



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA COMPRESSÃO DE PLACAS CIMENTÍCIAS
COM RESÍDUO DE EVA COMO MATERIAL RESILIENTE ALTERNATIVO NO
ISOLAMENTO AO RUÍDO DE IMPACTO.**

Fabianne Azevedo dos Santos

João Pessoa – Paraíba
Agosto – 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA COMPRESSÃO DE PLACAS CIMENTÍCIAS
COM RESÍDUO DE EVA COMO MATERIAL RESILIENTE ALTERNATIVO NO
ISOLAMENTO AO RUÍDO DE IMPACTO.**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba para a obtenção do título de doutora em Engenharia Civil e Ambiental, área de concentração Estruturas e Materiais, linha de pesquisa Tecnologia dos Materiais e Adequação Ambiental, sob a orientação do Professor Dr. Alúísio Braz de Melo e co-orientação do Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel.

Fabianne Azevedo dos Santos

João Pessoa – Paraíba
Agosto de 2020

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237a Santos, Fabianne Azevedo Dos.

Avaliação da influência da compressão de placas
cimentícias com resíduo de EVA como material resiliente
alternativo no isolamento ao ruído de impacto. /
Fabianne Azevedo Dos Santos. - João Pessoa, 2020.
139 f.

Orientação: Aluísio Braz de Melo.
Coorientação: Roberto Leal Pimentel.
Tese (Doutorado) - UFPB/Tecnologia.

1. Material resiliente; Influência da compressão; EVA.
I. de Melo, Aluísio Braz. II. Pimentel, Roberto Leal.
III. Título.

UFPB/BC

**“AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA COMPRESSÃO DE PLACAS CIMENTÍCIAS COM RESÍDUO DE EVA
COMO MATERIAL RESILIENTE ALTERNATIVO NO ISOLAMENTO AO RUÍDO DE IMPACTO”**

FABIANNE AZEVEDO DOS SANTOS

Tese aprovada em 27 de março de 2020

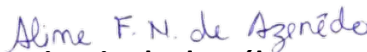
Período Letivo: 2019.2



Prof. Dr. Aluísio Braz de Melo – UFPB
Orientador



Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel – UFPB
Coorientador



Profª. Drª. Aline Figueiredo da Nóbrega Azeredo - UFCG
Examinadora Interna



Profª. Drª. Claudia Coutinho Nóbrega - UFPB
Examinadora Interna



Profª. Drª. Bianca Carla Dantas de Araújo - UFRN
Examinadora Externa



Profª. Drª. Maria Fernanda de Oliveira - UNISINOS
Examinadora Externa

João Pessoa/PB
2020

AGRADECIMENTOS:

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus a oportunidade de cursar o Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental na Universidade Federal da Paraíba, na qual um dia eu tanto sonhei em estudar. E desejo que outros sonhos possam ser realizados dentro das instituições de ensino do país.

Aos meus pais, Fábio Silva e Rejane Azevedo, e à minha irmã Anna Beatriz, agradeço o apoio de sempre. Aos meus familiares, em especial à minha tia Regina pelo incentivo e aos meus avós (*in memoriam*), mas sei que continuam torcendo por mim onde quer que estejam.

Este trabalho não seria possível sem a crítica e orientação dos professores Dr. Aluísio Braz de Melo e do Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel aos quais expresso meu sincero agradecimento e admiração ao longo desses nove anos de convivência e aprendizado. Aproveito e peço desculpa por alguma falha cometida. Estendo os agradecimentos aos funcionários do LABEME-CT-UFPB, que me ajudaram na resolução de diversas questões durante a pesquisa, especialmente a Sr. Sebastião, Delby, Mizo, Beto, Otoniel. E os amigos Ricardo Carvalho e Zito que deram literalmente uma força para a execução dos ensaios.

Agradeço também as professoras Dra. Elisângela Pereira, Profa. Dra. Aline Azeredo, Profa. Dra. Bianca Araújo, Profa. Dra. Claudia Coutinho, Profa. Dra. Maria Fernanda Oliveira e ao Prof. Dr. Gibson Meira por terem aceitado o convite de fazerem parte das bancas examinadoras e consequentemente por suas contribuições através das sugestões.

Obrigada aos meus colegas da UFPB por ajudarem a tornar a jornada mais fácil, em especial, à Gabryela Ferreira, Mariane Carvalho, Mellyne Palmeira, Ana Beatriz Queiroga, Amanda Queiroga, Jéssica Laís, André Siqueira, Pablo Lacerda, Leilane Aguiar, Adriane Oliveira, Rafaelle Finotti, Gabriel Soares, Felipe Feliciano, Aretuza Karla e Kevin Thomas. E obrigada pelas palavras de incentivo das minhas amigas da graduação (Design de Interiores 2005.1 - IFPB) e dos meus colegas de trabalho do IFPB.

Finalmente ao PPEGAM-UFPB, pelos meios disponibilizados para o desenvolvimento e conclusão do trabalho, o meu muito obrigada!

Avaliação da influência da compressão de placas cimentícias com resíduo de EVA como material resiliente alternativo no isolamento ao ruído de impacto.

RESUMO

Os ruídos de impactos nos pisos de edifícios multipavimentos tem se caracterizado como algo que compromete, cada vez mais, a convivência entre vizinhos de unidades autônomas sobrepostas. As medidas práticas para enfrentar tal problemática recorrem a execução de pisos flutuantes, ainda durante as obras do edifício, no qual se utiliza um material resiliente entre a laje estrutural e o contrapiso. A problemática em foco no presente estudo está centrada na alteração da rigidez dinâmica do material resiliente, durante sua vida útil, e na possível variação da capacidade de isolamento acústico do sistema de piso. O objetivo foi avaliar a influência da compressão no material resiliente proposto com placas cimentícias aglomeradas com resíduo de EVA e o grau de comprometimento do seu desempenho acústico em sistema de piso flutuante, quanto ao isolamento dos ruídos de impacto, a partir da observação da sua característica de rigidez dinâmica. Os estudos experimentais avaliaram dois materiais resilientes diferentes, sendo comparadas amostras alternativa e comercial, ambas confeccionadas com aproveitamento de resíduos: de EVA da indústria de calçados, transformados em agregados leves e utilizados na produção de placas cimentícias (PEVA1,8); e a manta composta por fibras recicladas a partir de resíduos de PET (MantaPET). O destaque das análises é para a placa PEVA1,8, produzida em laboratório, através de um processo diferente de moldagem, visando obter características adequadas para um material resiliente alternativo. A avaliação desses materiais baseou-se num procedimento de influência da compressão, até três anos com o material resiliente confinado entre duas placas (simulação do material entre laje e contrapiso), e numa estimativa de comportamento para até dez anos, buscando relacionar o desempenho acústico e a vida útil, quando aplicados em sistemas de pisos flutuantes. Os indicadores adotados foram rigidez dinâmica e isolamento ao ruído de impacto, com avaliações parciais até 3 anos (a cada 12 meses), sendo uma das amostras com placas PEVA1,8 avaliada sem interromper o processo de compressão nos três anos. Os ensaios acústicos com os materiais resilientes foram realizados numa câmara que contém uma laje pré-moldada convencional. Os procedimentos de análise adotados nos testes de ruído de impacto no sistema de piso, de rigidez dinâmica e de fluência à compressão dos materiais resilientes se apoiaram em normas vigentes. A variação da capacidade de isolamento acústico inicial da placa PEVA1,8 foi de apenas 1 dB (61 dB/60 dB) após três anos de compressão no conjunto, mantendo a mesma classificação de desempenho intermediário, segundo a NBR 15575:2013, enquanto a sua rigidez dinâmica variou de 20,0 MN/m³ para 17,7 MN/m³ e para 13 MN/m³, quando não interrompeu a compressão. Ou seja, ao longo de três anos, a placa PEVA1,8 tende a perder rigidez, mas praticamente sem correspondência com aumento no isolamento acústico. A MantaPET variou sua rigidez dinâmica de 2 MN/m³ para 3,5 MN/m³ após dois anos de influência da compressão. O fato notável é que enquanto a placa PEVA1,8 tende a perder rigidez durante o uso ao longo do tempo, a MantaPET tende a aumentar sua rigidez, embora tal manta ainda se mantenha bastante eficiente na capacidade de isolamento acústico. Na estimativa de comportamento para dez anos, foi possível verificar uma deformação menor para PEVA1,8 (média de 0,73 mm; 3,42 %), comparado com a MantaPET (média de 1,61 mm; 20,15 %), bem como se confirmaram as tendências semelhantes relativas às variações da rigidez dinâmica: redução para PEVA1,8 e aumento para MantaPET. Contudo, tais estimativas, calculadas com base em modelos teóricos, mostraram que não se teria comprometimento na capacidade de isolamento de ambos os materiais resilientes estudados, depois de dez anos de aplicados em piso flutuante. Logo, pode-se afirmar que placa PEVA1,8 não possui a mesma eficiência de isolamento ao ruído de impacto no piso, comparado com a MantaPET (56 dB), mas a placa tem potencial para ser utilizada como material resiliente em sistemas de piso flutuantes, uma vez que em sua composição o EVA, em combinação com cimento Portland, confere uma interessante característica, que devido à pouca deformação das placas ao longo do tempo, pode propiciar maior estabilidade para suportar o peso dos materiais adicionados sobre elas, após a execução do piso flutuante.

Palavras-chave: Material resiliente; Influência da compressão; EVA; Ruído de Impacto; Rigidez dinâmica.

Evaluation of the influence of compression of cements boards with EVA waste as an alternative resilient material in the isolation to impact noise.

ABSTRACT

The noise of impacts on the floors of multi-floor buildings has been characterized as something that increasingly compromises the coexistence between neighbors of overlapping autonomous units. The practical measures to face this problem resort to the execution of floating floors, even during the works of the building, in which a resilient material is used between the structural slab and the subfloor. The problem in focus in the present study is centered on changing the dynamic stiffness of the resilient material, during its useful life, and on the possible variation of the acoustic insulation capacity of the floor system. The objective was to evaluate the influence of compression on the proposed resilient material with cements boards agglomerated with EVA waste and the degree of impairment of its acoustic performance in a floating floor system, regarding the isolation of impact noise, based on the observation of its characteristic of dynamic stiffness. The experimental studies evaluated two different resilient materials, comparing alternative and commercial samples, both made using waste: EVA from the shoe industry, transformed into light aggregates and used in the production of cements boards (PEVA1,8); and the blanket composed of fibers recycled from PET waste (MantaPET). The highlight of the analyzes is for the PEVA1,8 boards, produced in the laboratory, through a different molding process, in order to obtain adequate characteristics for an alternative resilient material. The evaluation of these materials was based on a procedure of influence of the compression, up to three years with the resilient material confined between two boards (simulation of the material between slab and subfloor), and on a behavior estimate for up to ten years, seeking to relate the acoustic performance and service life when applied to floating floor systems. The indicators adopted were dynamic stiffness and impact noise isolation, with partial evaluations up to 3 years (every 12 months), one of the samples with PEVA1,8 plates being evaluated without interrupting the compression process in the three years. The acoustic tests with the resilient materials were carried out in a chamber containing a conventional precast slab. The analysis procedures adopted in the tests of impact noise in the floor system, dynamic stiffness and creep to compression of resilient materials were supported by current standards. The variation in the initial acoustic insulation capacity of the PEVA1,8 board was only 1 dB (61 dB / 60 dB) after three years of compression in the set, maintaining the same intermediate performance classification, according to NBR 15575: 2013, while the its dynamic stiffness varied from 20,0 MN / m³ to 17,7 MN / m³ and to 13 MN / m³, when it did not interrupt the compression. That is, over three years, the PEVA1,8 board tends to lose rigidity, but practically unmatched with an increase in sound insulation. MantaPET varied its dynamic stiffness from 2 MN / m³ to 3,5 MN / m³ after two years of compression influence. The notable fact is that while the PEVA1,8 board tends to lose rigidity during use over time, MantaPET tends to increase its rigidity, although such a blanket still remains quite efficient in its sound insulation capacity. In the behavior estimate for ten years, it was possible to verify a smaller deformation for PEVA1,8 (average of 0,73 mm; 3,42%), compared to MantaPET (average of 1,71 mm; 20,15%), as well as similar trends regarding variations in dynamic stiffness were confirmed: reduction to PEVA1,8 and increase to MantaPET. However, such estimates, calculated based on theoretical models, showed that the insulation capacity of both resilient materials studied would not be compromised after ten years of application on floating floors. Therefore, it can be said that PEVA1,8 does not have the same insulation efficiency to impact noise on the floor, compared to MantaPET (56 dB), but the board has the potential to be used as a resilient material in floating floor systems, since in its composition, EVA, in combination with Portland cement, gives an interesting characteristic, which due to the little deformation of the plates over time, can provide greater stability to support the weight of the materials added on them, after the execution of the floating floor.

Keywords: Resilient material; Influence of compression; EVA; Impact Noise; Dynamic stiffness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 –	Sons graves e agudos	20
Figura 02 –	Sinal sonoro dos ruídos	23
Figura 03 –	Vibrações propagadas pelas estruturas (parede e laje)	27
Figura 04 –	Esquema de piso flutuante	30
Figura 05 –	Equivalente mecânico de um piso flutuante	31
Figura 06 –	Máquina de Impacto	33
Figura 07 –	Comparação entre os critérios brasileiros de desempenho acústico para isolamento de ruído aéreo de piso de alguns países e os resultados dos ensaios.	35
Figura 08 –	Configuração do teste	39
Figura 09 –	Sistema de medição proposto	40
Figura 10 –	Placa do tipo EVA_ar2,5 desenvolvida por Santos (2013)	44
Figura 11 –	Método de função de transferência de feixe	45
Figura 12 –	Característica morfológica de acordo com o percentual de EVA	47
Figura 13 –	Frequência de Ressonância para raspas de pneus não compactados (amostra A) em t0 (a) e t = 210 dias (b).	55
Figura 14 –	Frequência de Ressonância para resíduos de fibras têxteis (amostra B) em t0 (a) e t = 210 dias (b).	55
Figura 15 –	Rigidez dinâmica da espuma laminada em alta faixa de frequência.	59
Figura 16 –	Ábaco para estimativa do nível de pressão de ruído de impacto no piso	60
Figura 17 –	Métodos utilizados para a obtenção da rigidez dinâmica	64
Figura 18 –	Teste de Fluência a compressão	66
Figura 19 –	Placa PEVA1,8_B nas dimensões 20 cm x 20 cm	67
Figura 20 –	Característica morfológica de acordo com o percentual de EVA	68
Figura 21 –	Amostra de MantaPET cortada nas dimensões 20 cm x 20 cm	69
Figura 22 –	Fluxograma do ensaio de Ruído de Impacto	69
Figura 23 –	Fluxograma do ensaio de rigidez dinâmica	70
Figura 24 –	Resíduos de EVA coletados em forma de retalhos	71
Figura 25 –	Trituração do resíduo de EVA	72
Figura 26 –	Forma metálica utilizada para moldagem das placas	72
Figura 27 –	Régua para nivelamento	73
Figura 28 –	Aplicação de carga no conjunto com a prensa hidráulica	75
Figura 29 –	Aplicação da resina na placa cimentícia com EVA	76
Figura 30 –	Moldagem das placas de concreto	77
Figura 31 –	Conjunto para simular o sistema de piso flutuante	77
Figura 32 –	Localização dos protótipos no LABEME - UFPB	78
Figura 33 –	Desenho esquemático da localização do protótipo 1	79
Figura 34 –	Pavimento inferior e superior do protótipo 1	79
Figura 35 –	Corte transversal (AA) e longitudinal (BB) do protótipo 1	80
Figura 36 –	Ensaio simplificado com a máquina de impacto	81
Figura 37 –	Posicionamento do analisador acústico	81
Figura 38 –	Aparelhagem para medição do tempo de reverberação	82
Figura 39 –	Planilha do ensaio de Tempo de Reverberação	84
Figura 40 –	Exemplo de resultados do ensaio de Ruído de Fundo	84
Figura 41 –	Exemplo resultado ruído de impacto para a primeira posição da máquina	85
Figura 42 –	Confrontação da curva padrão e a do ensaio da amostra REF.	87
Figura 43 –	Execução do teste de rigidez dinâmica na amostra PEVA1,8 – 1ª tentativa	89
Figura 44 –	Exemplo do teste rigidez dinâmica – 2ª tentativa	90
Figura 45 –	Exemplo do teste de rigidez dinâmica: terceira tentativa	91
Figura 46 –	Equipamentos para aquisição de sinal da terceira tentativa	91
Figura 47 –	Equipamentos para ensaio de Rigidez Dinâmica – quarta tentativa	92
Figura 48 –	Conjuntos com cargas estáticas	93
Figura 49 –	Amostras do ensaio de fluência a compressão	96
Figura 50 –	Medição realizada com paquímetro	96

