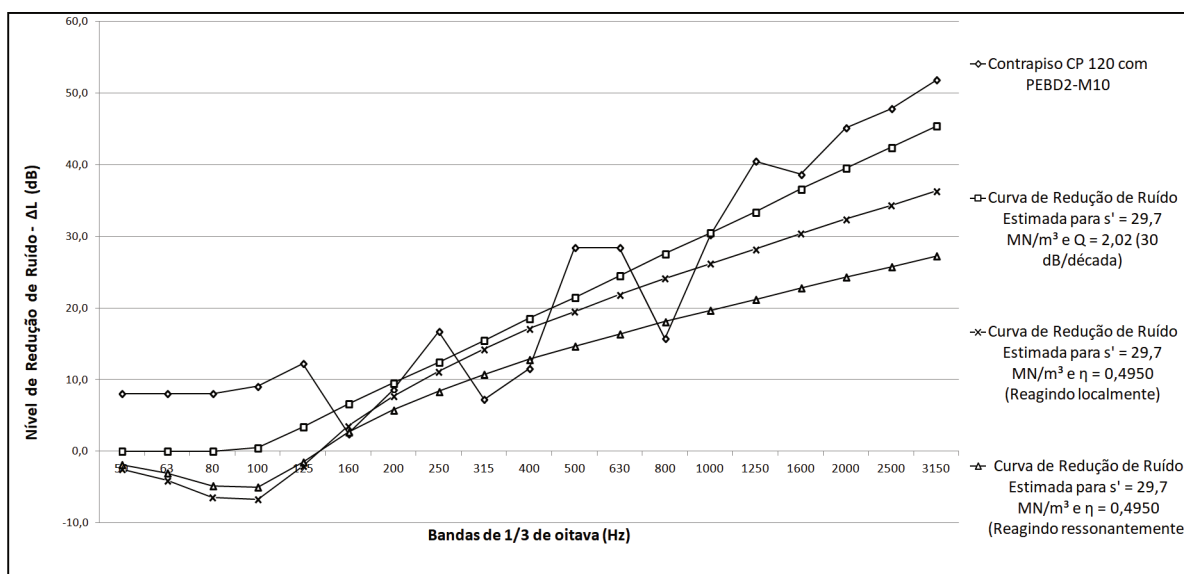
Fonte: O Autor

5.6.3 Material PEBD2

Os resultados aferidos para o material PEBD2 com CP120 apresentaram os mesmos valores de nível ponderado estimados de algumas amostras ensaiadas nos testes de rigidez dinâmica. Semelhantemente a PEBD1, os níveis de redução mensurados com os contrapisos CP50 e CP80 foi superestimados.

Na [Figura 48](#) é apresentado o gráfico das curvas de redução de ruído mensurada com CP120 e as estimadas para a amostra PEBD1-M2 com 3 dias de idade, tanto pelo modelo empírico corrigido por Schiavi (2005), quanto pelo modelo analítico de Schiavi (2018). A curva de redução estimada pela [Equação 19](#) de forma sobreposta à linha de tendência de ΔL para M10 - CP120 apresentaria a rigidez dinâmica de 27 MN/m^3 e a inclinação de $31,3 \text{ dB/década}$.

Figura 48: Resultados de ΔL medido com CP 120 e estimados para manta PEBD2 de 10 mm com ajustes [17] e pelo modelo analítico de Schiavi (2018) [35].



Fonte: O Autor

Na [Tabela 30](#), são apresentados os resultados medidos e estimados do nível ponderado de redução do material PEBD2 com 10 mm. Observa-se que o valor de ΔL_w da curva estimada pelo modelo de Schiavi (2005) ([Equação 21](#)) para a amostra PEBD2-M2 com 3 dias de idade apresentou o mesmo resultado calculado para a curva medida com CP 120, apresentada na [Figura 48](#). De forma semelhante ao material PEBD1, os resultados de ΔL_w estimados pelo método de Schiavi (2018) apresentaram-se inferiores ao mensurado com CP 120; e os resultados medidos com CP 50 e C80 foram superestimados.

Tabela 30: Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material PEBD2 com 10 mm.

Material	Amostra	Rigidez Dinâmica (MN/m ³)	Parâmetro de Amortecimento		Contrapiso	Nível de redução do ruído de impacto ponderado (ΔL_w)	
PEBD2	M10	(S't)	Fator de Qualidade (Q)	Fator de Perda Total (η)	CP120	24	
					CP80	31	
					CP50	33	
					ΔL_w - Modelo Empírico ajustado Schiavi (2005)	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Ressonantemente	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Localmente
	M2 (3 dias)	29,7	2,02 (30 dB/década)	0,4950	24	19	20

Fonte: O Autor

Os resultados do material PEBD2 com 5 mm podem ser visualizados na [Tabela 31](#). Enquanto que para o material PEBD1 as amostras de 5 e de 10 mm diferiram em 2 dB quanto ao nível ponderado de desempenho calculado para as medições em bancada com CP 120 (22 e 24 dB), em PEBD2, a diferença chegou a 3 dB (21 dB e 24 dB).

Tabela 31: Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material PEBD2 com 5 mm.

Material	Amostra	Rigidez Dinâmica (MN/m ³)	Parâmetro de Amortecimento		Contrapiso	Nível de redução do ruído de impacto ponderado (ΔL_w)	
PEBD2	M5	(S't)	Fator de Qualidade (Q)	Fator de Perda Total (η)	CP120	21	
					CP80	30	
					CP50	30	
					ΔL_w - Modelo Empírico ajustado Schiavi (2005)	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Ressonantemente	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Localmente
	M8 (4 dias)	50,5	2,09 (30 dB/década)	0,4785	21	16	16

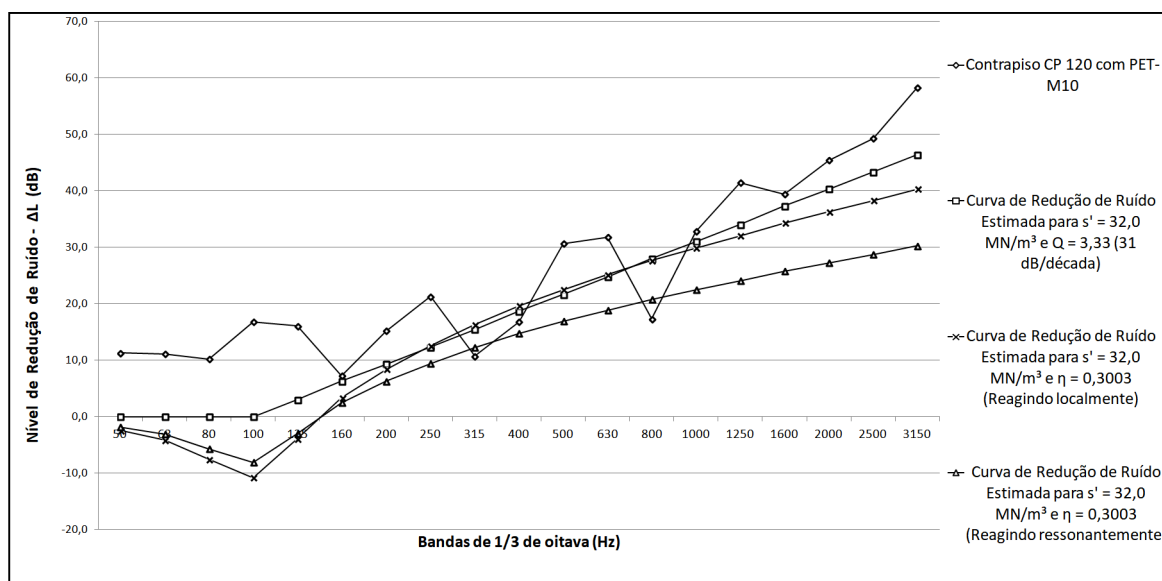
Fonte: O Autor.

5.6.4 Material PET

Conforme discutido anteriormente, o fato do material PET ser fibroso, com estrutura de células abertas, faz com que a aferição da rigidez dinâmica leve em consideração a adição da contribuição do ar enclausurado na resposta final, uma vez que esta parcela não pode ser mensurada durante os ensaios, nos quais os provetes executados permitem a saída do ar pelas bordas da manta. No caso da avaliação com a bancada reduzida, as condições do ensaio também não garantem o enclausuramento do ar contido nos poros do material PET, o que pode não representar o comportamento em situação real ou de laboratório.

Na [Figura 49](#), é apresentado o gráfico das curvas de redução de ruído mensurada com CP120 e as estimadas para a amostra PET-M2 com 8 dias de idade, tanto pelo modelo empírico corrigido por Schiavi (2005), quanto pelos modelos analíticos de Schiavi (2018).

Figura 49: Resultados de ΔL medido com CP 120 e estimados para manta PET de 10 mm com ajustes [17] e pelo modelo analítico de Schiavi (2018) [35].



Fonte: O Autor

A [Tabela 32](#) apresenta os resultados do material medidos na bancada, bem como os valores estimados para algumas amostras mensuradas pelo teste de rigidez dinâmica, e as estimativas de aproximação com a curva medida. Também é informado o resultado de ΔL_w aferido em laboratório, disponibilizado pelo fabricante do material. Neste caso, o contrapiso adotado no ensaio em câmaras sobrepostas possuía 5 cm

de espessura, 1 cm a mais do que a espessuras dos moldes de contrapiso CP50, CP80 e CP120, o que foi utilizado também nos cálculos de nível de redução obtidos a partir dos parâmetros dinâmicos aferidos.

Tabela 32: Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material PET com 10 mm.

Material	Amostra	Rigidez Dinâmica (MN/m ³)	Parâmetro de Amortecimento		Contrapiso	Nível de redução do ruído de impacto ponderado (ΔL_w)	
PET	M10	(S't)	Fator de Qualidade (Q)	Fator de Perda Total (η)	CP120	29	
					CP80	37	
					CP50	35	
					ISO 10140 (CP 5cm)	26	
					ΔL_w - Modelo Empírico ajustado Schiavi (2005)	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Ressonantemente	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Localmente
M2 - 8 dias (CP 4 cm)	32	3,33 (31 dB/década)	0,3003	24	19	19	
M2 - 8 dias (CP 5 cm)	32	3,33 (31 dB/década)	0,3003	26	21	22	

Fonte: O Autor.

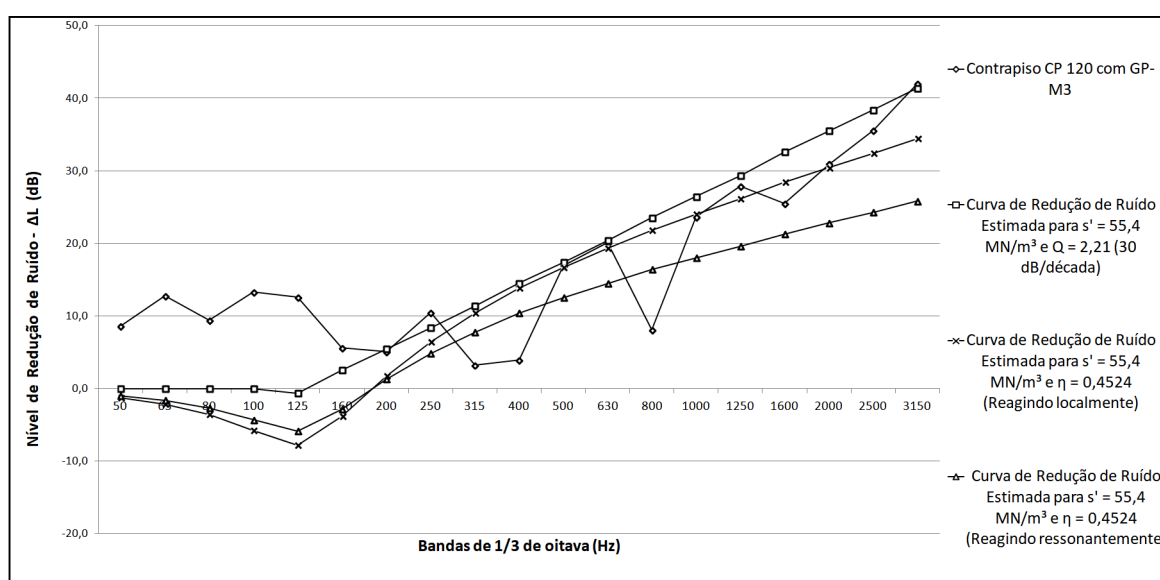
Os resultados obtidos com CP50 e CP80 apresentam-se bem acima do desempenho esperado para o material, de forma análoga ao observado para os materiais PEBD1 e PEBD2. No entanto, no caso do PET, uma considerável diferença entre os valores obtidos com CP120 e os resultados estimados a partir dos parâmetros aferidos em PET-M2 foi verificada, atingido o desvio de 5 dB. Portanto, os resultados medidos em bancada reduzida para o material PET foram superestimados.

Adotando os parâmetros dinâmicos medidos para a amostra PET-M2 com 8 dias de idade, porém usando a densidade superficial de um contrapiso com 5 cm de espessura ($102,56 \text{ kg/m}^2$), o nível ponderado estimado pela [Equação 21](#) atinge o valor ΔL_w de 26 dB, igual ao obtido em laboratório segundo a ISO 10140, e 2 dB acima da estimativa para um contrapiso com 4 cm ($82,04 \text{ kg/m}^2$ resulta em ΔL_w de 24 dB).

5.6.5 Material GP

As amostras de GP, semelhantemente ao verificado para os materiais PEBD1 e PEBD2, apresentaram valores de níveis ponderados da redução de ruído, para os ensaios com contrapiso CP120, próximos aos encontrados por estimativa pelo modelo de Schiavi (2005) a partir dos parâmetros dinâmicos aferidos. As respostas utilizando CP50 e CP80 também foram superestimadas. A [Figura 50](#) apresenta o gráfico das curvas de redução de ruído mensurada com CP120 e as estimadas a partir dos parâmetro dinâmicos da amostra GP-M1 com 8 dias de idade ([Tabela 13](#)).

Figura 50: Resultados de ΔL medido com CP 120 e estimados para manta GP de 3 mm com ajustes [17] e pelos modelos analíticos de Schiavi (2018) [35].