Figura 51 -	Níveis de Ruído de Impacto (Li) para as amostras sem o processo de compressão	101
Figura 52 -	Níveis de Ruído de Impacto (Li) para as amostras sem processo de compressão	103
Figura 53 -	Níveis de Ruído de Impacto (Li) para as amostras após um ano	104
Figura 54 -	Níveis de Ruído de Impacto (Li) para PEVA1,8_B e MantaPET_A após dois anos	106
Figura 55-	Níveis de Ruído de Impacto (Li) para PEVA1,8_B após três anos	107
Figura 56 -	Níveis de Ruído de Impacto (Li) para PEVA1,8_C após três anos	109
Figura 57 -	Níveis de Ruído de Impacto (Li) para PEVA1,8_D	110
Figura 58 -	Espessura inicial e final das amostras	118
Figura 59 -	Comportamento da amostra MantaPET_B, em destaque durante o ensaio de fluência à compressão	120
Figura 60 -	Estimativa de redução de isolamento ao ruído de impacto	123
Figura 61 -	Relação entre resultado de rigidez dinâmica (MN/m ³) e nível de ruído de impacto padronizado ($L'_{nT,w}$)	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 –	Coeficiente dinâmico e ângulo de fase da série de Fourier para caminhada	25
Tabela 02 –	Frequência Limite Superior das estruturas submetidas a vibrações por indução humana	25
Tabela 03 –	Descritores de classificação quanto ao isolamento acústico para ruído de impacto.	32
Tabela 04 –	Critério e nível de pressão sonora de impacto padronizado $L'_{nT,w}$	33
Tabela 05 –	Classificação dos resultados de ruído de impacto para as amostras com grande dimensão	43
Tabela 06 –	Expressão de correlação envolvendo rigidez dinâmica e nível de redução do ruído de impacto (banda 1/3 de oitava).	52
Tabela 07 –	Resumo dos resultados	58
Tabela 08 –	Resultados de rigidez dinâmica antes e após o carregamento e a estimativa de deformação para 10 anos de uso	63
Tabela 09 –	Cronograma dos ensaios de ruído de impacto e de rigidez dinâmica	70
Tabela 10 –	Normas utilizadas nos ensaios	71
Tabela 11 –	Estudo de composição da placa cimentícia com EVA	74
Tabela 12 –	Valores de referência para ruído de impacto	83
Tabela 13 –	Níveis de ruído de impacto padronizado para a amostra REF.	86
Tabela 14 –	Especificações de cada sistema referência (REF) de piso flutuante	87
Tabela 15 –	Exemplo de cronograma da ISSO 20392:2007	95
Tabela 16 –	Cronograma do ensaio de fluência a compressão	95
Tabela 17 –	Comparativo entre a placa PEVA1,8 proposta no estudo atual e as estudadas anteriormente por Santos (2013) a EVA_ar0 e EVA_ar1.	99
Tabela 18 –	Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para os sistemas de pisos comparados	100
Tabela 19 –	Comparativo entre desempenho das placas PEVA1,8 e MantaPET	101
Tabela 20 –	Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para os sistemas de pisos comparados	102
Tabela 21 –	Comparativo entre desempenho das placas PEVA1,8, placas de Santos (2013) (EVA_ar0 e EVA_ar1) e MantaPET	102
Tabela 22 –	Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para os sistemas de pisos comparados após um ano de compressão.	103
Tabela 23 –	Comparativo entre desempenho das placas PEVA1,8_B e MantaPET_A após um ano de compressão	104
Tabela 24 –	Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para os sistemas de pisos comparados após 2 anos de compressão.	105
Tabela 25 –	Comparativo entre desempenho das amostras PEVA1,8_B e MantaPET_A em relação a amostra de REF após dois anos de compressão.	106
Tabela 26 –	Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para os sistemas de pisos com a placa PEVA1,8_B após 3 anos	107
Tabela 27 –	Comparativo entre desempenho da placa PEVA1,8_B e da MantaPET_A ao longo do tempo	108
Tabela 28 –	Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para os sistemas de piso flutuante com a placa PEVA1,8_C em três anos no conjunto sem interferência ao longo do tempo.	108
Tabela 29 –	Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para o sistema de piso flutuante com a placa PEVA1,8_D	109
Tabela 30 –	Comparativo entre desempenho das amostras ao longo do tempo	110
Tabela 31 –	Resultados dos testes iniciais da frequência de ressonância (fr) e rigidez dinâmica aparente ($s't$) para várias amostras de materiais resilientes (comerciais e alternativos).	111
Tabela 32 –	Resultados da frequência de ressonância (fr) e rigidez dinâmica aparente ($s't$) para a placa PEVA1,8_B sem compressão (medição inicial).	111
Tabela 33 –	Análise de variância entre as amostras PEVA1,8_B e PEVA1,8_D	113

Tabela 35 –	Análise de variância entre as amostras PEVA1,8_B e PEVA1,8_D	115
Tabela 36 –	Comparativo entre os resultados de rigidez dinâmica das amostras ao longo do tempo	115
Tabela 37 –	Valores iniciais do ensaio de fluência a compressão	117
Tabela 38 –	Dados do primeiro dia de medição (25/07/2019)	117
Tabela 39 –	Dados da última medição (25/11/2019)	117
Tabela 40 –	Cálculos com dados do ensaio de Fluência à compressão para a Placa PEVA1,8_D	119
Tabela 41 –	Cálculos com dados do ensaio de FC para a Placa MantaPET_B	119
Tabela 42 –	Resultados calculados da frequência de ressonância (f_r) e da rigidez dinâmica aparente ($s't$) para PEVA1,8_D, após ensaio de fluência à compressão	122
Tabela 43 –	Resultados calculado da frequência de ressonância (f_r) e da rigidez dinâmica aparente ($s't$) para MantaPET_B, após ensaio de fluência à compressão	122
Tabela 44 –	Resumo dos valores das amostras ensaiadas	124
Tabela 45 –	Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente ($s't$) para o material comercial (PET) sem compressão (medição inicial).	137
Tabela 46 –	Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente ($s't$) para a placa PEVA1,8_D	137
Tabela 47 –	Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente ($s't$) para placa PEVA1,8_B com 1 ano de compressão no conjunto.	138
Tabela 48 –	Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente ($s't$) para a amostras MantaPET_A após 1 ano	139
Tabela 49 –	Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente ($s't$) para o material comercial (PET) sem processo de compressão.	139
Tabela 50 –	Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente ($s't$) para placa PEVA1,8_B após três anos de compressão no conjunto.	140
Tabela 51 –	Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente ($s't$) para MantaPET_A com dois anos de compressão no conjunto.	140
Tabela 52 –	Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente ($s't$) para PEVA1,8_C após 3 anos com compressão estática no conjunto de modo ininterrupto	141

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Argamassa colante
ANOVA	Análise de variância
ATH	Alumina tri-hidratada
CBIC	Câmara Brasileira Para a Indústria da Construção
CII	Classe de Isolamento de Impacto
C.P.S	Ciclos por Segundo
CP	Cimento Portland
CT	Centro de Tecnologia
EVA	Etileno Acetato de Vinila
EPS	Poliestireno Expandido
FHA	Federal Housing Administration
FFT	Série de Fourier
Hz	Hertz
ISO	Organização Internacional para Padronização
LABEME	Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
NIS	Nível de Intensidade Sonora
NPS	Nível de Pressão Sonora
NTA	Acordo Técnico Holandês.
PEI	Resistência à abrasão superficial
PET	Poliméricos de Tereftalato de Polietileno
ProAcústica	Associação Brasileira para Qualidade Acústica
RPQ	Relação Preço Qualidade
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
TR	Tempo de Reverberação
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
Justificativa	16
Pergunta da pesquisa	17
Hipótese do trabalho	18
Objetivos	18
Objetivo geral	18
Objetivos específicos	18
Estrutura do trabalho	18
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
1.1 Som, frequência sonora e ruído de impacto	20
1.2 Vibração no sistema de piso flutuante induzida pela atividade humana	23
1.3 Isolamento do ruído de impacto em edificação de multipavimentos	27
1.3.1 Parâmetros acústicos normatizados para redução do ruído de impacto	30
1.4 Estudos avaliativos sobre ruído de impacto em pisos de edifícios	36
1.4.1 Aproveitamento do resíduo de EVA em sistemas de pisos flutuantes	41
1.5 Algumas variáveis que interferem nos resultados de redução do ruído de impacto em pisos flutuantes	49
1.5.1 Características da rigidez dinâmica dos materiais resilientes utilizados em sistemas de pisos flutuantes.	50
1.5.2 Fluência à compressão em materiais resilientes de sistemas de pisos flutuantes	61
2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	67
2.1 Metodologia da Pesquisa	67
2.2 Fabricação de placas cimentícias com resíduo de EVA	71
2.2.1 Fabricação das placas de concreto e de argamassa	77
2.3 Procedimento de ensaio de ruído de impacto em piso flutuante	78
2.3.1 Ensaio de Tempo de Reverberação	82
2.4 Tratamento dos resultados de acordo com a ISO 717- 2:2013	83
2.5 Teste de rigidez dinâmica	88
2.6 Processo de influência da compressão das placas PEVA1,8 e da MantaPET	92
2.6.1 Processo de simulação da compressão natural para as amostras PEVA1,8_B, PEVA1,8_C e MantaPET_A	92
2.6.2 Processo acelerado com ensaio de Fluência à compressão com as amostras PEVA1,8_D e MantaPET_B	93
2.7 Estimativa da redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto (ΔL) ao longo do tempo	97
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
3.1 Resultados quanto à redução ao ruído de impacto dos sistemas de piso flutuante propostos após os períodos de simulação de compressão no conjunto.	100
3.1.1 Resultado inicial do ensaio ruído de impacto das placas PEVA1,8 e da MantaPET.	100
3.1.2 Resultado do ruído de impacto das placas PEVA1,8_B e MantaPET_A após um ano compressão no conjunto.	103
3.1.3 Resultado do ruído de impacto das placas PEVA1,8_B e MantaPET_A após dois anos de compressão no conjunto.	105
3.2 Resultados da rigidez dinâmica inicial da placa PEVA1,8 (tipo B, C e D) e da MantaPET (tipo A e B), após simulação de compressão no conjunto.	111
3.2.1 Resultado inicial do ensaio de rigidez dinâmica das placas PEVA1,8 e da MantaPET.	111
3.2.2 Resultado de rigidez dinâmica da placa PEVA1,8_B e da MantaPET_A após um ano de compressão no conjunto.	113
3.2.3 Resultado da rigidez dinâmica após três anos de compressão no conjunto para as placas PEVA1,8_B e PEVA1,8_C, e dois anos para a MantaPET_A.	114
3.3 Resultado das medições do ensaio de fluência à compressão para as amostras PEVA1,8_D e MantaPET_B.	116
3.3.1 Resultado da redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto, (ΔL) em dB,	121

estimado a partir da rigidez dinâmica para as placas PEVA1,8_D e MantaPET_B, na simulação de dez anos de vida útil.

4. CONSIDERAÇÃO FINAL	127
4.1 Recomendações para pesquisas futuras com a utilização de resíduos de EVA aplicados em sistemas de pisos flutuantes:	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
APÊNDICE	137

INTRODUÇÃO

O aumento da verticalização nas cidades e a evolução das tecnologias desenvolvidas pela construção civil permitem o acréscimo de novos materiais e de sistemas estruturais que possibilitam mais flexibilidade de execução nas construções. Apesar de mudanças nas tecnologias é visível que o modo de construção atual vem buscando a economia de custo e de dimensão com interesse no lucro. Para atingir tais objetivos é necessário que as construções aliem o uso de novos materiais e que são algumas vezes mais dispendiosos, porém mais adequados e que melhorariam o desempenho da edificação ao longo do tempo.

Um dos problemas observados nas construções sem tratamento específico é o ruído de impacto entre pisos, o qual se propaga pela laje, alcança as paredes e chega até os ambientes vizinhos, gerando alguns transtornos para os moradores. O isolamento acústico, entretanto, é uma propriedade que não aparece à vista do comprador do imóvel, embora sua falta seja sentida durante o período de pós ocupação em uma construção sem a implementação de medidas projetuais específicas para este conforto.

No Brasil a Norma Brasileira NBR 15575-3:2013 dispõe de valores que classificam os sistemas de piso entre as unidades habitacionais autônomas dispostas em pavimentos distintos, de acordo com cada nível de pressão sonora de impacto ponderado ($L'_{nT,w}$) de cada sistema. Se o $L'_{nT,w}$ for entre 66 dB e 80 dB o sistema do piso deverá ser considerado com nível de desempenho mínimo (M); para valores entre 56 dB a 65 dB classifica-se com nível de desempenho intermediário (I); e para valores menor ou igual a 55 dB, classifica-se com nível de desempenho superior (S), sendo esse último caso o sistema em análise considerado como de melhor isolamento acústico a ruído de impacto. Se as edificações que foram construídas após a vigência da norma, não atingirem pelo menos o resultado mínimo a construtora receberá medidas cabíveis para resolver o problema, podendo resultar em processos entre moradores, projetistas, construtoras e incorporadoras.

Entre os tipos de lajes estruturais das edificações a tipologia maciça é a que mais apresenta uma solidez para possibilitar um isolamento apropriado quanto ao ruído de impacto. Segundo a Câmara Brasileira Para a Indústria da Construção (CBIC) (2013), lajes de concreto armado de 10 cm a 12 cm de espessura conseguem atender o nível mínimo (M) da NBR 15575-3:2013. Segundo Alonso e Patrício (2018) para as outras tipologias de lajes existem uma variedade de camadas e por isso elas têm meios mais complexos e frágeis de

propagação do que lajes homogêneas como a maciça, sendo assim a laje heterogênea possui mais variáveis a serem previstas.

O ruído de impacto pode ser reduzido com a elaboração do projeto e o detalhamento do piso, com materiais adequados para esse fim, como por exemplo, a inserção do sistema de um piso flutuante que é uma concepção baseada em utilizar um contrapiso revestido, apoiado sobre um material elástico resiliente, que isola o contrapiso da laje estrutural e das paredes do edifício. A resiliência é uma propriedade que alguns materiais apresentam de retomar a forma original após terem sido submetidos a uma deformação elástica. A quantidade do ruído de impacto gerado no piso entre pavimentos (superior e inferior) é determinada pelo vigor do objeto impactante, pela transmissão de vibrações características e pelos materiais de revestimento do piso.

Diante dessa problemática observada nas edificações de multipavimentos atuais, a ideia desta pesquisa foi de propor placas cimentícias feitas com resíduo de EVA (Etileno Acetato de Vinila), descartado de indústrias calçadistas paraibanas, para servir como material resiliente em sistema de piso flutuante. O presente trabalho aprimorou o processo de moldagem de uma placa cimentícia com resíduo de EVA, visando obter características adequadas para um material resiliente alternativo. O foco no presente estudo foi centrado na alteração da rigidez dinâmica desta placa, durante sua vida útil, e na possível variação da capacidade de isolamento acústico do sistema de piso. Para avaliar o potencial de isolamento acústico as placas foram submetidas a processos de fluência à compressão, simulando seu uso em um sistema de piso flutuante ao longo do tempo. Para facilitar a leitura deste trabalho as placas foram denominadas pela abreviação PEVA1,8, sendo o numeral 1,8 relacionado à espessura da placa.

Nos estudos que pesquisam o potencial do resíduo de EVA, como por exemplo, o precursor no Brasil que foi o de Garlet (1998), foi observado que esse material tem características relevantes para propósitos de reciclagem mecânica e tem propriedades para ser um material resiliente, pois tem a capacidade de absorver impacto e de retornar à sua forma original. E por ser um resíduo seu uso, em tese, poderia impactar na economia de uso de recursos naturais pelo setor da construção civil, reconhecido por grandes impactos no meio ambiente, devido ao alto consumo de materiais. Também ajudaria a mitigar os impactos ambientais causados pelos resíduos de polímeros de EVA descartados como resíduos sólidos de indústrias calçadistas, que já são reconhecidos como um problema do nosso cotidiano.

A característica da rigidez dinâmica do material resiliente (placas cimentícias de EVA) foi o foco de avaliação neste trabalho, pois de acordo com as referências bibliográficas, essa propriedade do material se modifica ao longo do tempo após sua

aplicação no sistema de piso flutuante. A ideia foi avaliar o material numa situação mais crítica relacionada à tipologia de laje pré-moldada convencional, já que é sabido que a maciça é a que tem o desempenho mais satisfatório. Pretendeu-se verificar neste estudo que as placas tivessem baixa densidade para ser um tipo de material alternativo, entre alguns tipos de materiais resilientes comerciais existentes no mercado. Foi escolhido um tipo de material resiliente comercial para a comparação que foi a manta resiliente acústica de resíduo de PET (poliméricos de tereftalato de polietileno), intitulada neste estudo de MantaPET, que é um material fibroso. Apesar dos materiais não terem a composição parecida, os resultados serviram apenas para comparação entre um material comercial e um elaborado alternativamente neste trabalho, não ficando fora de sentido, pois existem trabalhos que também fazem comparação entre materiais diferentes.

Nesse sentido, considerando estudos mencionados na Fundamentação Teórica, nos quais afirmam que a rigidez dinâmica dos materiais resilientes pode variar de acordo com o tempo de aplicação do material e da carga que ele recebe, assume importância no presente trabalho investigar como as placas cimentícias feitas com resíduo de EVA desempenharam a função de material resiliente quando aplicadas em pisos flutuantes, e como elas se comportaram em relação à variação de sua rigidez dinâmica após o uso ao longo do tempo.

Justificativa

O desenvolvimento de técnicas construtivas para promover conforto acústico em edificações habitacionais de multipavimentos tem sido uma constante preocupação no Brasil depois das recomendações da NBR 15575:2013. A temática vem ganhando espaço em instituições de ensino e pesquisa e em empresas, para gerar informações e disseminá-las de forma a lançar suas aplicações na indústria da construção civil e para se adequar às exigências das normas.

Níveis de ruído acima dos aceitáveis descritos nas normas, como por exemplo NBR 15575:2013, afetam a saúde e o bem-estar do usuário das edificações de multipavimentos. Nesse sentido, o isolamento do ruído de impacto em pisos de edificações é de grande interesse para garantir condições de habitabilidade e salubridade acústica em ambientes residenciais. Portanto, existe a necessidade de controlar as variáveis envolvidas na transmissão do ruído de impacto, pois sabe-se que alguns detalhes construtivos podem influenciar na passagem desse ruído entre os pavimentos. As variáveis que podem influenciar são, por exemplo: o revestimento do contrapiso, tipo de laje estrutural, tipo de

material resiliente de acordo com a sua densidade e rigidez dinâmica, a presença do forro de gesso no sistema, dentre outros.

Nesse contexto, com auxílio das normas e critérios utilizados para classificar condições de conforto, que embasam a realização de estudos experimentais de ruído de impacto em pisos de edificações de multipavimentos, é importante caracterizar o desempenho das placas compostas com o resíduo de EVA aglomeradas com cimento, no sentido de ampliar o conhecimento do seu potencial para modificações acústicas nos ambientes quanto à redução do ruído de impacto.