Fonte: O Autor

A [Tabela 33](#) ilustra os resultados de ΔL_w para a amostra com 3 mm de espessura. A ponderação da redução de ruído obtida a partir da curva estimada pelo modelo de Schiavi (2005), por meio dos parâmetros dinâmicos medidos ao 8º dia de idade, apresentou o mesmo resultado de ΔL_w calculado para a curva mensurada com CP 120.

Os resultados obtidos para as amostras de GP com 5 mm e com 8 mm de espessura são apresentados nas [Tabelas 34 e 35](#), respectivamente. Os parâmetros dinâmicos aferidos para GP-M2 (amostra com 5 mm) ao oitavo dia de idade ([Tabela 13](#)), aplicados no modelo de Schiavi (2005), resultaram em um valor de ΔL_w 1 dB maior do que o obtido por meio do ensaio em bancada para CP 120. O mesmo ocorre

Tabela 33: Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material GP com 3 mm.

Material	Amostra	Rigidez Dinâmica (MN/m ³)	Parâmetro de Amortecimento		Contrapiso	Nível de redução do ruído de impacto ponderado (ΔL_w)	
GP	M3	(S't)	Fator de Qualidade (Q)	Fator de Perda Total (η)	CP120	21	
					CP80	30	
					CP50	30	
				ΔL_w - Modelo Empírico ajustado Schiavi (2005)	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Ressonantemente	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Localmente	
M1 (8 dias)	50,5	2,21 (30 dB/década)	0,4525	21	16	16	

Fonte: O Autor.

no caso da manta de GP com 8 mm de espessura, cujos os resultados de nível ponderado de redução, estimados a partir dos parâmetros dinâmicos medidos com 8 dias de idade para as amostras GP-M3, apresentaram-se 1 dB acima do valores medidos em bancada com CP120. Ao 27º dia de idade, a amostra de GP com 8 mm apresenta uma redução no valor de rigidez dinâmica (Tabela 13), resultando no aumento de mais 1 dB de ΔL_w .

Tabela 34: Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material GP com 5 mm.

Material	Amostra	Rigidez Dinâmica (MN/m ³)	Parâmetro de Amortecimento		Contrapiso	Nível de redução do ruído de impacto ponderado (ΔL_w)	
GP	M5	(S't)	Fator de Qualidade (Q)	Fator de Perda Total (η)	CP120	21	
					ΔL_w - Modelo Empírico ajustado Schiavi (2005)	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Ressonantemente	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Localmente
	M2 (8 dias)	49,5	2,32 (30 dB/década)	0,4310	22	16	16

Fonte: O Autor.

Os resultados de ΔL_w calculados a partir das estimativas pelo modelo de Schiavi (2018) apresentaram inferiores em todas as amostras avaliadas, em relação aos valores obtidos por meio das curvas mensuradas em bancada reduzida com CP

Tabela 35: Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para o material GP com 8 mm.

Material	Amostra	Rigidez Dinâmica (MN/m ³)	Parâmetro de Amortecimento		Contrapiso	Nível de redução do ruído de impacto ponderado (ΔL_w)	
GP	M8	(S't)	Fator de Qualidade (Q)	Fator de Perda Total (η)	CP120	22	
					ΔL_w - Modelo Empírico ajustado Schiavi (2005)	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Ressonantemente	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Localmente
	M3 (8 dias)	39,2	2,49 (30 dB/década)	0,4016	23	17	18
	M3 (27 dias)	33,8	2,28 (30 dB/década)	0,4386	24	18	19

Fonte: O Autor.

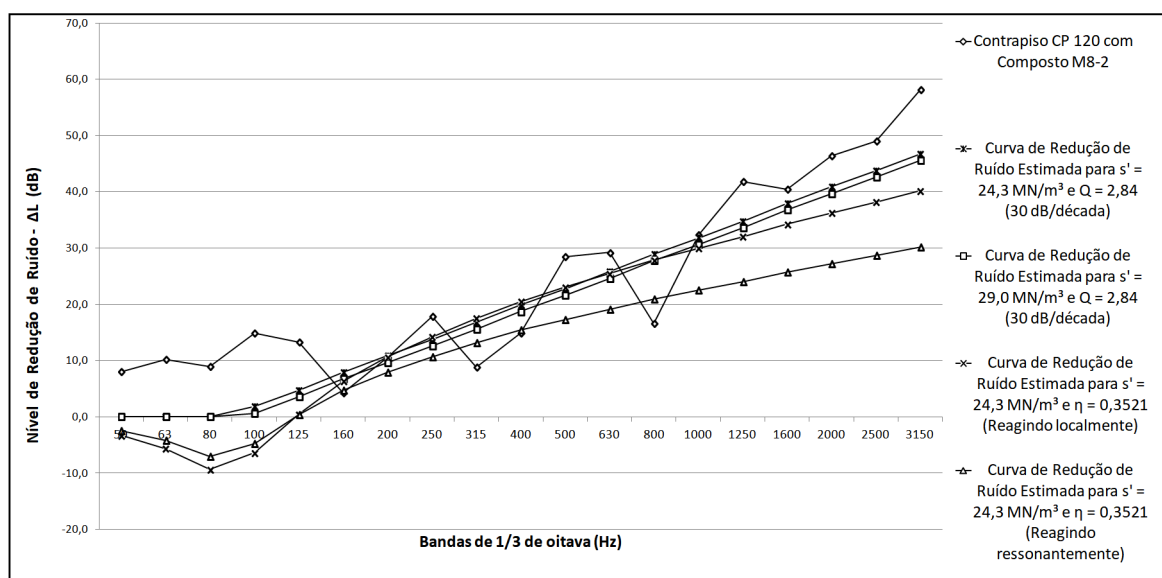
120. Tal evidência ocorre devido ao modelo analítico considerar a amplificação do nível de ruído transmitido na frequência de ressonância [35], uma vez que em nenhum resultado medido na bancada apresentou valores de nível de redução nulos ou negativos nas baixas frequências. O mesmo fenômeno foi observado em [12] e [30], nos quais as curvas de nível de redução de ruído aferidas em bancada reduzida para contrapisos flutuantes apresentaram valores positivos em toda a faixa de 100 a 3150 Hz. Segundo Cho (2013), que realizou estudos experimentais e numéricos da ressonância de contrapiso flutuantes, a alta transmissão do ruído de impacto nas baixas frequências ocorre devido às ressonâncias correspondentes ao piso flutuante em situações reais, desconsideradas no modelo analítico de vibração livre com um grau de liberdade [43], o que também ocorre no modelo simplificado de bancada reduzida.

5.6.6 Compostos

Foram realizadas medições na bancada com a solução de contrapiso flutuante composta por duas mantas sobrepostas, uma de PEBD1 com 5 mm e outra de GP com 3 mm. Os testes foram conduzidos na duas configurações possíveis de ordem das mantas, semelhantemente ao realizados durante os testes de rigidez dinâmica dos compostos com as amostras C1 e C4. Os contrapisos CP50 e CP80, por apresentarem-se superestimados em todas as medições, foram dispensados desta análise.

Por possuir espessura total de 8 mm, somando as duas mantas, as amostras compostas avaliadas na bancada foram nomeadas de M8-1, para a espécime com manta de GP por baixo da manta de PEBD1, e de M8-2 para a configuração contrária. A Figura 51 apresenta as curvas de nível de redução de ruído medidas e estimadas para a amostra composta M8-2 (PEBD1 com 5 mm + GP com 3 mm). Foram utilizados os dados dinâmicos medidos para a espécime composta C4, bem como a rigidez dinâmica calculada a partir dos resultados medidos para cada material isolado (ver Tabela 16), sendo considerado, neste caso, a inclinação da curva de desempenho convencional de 30 dB/década [15].

Figura 51: Resultados de ΔL medido com CP 120 e estimados para amostra composta M8-2 pelo modelo empírico [17] e pelos modelos analíticos de Schiavi (2018) [35].



Fonte: O Autor

Diferentemente das observações realizadas por Schiavi (2010) em relação às curvas de nível de redução de ruído aferidas em laboratório (ISO 10140-8 [10]) para

amostras compostas, conforme apresentado na [Figura 31](#), não é possível verificar no gráfico da [Figura 51](#) inclinações distintas na curva de redução mensurada por meio da bancada reduzida. Tal fato pode ser explicado devido irregularidade da curva ocasionada pelos modos de ressonância da bancada, evidenciados nas frequências centrais de 315 e 800 Hz. O mesmo comportamento irregular foi observado nos resultados obtidos por Pereira et al (2014) [30].

De forma análoga ao observado nos resultados medidos de rigidez dinâmica ([Tabela 16](#)), foram encontrados diferentes valores de ΔL_w , de acordo com a ordem de colocação das mantas da espécime composta. A [Tabela 36](#) apresenta os resultados obtidos no teste da bancada para as amostras composta M8-1 e M8-2, bem como valores estimados a partir dos parâmetros dinâmicos medidos para os compostos C1 e C4.

Tabela 36: Resultados experimentais e estimados de ΔL_w para as amostras compostas pelos materiais GP com 3 mm e PEBD1 com 5 mm.

Material	Amostra	Rigidez Dinâmica (MN/m ³)	Parâmetro de Amortecimento		Contrapiso	Nível de redução do ruído de impacto ponderado (ΔL_w)	
			Fator de Qualidade (Q)	Fator de Perda Total (η)		ΔL_w - Modelo Empírico ajustado Schiavi (2005)	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Ressonantemente
GP/PEBD1	M8-1	(S't)	2,68 (30 dB/década)	0,3731	CP120	24	
					ΔL_w - Modelo Empírico ajustado Schiavi (2005)	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Ressonantemente	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Localmente
	C1 (2 dias)	30,9	24	19	20		
PEBD1/GP	M8-2	(S't)	2,84 (30 dB/década)	0,3521	CP120	26	
					ΔL_w - Modelo Empírico ajustado Schiavi (2005)	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Ressonantemente	ΔL_w - Modelo Analítico Schiavi (2018) Reagindo Localmente
	C4 (2 dias)	24,3	26	21	22		
Composto	Calculado	29,0	(30 dB/década)	0,3626	25	19	20

Fonte: O Autor.

Foram obtidos os mesmos resultados de nível ponderado de redução do ruído de impacto por meio das medições em bancada com CP120 e mediante a estimativa

a partir dos ensaios de rigidez dinâmica. Houve uma diferença de desempenho da solução em função da ordem de colocação das mantas diferentes de 2 dB (ΔL_w) a mais para a configuração com PEBD1 por baixo de GP.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Nesta pesquisa, três diferentes materiais vibro-acústicos comercializados no Brasil para aplicação em sistemas de contrapiso flutuante foram avaliados experimentalmente quanto às propriedades mecânicas (compressibilidade e fluência à compressão constante), dinâmicas (rigidez dinâmica e parâmetros de amortecimento) e acústicas (nível de redução de aceleração vibratória). A partir dos resultados mensurados, foram adotados modelos empíricos, analíticos e estatísticos para a estimativa do nível de redução de ruído de impacto proporcionados pelos materiais em longo e curto prazo.

Em relação às propriedades dinâmicas, foram conduzidos dois procedimentos experimentais envolvendo testes com martelo de impacto, sendo uma metodologia normatizada (ISO 9052) [20] com ensaios para amostras intactas e após serem submetidas ao teste de compressibilidade; e um procedimento conduzido ao longo do tempo em bancada com a utilização de relógio comparador para aferição da variação da espessura. Quanto às propriedades de resistência mecânica, foi realizado um procedimento de ensaio normatizado (EN 1606) [24] para medição da fluência à compressão, e um método experimental para análise da compressibilidade das amostras, seguindo a norma EN 12431 [23]. Para os testes de redução da vibração em bancada reduzida, seguindo as condições normatizadas (ISO 16251-1) [11], um procedimento de ensaio foi conduzido para 3 dimensões de contrapiso flutuantes.

Além dos cinco métodos experimentais supracitados adotados na pesquisa, dois modelos de cálculo foram aplicados para estimativa da rigidez dinâmica ao longo do tempo: um considerando a formulação semi-empírica apresentada por Schiavi (2007), utilizando os resultados dos ensaios de fluência à compressão; e um modelo estatístico baseado no procedimento da norma EN 1606, utilizando os resultados experimentais de rigidez dinâmica ao longo do tempo em bancada com a utilização de relógio comparador.

Para estimativa do nível de desempenho acústico dos materiais, foram adotados dois modelos empíricos, sendo um que utiliza apenas a rigidez dinâmica como dado de entrada (Equação 19), e um que utiliza a rigidez dinâmica e o fator de qualidade da amostra (Equação 21). Também foi avaliado um modelo analítico que adota a rigidez dinâmica e o fator de perda total da amostra como parâmetros de entrada (Equações 22 e 23).

6.1 Conclusões sobre a metodologia

A aferição da rigidez dinâmica de mantas resilientes, conforme a metodologia descrita para a norma ISO 9052, não determina o período entre a preparação das amostras e a realização dos testes com martelo de impacto. É sabido que os valores deste parâmetro podem variar tanto devido à idade da amostra submetida ao carregamento constante ([27], [19], [18], [17], [9], [41], [44]) quanto devido às cargas externas acidentais ([27], [26]). Por esta razão, algumas amostras foram submetidas à avaliação em até 1 mês. Este período prolongado de ensaio permitiu avaliar o comportamento da rigidez dinâmica de uma mesma amostra ao longo do tempo, uma vez que, diferentemente das conclusões obtidas [41] e [44], em que todos os materiais avaliados apresentaram um crescimento deste parâmetro ao longo do tempo, algumas amostras apresentam uma redução da rigidez dinâmica nos últimos dias de ensaio, enquanto outras, tais como as amostras de PET, não apresentaram variação considerável ao longo do período de 31 dias de análise. Mesmo que uma das vantagens da aferição da rigidez dinâmica, como parâmetro indireto do desempenho de redução de ruído da amostra, consiste no rápido período de classificação, sua avaliação prolongada pode gerar limitações práticas, porém possíveis, diferentemente da avaliação em laboratório por meio da norma ISO 10140-8, que se tornaria inviável para um período de tempo maior.