Então, foi realizado um estudo de um procedimento para avaliar as variações na rigidez dinâmica do material resiliente alternativo proposto e compará-lo com um material resiliente comercial, após um determinado tempo de aplicação na simulação de pisos flutuantes. E com esse procedimento foi possível verificar a influência do grau de variação da rigidez dinâmica nos resultados do desempenho acústico dos materiais resilientes e na classificação dos sistemas de piso flutuante.

Esta pesquisa é importante porque visa contribuir ao mesmo tempo para preservar o meio ambiente (destinação de resíduos EVA) e a saúde humana, na medida em que se propõe a utilizar esse resíduo como material para reduzir ruído de impacto em pisos de edificações habitacionais de múltiplos pavimentos. Ademais, o trabalho proposto poderá alimentar um banco de dados que possa ser utilizado como referência para o tema de materiais não convencionais e para a utilização de piso flutuante em projetos de edificações de multipavimentos.

Pergunta da Pesquisa

Como será o comportamento de isolamento acústico em sistema de piso flutuante e da rigidez dinâmica da placa cimentícia com resíduo de EVA (PEVA1,8), quando submetidas a processos de fluência à compressão simulando sua vida útil na edificação de multipavimentos?

Hipótese do Trabalho

A hipótese a ser testada é que se com o tempo a placa cimentícia com resíduo de EVA fabricada neste estudo vai melhorar o desempenho de um sistema de piso flutuante de acordo com o potencial de isolamento acústico ao ruído de impacto e o seu comportamento

quanto ao seu processo de fluência à compressão durante o uso em sistema de piso flutuante.

Objetivos:

Objetivo geral:

Avaliar a influência da compressão no material resiliente proposto com placas cimentícias aglomeradas com resíduo de EVA e o grau de comprometimento do seu desempenho acústico em sistema de piso flutuante, quanto ao isolamento dos ruídos de impacto, a partir da observação da sua característica de rigidez dinâmica.

Objetivos específicos:

- Discutir a importância do uso de materiais alternativos para soluções de desempenho acústico quanto à capacidade de redução do ruído de impacto nas edificações de multipavimentos;
- Produzir um material resiliente alternativo em forma de placas cimentícias com resíduo de EVA com potencial para redução do ruído de impacto;
- Estudar procedimentos de influência da compressão de curto e longo prazo para verificação de influência na variação da rigidez dinâmica dos materiais resilientes no seu desempenho acústico;
- Avaliar o desempenho acústico de sistemas de pisos flutuantes, simulando algumas variáveis que influenciam nos resultados, em escala de protótipo, correlacionando tipo de material resiliente, de acordo com a sua densidade, rigidez dinâmica e o tempo de uso.

Estrutura do trabalho:

O conteúdo da tese foi distribuído em quatro capítulos (Fundamentação Teórica, Procedimentos Metodológicos, Resultados e Discussão e Consideração Final). Na

Fundamentação Teórica existe uma breve revisão bibliográfica sobre os temas que dão base ao presente trabalho, como por exemplo: acústica focada no desempenho das edificações de multipavimentos e principalmente a problemática do ruído de impacto transmitido pela estrutura e paredes. Depois foram apresentadas algumas variáveis que servem para estudar este fenômeno e como pode fazer um tratamento nos elementos de um piso flutuante para reduzir a transmissão do ruído de impacto. A principal variável estudada neste trabalho é a característica da rigidez dinâmica dos materiais resilientes. E por fim, foi apresentada uma descrição do material proposto, resíduo de EVA, para servir como material resiliente aglomerado com cimento para atuar em sistemas de piso flutuantes, valorizado por pesquisas bibliográficas, produção e análise em laboratório para verificar suas características.

Nos Procedimentos Metodológicos foram apresentadas as descrições dos materiais e métodos desenvolvidos, indicando a estrutura e os dados necessários utilizados para desenvolver a pesquisa com base em normas, e pesquisas bibliográficas que serviram para fabricar e testar experimentalmente o desempenho do material proposto. Os principais ensaios utilizados foram o de ruído de impacto com base na Organização Internacional de Normalização (ISO) 16283-2:2015, o de rigidez dinâmica regido pela ISO 9052:1989 e o teste de fluência à compressão de acordo com a ISO 20392:2007.

Na sequência o capítulo de Resultados e Discussão contém os resultados obtidos com os ensaios realizados, que servem de comparação com as pesquisas feitas sobre o material e contribuem para alimentar um banco de dados sobre o tema. O último capítulo traz a Consideração Final com conclusões sobre o que foi averiguado durante o processo desta pesquisa e sugere pontos a serem pesquisados em trabalhos posteriores. Na sequência foram apresentadas a lista das referências bibliográficas nacionais e internacionais em ordem alfabética, utilizadas nesta tese. E o Apêndice com as tabelas contendo os valores obtidos do ensaio de rigidez dinâmica das amostras de acordo com o seu respectivo tempo de análise.

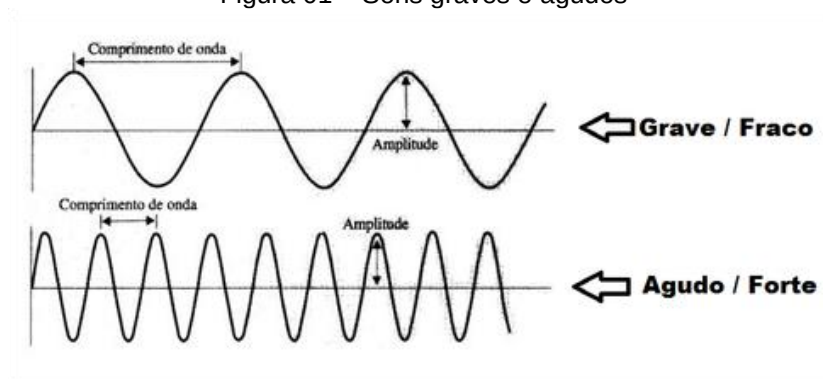
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Som, frequência sonora e ruído de impacto

Acústica é a parte da Física que lida com a geração, o controle, transmissão, recepção e os efeitos do som. O som pode ser definido como a sensação estimulada no órgão da audição pela energia radiante mecânica transmitida como ondas de pressão longitudinal através do ar ou de outro meio. De acordo com Silva (2005) as ondas sonoras necessitam de um meio elástico para se propagarem produzindo uma sensação auditiva, e não existe essa propagação no vácuo.

Sons com maior comprimento de onda (baixa frequência) são os graves. Quando propagados expressam o fenômeno de difração quando incidem em uma barreira (HASSAN, 2009). Sons com menor comprimento de onda (alta frequência) são os agudos, que, normalmente, causam irritabilidade ao ouvido humano, suas frequências têm maior número de oscilações temporais e são mais altos, ao contrário dos graves, que se encontram nas frequências mais baixas com menor número de oscilações temporais (BISTAFA, 2006) (Figura 01).

Figura 01 – Sons graves e agudos



Fonte: Gomes, 2013¹

¹ Disponível em: <https://sofiagsantos.wordpress.com/2013/02/26/audio-digital/>

A grandeza da pressão exercida sobre a atmosfera determina o máximo deslocamento da partícula em relação ao seu centro de equilíbrio. Esse pequeno deslocamento é chamado de amplitude (SOUZA *et al*, 2006). O número de vezes que uma partícula completa um ciclo de compressão e rarefação em determinado intervalo de tempo ao redor de seu centro de equilíbrio, ou seja, o número de vezes em que ela passa por uma mesma fase de vibração, é denominado frequência. Normalmente a frequência é uma grandeza medida em Hertz (Hz), que é o número de ciclos por segundo (c.p.s.). Cada fonte sonora tem sua capacidade própria de vibrar em determinada faixa de frequência. Para que seja audível ao ouvido humano, os sons devem se situar entre as frequências de 20 e 20.000 Hz.

Se a escala de frequências for dividida em diferentes bandas, contendo frequências, têm-se a pressão sonora eficaz de cada banda. Existem três bandas de largura proporcional normalizadas e denominadas de: bandas de oitava, bandas de um terço de oitava e bandas de um doze avos de oitava. A largura de uma oitava é à duplicação de frequência e as outras têm uma largura respectiva de $2^{1/3}$ e $2^{1/12}$ (SILVA, 2014).

Souza *et al* (2006) afirmam que em relação à onda sonora, a distância entre duas vibrações sucessivas a partir de uma fonte, ou seja, a distância que o som percorre em cada ciclo completo de vibração, obtém-se uma característica de importância fundamental para o desempenho acústico de um ambiente: o comprimento de onda (λ), que caracteriza seu comportamento perante as superfícies, revelando se possui dimensões adequadas para que ocorra a distribuição sonora desejada para o ambiente.

Segundo Pedroso (2007), a velocidade de propagação da onda sonora tem relação direta com a ligação das moléculas constituintes do material, pois quanto mais rígida for esta ligação maior será a velocidade de propagação. Em função do meio, o som pode apresentar características distintas, podendo ser difundido por vias aéreas (transmitido através do ar que é movimentado diretamente pela fonte de vibração), que são os ruídos aéreos, ou pelos sólidos (gerado pelos impactos de encontro à própria estrutura, transmitido e propagado através de toda a estrutura e tubulações do edifício), que são os ruídos de impacto.

Para facilitar os estudos acústicos, a larga escala de pressão sonora é substituída pelo decibel (dB). Segundo Souza *et al* (2006), o decibel corresponde a uma escala logarítmica, que se aproxima da percepção escutada das flutuações da pressão e da intensidade sonora. O decibel é a unidade que expressa o nível de intensidade sonora (NIS) e o nível de pressão sonora (NPS).

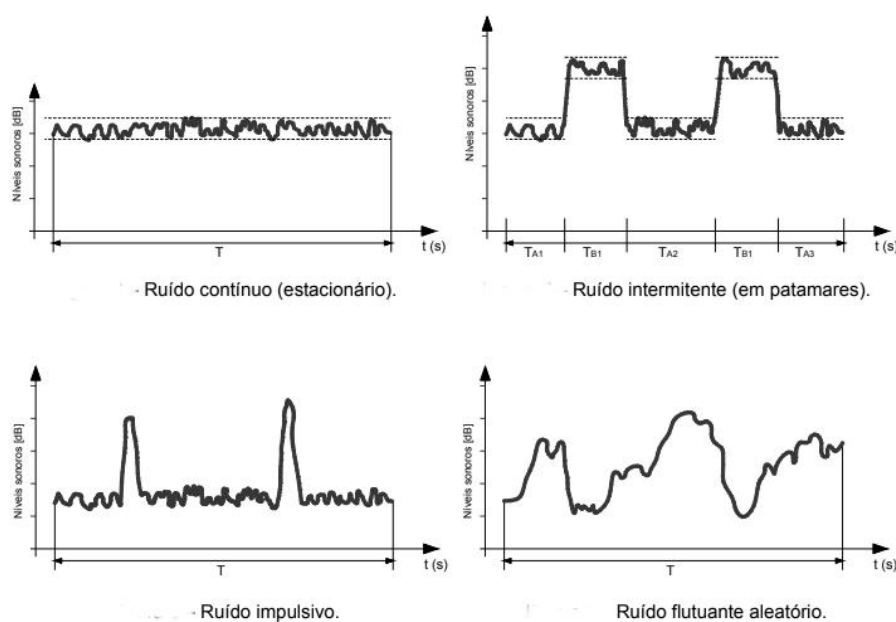
O ruído sonoro é qualquer som indesejado, desagradável, discordante ou que interfira na audição de outro som. Sempre que possível, os ruídos devem ser controlados em suas fontes. Os ruídos existentes em um ambiente interno podem ser decorrentes de atividades externas ou internas à edificação. Eles se caracterizam por sua intensidade, que é a quantidade de energia vibratória que se propaga nas áreas a partir da fonte emissora e pode ser expressa em termos de energia (watt/m^2) ou em pressão (N/m^2 , Pascal), e por sua frequência, representada pelo número de vibrações completas em um segundo, sendo expressa em Hertz (Hz).

Segundo Catai *et al* (2016), os ruídos quanto à variação no tempo se classificam em:

- Contínuo: aquele cujo nível de pressão sonora varia 3 dB durante um período longo (mais de 15 minutos) de observação. Com flutuação de nível de pressão sonora pequena, que pode ser desprezada dentro do período de observação;
- Intermitente: aquele cujo nível de pressão sonora varia de até 3 dB em períodos curtos (menor que 15 minutos e superior a 0,2s) e cai bruscamente ao nível do ambiente, várias vezes, durante o período de observação, desde que o tempo em que o seu nível se mantenha com o valor constante, diferente daquela do ambiente, seja da ordem de grandeza de um segmento ou mais;
- Impacto ou impulsivo: pode ser definido como picos de energia acústica de duração inferior a 1s.
- Ruído de fundo: que é todo e qualquer ruído que esteja sendo captado e não seja proveniente da fonte objeto das medições;

As características do sinal sonoro emitido por cada ruído acima são representadas na Figura 02. Os problemas de ruído de impacto têm a ver com eventos de vibração na estrutura em que se encontram sob ações que variam com o tempo (em magnitude, posição, direção e/ou sentido) e são classificadas como dinâmicas em caso de desenvolvimento de forças inerciais. (SORIANO, 2014).

Figura 02 – Sinal sonoro dos ruídos



Fonte: Adaptado de Mateus, 2008

1.2 Vibração no sistema de piso flutuante induzida pela atividade humana

Deve-se levar em conta também no estudo de sistemas de pisos flutuantes a vibração no sistema provocada pela atividade humana, como, por exemplo, o caminhar. De acordo com Lima (2007), o movimento humano de caminhar e correr gera um carregamento dinâmico periódico na estrutura, cujos principais parâmetros são:

- Período de passo (T_p): duração de cada repetição do movimento;
- Razão de passo (f_s): número de passos por segundo, medido em Hertz;
- Comprimento de passo (sl): espaço percorrido com um passo;
- Velocidade de avanço (fs): velocidade média de deslocamento;
- Tempo de contato (tp): tempo em que o pé permanece em contato com o chão;
- Coeficiente de impacto (kp): razão entre a força de pico e o peso estático da pessoa.

A força gerada pelo caminhar humano apresenta parcelas em várias direções, e em geral se considera apenas a parcela vertical para pisos com rigidez suficiente em seu plano

para que as demais parcelas possam ser desprezadas. É o que acontece, por exemplo, em uma laje de um edifício comum. Segundo Lima (2007), o mesmo não pode ser feito, por exemplo, para uma passarela, na qual os efeitos das componentes horizontais não são desprezíveis, uma vez que esta é bastante flexível nas demais direções.

O carregamento oriundo do contato do pé com o piso durante o caminhar é considerado contínuo, pois sempre um dos pés está em contato com o solo. Além disso, há sobreposição do carregamento de ambos os pés, porque quando o primeiro pé começa a desencostar do solo, o segundo já encostou completamente. Mas quando o caminhar adquire certa velocidade, de tal forma que os pés não encostam o piso simultaneamente, o carregamento não pode mais ser considerado contínuo. Neste caso, a função que descreve o carregamento passa a ser uma sequência de pulsos semi-senoidais, essa função é uma soma do peso estático da pessoa (70 kg = 700N usualmente) (DOLAN *et al*, 1999) com as componentes amplitude e frequência da carga harmônica.

Segundo Murray *et al* (2016), a caminhada e outros movimentos humanos causam cargas dinâmicas a serem aplicadas às estruturas. De acordo com Ribeiro (2017), as forças induzidas pelo ser humano são convenientemente representadas pela série de Fourier (FFT) (Equação 01):

$$F(t) = G + \sum_{i=1}^n G \cdot \alpha_i \cdot \sin(2\pi \cdot i \cdot f_c \cdot t - \Phi_i) \quad (\text{Equação 01})$$

Onde:

G = peso da pessoa;

i = número do i-ésimo harmônico;

n = número total das contribuições harmônicas;

α_i = coeficiente de Fourier do i-ésimo harmônico;

$G \cdot \alpha_i$ = amplitude da força do i-ésimo harmônico;

f_c = frequência da atividade;

Φ_i = ângulo de fase do i-ésimo harmônico;

t = tempo.

De acordo com Murray *et al* (2016), os parâmetros, coeficiente dinâmico e ângulo de fase, da série de Fourier para a atividade da caminhada estão descritos na Tabela 01. Esses valores e considerações ajudaram na tentativa de configuração do Transdutor eletrônico da

usado na presente pesquisa para simular a vibração oscilatória em cima do sistema de piso flutuante deste estudo.

Tabela 01 - Coeficiente dinâmico e ângulo de fase da série de Fourier para caminhada

Peso da pessoa	Coeficiente Dinâmico	Ângulo de fase
70kg	0.5, 0.2, 0.1, 0.05	-

Fonte: Adaptado de Murray *et al* (2016)

A NBR 8800:2008 apresenta um anexo sobre vibrações em pisos. Segundo a norma, as frequências naturais dos pisos não podem ser inferiores a 3 Hz. Para pisos de edifícios comerciais ou residenciais em que há caminhar regular de pessoas, a menor frequência natural do piso não pode ser inferior a 4Hz

A Norma brasileira 6118:2014 apresenta como restrição a ressonância, que é a razão entre a frequência natural e a frequência crítica, e deve ser no mínimo, 1.2 (Equação 02).

$$\frac{f_0}{f_{crit}} > 1,2 \quad \text{(Equação 02)}$$

A NBR 6118:2014 indica que na falta de dados experimentais, as frequências de limite superior da faixa para estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas, podem ser descritas conforme o Tabela 02.