A bancada elaborada para aferição simultânea da rigidez dinâmica e da espessura da amostra (mensurada por relógio comparador) ao longo do tempo, conforme apresentado na [Figura 17](#), permitiu avaliar a interação entre estes dois parâmetros, bem como com a temperatura e umidade. Uma vez que, para cada medição da rigidez dinâmica, um acelerômetro era fixado no centro geométrico da placa de aço, e os testes era conduzidos com martelo de impacto, a variação da espessura das amostras não pode ser classificada como sendo devido à fluência à compressão constante. No entanto, tais condições podem representar melhor as situações reais dos materiais em uso. Uma possível limitação deste método diz respeito à não adoção de camada de gesso entre os materiais avaliados e a placa de aço, conforme determinado pela norma ISO 9052. No entanto, os resultados obtidos utilizando esta bancada, apesar de apresentarem diferenças em relação aos valores medidos para os mesmos materiais por meio do procedimento normatizado, respeitaram a mesma tendência observada nos testes realizados segundo a norma: aumento da rigidez dinâmica ao longo do

tempo para o material PEBD2 e constância dos valores para PET. Desta forma, o método se mostrou prático e confiável para uma análise mais completa das propriedades dos materiais resilientes ao longo do tempo, não dispensando, porém, a necessidade de aferição individual dos parâmetros de rigidez dinâmica e fluência à compressão segundo as respectivas normas (ISO 9052 e EN 1606).

A fluência à compressão foi aferida simultaneamente para as 4 amostras, avaliadas em bancada única, conforme pode ser visualizado na [Figura 19](#). Considerando o longo período de análise (6 meses) e a disponibilidade de apenas quatro relógios comparadores, o procedimento adotado mostrou-se favorável para a comparação dos resultados para os diferentes materiais, submetidos às mesmas condições externas. Uma das limitações do teste, no entanto, foi a incapacidade de controlar a variação da umidade relativa do ar, o que provocou variações dos resultados das amostras de PEBD.

O método de avaliação da compressibilidade utilizando a máquina de compressão (MTS Criterion 45) permitiu aplicação com precisão do carregamento de 48 kN nas amostras de PEBD avaliadas ([Figura 21](#)), possibilitando a análise da rigidez dinâmica após a alta compressão imposta, semelhante aos estudos realizados por [27] e [32], atingindo assim um dos objetivos da pesquisa. Os resultados de compressibilidade, no entanto, não se demonstraram confiáveis por meio deste método, em decorrência das condições de descompressão total forçada pela máquina utilizada no teste entre cada carregamento, permitindo assim a recomposição do material elástico quando descomprimido.

Os resultados de nível de redução de aceleração obtidos por meio da bancada reduzida ([Figura 25](#)) apresentaram-se satisfatórios para os testes com contrapiso CP 120, diferentemente dos mensurados utilizando os tamanhos de contrapiso CP 80 e CP 50, em concordância com as sugestões de [32] e conclusões de [30]. Apesar das divergências verificadas nas baixas frequências (banda central de terço de oitava de 100 Hz ou inferior) e nas ressonâncias dos modos de flexão da bancada (bandas centrais de terço de oitava de 315 Hz e 800 Hz) em relação às curvas de redução de ruído estimadas por meio das propriedades dinâmicas das amostras (rigidez dinâmica e amortecimento), os níveis ponderados de redução (norma ISO 717-2) apresentaram boa aproximação. A amostra PET, no entanto, não demonstrou o mesmo comportamento, indicando que o método de avaliação em bancada reduzida pode possuir limitações para testes com materiais de composição estrutural de células abertas.

O modelo de cálculo para estimativa da variação da rigidez dinâmica, proposto por Schiavi (2007), a partir dos resultados do teste de fluência à compressão, permite uma estimativa do nível de desempenho da manta resiliente em longo prazo de forma simples, apesar de depender de um ensaio de longa duração. O método, no entanto, considera apenas a variação da espessura da amostra devido à compressão constante, o que pode não representar um caso real. Ademais, conforme verificado nos resultados com a manta PET, alguns materiais não apresentam uma relação direta entre a variação da espessura e da rigidez dinâmica. A estimativa adotada a partir da extrapolação dos resultados de rigidez dinâmica medidos ao longo, baseada na metodologia da norma EN 1606, por sua vez, apresenta-se promissora, uma vez que permite avaliar a correlação entre a espessura da amostra e a rigidez dinâmica ao longo do tempo. No entanto, não se pode afirmar uma regra geral de comportamento, sendo necessária a avaliação experimental de cada tipo de material e suas tendências.

O cálculo da redução de ruído por meio do modelo sem-empírico de Schiavi (2005) (Equação 21) demonstrou-se satisfatório quando comparado com os resultados medidos em bancada reduzida, e mesmo com os obtidos em laboratório (ISO 10140-8) para o caso do material PET, disponibilizado pelo fabricante. Já o modelo de Schiavi (2018), que considera o fator de perda da amostra, apresentou resultados de nível ponderado de redução bastante inferiores para todas as amostras, justificado pela amplificação da transmissão na frequência de ressonância calculada para o contrapiso flutuante, o que não ocorre no modelo simplificado de bancada reduzida.

6.2 Considerações quanto aos resultados

Os resultados de rigidez dinâmica conduzidos de acordo com a norma ISO 9052 não apresentaram o mesmo comportamento para os diferentes materiais. Para PEBD1, por exemplo, as duas amostras com 5 mm ensaiadas tiveram redução dos valores ao longo do tempo, reduzindo em até $5,3 \text{ MN/m}^3$ do terceiro para o sétimo dia de idade da amostra PEBD1-M4. O mesmo ocorreu para as amostras de 5 mm do material PEBD2, atingindo uma redução $8,8 \text{ MN/m}^3$ do 4º para o 14º dia para a amostra PEBD2-M4. No entanto, para a espécime PEBD2-M1, de 10 mm, o comportamento da rigidez dinâmica foi crescente, chegando a aumentar $6,5 \text{ MN/m}^3$ do primeiro ao 13º dia de idade. Para ambos materiais de PEBD, as respostas obtidas para mantas

de 10 mm após submetidas ao teste de compressibilidade foram, em média, $3 \text{ MN}/\text{m}^3$ maiores do que os resultados aferidos para espécimes intactas. As amostras de PET por sua vez, basicamente não sofreram alterações nos resultados de rigidez dinâmica medidos ao longo do tempo, mesmo com período de análise prolongada (31 dias). Já para o material GP, do 4º para o 8º dia, as rigidez dinâmica diminuiu uma para a amostra com 3 mm ($0,8 \text{ MN}/\text{m}^3$), e aumentou para as espécimes com 5 mm ($6,6 \text{ MN}/\text{m}^3$) e com 8 mm ($2,5 \text{ MN}/\text{m}^3$). Concluiu-se, portanto, que o comportamento da rigidez dinâmica de mantas resilientes ao longo do tempo depende tanto do tipo do material quanto da espessura da amostra, não apresentando necessariamente um comportamento crescente quando submetida à compressão constante, conforme observado por [41] e [44].

Os testes de fluência à compressão também apresentaram diferentes resultados para cada tipo de material. A amostra de GP com 5 mm, por exemplo, não apresentou variação mensurável da espessura ao longo do período de análise, não sendo possível a extrapolação em longo prazo. Já amostra PET, apesar de atingir a maior deformação total extrapolada para 13 anos (63,78 %), apenas 4,8 % é devido à fluência à compressão constante, sendo os outros 59 % da deformação após o carregamento inicial. As amostras PEBD1 e PEBD2, no entanto, apresentam quase a mesma porcentagem de deformação devido ao carregamento inicial e à fluência à compressão após 10 anos.

Os resultados de rigidez dinâmica estimados para 10 anos pelo método de Schiavi (2007) [9], que utiliza os resultados dos ensaios de fluência à compressão e de rigidez dinâmica, aferida em curto prazo, apresentam um crescimento de 3 a $4 \text{ MN}/\text{m}^3$ para os materiais avaliados, porém não conferem variação em termos de nível ponderado de redução de ruído (ΔL_w), exceto para a amostra de PET, que diminuiu 1 dB de ΔL_w para estimativa em 10 anos. No entanto, conforme ilustrado na [Tabela 27](#), este material não apresenta variação expressiva de rigidez dinâmica devido à diminuição de espessura. Portanto, a estimativa pelo modelo de Schiavi (2007) não proporciona variação do desempenho acústico às amostras avaliadas. Já para o método de extrapolação dos resultado da rigidez dinâmica, avaliada por 44 dias, é obtida uma variação de 1 dB do ΔL_w para estimativa após 3 anos e 7 meses.

A aferição do nível de redução de ruído proporcionado pelas mantas resiliente por meio do ensaio em bancada reduzida apresentou-se coerente em relação aos resultados estimados pelo método de Schiavi (2005) [17], a partir dos resultados

de rigidez dinâmica e fator de qualidade das amostras. Para os materiais PEBD1 e PEBD2 com 10 mm, bem como para GP com 3 mm, os resultados de ΔL_w aferidos foram iguais aos estimados pelo modelo empírico citado. Para as amostras PEBD1 e PEBD2 de 5 mm e GP de 5 e 8 mm, uma diferença de apenas 1 dB foi verificada. Já para o material PET, houve uma grande discrepância entre os resultados medido ($\Delta L_w = 29$) e estimados ($\Delta L_w = 24$). Uma das razões para esta evidência consiste na baixa rigidez dinâmica do material quando não é considerada a contribuição promovida pelo ar contido nos poros da manta de células abertas, situação que pode ocorrer na bancada reduzida, uma vez que o material se mantém com as bordas livres, permitindo o fluxo de ar.

6.3 Sugestões e perspectivas futuras

Neste trabalho, buscou-se aplicar e avaliar metodologias de análise do comportamento de sistemas de contrapiso flutuante em longo prazo, principalmente a partir do estudo das mantas resilientes adotadas, ou da medição destes sistemas em modelo de bancada laje reduzida.

A avaliação ao longo do tempo das propriedades dinâmicas das mantas resilientes de forma simultânea à aferição da variação da espessura, conforme adotado nesta pesquisa, com o devido controle das condições de temperatura e umidade, pode representar uma rica metodologia para abordagem do problema.

O resultado de interesse acústico, no entanto, vai além da análise das propriedades físicas das mantas vibro-acústicas. Desta forma, visto que a bancada de laje reduzida apresentou-se satisfatória para o estudo de soluções de contrapiso flutuante, uma avaliação ao longo do tempo utilizando esta metodologia de ensaio pode viabilizar conclusões promissoras no que diz respeito à durabilidade destes sistemas.

REFERÊNCIAS

- [1] WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Environmental Noise Guidelines for the European Region**. DK-2100 Copenhagen, Denmark, 2018. ISBN 978928905356-3
- [2] RESOLUÇÃO CONAMA. **Dispõe sobre critérios de padrões de emissão de ruídos decorrentes de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política**. Resolução n 1, 8 de março de 1990. Publicada no DOU nº 63, de 2 de abril de 1990, Seção 1, página 6408.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151:2000 - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade**. Rio de Janeiro, 2000.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152:2017 - Níveis de Pressão Sonora em Ambientes Internos a Edificações**. Rio de Janeiro, 2017.
- [5] CARNEIRO, W. de A. M. **Perturbações Sonoras em Edificações Urbanas**. 4. ed. Belo Horizonte: DelRey, 2014.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575:2013 - Edificações Habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.
- [7] LEE, Y. J. KIM, J. M. **Deflection of Resilient Materials for Reduction of Floor Impact Sound**. The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 612608, 2014.
- [8] HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. Ed. São Paulo: Pearson, 2007.
- [9] SCHIAVI, A. PAVONI A. CORALLO M. **Acoustical Performance Characterization of Resilient Materials used under Floating Floors in Dwellings**. Acta Acustica United with Acustica, vol. 93, pp 477-485, 2007.
- [10] EUROPEAN STANDARD **ISO 10140-8:2010 - Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 8: Laboratory**

measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a heavyweight standard floor. 2010.

- [11] EUROPEAN STANDARD **ISO 16251-1:2014 - Acoustics - Laboratory measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a small floor mock-up - Part 1: Heavyweight compact floor.** 2014.
- [12] FORET, R. CHÉNÉ, J. B. CARTER, C. G. **A comparison of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings measured using ISO 140-8 and ISO/CD 16251-1.** Forum Acusticum, Aalborg, Denmark, 2011.
- [13] VÉR, I L. **Impact Noise Isolation of Composite Floors** The Journal of the Acoustical Society of America 50, 1043 (1971); doi: 10.1121/1.1912726.
- [14] C. HOPKINS. **Sound Insulation** 1. Edition, Elsevier, UK, 2007. ISBN: 9780 7506 6526 1
- [15] H. CREMER, L. CREMER. **Theory of Impact Noise Excitation** Frequenz 2, 61, German.
- [16] EUROPEAN STANDARD **ISO 717-2:2013 - Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Impact sound insulation.** 2013.
- [17] SCHIAVI, A. PAVONI A. RUSSO F. **Estimation of Acoustical Performance of Floating Floors from Dynamic Stiffness of Resilient Layers.** Building Acoustic, Volume 12, Number 2, Pages 99 - 113, 2005.
- [18] NEVES, A. ANTÓNIO, J. NOSSA, A. **Resultados experimentais da rigidez dinâmica de materiais usados sob pavimentos flutuantes.** Acústica 2008, Coimbra, Portugal, 2008.
- [19] KIM, K. W. YEON, J. O. YANG, K. S. KIM, M. J. **Influence of Loading Time of a Load Plate and Sample Size on the Measurement of Physical Properties of Resilient Materials** Archives of Acoustics Vol. 40, No. 2, pp. 159-167, 2015.
- [20] EUROPEAN STANDARD **ISO 9052-1:1989 - Acoustics - Method for the determination of dynamics stiffness - Part 1: Materials used under floating floors in dwellings.** 1989.