Tabela 02 – Frequência Limite Superior das estruturas submetidas a vibrações por indução humana

Caso	f_{crit} Hz
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

Fonte: NBR 6118:2014

Segundo Clough e Penzieno (2003) o caminhar humano é um exemplo de frequência de excitação em pisos e pode ser descrito por diferentes modelos biodinâmicos, mas a frequência do passo é da ordem de 2,0 Hz. As frequências naturais dos pisos devem,

portanto, ser maiores que 3,0 Hz, por norma, a fim de evitar o fenômeno de ressonância e consequentemente a amplificação das vibrações em decorrência deste fenômeno. Para atender os requisitos normativos e evitar os efeitos de ressonância, deve-se, portanto, considerar formas de isolamento das vibrações na estrutura. Ao tratar de isolamento, deve-se levar em consideração o conceito de transmissibilidade. A transmissibilidade (Tr) é a razão entre a força transmitida à base do sistema a isolar e o carregamento do sistema. A redução do nível sonoro normalizado de impacto (Δ_{LW}), para reações localizadas, a exemplo o caminhar, pode ser expresso através da Equação 03.

$$\Delta_{LW} = 40 \log f/f_0 \quad (\text{Equação 03})$$

Onde:

f_0 = frequência de ressonância do sistema de piso flutuante, em Hz;

f = frequência central de banda de oitava.

A frequência de ressonância do sistema de piso flutuante é expressa pela Equação 04.

$$f_0 = 1/2\pi \sqrt{s't/mt} \quad (\text{Equação 04})$$

Cujos termos são:

f_0 = frequência de ressonância do sistema de piso flutuante;

$s't$ = rigidez dinâmica do isolador (material resiliente) (N/m^3);

mt = densidade superficial do contrapiso.

Por fim, o L'_n ou seja, o nível de pressão sonora do sistema de piso com uso de material resiliente é expresso pela Equação 05.

$$L'_n = L_n - \Delta_{LW} \quad (\text{Equação 05})$$

Onde:

L'_n = nível de pressão sonora de impacto;

L_n = nível de pressão sonora de impacto normalizado do piso com revestimento;

Δ_{LW} = redução no nível de pressão sonora do impacto medida de acordo com a ISO 10140-1 em um número único.

Para frequências de excitação próximas à frequência de ressonância, a redução do nível sonoro normalizado de impacto é baixa, e para frequências inferiores à de ressonância

a redução é negativa. Nestas situações, segundo Bistafa (2006), o piso se move em fase com a laje, e o desempenho acústico do sistema é “menos favorável do que a laje nua”, esse desempenho pode ser explicado pelo acontecimento da amplificação dinâmica.

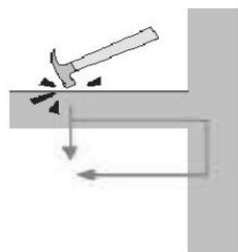
1.3 Isolamento do ruído de impacto em edificação de multipavimentos

Os ruídos causam problemas de saúde e influenciam o estado emocional das pessoas e, conseqüentemente, o seu comportamento. O conforto acústico das edificações deve ser pensado desde o projeto arquitetônico. Ao projetista cabe planejar um ambiente que consiga evitar interferências nas atividades do usuário e permitir que as atividades desenvolvidas por ele não afetem as atividades das outras pessoas.

De acordo com Hax (2002) os problemas acústicos que se apresentam nas edificações são os ruídos alheios ao local ou produzidos no próprio ambiente e as vibrações (sons de baixa frequência) produzidas por maquinários que interferem no sossego, na saúde e na capacidade de trabalho do indivíduo. A falta de condicionamento acústico dos ambientes prejudica a boa audição e a inteligibilidade, causando defeitos acústicos comuns como: ecos, ressonâncias e reverberação excessiva.

Sons produzidos por caminhadas, queda de objetos, arrastar de móveis sobre lajes provocam desconforto nos ambientes de edificações de multipavimentos, ouvidos por usuários de ambientes adjacentes, principalmente o apartamento que fica logo abaixo do que está produzindo o ruído. Esse fenômeno ocorre porque se trata de uma excitação por contato, em que a laje se torna um irradiador de energia sonora em ampla faixa de frequências, devido ao movimento vibratório induzido pela excitação localizada (BISTAFA, 2011) (Figura 03).

Figura 03– Vibrações propagadas pelas estruturas (parede e laje).



Fonte: Pmontes².

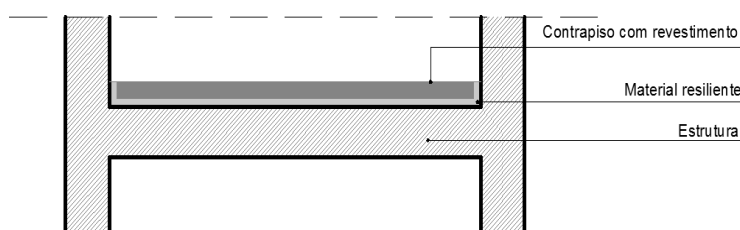
² Disponível em: <http://es.paperblog.com/aislamiento-acustico-al-ruído-de-impacto-suelos-flotantes-194003/>

Souza *et al* (2006), explicam que a forma de tratamento para reduzir ruídos varia com o seu tipo e as fontes que podem ser propagadas, tanto sob a forma de ruídos aéreos (pelo ar) quanto de ruídos transmitidos por impacto propagado pela vibração na estrutura.

Para os ruídos aéreos os materiais absorventes regulam a quantidade de absorção do som dentro do próprio ambiente, como por exemplo a cortiça, tecido, espuma entre outros e para os ruídos de impacto um material isolante aplicado sobre uma parede e/ou piso reduz o nível sonoro transmitido para outro ambiente, isto é um material resiliente que amorteça o impacto.

De acordo com Alonso e Patrício (2018) o sistema de piso flutuante (Figura 04) utilizado para isolamento ao ruído de impacto é caracterizado como um sistema amortecedor de molas, onde a placa rígida é a massa e a mola é a camada resiliente localizada entre contrapiso e a estrutura (laje e paredes). Esse fato determina que sistemas de pisos flutuantes são considerados uma solução eficiente para reduzir a transmissão do ruído de impacto.

Figura 04 – Esquema de piso flutuante.



Fonte: Santos (2013)

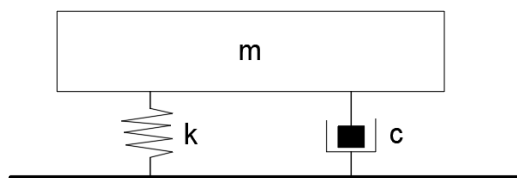
Segundo Bistafa (2011) o piso flutuante é mais eficaz se estiver desacoplado das paredes, ou seja, os materiais isoladores devem ser utilizados também nos fechamentos verticais (paredes) do contrapiso, isolando-o da laje e de toda a estrutura. Esse isolamento lateral é importante para evitar o aparecimento de pontes acústicas nas ligações da estrutura como, por exemplo, a ligação do piso com a parede feita pelo rodapé (FERRAZ, 2008).

A Figura 05 apresenta uma analogia mecânica do sistema de piso flutuante, que representa um sistema massa-mola, onde o m é a massa por unidade de superfície do piso flutuante (kg/m^2), k é a rigidez dinâmica por unidade de superfície do material elástico e o c é o amortecimento por unidade da superfície do material elástico.

Segundo Hax (2002), os materiais elásticos empregados nos pisos flutuantes devem cumprir os seguintes requisitos: ter boa resistência mecânica; ter boa resistência química

(não se decompor e nem ser atacado por umidade); ser incombustível e ser elástico (ter baixa rigidez dinâmica).

Figura 05 – Equivalente mecânico de um piso flutuante.



Um exemplo de material resiliente é a manta feita de resíduo de PET. No estudo de Klippel Filho *et al* (2017) eles analisaram este material tanto para isolamento de ruído de impacto como aéreo. E afirmam que este é um dos materiais indicados para atender o controle do ruído, tanto pelo isolamento como pela absorção sonora, porque é um material do tipo fibroso, compostos por resíduos poliméricos de tereftalato de polietileno (PET), utilizados amplamente na indústria de embalagens, principalmente em garrafas de plástico. Têm como características serem resistentes, hipoalergênicos e inofensivos para a saúde do operador em sua instalação, ao contrário das lãs de rocha e vidro que liberam partículas no ar. Estes ainda podem ser lavados e têm o apelo de ser um material reciclado. No estudo eles concluíram aumento na densidade dos materiais não aumenta consideravelmente o isolamento ao som aéreo em sistemas *drywall* e após 10 anos de uso em pisos flutuantes o material com maior densidade terá mantido o desempenho acústico inicial.

A construção civil é um ramo de atividade que aceita diversos materiais para solucionar problemas, entre eles os acústicos. Os resíduos, dependendo de suas características, se apresentam com potencial de solução a ser aplicada, comparando-se comparados com materiais industrializados produzidos para esse fim. Então, com a utilização desses resíduos, tanto pode melhorar o custo benefício quanto contribuir para a preservação do meio ambiente. De acordo com Caniato *et al* (2015) existem protocolos ambientais e de poupança de energia como os programas: *Leed*³, *Itaca*, *GreenStar*, *Casaclima* etc., que motivam a disponibilidade de tipos de materiais reutilizáveis nas construções. Afirmam também que alguns fabricantes colocam os reciclados cada vez mais, ao lado dos materiais tradicionais, e que essa mesma tendência existe na literatura

³ A certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) tem o intuito de promover as melhores práticas na construção, fomentando práticas sustentáveis e que viabilizem essa ideia para a indústria. Criada pela *United States Green Building Council*, a certificação LEED é considerada o selo sustentável de maior reconhecimento internacional e o mais utilizado em todo o mundo. No Brasil, a USGBC é representada pela *Green Building Council Brasil*. (CUSHMAN e WAKEFIELD, 2018)

científica, o que contribui para o avanço das pesquisas acerca desse tema, e justifica a necessidade de incentivo governamental para serem desenvolvidas.

1.3.1 Parâmetros acústicos normatizados para redução do ruído de impacto

Projetos acústicos requerem níveis de som como os previstos em normas nacionais e internacionais, como, por exemplo a NBR 10151: 2019 - Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas - Aplicação de uso geral e a NBR 10152: 2017- Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Os limites para ruídos ocupacionais que incidem sobre o corpo humano são indicados pelas normas trabalhistas.

No Brasil a NBR 15575-3: 2013 apresenta os requisitos e os critérios para se verificar o isolamento acústico do sistema do piso entre unidades autônomas de edifícios. A NBR citada define ruído de impacto como sendo um som oriundo pela percussão de um corpo sólido e que é transmitido através do ar. São considerados o isolamento de ruído de impacto no sistema de piso (caminhamento, queda de objetos e outros) e o isolamento de ruído aéreo (conversas, som proveniente de TV e outros). Os valores normativos são obtidos por meio de ensaios realizados em campo para o sistema construtivo. Na NBR 15575:2013 os métodos disponíveis para a avaliação se dividem em:

- Isolamento de ruído de impacto padrão em sistemas de pisos: determina, em campo, o nível de pressão sonora de impacto padrão em sistema de piso entre unidades autônomas, caracterizando de forma direta o comportamento acústico do sistema. O método é descrito na norma ISO 16283-2: 2015, com valores em bandas de um terço de oitava entre 50 e 5.000 Hz ou em bandas de oitava entre 125 e 2000 Hz. E pelo procedimento descrito na norma ISO 717-2: 2013, utilizado para determinar o valor do nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado, $L'_{nT,w}$, entre os ambientes a partir do conjunto de valores de nível de pressão sonora de impacto padronizado, L'_{nT} ;
- Isolamento de ruído aéreo de sistema de pisos: determina, em campo, o isolamento sonoro de ruído aéreo entre unidades autônomas e entre uma unidade e as áreas

comuns, caracterizando de forma direta o comportamento acústico do sistema. O método é descrito na norma ABNT NBR ISO 16283-1:2018.

Os descritores utilizados para possibilitar a interpretação dos sons de impacto com a finalidade de classificação de desempenho acústico de sistemas de pisos apresentam diferenças básicas em função do tipo de medição, se em campo ou em laboratório, e do elemento construtivo a ser analisado, como laje, sistema completo ou somente revestimento. Uma síntese dessas diferenças foi apresentada por Tutikian *et al* (2017) (Tabela 03), o uso da apóstrofe após a letra L indica que os resultados são de ensaios de sons de impacto em campo; o uso da letra n indica resultados normalizados por bandas de frequência; a letra T é utilizada para resultados padronizados em campo, com medições do tempo de reverberação. Para a expressão dos valores por um número único, é realizada uma ponderação por banda de frequências conforme procedimentos da norma ISO 717-2:2013, e a letra w utilizada no descritor designa resultados ponderados expressos em um número único.

Tabela 03 – Descritores de classificação quanto ao isolamento acústico para ruído de impacto

Símbolo do descritor	Designação	Referência normativa
L_n	Nível de pressão sonora de impacto normalizado do piso com revestimento	ISO 10140-3:2010
L_{n0}	Nível de pressão sonora de impacto normalizado do piso sem revestimento	ISO 10140-3:2010
$L_{n,w}$	Nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado	ISO 717-2:2013
L'_{nT}	Nível de pressão sonora de impacto padronizado do piso, medido em campo	ISO 16283-2:2018
$L'_{nT,w}$	Nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado do piso, medido em campo	ISO 717-2:2013

Fonte: Adaptada de Tutikian *et al* (2017)

A norma NBR 15575-3: 2013 determina requisitos para níveis de ruído admitidos na habitação. É necessário avaliar o som resultante de ruído de impacto padrão entre unidades habitacionais. Para isso devem ser avaliados os dormitórios da unidade habitacional. As medições devem ser executadas com portas e janelas fechadas. A norma NBR 15575-3: 2013 apresenta também recomendações relativas a outros níveis de desempenho do nível de pressão sonora de impacto padronizado, ($L'_{nT,w}$), com o intuito de complementar os valores normalizados anteriormente. Esta norma recomenda que o construtor ou

incorporador informe o nível de desempenho dos sistemas que compõem a edificação habitacional, quando exceder o nível mínimo (M) de acordo com a Tabela 04.

Tabela 04 – Critério e nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado, $L'_{nT,w}$

Elemento	$L'_{nT,w}$ [dB]	Nível de desempenho
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos	66 a 80	M
	56 a 65	I
	≤ 55	S
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	51 a 55	M
	46 a 50	I
	≤ 45	S

Fonte: Adaptado de NBR 15.575-3: 2013 (Anexo E)

A melhor classificação de isolamento acústico pela referida norma (S – superior) estabelece a medição de ruído de impacto padrão no compartimento recepção menor ou igual a 55 dB. Nos termos da NBR 15.575-3: 2013, o máximo nível de ruído de impacto padrão no compartimento de recepção (onde o ruído de impacto é recebido) é de 80 dB (Classificação M, de mínimo). Esse compartimento fica imediatamente abaixo do compartimento de emissão onde é colocada a fonte de ruído utilizada, por exemplo, uma máquina de impacto normalizado (Figura 06).

Figura 06 – Máquina de Impacto



Fonte: Brüel & Kjær⁴.

Os resultados da pesquisa de Croce *et al* (2017) indicaram que a excitação provocada pela máquina de impacto padronizada, no ambiente emissor, em diferentes

⁴ Disponível em: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/sound-sources/tapping-machine-3207>

quantidades e regiões da laje, tem influência nas estimativas de desempenho do sistema e que há pouca influência significativa da quantidade de microfones na sala receptora, nos resultados dados pelos valores de $L'_{nT,w}$ e L'_{nT} .

De acordo com Tutikian *et al* (2017), a norma brasileira de desempenho de edifícios não apresenta possibilidade de classificação de sistemas de pisos a partir de ensaios em laboratório. Por isso no trabalho desses autores, apesar dos ensaios serem conduzidos com aporte de toda infraestrutura de laboratório para determinação do $L'_{nT,w}$, os resultados são classificados como de ensaios em campo para fins comparativos. Que será o mesmo raciocínio do presente estudo e explicado mais detalhadamente no capítulo de Procedimentos Metodológicos.

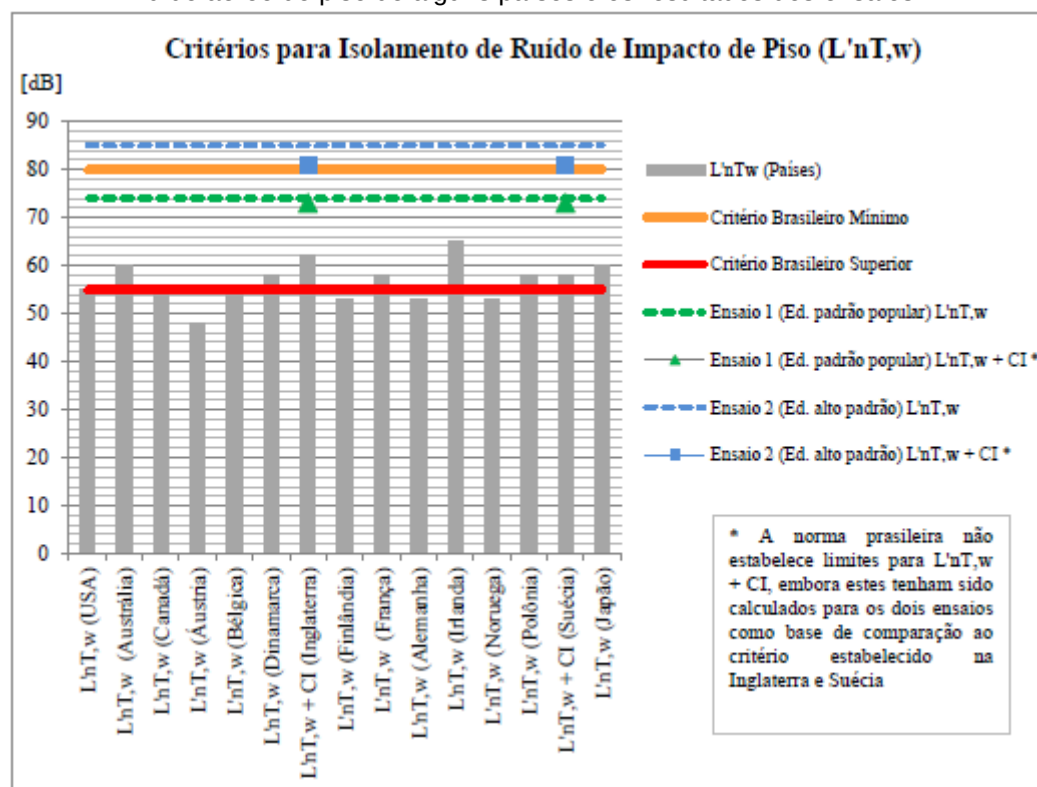
A avaliação da redução da transmissão dos sons de ruído de impacto pela aplicação de revestimentos em pavimentos pode ser obtida em laboratório, com base na ISO 10140-3:2010 - Acústica - Medição em laboratório do isolamento acústico de elementos de construção - Parte 3: Medição do isolamento acústico de impacto. A quantificação da redução sonora em laboratório requer câmaras acústicas de dimensões normalizadas, a utilização de amostras de grandes dimensões (10 m² de camada resiliente) e uma laje maciça.

Rezende *et al* (2014) realizaram um levantamento das normas e critérios usados para classificar as condições de adequação acústica de edificações, para fundamentar a comparação entre o estabelecido na norma NBR 15575-3:2013 e o recomendado para outros países, como por exemplo: Estados Unidos, Austrália, Canadá, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Inglaterra, Finlândia, França, Alemanha, Irlanda, Noruega, Polônia, Suécia e Japão.

Através da comparação feita quanto ao isolamento de ruído de impacto de piso ($L'_{nT,w}$) (Figura 07), foi observado que os critérios mínimos estabelecidos pela norma brasileira estão acima dos adotados em alguns países, principalmente. França, Austrália, Japão e Irlanda são menos restritivos que os demais e adotam valores de 58, 60 e 65dB respectivamente para o $L'_{nT,w}$, ainda sim são bem superiores aos 80 dB estabelecidos como mínimos pela norma brasileira.

Para as edificações construídas após a vigência da NBR 15.575-3: 2013, nos casos de sistemas de piso em desacordo com o que preconiza a norma, será de responsabilidade das empresas construtoras/incorporadoras fazer uso de tecnologias construtivas que reduzam os efeitos do impacto, ou vibrações, sobre as lajes com consequente melhoria do desempenho acústico do sistema de piso.

Figura 07 - Comparação entre os critérios brasileiros de desempenho acústico para isolamento de ruído aéreo de piso de alguns países e os resultados dos ensaios.



Fonte: Rezende *et al* (2014).

Em outros países, como por exemplo na Holanda, Beentjes *et al* (2018), afirmam que há um acordo com os fornecedores e produtores de materiais de pisos flutuantes de que eles têm que ter um relatório acústico de acordo com a norma ISO 10140:2010 a ser apresentado no período máximo de duas semanas aos usuários e avaliadores que solicitarem tal documento. Se isso não acontecer, um comitê de três especialistas investiga o caso e pode proibir o produto de usar o rótulo NTA (*Dutch Technical Arrangement*⁵). Desta forma, o problema de escolher uma boa combinação de piso flutuante nesse país é facilitado para os consumidores. Embora o fornecedor do material resiliente possa indicar o potencial de seu desempenho acústico, a redução dos ruídos de impacto no piso a ser obtida no edifício construído pode não ser aquela esperada, em função dos projetos (arquitetônico e estrutural) e das especificações dos materiais e dos serviços a serem executados.

A ISO12354-2:2017 traz suporte para estimar o desempenho acústico de edifícios a partir do desempenho de elementos. Segundo Schiavi *et al* (2018) é difícil calcular

⁵ *Dutch Technical Arrangement* = Acordo Técnico Holandês.

analiticamente a radiação acústica de estruturas de construção complexas, nas quais tipos de materiais e várias condições de contorno estão envolvidos. As principais razões são devido à não difusividade do campo vibracional, para a presença de descontinuidades estruturais do sistema ortotrópico, cujas propriedades mecânicas são únicas e dependem das direções em que são observadas. E a complexidade da densidade modal devido à periodicidade da estrutura, e a radiação de som de um campo irregular, como uma placa composta por diferentes tipologias de materiais (tais como placa de concreto e “vigas” de tijolos vazados). De acordo com Oliveira e Patrício (2017), os sistemas de piso com lajes não homogêneas têm meios de propagação mais complexos do que sistemas homogêneos.

O processo vibratório de uma laje de concreto armado promove transferência de vibrações para os apoios que, conectados com as paredes do pavimento imediatamente inferior, induzem-nas a vibrar, tornando-as fontes secundárias de ruídos (CARVALHO, R., 2006).

Nunes *et al* (2014) afirmam que nas medições em campo, diversos fatores podem originar dúvidas em relação aos resultados, e a minimização da influência desses fatores constitui uma das formas de garantia da qualidade de medição dos laboratórios, pois, sempre que se realiza algum tipo de medição, cometem-se erros devido a causas diversas. O estudo verificou que o posicionamento da máquina de impactos próximo às paredes no ensaio em campo, especialmente nos pontos próximos a janelas, gera níveis de ruído de impacto maiores, comparados aos pontos localizados no centro do piso. Além disso, a distribuição dos valores por frequência não permite uma análise estatística comparável ao método de estimativa de incertezas da norma ISO 12999-1:2014. No entanto, não se deve descartar totalmente esses pontos em uma medição em campo, pois a produção do impacto mecânico decorrente do uso do imóvel também pode ocorrer próximo a janelas. Portanto, fica evidente que ensaio para avaliar ruído de impacto das edificações de multipavimentos possui várias características que devem ser levadas em consideração na avaliação do desempenho.

1.4 Estudos avaliativos sobre ruído de impacto em pisos de edifícios

Na temática de isolamento acústico quanto a ruído de impacto há alguns estudos, como por exemplo, o de Cornacchia (2009) que verificou o nível de isolamento do ruído de impacto do sistema laje e piso de unidades residenciais, entre elas a maciça, nervurada e pré-moldada convencional. As medições foram realizadas em 30 apartamentos, com os

ensaios realizados de acordo com as normas internacionais ISO 140-7:1998 e ISO 717-2:1996. Cinco apartamentos executados com laje nervurada se enquadraram dentro do nível de desempenho superior de acordo com a NBR 15575:2008, nenhum apartamento analisado teve um desempenho considerado intermediário, e a grande maioria apresentou níveis de desempenho mínimo com valores de $L'_{nT,w}$ maiores que 66 dB. Para a laje maciça, apenas um apartamento apresentou desempenho superior, nenhum teve desempenho intermediário e os outros apartamentos apresentaram desempenho mínimo. Para a laje pré-moldada convencional não houve nenhuma amostra para os critérios de desempenho superior; apenas um apartamento apresentou desempenho intermediário e os outros registraram desempenho mínimo.

Ferreira (2007), que analisou algumas soluções técnicas em edificações em relação ao preço-qualidade (RPQ), dentre elas a de isolamento de ruído de impacto com uso de sistemas de pisos flutuantes constituídos por materiais resilientes, que foram divididos em quatro grupos: cortiças e derivados da cortiça, lãs minerais, borrachas e polietilenos. Concluiu-se que a solução composta por revestimento em laminado de madeira 10 mm, contrapiso 40 mm, lâ de vidro 15 mm, lâmina de polietileno 0,2 mm e laje de concreto 140 mm, se classificou com um valor de ΔL_w (valor único da redução do nível sonoro de percussão normalizado em decibéis), cerca de 34 dB, superior ao da média das demais soluções, aliado a um custo e a uma espessura abaixo da média, o que permitiu classificar esta solução na primeira posição em termos de RPQ.

Ferraz (2008), constatou que os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 15575-3: 2008 estavam bem menos restritivos que os critérios recomendados pela *Federal Housing Administration* (FHA) do *United States Department of Housing and Urban Development* – HU, a FHA recomenda o cálculo da Classe de Isolamento de Impacto (CII). A CII e o $L'_{nT,w}$ são valores globais ponderados que representam o comportamento do piso flutuante diante do ruído gerado pela máquina de ruído de impacto padrão. Os critérios da NBR 15575-3: 2008 estavam exigindo desempenho de isolamento de ruído de impacto de pisos bem inferiores aos sistemas construtivos praticados. E são os mesmos valores da norma atualizada em 2013.

Hagberg e Thorsson (2010) fazem algumas observações sobre medições em edificações que tenham lajes leves diferentemente de lajes maciças, já que para as maciças a medição para baixas frequências é desprezada, mas para outras tipologias de lajes é importante levá-las em consideração. Os padrões de medição podem causar incertezas

devido ao tempo de reverberação não ser consistente abaixo de 100 Hz e o volume da sala receptora pode afetar os resultados nas baixas frequências.

Bouttout e Amara (2016) verificaram a diferença ao medir o nível de pressão sonora de um ambiente sem tratamento com piso flutuante que resultou em $L'_{nT,w}$ 79 dB, o que não é o recomendado para a Argélia, ou seja, $L'_{nT,w}$ de no mínimo 58 dB. Já em uma simulação numérica eles constataram que se fosse adicionado um material resiliente nesse sistema de piso o nível de ruído de impacto seria de 57 dB.

Miskinis *et al* (2012) fizeram uma pesquisa com o objetivo de avaliar a influência do tamanho da amostra do piso flutuante na redução do nível de ruído de impacto padronizado ponderado. As amostras foram utilizadas de acordo com a norma ISO 10140-1:2010, que determina as regras de aplicação de produtos específicos na medição em laboratório para o isolamento acústico de elementos da construção. A pesquisa foi feita em edifício real, em dois quartos, um acima do outro. O nível de ruído de impacto padronizado ponderado da laje de concreto armado de 22 cm de espessura foi medido como referência e depois o piso flutuante foi instalado. A lã de rocha colocada sobre a laje tem os valores de 5 cm de espessura e 119 kg/m³ de densidade. A rigidez dinâmica da lã de rocha foi de 18 MN/m³, que foi medida no laboratório de acordo com ISO 9052-1:1989. Os resultados do teste mostraram forte dependência da redução do nível de ruído de impacto padronizado ponderado com o tamanho da amostra, sendo esta redução mais expressiva para placas flutuantes com área inferior a 2 m². O tamanho da amostra com área maior ou igual a 10 m² é o melhor a ser utilizado, mas o problema é que a produção de grandes amostras é um processo caro e demorado. Assim, a maneira mais rápida e barata é usar tamanhos menores com área menor que 10 m² e realizar medições em edifícios reais.

Branco e Godinho (2013) completam dizendo que métodos de testes simplificados como estes, que usam amostras menores para depois utilizar amostras maiores, permitem a realização de mais ensaios com custos relativamente baixos. Desta forma, é possível comparar diretamente o desempenho de um significativo número de possíveis soluções e em seguida, descartar aquelas com desempenho inferior. Sendo assim, o teste padrão, deve ser efetuado apenas nas soluções com resultados mais promissores. Por outro lado, Borges *et al* (2018) dizem que o uso de amostras de tamanho pequeno permite análises comparativas sem a possibilidade de obtenção de um valor do nível de ruído de impacto padronizado ponderado.

É comum obter valores diferentes $L'_{nT,w}$ de ensaios realizados em campo em situações similares, sendo difícil de chegar a um padrão que conduza sempre a um mesmo

resultado (MATEUS E SANTOS, 2008). Patrício (2002) reforça essa ideia, confirmando que os resultados da redução do ruído de impacto em piso são mais seguros quando se estuda o isolamento acústico em laboratório, pois as avaliações realizadas em campo sofrem influências do local. Para um mesmo sistema de piso, a redução do ruído de impacto apresenta-se de forma desigual, quando comparados os resultados em laboratório e em campo. Essa divergência ocorre com mais frequência em lajes não homogêneas (pré-moldadas, por exemplo). Esses fatos se justificam devido aos níveis de impacto padronizados ponderados ($L'_{nT,w}$) serem influenciados pelas curvas de ponderação propostas pela ISO 717-2:2013, que sofrem variação ao longo da faixa de frequência.

Pacheco *et al* (2017) optaram por realizar os testes em 1 m² de amostra, como feito por outros pesquisadores, a fim de minimizar tempo e evitar desperdício de material. Por outro lado, o uso de amostras de tamanho pequeno permite análises comparativas sem a possibilidade de obtenção de um valor do nível de ruído de impacto padronizado ponderado que é da medição realizada em campo.

Na metodologia do presente trabalho será utilizada uma amostra de piso flutuante de 1m² de acordo com pesquisas anteriores que também utilizaram esta mesma dimensão. Portanto, sabendo que o tamanho da amostra influencia nos resultados entre pisos simplificados e pisos totalmente revestidos, o intuito desta pesquisa é de fazer apenas um comparativo entre as diferentes configurações de piso flutuante ensaiadas, para uma mesma área da placa no protótipo acústico de modo que este fator não introduza um erro na avaliação dos resultados.

Foret *et al* (2011) fizeram um teste simplificado de acordo com o método proposto na ISO/CD 16251-1 “Acústica – Laboratório medição da redução do ruído de impacto transmitido por revestimentos de piso em um tamanho reduzido piso padrão - Parte 1 Piso pesado”. A melhoria do isolamento acústico de impacto de um revestimento do piso é determinada pela diferença do nível de aceleração medida na superfície inferior de uma pequena placa de concreto (Figura 08) com e sem amostra ao invés de medir diretamente o som nível de pressão na sala inferior. A configuração do teste constituída por uma laje em quatro suportes elásticos e verificada a influência de alguns parâmetros, como por exemplo as posições dos acelerômetros ...), mas os autores dizem que esse método é complicado para medir a melhoria de pisos laminados ou flutuantes devido ao comportamento modal da placa de tais sistemas.

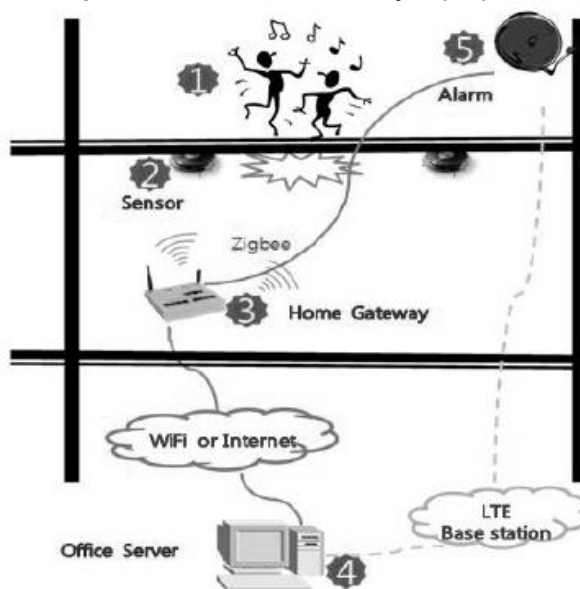
Figura 08 – Configuração do teste



Fonte: Foret *et al* (2011)

Haan (2018) fez uso da Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) para controlar os problemas de ruído de impacto com instalações de monitoramento com sensores, *gateway*⁶ de comunicação sem fio e servidor principal com *software* de análise, aplicados em 300 unidades habitacionais (Figura 09). O sistema projetado com microfone e medidor de vibração alarmava no andar de cima quando o limite de ruído de impacto padrão era excedido no andar de baixo.

Figura 09 - Sistema de medição proposto



Fonte: Adaptado de Haan, 2018

⁶ Pode ser traduzido como "portão de entrada". O gateway pode ser um PC com duas (ou mais) placas de rede, ou um dispositivo dedicado, utilizado para unir duas redes (MORIMOTO, 2005).

O algoritmo operacional foi feito de acordo com os regulamentos atuais da Coréia e como resultado verificou-se que o sistema é operado bem em tempo real, de acordo com o algoritmo e regulação. Também foi revelado que os resultados analisados do sistema estão de acordo com os níveis medidos. Além disso, verificou-se que a ocorrência de ruído excessivo foi reduzida em 14% comparando com o estado inicial. Os moradores responderam por meio de questionários que o ruído foi reduzido cerca de 20% em média. Como conclusão, a confiabilidade do sistema de monitoramento de ruído de impacto de piso foi verificada e o sistema pode servir para comercialização no futuro.

Heissler (2018) apresentou resultados da diferença na comparação na medição *in loco* com estimativa obtida com o *software* SONarchitect. Os ensaios foram realizados em edifícios residenciais de acordo com a ISO 16286-2:2015. Uma análise de incerteza de medição a partir de uma série histórica de dados foi realizada para verificar se existia influência da geometria na incerteza. Os valores estimados ficaram próximos dos resultados de ensaio, entretanto, não foi possível relacionar a incerteza de medição com o volume do cômodo ensaiado, pois tanto a análise de variância para regressão linear, quanto uma linha de tendência retornaram valores de série temporal não válidos. Segundo Heissler (2018) a incerteza de medição é um parâmetro avaliativo de regularidade dos ensaios e que valores relacionados a geometria do ambiente influencia no valor da incerteza.

É importante verificar nas pesquisas o uso das diferentes variáveis para se calcular o desempenho de um sistema flutuante e é possível perceber a preocupação de otimização das medições de acordo com tamanho de amostras e programas computacionais para estimar o valor do desempenho acústico quanto ao isolamento ao ruído de impacto representando diferentes situações.

1.4.1 Aproveitamento do resíduo de EVA em sistemas de pisos flutuantes

No Brasil o EVA é um co-polímero⁷ utilizado com frequência na indústria calçadista para a confecção de solados e palmilhas internas de calçados e o seu resíduo também vem sendo estudado em aplicação em sistema de piso flutuante. A geração do resíduo da indústria calçadista, especificamente, o copolímero etileno acetato de vinila (EVA), está relacionada ao processo de produção de solas, entressolas e palmilhas dos calçados. Os

⁷ Os polímeros são macromoléculas formadas pela união de várias unidades de monômeros (moléculas pequenas). (COPOLÍMEROS. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/copolimeros.htm>)

resíduos gerados durante a fabricação das placas são em forma de aparas, que surgem após o processo de expansão das placas, e em forma de pó, resultante do lixamento delas.

De acordo com Silva *et al* (2017) esses resíduos representam de 2 a 3% da produção da indústria calçadista, e como o EVA é uma espécie de borracha expandida leve, gera um material remanescente que ocupa grande volume e acaba necessitando de muito espaço em seu armazenamento e para sua disposição final, sobrecarregando os aterros e configurando como um problema ambiental.