- [21] CREMER, L., HECKEL, M. UNGAR, E.E. **Structure-Borne Sound** 2nd, Ed, Sprinter-Verlag, Berlin, 1988.
- [22] HARTOG, D. J. P. **Mechanical vibrations**. New York: McGraw-Hall Book Company; 1947.
- [23] EUROPEAN STANDARD **EN 12431/2000: Thermal insulating products for building application - Determination of thickness for floating floor insulating products**. 2000.
- [24] EUROPEAN STANDARD **EN 1606/1999: Thermal insulating products for building application - Determination of compressive creep** 1999.
- [25] EUROPEAN STANDARD **BS EN 12354-2:2000 - Building acoustics estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements Part 2: Impact sound insulation between rooms** 2000.
- [26] DIKAVICIUS, V. MISKINIS, K. **Change of Dynamic Stiffness of Open and Closed Cell Resilient Materials after Compressibility Test**. Materials Science. MEDZIAGOTYRA, Vol. 15, No. 4, 2009. ISSN 1392-1320.
- [27] 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 102 (2016) 226-232.
- [28] EUROPEAN STANDARD **ISO 10140-1:2016 - Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 1: Application rules for specific products** 2016.
- [29] EUROPEAN STANDARD **ISO 10140-3:2010/Amd.1:2015 - Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 3: Measurement of impact sound insulation AMENDMENT 1** 2015.
- [30] PEREIRA, A. GODINHO, L. MATEUS, D. RAMIS, J. BRANCO, F. G. **Assessment of a simplified experimental procedure to evaluate impact sound reduction of floor coverings** Applied Acoustics 79 92-103, 2014.
- [31] EUROPEAN STANDARD **ISO 140-8:1997 Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 8: Laboratory measu-**

rements of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a heavyweight standard floor 1997.

- [32] MISKINIS, K. DIKAVICIUS, V. RAMANAUSKAS, J. NORVAISIENE, R. **Dependence between Reduction of Weighted Impact Sound Pressure Level and Specimen Size of Floating Floor Construction.** Materials Science. MEDZIA-GOTYRA, Vol. 18, No. 1, 2012. ISSN 1392-1320.
- [33] EUROPEAN STANDARD **ISO 16283-2: 2018 - Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Impact sound insulation** 2018.
- [34] EUROPEAN STANDARD **BS EN ISO 10140-5: 2010 A1:2014 - Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 5: Requirements for test facilities and equipment** 2010.
- [35] SCHIAVI, A. **Improvement of impact sound insulation: A constitutive model for floating floors** Applied Acoustics 129 (2018) 64-71.
- [36] STEWART, M. A. MACKENZIE, R. K **IA Comparison of the Predicted Dynamic Stiffness of Resilient Layers with Calculated Values Obtained From the Measured Acceleration Response** Building Acoustics, VOL. 7, NO. 4 (2000).
- [37] SCHIAVI, A. PAVONI, A. RUSSO, F. CORALLO, M. **Dynamic stiffness of resilient materials: some consideration on the proposed revision of ISO 9052-1 Standard** Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010, Sydney, Australia (2010).
- [38] HARRISON, M. SYKES, A. O. MARTIN, M. **Wave effect in Isolation Mounts** The Journal of the Acoustical Society of America 24, (1952).
- [39] FINDLEY, W. N **Creep characteristic of plastic** Symposium on Plastics, American Society, Testing Materials, (1944).
- [40] KIM, K. W. SHIN, H. K. JEONG, A. Y. YANG, K. S. **Physical properties of resilient materials for floor impact sound reduction** 24^o International Congress of Sound and Vibration. London, 23-27 July 2017.

- [41] LEE, Y. J. KIM, M. J. KIM, J, KIM, J. **Evaluation of the long-term sound reduction performance of resilient materials in floating floor systems** Journal of Sound and Vibration. 366 (2016), pp 199-210.
- [42] SCHIAVI, A. PAVONI, A. RUSSO, F. CORALLO, M. **The effect of damping in resilient materials used in floating floors on impact sound insulation** 22^o International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy, 12-16 July (2015).
- [43] CHO, T. **Experimental and numerical analysis of floating floor resonance and its effect on impact sound transmission** Journal of Sound and Vibration, 332 (2013) 6552-6561.
- [44] KIM, C. HONG, Y. K. LEE, J. Y. **Long-term dynamic stiffness of resilient materials in floating floor systems** Construction and Building Materials 133 (2017) 27-38

7 APÊNDICE

Tabela 37: Valores de temperatura e umidade aferidos em cada leitura do teste de fluência à compressão

Tempo (horas)	Temperatura (°C)	Umidade (%)
144	19,4	76,0
192,5	19,3	75,0
265	19,4	75,0
312	19,4	78,0
433	19,3	74,0
530	19,5	76,0
648	19,6	76,0
798	19,9	67,0
931	20,7	81,0
1107	19,9	68,0
1296	20,8	83,0
1445	19,2	72,0
1630,5	19,8	72,0
2302	19,8	65,0
2778,5	18,9	71,0
2952	19,7	71,0
3171	19,4	75,0
3189	19,4	78,0
3403	19,6	71,0
3666	20,3	82,0
4033	19,9	80,0
4345	27,2	65,8
4460,5	21,7	66,7

Fonte: autor

Tabela 38: Parâmetro estatísticos obtidos a partir da fluência à compressão de PEBD1 - 168 dias de ensaio

PEBD1 (dados até 168 dias de ensaio)										
Média aritmética dos valores log t (t em horas)	Média aritmética dos valores log Xct (Xct em mm)	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log t	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log Xct	Soma dos desvios	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de determinação	Coefficiente de correlação	Inclinação da curva	Ponto de intercepção da curva na ordenada
Xm	Ym	Qx	Qy	Qxy	Sr ²	Sr	r ²	r	b	a
3,04357	-0,61574	4,13050	0,18226	0,76082	0,00222	0,04708	0,76890	0,87687	0,18420	-1,17635

Fonte: autor

Tabela 39: Resultados mensurados de Fluência à compressão - Amostra PEBD2

Amostra PEBD2					
Tempo (horas)	Log t	Deformação Xt (mm)	Deformação Relativa et (%)	Fluência à Compressão Xct (mm)	Log Xct
144	2,1584	1,046	10,463	0,31	-0,5157
192,5	2,2844	1,062	10,623	0,32	-0,4935
265	2,4232	1,062	10,623	0,32	-0,4935
312	2,4942	1,089	10,893	0,35	-0,4584
433	2,6365	1,101	11,013	0,36	-0,4437
530	2,7243	1,073	10,733	0,33	-0,4789
648	2,8116	1,116	11,163	0,38	-0,4260
798	2,9020	1,141	11,413	0,40	-0,3979
931	2,9689	1,121	11,213	0,38	-0,4202
1107	3,0441	1,161	11,613	0,42	-0,3768
1296	3,1126	1,116	11,163	0,38	-0,4260
1445	3,1599	1,170	11,703	0,43	-0,3675
1630,5	3,2123	1,156	11,563	0,42	-0,3820
2302	3,3621	1,171	11,713	0,43	-0,3665
2778,5	3,4438	1,191	11,913	0,45	-0,3468
2952	3,4701	1,171	11,713	0,43	-0,3665
3171	3,5012	1,161	11,613	0,42	-0,3768
3189	3,5037	1,151	11,513	0,41	-0,3872
3403	3,5319	1,191	11,913	0,45	-0,3468
3666	3,5642	1,186	11,863	0,45	-0,3516
4033	3,6056	1,209	12,093	0,47	-0,3298
4345	3,6380	1,196	11,963	0,46	-0,3420
4460,5	3,6494	1,204	12,043	0,46	-0,3344

Fonte: autor

Tabela 40: Resultados mensurados de Fluência à compressão - Amostra PET

Amostra PET					
Tempo (horas)	Log t	Deformação Xt (mm)	Deformação Relativa ϵ_t (%)	Fluência à Compressão Xct (mm)	Log Xct
144	2,1584	5,970	59,70	0,070	-1,1549
192,5	2,2844	5,980	59,80	0,080	-1,0969
265	2,4232	5,980	59,80	0,080	-1,0969
312	2,4942	5,985	59,85	0,085	-1,0706
433	2,6365	5,993	59,93	0,093	-1,0315
530	2,7243	6,000	60,00	0,100	-1,0000
648	2,8116	6,010	60,10	0,110	-0,9586
798	2,9020	6,010	60,10	0,110	-0,9586
931	2,9689	6,010	60,10	0,110	-0,9586
1107	3,0441	6,030	60,30	0,130	-0,8861
1296	3,1126	6,030	60,30	0,130	-0,8861
1445	3,1599	6,055	60,55	0,155	-0,8097
1630,5	3,2123	6,040	60,40	0,140	-0,8539
2302	3,3621	6,050	60,50	0,150	-0,8239
2778,5	3,4438	6,060	60,60	0,160	-0,7959
2952	3,4701	6,060	60,60	0,160	-0,7959
3171	3,5012	6,070	60,70	0,170	-0,7696
3189	3,5037	6,070	60,70	0,170	-0,7696
3403	3,5319	6,070	60,70	0,170	-0,7696
3666	3,5642	6,072	60,72	0,172	-0,7645
4033	3,6056	6,096	60,96	0,196	-0,7077
4345	3,6380	6,102	61,02	0,202	-0,6946
4460,5	3,6494	6,110	61,10	0,210	-0,6778

Fonte: autor

Tabela 41: Parâmetro estatísticos obtidos a partir da fluência à compressão de PET - 123 e 168 dias de ensaio

PET (dados até 123 dias de ensaio)										
Média aritmética dos valores log t (t em horas)	Média aritmética dos valores log Xct (Xct em mm)	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log t	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log Xct	Soma dos desvios	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de determinação	Coefficiente de correlação	Inclinação da curva	Ponto de intercepção da curva na ordenada
Xm	Ym	Qx	Qy	Qxy	Sr ²	Sr	r ²	r	b	a
2,88803	-0,94862	2,49692	0,20954	0,71130	0,00049	0,02222	0,96701	0,98337	0,28487	-1,77134
PET (dados até 168 dias de ensaio)										
Média aritmética dos valores log t (t em horas)	Média aritmética dos valores log Xct (Xct em mm)	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log t	Soma do quadrado dos desvios referentes aos valores de log Xct	Soma dos desvios	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de determinação	Coefficiente de correlação	Inclinação da curva	Ponto de intercepção da curva na ordenada
Xm	Ym	Qx	Qy	Qxy	Sr ²	Sr	r ²	r	b	a
3,04357	-0,90280	4,13050	0,35359	1,19434	0,00043	0,02083	0,97669	0,98828	0,28915	-1,78285

Fonte: autor

Tabela 42: Resultados PEBD2-M3 em log - Bancada Rigidez x Fluência x Tempo

PEBD2-M3						
idade em horas	log t	(log t) ²	log Xct	log(Xct) ²	log s'	log(s') ²
24	1,3802	1,9050	-0,5539	0,3068	1,5177	2,3033
48	1,6812	2,8266	-0,5096	0,2597	1,5719	2,4710
72	1,8573	3,4497	-0,4958	0,2458	1,5480	2,3962
168	2,2253	4,9520	-0,3987	0,1589	1,5798	2,4959
192	2,2833	5,2135	-0,3879	0,1505	1,5719	2,4710
216	2,3345	5,4497	-0,4041	0,1633	1,5876	2,5204
240	2,3802	5,6654	-0,3879	0,1505	1,5798	2,4959
312	2,4942	6,2208	-0,3592	0,1290	1,6106	2,5940
336	2,5263	6,3824	-0,3592	0,1290	1,5953	2,5451
384	2,5843	6,6788	-0,3360	0,1129	1,6106	2,5940
408	2,6107	6,8155	-0,3436	0,1180	1,6030	2,5695
504	2,7024	7,3031	-0,3562	0,1269	1,6030	2,5695
600	2,7782	7,7181	-0,3149	0,0991	1,6181	2,6181
1056	3,0237	9,1425	-0,3149	0,0991	1,5953	2,5451

Fonte: Os Autores

Tabela 43: Resultado estimados do nível de redução do ruído de impacto - Amostra PEBD1-M10.

Nível de Redução de Ruído Estimado para $s' = 36,4 \text{ MN/m}^3$	
f_1 (Hz)	ΔL (dB)
100	-0,8
125	2,1
160	5,3
200	8,2
250	11,1
315	14,1
400	17,2
500	20,1
630	23,1
800	26,3
1000	29,2
1250	32,1
1600	35,3
2000	38,2
2500	41,1
3150	44,1
Rigidez Dinâmica da Manta de PEBD1 10mm - 4 dias	36,43 MN/m^3
Massa por área do contrapiso (4mm)	82,04 kg/m^2
Frequência Natural de Ressonância	106,62 Hz

Fonte: O Autor

Tabela 44: Tabela de Cálculo do Nível ponderado de Redução de Ruído de Impacto - Amostra PEBD1-M10 com CP120.

Manta acústica PEBD1 de 10mm - CP120							
f1 (Hz)	$\Delta L = L_{n,o}$ - L_n (dB)	Piso de Referência (ISO 717-2)	$L_{n,r,o} - \Delta L$	Valores de Referência (ISO 717-2)	shift	Desvio positivo (4) - [(5) + (6)]	Valores de Referência - shift
	Redução	$L_{n,r,o}$ (dB)	$L_{n,r}$ (dB)	dB			
1	2	3	4	5	6	7	8
100	9,9	67	57,1	62	-6	1,1	56
125	13,9	67,5	53,6	62	-6	0,0	56
160	5,2	68	62,8	62	-6	6,8	56
200	7,0	68,5	61,5	62	-6	5,5	56
250	15,7	69	53,3	62	-6	0,0	56
315	7,0	69,5	62,5	62	-6	6,5	56
400	9,5	70	60,5	61	-6	5,5	55
500	26,4	70,5	44,1	60	-6	0,0	54
630	28,4	71	42,6	59	-6	0,0	53
800	17,0	71,5	54,5	58	-6	2,5	52
1000	28,3	72	43,7	57	-6	0,0	51
1250	40,0	72	32,0	54	-6	0,0	48
1600	39,2	72	32,8	51	-6	0,0	45
2000	42,7	72	29,3	48	-6	0,0	42
2500	49,4	72	22,6	45	-6	0,0	39
3150	54,1	72	17,9	42	-6	0,0	36
Sum:						27,96	< 32,00
$\Delta L_w =$						78 - 54	24

Fonte: O Autor