De acordo com Andrade (2010), o EVA é bastante utilizado pela indústria calçadista, devido ao fato de ser um material leve e macio, que resiste ao desgaste, além de ter baixo custo. A geração de resíduos na forma de retalhos é inevitável e sua reutilização é inviável, já que o EVA é um polímero termofixo, que após moldado sob uma determinada pressão e temperatura se torna infusível, insolúvel e não reciclável.

A queima desse resíduo em fornos industriais diminui os problemas de armazenagem e descarte, mas libera gases tóxicos na atmosfera. Portanto, a reciclagem é uma alternativa para incorporar o EVA em novos produtos úteis para a construção civil. De acordo com Lyra (2007), o EVA tem uma estrutura celular que o torna um material poroso e quando adicionados ao concreto, os resíduos de EVA proporcionam leveza, flexibilidade, resiliência, ductilidade e menos desperdício de material, porque as peças cimentícias fabricadas com incorporação de EVA tem maior resistência a impactos, devido à elasticidade dos resíduos, e a sua aderência à pasta de cimento *Portland*⁸ permite que o material seja facilmente cortado sem gerar desperdícios.

Segundo Garlet (1998), que foi o precursor de estudos com resíduos de EVA no Brasil, as aplicações e as vantagens possíveis na construção civil para o uso de compósitos cimentícios leves obtidos a partir de agregados de EVA podem ser: enchimento para lajes rebaixadas, isolamento acústico entre pavimentos, isolamento térmico nas lajes de forro, entre outros. Ele também evidenciou a grande potencialidade desse resíduo para ser usado em diversos componentes e sistemas na construção civil, sem função estrutural, por entender que ele tem baixa massa específica, boas características acústicas e térmicas, é estável, inerte, não suscetível a fungos e pode ser aproveitado como agregado sintético para a elaboração de compósitos leves.

⁸ Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o cimento Portland é denominação para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento. É um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido não se decompõe mais. Misturado com água e outros materiais tais como a areia, a pedra britada, a cal e outros, resulta nos concretos e nas argamassas usadas na construção de casas, edifícios, pontes, barragens etc.

Pedroso (2007) realizou uma análise comparativa entre as composições de pisos flutuantes compostos pela interposição de material elástico entre a laje e o revestimento final. Os materiais elásticos utilizados foram os disponíveis no mercado, como: lã de vidro, mantas de borracha reciclada (resíduos de EVA), isopor de alta densidade e manta de polietileno. Foi verificado o desempenho dessas composições, quanto ao isolamento do ruído de impacto. Alguns utilizaram porcelanato e, em outros, laminado melamínico de madeira, como revestimentos finais. Nos ensaios foi utilizada a laje estrutural de concreto armado, contrapiso com espessura de 12 cm, sem revestimento para servir como referência, e comparação com amostras de manta de borracha reciclada (EVA), com espessura de 8,0 mm e densidade, de 130 kg/m³. Foi utilizada também a manta de borracha reciclada, de espessura de 4,0 mm e densidade de 260 kg/m³. O sistema montado com Rubberflex apresentou um bom desempenho nas frequências até o patamar de 3150 Hz, quando voltou a se igualar ao sistema de referência (sem manta). A lã de vidro por ter uma espessura maior, de 15 mm, foi o material resiliente mais eficaz, com o melhor desempenho de isolamento do ruído de impacto em todas as frequências.

No estudo desenvolvido por Tutikian *et al* (2013), foi avaliado o desempenho acústico de placas (50 cm x 50 cm x 3 cm) aglomeradas com resíduos de EVA para reduzir ruídos de impactos em pisos, fabricadas com dois tipos de agregados graúdos de EVA (com e sem pó de EVA), bem como variando o teor de agregado graúdo de EVA nos compósitos cimentícios. Para os sistemas de pisos flutuantes avaliados com base em testes simplificados (amostras com 1 m²), utilizando lajes de concreto armado (10 cm de espessura), os resultados indicaram que a porcentagem mais elevada de agregado de EVA graúdo (D_{máx} = 9,5mm) não aumentou o desempenho acústico.

Tutikian *et al* (2013) também avaliaram o desempenho acústico de concreto com resíduos de EVA para reduzir ruídos de impactos em pisos. Nesse estudo, utilizaram três dosagens para a fabricação das placas cimentícias com EVA (50 cm x 50 cm x 3 cm), sendo uma delas com 80% e as outras duas com 70% e 60% de agregado graúdo de EVA. Os resultados indicaram que as amostras com 80% e 60% desse agregado apresentaram número global (L'_{nT,w}) de 56 dB e 62 dB, respectivamente, mostrando uma melhora de 6 dB no isolamento acústico na medida em que se aumentou o teor de EVA.

Na continuação dos estudos de Tutikian *et al* (2017), objetivaram analisar a correlação entre os resultados da amostra com 80% de substituição de agregado miúdo por EVA com testes realizados numa amostra com área de 1 m² e sua reprodução em câmara reverberante com amostra de área igual a 16 m². A amostra de 1 m² apresentou uma

diferença de 2 dB para menos em relação à amostra de 16 m² (Tabela 05) e sua utilização se mostrou viável em estudos com argamassa leves.

Tabela 05 - Classificação dos resultados de ruído de impacto para as amostras com grande dimensão

Amostra 1 m²	Área (m²)	L'_{nT,w} (dB)	Sistema de piso separando unidades posicionadas em pavimentos distintos	Cobertura acessível ou sistema de piso de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas
20AN80EVA	1	59	Intermediário	Não atende
20AN80EVA	16	61	Intermediário	Não atende

Fonte: Adaptado de Tutikian et al (2017)

Pode-se observar que houve uma redução da resistência, tanto na compressão como na tração na flexão, na medida em que aumentou a incorporação de EVA na mistura, o que demonstra uma relação com a massa específica e teor de EVA. Em relação ao desempenho acústico, quando comparado com a norma de desempenho NBR 15575:2013, nota-se que o traço com melhor desempenho foi o de maior proporção de substituição de EVA.

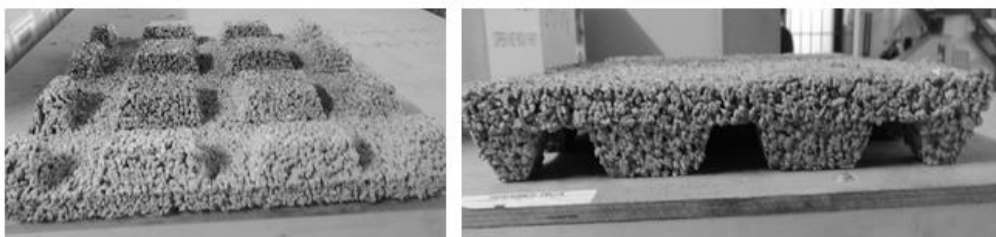
Os autores afirmam que essa condição se deve ao fato do maior conteúdo de ar no material, pois sempre que não houver a permeabilidade da pasta de cimento nos poros do agregado de EVA, a baixa rigidez do sistema é preservada, mantendo-se a dissipação da energia mecânica por causa do amortecimento interno, com a consequente redução do som de impacto. A dissipação da energia mecânica é explicada pelo aumento do tempo de contato derivado do amortecimento da energia cinética resultante das características elástica do material. Nessas circunstâncias o espectro de excitação tem a mesma força de amplitude com diferentes distribuições ao longo do tempo.

Eles concluem que esses resultados, no entanto, não devem ser utilizados com a finalidade de se obter um valor absoluto de isolamento, pois o efeito dos vínculos entre os elementos construtivos e a contribuição das transmissões marginais são de extrema relevância para a determinação do isolamento ao ruído de impacto em sistemas de pisos. E que o resíduo de EVA da indústria calçadista se mostrou eficiente na redução dos ruídos de impacto para o uso como agregado leve em argamassa de contrapiso, além de ser uma alternativa para reduzir o custo de argamassa, bem como dar uma finalidade ao resíduo que ficaria depositado em aterros.

Santos (2013) desenvolveu outro estudo que propõe placas cimentícias, executadas com agregados de resíduos de EVA ($D_{máx} = 4,8$ mm), aplicadas como material resiliente na composição de sistemas de piso flutuante. Nesse estudo, foram testadas três placas

cimentícias (35 cm x 35 cm) de EVA com configurações diferentes, em termos de espessura total e geometrias: uma delas com todas as superfícies planas (espessura total igual a 2,5 cm, intitulada de EVA_ar0); outras duas (espessura total igual a 3,5 cm e 5,0 cm, intituladas de EVA_ar1 e EVA_ar2,5 respectivamente) com uma das superfícies com baixos relevos parciais, de modo a gerar alguns bolsões de ar (alturas iguais a 1,0 cm e 2,5 cm, respectivamente) (Figura 10) entre tais placas e a laje estrutural pré-moldada convencional (10 cm).

Figura 10 – Placa do tipo EVA_ar2,5 desenvolvida por Santos (2013)



Fonte: Santos (2013)

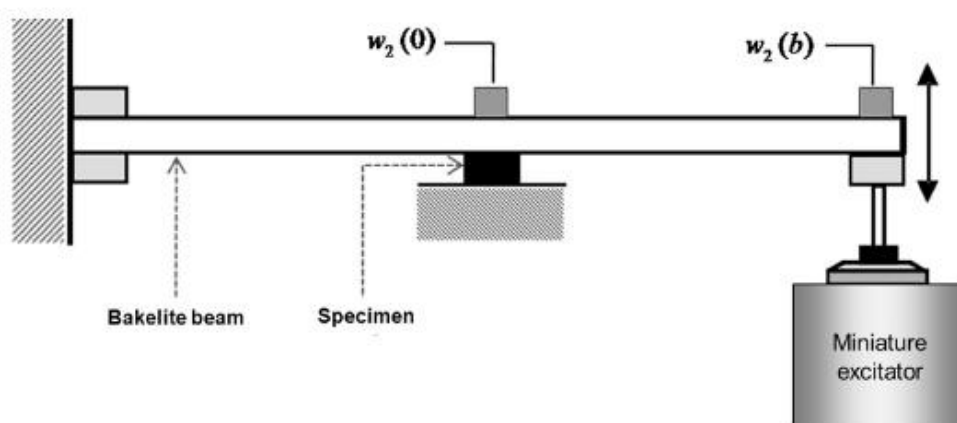
O desempenho das placas de EVA propostas foi comparado com alguns materiais disponíveis no mercado (polietileno de 1,0 cm; e lã de rocha de 5,0 cm, chamados de MA e LR respectivamente) para uso em pisos flutuantes. Nos ensaios simplificados (com área das amostras com 1,0 m²), realizados em protótipo, simulando ambientes sobrepostos, todos os sistemas de pisos flutuantes foram avaliados, considerando o contrapiso com 4,0 cm, com revestimento em cerâmica esmaltada.

Com base nos resultados obtidos no estudo de Santos (2013), nenhuma das amostras com placa cimentícia de EVA obteve desempenho superior, de acordo com a classificação da NBR 15575-3:2013. Contudo, dentre as três placas avaliadas, somente a placa EVA_ar2,5 (espessura total com 5 cm), com maior bolsão de ar (altura de 2,5 cm) se classificou com desempenho intermediário ($L'_{nT,w} = 64$ dB). A principal conclusão de Santos (2013) foi que a placa cimentícia de EVA, como proposta, tem potencial como um material alternativo, visando reduzir os ruídos de impacto entre os pisos de edificações. Para essa conclusão apoia-se na consideração de que os resultados foram obtidos com laje pré-moldada convencional, que reconhecidamente tem o menor desempenho em relação aos demais tipos de laje.

Yo e Jeon (2014) estudaram os efeitos de isoladores resilientes e materiais de amortecimento viscoelásticos, entre eles o EVA, na redução de ruído de impacto de piso

usando simulações de método dos elementos finitos (MEF) e medições *in situ*. Inicialmente, as propriedades dinâmicas dos materiais foram medidas usando um método de função de transferência de feixe para incluir as propriedades em uma simulação MEF (Figura 11), no qual a extremidade do feixe foi fixada por um torno de bancada, enquanto a outra extremidade foi excitada por uma vibração controlada gerada com um agitador eletrodinâmico (B&K Tipo 4810). A vibração estrutural do sistema foi medida usando dois acelerômetros piezoelétricos em miniatura (Endevco 2250-A), e a função de transferência entre os dois acelerômetros foi calculada. Então as propriedades dinâmicas das amostras foram determinadas.

Figura 11 - Método de função de transferência de feixe



Fonte: Yo e Jeon (2014)

Como resultado, materiais de amortecimento forneceram um fator de perda maior e um módulo de elasticidade dinâmico também maior do que os isoladores resilientes. Posteriormente, simulações MEF e medições *in situ* foram realizadas para investigar os efeitos da intercamada sobre as características dos sons e vibrações do piso. Os resultados indicaram que o nível de aceleração da vibração do impacto e os sons de impacto do piso em baixas frequências foram significativamente diminuídos devido à instalação de materiais de amortecimento, enquanto os níveis de pressão sonora de baixas frequências foram aumentados, como resultado do uso de isoladores resilientes.

De acordo com Kim *et al* (2015), na Coréia os materiais resilientes mais comuns utilizados em pisos flutuantes são poliestireno expandido (EPS) e o etileno acetato de vinila (EVA). De fato, estudos experimentais têm demonstrado perspectivas positivas quanto à utilização do resíduo do EVA, para reduzir ruído de impacto entre pisos de edificações de

multipavimentos. Brancher *et al* (2016), afirmam que materiais com aplicação não estrutural, que não requerem elevada resistência mecânica, podem conter elevadas porcentagens de resíduos e, dessa forma, aumentar a eficiência no isolamento térmico e acústico de elementos construtivos.

Borges (2015) analisou materiais inovadores com compósitos, produzidos a partir da substituição parcial da areia por três diferentes resíduos (EVA, casca de arroz e resíduos de madeira), sendo analisados comparativamente, buscando investigar as propriedades acústicas de argamassas destinadas para contrapiso. Segundo a autora, nas baixas frequências, bandas entre 100 e 400 Hz, ocorreu uma semelhança de desempenho entre os materiais testados. Destaca-se que os compósitos com EVA demonstraram melhor desempenho ao isolamento de ruído de impacto nas médias e altas frequências, que correspondem aos limites de bandas de terço de oitava entre 400 e 1600 Hz. A autora ainda destaca que os compósitos com mais adição de resíduos apresentaram valores de redução dos sons de impacto (ΔL) superiores, com redução de 22 dB para EVA 50% e 24 dB para EVA 75%, em relação ao sistema de referência sem EVA.

Os níveis de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ($L'_{nT,w}$) dos compósitos com resíduo, também apresentaram redução em relação ao compósito de referência, o que ocasionou aumento da capacidade de isolamento acústica desses compósitos. Finalmente, conclui-se que os compósitos com resíduos de madeira ficaram frágeis e quebraram, não sendo possível ensaiar quanto ao ruído de impacto. No âmbito das propriedades acústicas, os testes laboratoriais mostraram resultados quanto à redução dos ruídos de impacto e níveis de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ($L'_{nT,w}$).

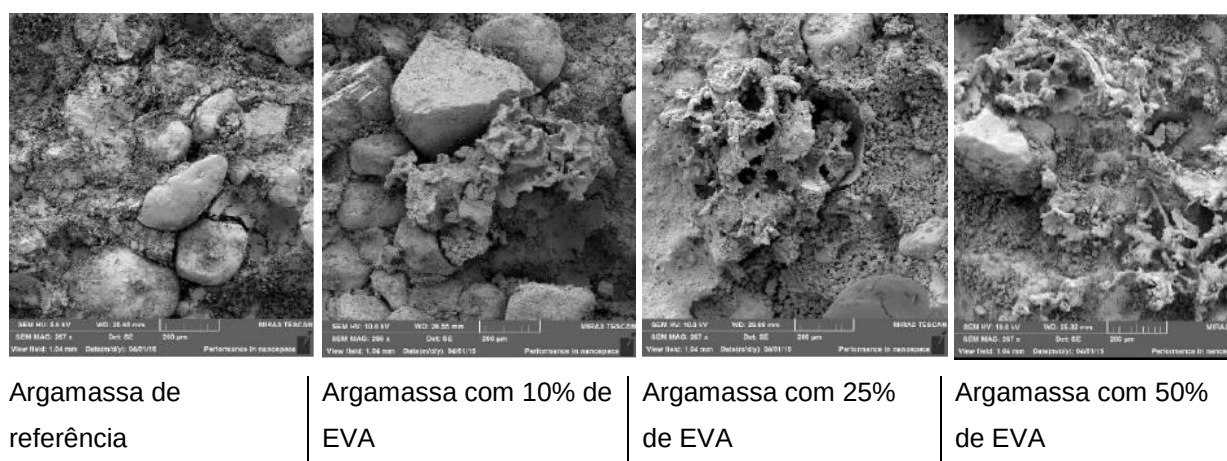
Borges *et al* (2018) propuseram a utilização de resíduos de EVA e casca de arroz em materiais resilientes para diminuir o ruído de impacto, substituindo agregados naturais com 25%, 50% e 75% na composição cimentícia. Ensaio de fluência à compressão, rigidez dinâmica e ruído de impacto foram realizados e os resultados mostraram que o uso de resíduos naturais e artificiais pode representar ganhos na eficiência do isolamento acústico de ruído de impacto para pisos flutuantes, quando usado em proporções maiores. A influência de variáveis, como tamanho de partícula do material incorporado a diferentes tipos de compostos, difere de acordo com o tipo de material, porque quanto menor o tamanho de partícula, maior a eficiência do material no isolamento de ruído de impacto.

Em um estudo comparativo desenvolvido com argamassa leve com resíduo de EVA, Zuchetto *et al* (2015b) testaram cinco diferentes proporções 20%, 40%, 60%, 80% e 100% para verificar o desempenho acústico de piso flutuantes baseados em fluência à

compressão e testes de rigidez dinâmica. As amostras feitas de 80% e 100% de EVA tiveram menor rigidez dinâmica, 26,74 e 28,13 MN/m³, respectivamente, ambos com uma estimativa de ΔLw de 24 dB.

Brancher *et al* (2016) analisaram a eficiência do EVA micronizado⁹ (Figura 12) compostos em corpos de prova de 3 cm, 5 cm e 7 cm de espessura e três conteúdos de adição de polímero.

Figura 12 – Característica morfológica de acordo com o percentual de EVA



Fonte: Adaptado de Brancher *et al* (2016)

Amostras com 50% micronizadas de EVA mostraram melhor eficiência de isolamento de impacto de 23 dB. Análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiram verificar que a eficiência do sistema é explicada pela preservação de porosidade dos grãos de polímero por causa do tipo de interface formada com a pasta de cimento.

Zini *et al* (2016) afirmam que em materiais porosos, o amortecimento de som é primariamente relacionado com a dissipação de energia devido ao atrito do ar durante a propagação através dos poros e, também, por viscosidade e atrito interno, quando a vibração ocorre a partir da própria estrutura do material. A quantidade de vazios é diretamente proporcional ao amortecimento de impacto mecânico.

Pacheco *et al* (2017) estudaram o uso do resíduo de EVA no concreto, como substituto do uso de agregados convencionais, traz incorporação de ar através da porosidade do componente. Isso contribui para que esta solução se transforme em um método eficiente para fornecer concreto com isolamento acústico e é uma maneira eficiente,

⁹ Microzinado vem de um processo de redução de partículas através de moinhos onde se obtém a redução do material em até 400 microns. Disponível em: <http://www.grupoelasto.com.br/produtos/micronizacao/>. Acesso em: Fevereiro de 2020.

com custo reduzido, de incorporar ar e reduzir a massa específica das lajes, levando a uma redução da transmissão acústica de impacto nos sistemas de piso.

Silva *et al* (2017) testaram a inflamabilidade de placas cimentícias com resíduo de EVA, no ensaio de queima a placa quando utilizada em situações verticais precisou de adição de um antichamas de Alumina tri-hidratada (ATH), pois sem essa adição o material queimou totalmente em um tempo médio de 2,59 segundos. E quando a placa produzida foi testada em situações horizontais, como por exemplo piso e teto, se mostra resistente. Pois após 30 segundos de exposição a chama, o fogo se extinguiu sem propagação, ou seja, a combustão não atingiu a marca de 25 mm como recomendado pela UL94 (teste de queima vertical e horizontal).

Portanto, como visto em algumas pesquisas, o aproveitamento desses materiais (resíduos de EVA) tem a possibilidade de serem usados para correção acústica, cujo grande desafio é de racionalizar o uso da energia, respeitar o meio ambiente e utilizar recursos renováveis nos processos de industrialização, além de não ser um custo oneroso para o empreendimento. Como dizem Nienkoetter *et al* (2014), o tratamento acústico contendo a brita leve de EVA na argamassa de contrapiso é uma ideia promissora a ser desenvolvida como sistema de redução dos ruídos de impacto, já que seu custo foi avaliado como tratamento acústico com valor intermediário para uma residência multifamiliar em prédio popular de padrão baixo. Neste estudo de Nienkoetter *et al* (2014), o EVA é usado para fabricação do contrapiso diferentemente do presente estudo, mas reforça o pensamento de que é viável a utilização desse produto como material resiliente por ser um resíduo descartado pela indústria calçadista e que com esta utilização contribui para consolidar uma alternativa ao descarte, como também para o desempenho acústico da edificação e com isso compensando o investimento do seu uso.

1.5 Algumas variáveis que interferem nos resultados de redução do ruído de impacto em pisos flutuantes

Vários aspectos influenciam os estudos de ruído de impacto no piso e a sua transmissão entre pavimentos adjacentes dos edifícios, tais como: os materiais utilizados como revestimento do piso, o tipo de laje estrutural executada (maciça, pré-moldada,

nervurada, etc), a posição do forro rebaixado, a rigidez dinâmica do material resiliente, entre outros.

Em relação aos materiais utilizados como revestimentos de pisos, Pedroso (2007) diz que os melhores resultados práticos para isolamento acústico são os apresentados por tapetes e carpetes, porém esses métodos não são muito aceitos por questões culturais e sanitárias, já que tapetes e carpetes podem contribuir para a origem de doenças alérgicas.

Outra preocupação na concepção dos pisos flutuantes, conforme Souza *et al* (2006), é de evitar as pontes acústicas, que ocorrem quando pequenos pontos rígidos permanecem entre o contrapiso e a laje, ou seja, é necessário que o contato entre as superfícies seja feito somente por meio de material resiliente. E também ter atenção ao isolamento entre as estruturas (alvenaria + laje), pois qualquer ponto de contato pode ocasionar ponte acústica, o que acarreta perda parcial do isolamento.

Para que isto não ocorra é necessário que o material resiliente envolva o contrapiso não só em sua interface contrapiso/laje, mas também em sua interface contrapiso/paredes, subindo a manta resiliente do piso flutuante até a altura do rodapé em torno de todo o ambiente. Um exemplo que pode ocasionar pontes acústicas é a presença das taliscas, devendo-se, portanto, efetuá-las sobre o próprio material resiliente, evitando o contato direto do piso com a laje, com uso de espaçadores para evitar o contato da tela com os demais sistemas dos pisos flutuantes.

A Associação Brasileira para Qualidade Acústica (ProAcústica) (2015) recomenda alguns procedimentos para executar de maneira correta o projeto do sistema de piso flutuante. Inicialmente, para execução desse sistema, é necessário proceder a uma varrição completa da laje, pois qualquer material que ficar entre o contrapiso e a laje servirá de ponte acústica, reduzindo a característica isolante da manta. Em seguida, a manta acústica deve ser colocada sobre a laje antes da execução e posicionamento das mestras e das taliscas. Nunca se deve cortar a manta na região das taliscas. O terceiro passo é realizar o sarrafeamento do piso grosso com régua metálica. No encontro com as paredes e outras superfícies verticais, deve ser deixada uma sobra de 10 a 15 cm para garantir a subida da manta até o rodapé. Depois colocar as tiras de rodapé por trás da manta em volta de toda a parede. O contrapiso acústico não pode ter contato direto com nenhuma parte da estrutura. Em seguida, coloca-se a argamassa, que, então, deve ser compactada com soquete. A argamassa precisa ser aplicada em duas camadas, quando for usada a tela metálica eletrosoldada entre elas, e é preciso tomar extremo cuidado no momento da compactação para não deslocar a tela de sua posição. Depois de terminada a execução da camada

superior, o contrapiso precisa ser protegido com lona plástica para não perder a umidade, a fim de que exista a cura adequada.

1.5.1 Características da rigidez dinâmica dos materiais resilientes utilizados em sistemas de pisos flutuantes.

Uma característica que se destaca na influência dos resultados dos materiais resilientes quanto ao desempenho no isolamento acústico é a rigidez dinâmica que de acordo com Kim *et al* (2016) depende da densidade, forma, espessura e carga estática do material. E com isso fornece o valor necessário para estimar o quanto o piso flutuante pode reduzir o nível de pressão sonora do impacto.

Segundo Caniato *et al* (2016), os principais parâmetros que caracterizam as propriedades mecânicas de um material resiliente são três: rigidez dinâmica, fluência compressiva e compressibilidade. A compressibilidade e compressão são primordiais e devem ser medidas em laboratório para avaliar se a camada resiliente selecionada é adequada para o tempo de vida do sistema de piso flutuante esperado do edifício, como por exemplo, em alguns países (ex. Itália e França), esta vida útil é de pelo menos 10 anos.

Borges *et al* (2018) afirmam que o que pode determinar a eficiência do isolamento de ruído de impacto é a capacidade de deformação do material resiliente a carga constante, para a qual torna-se importante executar teste de aceleração de compressão com uma forte relação entre tempo, deformação e estresse aplicado, portanto, essa propriedade permite avaliar desempenho do sistema ao longo do tempo nas taxas de carregamento de uso.

Zini *et al* (2016) relataram que a relação entre a redução da espessura do material resiliente devido à compressão ao longo do tempo e estimativa do desempenho acústico do sistema revestido tem sido estudada em diversas pesquisas, que com a determinação da rigidez dinâmica, fluência à compressão e redução do ruído de impacto fornecem dados para estudos mais completos. Os autores concluíram que materiais compressíveis, embora promovam um elevado amortecimento da energia produzida pelo impacto entre sólidos, pode levar a uma redução excessiva da espessura do material quando sujeito a certas cargas, que poderia causar um aumento na rigidez dinâmica e a diminuição subsequente na redução do som de impacto.

No estudo de Zuchetto *et al* (2015a), os materiais estudados não tiveram sua capacidade de isolamento acústico reduzida em função da redução de espessura decorrente da compressão, e consequente diminuição no índice de vazios, ao longo do tempo de uso do edifício. Na continuação do estudo Zuchetto *et al* (2016b), afirmam que os materiais resilientes quando estão presentes no sistema de piso flutuante são submetidos a cargas acidentais ao longo de toda a sua vida útil, eles sofrem deformações e consequentes reduções na sua espessura inicial, o que pode comprometer sua eficiência no amortecimento das vibrações.

De acordo com Kim *et al* (2009), em relação à escolha do material resiliente a ser utilizado, com o objetivo de reduzir o nível de ruído de impacto deve-se considerar que materiais resilientes com menor rigidez dinâmica propiciam maior nível de redução de ruído de impacto. Esse fato chama a atenção para a necessidade de avaliar essa variável (rigidez dinâmica) entre as opções de materiais com características resilientes, para cumprir a mesma função nos pisos flutuantes e que será mais discutida no próximo ponto deste trabalho. Dessa forma, fica evidente a problemática abordada nessa pesquisa, na medida em que se constata a existência de variáveis importantes, que podem influenciar no desempenho acústico dos pisos flutuantes.

Kim *et al* (2009) observaram que enquanto a rigidez dinâmica diminui, a frequência de ressonância diminui também e o nível de redução do som do impacto aumenta. Para evitar ressonância em 63 Hz, é desejável diminuir a rigidez dinâmica de materiais resilientes, e para reduzir o ruído de impacto é vantajoso aplicar materiais resilientes com uma rigidez dinâmica igual ou inferior a 8 MN/m³. Os autores examinaram as mudanças na rigidez dinâmica de 51 materiais resilientes, de acordo com diferentes métodos de instalação desses materiais, sendo eles Poliéster, EPS macio (poliestireno expandido), EVA (acetato de etileno vinil), EPP (Polipropileno Expandido), EPE (Polietileno Expandido), EPS (Poliestireno expandido) e EPO (poliolefina expandida). Os experimentos foram realizados com 16 camadas simples e 35 multicamadas estruturais desses materiais resilientes. Os autores analisaram a correlação entre os resultados da rigidez dinâmica e a redução de ruído de impacto (Tabela 06) e dizem que à medida que a rigidez dinâmica dos materiais resilientes diminui, o nível de redução de ruído de impacto tende a aumentar, e a correlação variou dependendo da frequência.

Tabela 06 - Expressão de correlação envolvendo rigidez dinâmica e nível de redução do ruído de impacto (banda 1/3 de oitava).

Frequência (Hz)	Expressão de correlação ^a	Coefficiente de determinação (R ²)
-----------------	--------------------------------------	--

^a Avaliação da influência da compressão de placas cimentícias com resíduo de EVA como material resiliente alternativo no isolamento ao ruído de impacto.

25	$y=1,768 \ln(x)-6,4992$	0,2532
31,5	$y=-1,3017 \ln(x)-0,3086$	0,1646
40	$y=-1,1366 \ln(x)+3,9201$	0,5894
50	$y=0,6307 \ln(x)+1,9623$	0,0492
63	$y=-4,9416 \ln(x)+2,878$	0,7768
80	$y=-6,0786 \ln(x)+17,989$	0,8317
100	$y=-5,2281 \ln(x)+18,444$	0,7992
125	$y=-3,6541 \ln(x)+19,278$	0,7667
160	$y=-4,0732 \ln(x)+21,085$	0,8368
200	$y=-3,4223 \ln(x)+23,185$	0,8066
250	$y=3,9261 \ln(x)+27,271$	0,8046
315	$y=-2,5653 \ln(x)+24,976$	0,5368
400	$y=-0,83 \ln(x)+19,813$	0,1306
500	$y=-0,7715 \ln(x)+19,911$	0,0987
630	$y=0,124 \ln(x)+16,19$	0,0012

^a x = rigidez dinâmica; y = redução do nível de ruído de impacto

Fonte: Adaptada de Kim *et al* (2009)

Os resultados da medição da banda de 1/3 de oitava mostraram que a determinação do coeficiente ($R^2 = 0,8368$) foi o mais alto em 160 Hz, e o coeficiente de determinação não foi alto entre faixas de 25 Hz a 40 Hz e de 315 Hz a 630 Hz. Após a conversão em número único, o nível de ruído de impacto das estruturas com baixa rigidez dinâmica foi reduzido, levando a conclusão de que existe uma correlação entre a dinâmica rigidez e nível de ruído do impacto.

Os ensaios para a determinação da rigidez dinâmica de materiais resilientes são realizados com base nos procedimentos da norma ISO 9052-1:1989. O princípio é a determinação da rigidez dinâmica aparente ($s' t$), por unidade de área de amostra, através do método da ressonância, que consiste na medição da frequência fundamental de ressonância da vibração vertical do sistema massa-mola. A mola corresponde ao material resiliente e a massa à placa de carga. De acordo com a norma ISO 9052-1:1989 a frequência de ressonância da vibração vertical pode ser determinada utilizando sinais sinusoidais, de ruído branco ou de pulso sinusoidal.

A norma explica que esses métodos são equivalentes. No pulso sinusoidal se obtém a frequência de ressonância variando a frequência de excitação, enquanto se mantém constante a força de excitação. O valor da frequência de ressonância é encontrada por extrapolação da força de amplitude não nula. O sinal de ruído branco se obtém a frequência de ressonância através da análise de resposta do sistema, em conformidade com a ISO 7626-2 ou usando impacto de excitação com um excitador que não está ligado à estrutura.

A rigidez dinâmica (s') é determinada somando-se ao valor da rigidez dinâmica aparente ($s' t$) a um fator ($s'a$) que depende da rigidez dinâmica do gás existente nos poros

do material. Neste trabalho, apenas será determinada a rigidez dinâmica aparente dos materiais resilientes. A frequência de ressonância é dada pela equação 06:

$$f_r = 1/2\pi \sqrt{s't/m't} \quad (\text{Equação 06})$$

Onde:

$s't$ é a rigidez dinâmica aparente por unidade de área da amostra (N/m³);

$m't$ é a massa total por unidade de área usada durante o teste (kg/m²).

A rigidez dinâmica (s') é definida como sendo a proporção de deslocamento dinâmico para carga dinâmica e pode ser definida de acordo com a Equação 07:

$$s' = \frac{F \sqrt{S}}{\Delta d} \left(\frac{N/m^2}{m} = \frac{N}{m^2 m} = N/m^3 \right) \quad (\text{Equação 07})$$

Onde:

S = é a área do corpo de prova;

F = é a força agindo perpendicularmente;

Δd = alteração dinâmica resultante da espessura do material resiliente.

E a rigidez dinâmica aparente ($s't$) por unidade de área da amostra de teste é dada pela Equação 08:

$$s't = 4 \cdot \pi^2 \cdot m_t \cdot f_r^2 \quad (N/m^3) \quad (\text{Equação 08})$$

Onde:

$m't$ = é a massa total por unidade de área

f_r = é a frequência de ressonância

Esta propriedade está correlacionada com a rigidez do material resiliente e conclui-se então que a isolação de ruídos de impacto em prol do conforto acústico pode ser controlada pelo acréscimo na espessura da laje de concreto armado, aliado ao emprego de materiais resilientes com baixa rigidez dinâmica, em busca de uma camada com capacidade de minimizar as vibrações causadas por impactos acidentais e inevitáveis, através do sistema massa-mola. Então, a rigidez dinâmica é dada pela relação da força dinâmica aplicada diretamente na amostra com o deslocamento dinâmico sofrido pelo material resiliente.

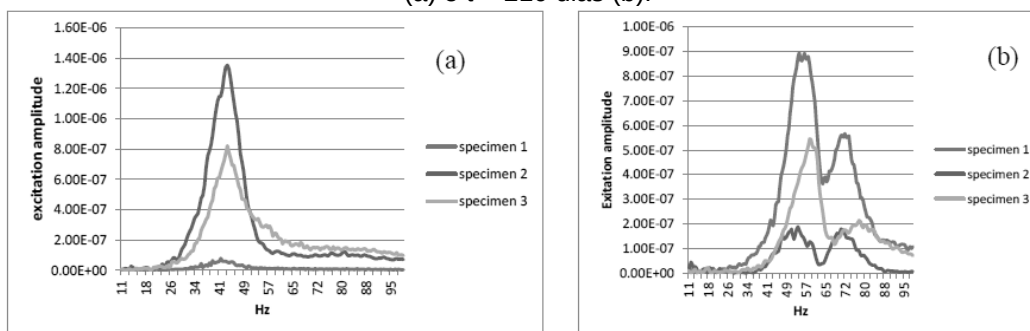
De acordo com Pacheco *et al* (2017), os materiais resilientes promovem uma redução de massa nos sistemas de revestimento quando incorporados no contrapiso e com isso são susceptíveis a deformações, o que pode levar a mudanças na capacidade de amortecimento ao longo do tempo. Schiavi *et al* (2005), recomenda a medição da frequência de ressonância de um sistema resiliente para uma carga estática após alguns dias, pelo menos para a medição de rigidez dinâmica ser mais confiável.

Segundo Kim *et al* (2015), na Coreia os materiais resilientes estão limitados a valores menores do que 40 MN/m³. Pois este é um valor mínimo definido pelas leis domésticas coreanas para assegurar o desempenho do isolamento do ruído de impacto do piso em edificações de multipavimentos.

Segundo Cripps e Fovargue (2004) *apud* Klippel Filho *et al* (2017), 10 MN/m³ é o valor máximo para materiais utilizados como camadas resilientes em pisos flutuantes em países europeus. Já estudos no Brasil não dizem quanto de rigidez dinâmica pode ter ao longo do tempo, mas como por exemplo, o estudo de Zuchetto *et al* (2016a) diz que após 10 anos de uso, os sistemas de pisos flutuantes compostos por materiais poliméricos fibrosos podem apresentar uma perspectiva de perda de desempenho entre 3 e 4 dB em medições de ruído de impacto.

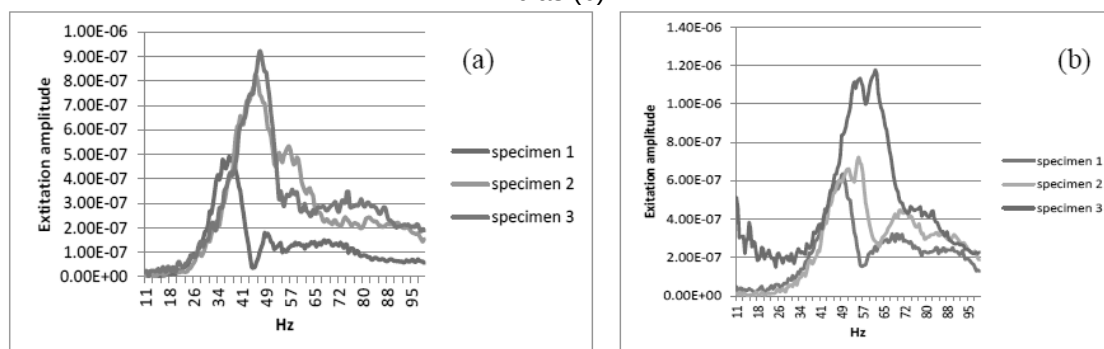
Segundo a ISO 9052-1:1989, pode-se escolher um sistema não – automático tanto para excitação como para o pós-processamento. No estudo de Caniato *et al* (2015) foi utilizado um martelo de impacto, acelerômetro, *Hardware* da *National Instruments* e Programa LabVIEW para aquisição de sinal. Os resultados obtidos ambos em t₀ e após 210 dias sob carga estática (teste de fluência à compressão) mostram uma mudança de frequência do pico de amplitude de ressonância em valores mais altos (Figura 13 e 14). Este fato implica uma redução dos desempenhos do piso flutuante e é causado por fluência compressiva, fenômeno que ocorre tanto para camadas tradicionais quanto recicladas.

Figura 13 - Frequência de Ressonância para raspas de pneus não compactados (amostra A) em t₀ (a) e t = 210 dias (b).



Fonte: Caniato *et al* (2015)

Figura 14 - Frequência de Ressonância para resíduos de fibras têxteis (amostra B) em t_0 (a) e $t = 210$ dias (b).



Fonte: Caniato *et al* (2015)

Neves *et al* (2008) fizeram a previsão da redução de ruídos de impacto de acordo com as normas ISO 12354-2 e ISO 717-2. A validação do resultado do ensaio é feita tendo em conta a função de coerência que dá o grau de linearidade entre a força aplicada e a aceleração, para cada frequência. Esta função está compreendida entre 0 e 1. Um valor de coerência menor que 1 indica falta de qualidade dos dados obtidos, quando este fato é constatado, o resultado do ensaio deve ser rejeitado. A curva de resposta em frequência permite avaliar o desempenho do material resiliente.

Para cada amostra de material resiliente, foram realizados, pelo menos, três ensaios. Em cada um deles, o acelerômetro foi colocado no centro da placa de carga e excitou o sistema, através de um martelo de impacto, em quatro pontos à volta da sua zona central. Para cada uma das medições, foi obtida a função de transferência na qual foi possível identificar o pico de ressonância e a correspondente frequência de ressonância. Então, determinou-se a rigidez dinâmica aparente para cada uma das medições que foi uma média de doze valores obtidos, com desvio padrão inferior a 10%. Quando algum dos materiais teve o desvio padrão superior a 10%, ensaiaram-se novas amostras até se obter uma rigidez dinâmica aparente média com desvio padrão inferior a 10%. Tendo em conta a Equação 09, foi possível determinar o fator de qualidade, Q e o grau de amortecimento (ξ) foi obtido a partir da Equação 10. Confrontando os valores de Q e ξ com os respectivos valores da rigidez dinâmica aparente, nas amostras de Feltro e de EPS de cor cinza, constataram que quanto maior for o grau de amortecimento do sistema, maior é o valor da rigidez dinâmica aparente pelo qual o fator de qualidade decresce.

$$\xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega} \quad (\text{Equação 09})$$

$$Q = \frac{\omega}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{1}{2\xi} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

ω_1 e ω_2 = frequências

Q = fator de qualidade

ξ = grau de amortecimento,

Então, para estes materiais, na medida em que a espessura do material resiliente aumenta, a rigidez dinâmica aparente diminui, assim como o amortecimento e, conseqüentemente, o fator de qualidade aumenta. Para o aumento de espessura, o amortecimento diminui quando a frequência de ressonância diminui porque o Δf também diminui, ou seja, à medida que a frequência de ressonância diminui, a curva, de resposta em frequência, apresenta um pico mais estreito na ressonância. A partir dos resultados dos ensaios realizados, foi possível estimar a redução sonora aos sons de impacto, para cada uma das amostras. Neves *et al* (2008) dizem que quando os materiais são compressíveis, a diminuição de espessura do material, quando sujeito a carga, pode provocar um aumento da rigidez dinâmica.

Alonso e Patrício (2018) mediram a frequência de ressonância dos diferentes materiais resilientes a partir da análise teórica da vibração livre do material, que permitiu identificar os parâmetros do sistema, como o quociente de dois máximos consecutivos de oscilação, sendo T o período de oscilação. Depois destes parâmetros serem conhecidos, ω_0^2 (rad/s) o quadrado da frequência de ressonância natural da massa-mola do sistema que pode ser obtido da Equação 11, e m' (kg/m²) que é a massa por unidade de área do carregamento.

$$\omega_0^2 = \omega^2 + \delta^2 = (2\pi/T)^2 + \delta^2 = \frac{s}{m'} \quad (\text{Equação 11})$$

Os valores de frequência de ressonância f_0 obtidos foram comparados a partir da FFT, processando os sinais adquiridos através dos acelerômetros. Uma vez conhecida a frequência de ressonância, foi determinada a rigidez dinâmica dos materiais testados e

calculada de acordo com a seguinte relação da Equação 12, onde f_0 (Hz) é a frequência de ressonância medida e m' (kg / m²) é a massa por unidade de área do carregamento.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'}{m'}} \text{ Hz} \quad (\text{Equação 12})$$

Alonso e Patrício (2018) analisaram se os mesmos materiais se comportam de forma semelhante em pisos homogêneos ou heterogêneos devido as suas propriedades estruturais. Então, quatro tipos de materiais comumente usados na Espanha e em Portugal foram analisados. São eles: amostras flexíveis e de baixa densidade compostas por material fibroso de alta porosidade, acoplado a folhas de plástico protetoras (M1 e M2) e materiais feitos de grãos compactados porosos de cortiça (M3) e cortiça misturada com borracha (M4).

As características acústicas desses materiais também foram investigadas para comparar a eficiência desses materiais com base no uso de sua rigidez dinâmica ou estática. Os pisos selecionados para os ensaios foram: laje de concreto maciça (14 cm de espessura), e laje heterogênea pré-fabricada composta por dois painéis de materiais reciclados colados com resinas termofixas, com uma câmara cheia de painéis poliestireno extrudido. De acordo com este estudo, pode-se afirmar que o comportamento acústico dos pisos homogêneos e heterogêneos é significativamente diferente, em alguns casos até quase quatro vezes maior em pisos heterogêneos (Tabela 07), quando o material resiliente aplicado pode ter sua eficiência diferente levando a erros de projeto. Portanto, é necessário realizar medições acústicas de materiais resilientes em laboratório.

Tabela 07 – Resumo dos resultados

Comparison	L_{nw} (dB)		ΔL_{nw} w/o		$L_{nw,1}$ (dB)		ΔL_{nw1} RLF		$L_{nw,2}$ (dB)		ΔL_{nw2} RHF	
	NH	H	NH	H	NH	H	NH	H	NH	H	NH	H
With slab – floating floor system												
M1	78	61	7	23	65	62	7	10	77	56	1	22
M2	79	62	6	22	68	65	4	7	82	59	-4	19
M3	78	60	7	23	66	62	6	10	79	56	-1	22
M4	78	62	7	22	65	63	7	9	76	57	2	21
W/o slab – floor coverings												
M1	56	44	29	40	47	46	25	26	54	40	24	38
M2	78	63	7	21	70	68	2	4	67	59	11	19
M3	73	60	12	24	66	66	6	6	63	56	15	22
M4	57	45	28	39	48	47	24	25	56	41	22	37

H= laje homogênea; NH = laje heterogênea;

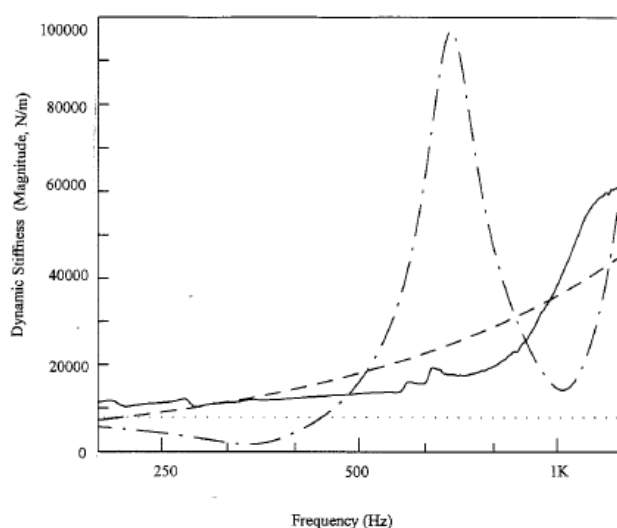
Fonte: Alonso e Patrício (2018)

Stewart e Mackenzie (2000) adotaram uma abordagem simplificada que permite que a rigidez dinâmica de camadas resilientes seja analisada em altas frequências na qual os efeitos de onda através da espessura da camada são importantes. O método é um desenvolvimento da técnica usada na norma ISO 9052-1:1989. No entanto, o método da norma só possibilita ter a rigidez em uma frequência, enquanto o método no trabalho deles consegue a rigidez através de uma faixa de frequência. A Figura 15 demonstra que a previsão da rigidez dinâmica da Equação 13 dá concordância razoável com as medições.

$$\bar{K}(1+j\eta) = j\omega\rho c_l(1+j\eta) \quad (\text{Equação 13})$$

No entanto, a Figura 15 mostra picos e vales que são indicativos de comportamento ressonante da amostra, mesmo que a previsão de rigidez, incluindo os efeitos de ressonâncias de onda (Equação 14), não preveja este comportamento com precisão.

Figura 15- Rigidez dinâmica da espuma laminada em alta faixa de frequência.



————, Cálculo dos dados medidos com equação 7.

....., rigidez à frequência de ressonância massa-mola-massa com equação 5;

-----, rigidez com Equação 12;

- . - . - ., Rigidez com equação 8.

Obs: equações do trabalho de Stewart e Mackenzie (2000)

Fonte: Stewart e Mackenzie (2000)

É importante notar que a Equação 14 apenas prevê o efeito de ondas estacionárias unidimensionais.

$$\bar{K}(1+j\eta) = K_o(1+j\eta) \frac{k_k d \left(1 - j \frac{\eta}{2}\right)}{\tan k_k d \left(1 - j \frac{\eta}{2}\right)} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

$\bar{K}$ = rigidez entre camadas (N/m), que inclui componentes reais e imaginários nas frequências mais altas;

η = fator de perda do material resiliente;

K_k = termo adicional que contém o número de onda longitudinal da camada;

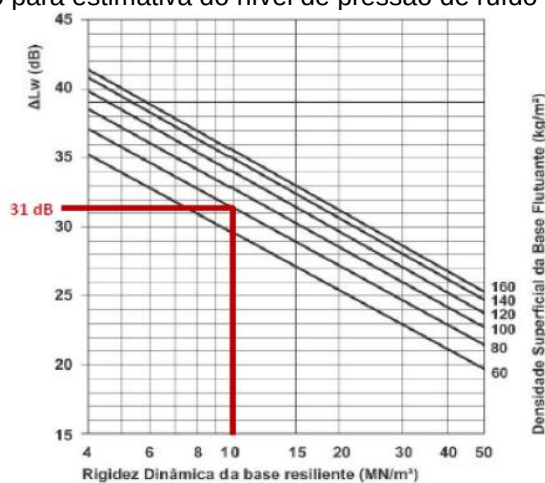
K_0 = A rigidez calculada a partir da medição da frequência ressonante massa-mola-massa.

Cabe lembrar que pode haver algumas reflexões de ondas que geram ondas na direção lateral e, portanto, os efeitos de ressonância podem ser causados por dois modos tridimensionais. No entanto, sem fornecer uma solução completa que inclua uma previsão deste comportamento modal, a abordagem neste trabalho mostra que uma previsão de rigidez dinâmica pode ser feita assumindo que o único movimento de onda na amostra caracteriza-se por ondas longitudinais livres através da espessura da amostra.

De acordo com Baron *et al* (2004) para reduzir a transmissão do ruído de impacto, é importante que a base elástica tenha um valor reduzido de rigidez dinâmica e a base flutuante tenha maior densidade superficial. O fato leva a entender que é possível estimar empiricamente a redução no nível de pressão de som de impacto de um piso flutuante em termos da massa real de uma laje.

A redução ponderada do nível de pressão sonora de ruído de impacto (ΔL_w) está relacionada com a densidade superficial do contrapiso e com a rigidez dinâmica da base elástica (material resiliente). O ΔL_w pode ser estimado conforme indica o ábaco apresentado na norma ISO 12354-2:2017 (Figura 16).

Figura 16 – Ábaco para estimativa do nível de pressão de ruído de impacto no piso



Fonte: Patrício (2010) *apud* Pereira (2018)

Como por exemplo, um caso de aplicação da estimativa escrito por Pereira (2018) com contrapiso de 4 cm de espessura; Manta com rigidez dinâmica de 10 MN/m³; Densidade superficial do contrapiso = 0,04m x 2000 kg/m³ = 80 kg/m². O valor estimado para o ΔL_w é de 31 dB, conforme mostra a Figura 25.

D'Alessandro *et al* (2014), dizem que valores de ΔL_w calculado em laboratório de acordo com a ISO 10140-3, podem ser considerados subestimados no que diz respeito a valores de ΔL_w calculados com equações experimentais que podem ser considerados mais representativos, devido a várias causas como o tamanho da amostra testada e a alta rigidez dos materiais, que no caso deles eram compósitos leves contendo material polimérico derivado de fios elétricos na espessura 7 cm, o tamanho da amostra de ensaio foi de 1 m² e a rigidez de 63 MN/m², o ΔL_w calculado de acordo com a ISO 10140-3, foi de 18 dB e o calculado com equação experimental foi de 25 dB.

Ainda de acordo com a ISO 12354-2:2017¹⁰ é possível prever o comportamento de um material, eventualmente usado em piso flutuante quanto ao isolamento do som, através do cálculo de redução do nível de pressão sonora de ruído de impacto (ΔL em dB).

1.5.2 Fluência à compressão em materiais resilientes de sistemas de pisos flutuantes

A fluência por compressão pode ser determinada com base no carregamento do material ao longo do tempo de acordo com procedimentos ISO 20392:2007, que se baseiam em: três amostras quadradas do mesmo material medindo 20 cm x 20 cm, são colocadas sobre uma base rígida, livres da influência de vibrações; são submetidas a uma carga estática de 200 kg/m², utilizando uma placa de aço com a mesma dimensão e instalados relógios comparadores com precisão de 0,01 mm, para fazer a leitura de deformação ao longo do tempo de ensaio, cujos dados servem para estimar a deformação durante a vida útil do material, quando aplicado em sistemas de piso flutuante, de acordo com valores extrapolados.

De acordo com Kim *et al* (2015) a ISO 20392:2007 serve para determinar a deformação lenta por compressão de material isolante térmico (fluência à compressão), mas que eles utilizaram para materiais resilientes. Neste caso, utilizaram cálculo de deformação

¹⁰ A ISO 12354-2:2017 traz uma nota dizendo que a teoria acústica do isolamento de impacto leva à Equação 03 (página 26), que se refere a placas infinitas. No entanto, dados experimentais mostram que, para situações práticas, a Equação 15 está em uma margem segura.

da espessura devido à aplicação de carga, de acordo com um método para medir a alteração de espessura ao longo de um período, sob uma certa carga e condições de temperatura e umidade. A ISO 20392:2007 também especifica que a espessura das amostras deve ser medida por 90 dias ou mais sob certa carga, e com isso podem ser previstos resultados em relação a 10 anos de aplicação do material.

A espessura medida por 90 dias em um intervalo de escala de registro pode ser usada para estimar a espessura após 10 anos, através de uma equação de regressão linear. A deformação a longo prazo é calculada com base na Equação 15 de Findley (1944) de acordo com a ISO 20392:2007.

$$X_t = X_0 + mt^b \text{ (mm)} \quad \text{(Equação 15)}$$

$$m = 10^a, \quad a = y_m - bx_m,$$

$$b = \frac{\sum x_t y_t - \frac{\sum x_t \sum y_t}{n}}{\sum x_t^2 - \frac{(\sum x_t)^2}{n}}$$

Onde:

X_t é o encurtamento, em milímetros, no tempo t (em horas);

X_0 é inicialmente a deformação (60 s após o carregamento);

X_m é valor médio de x_t .

Depois é calculada a deformação relativa da amostra, ϵ_t , em porcentagem, usando a Equação 16:

$$\epsilon_t = (X_t / d_s) \times 100 \quad \text{(Equação 16)}$$

Onde:

d_s é a espessura inicial, em milímetros.

Schiavi *et al* (2007), relataram a quantidade de deformação após 10 anos, usando uma outra equação (Equação 17) para estimar a rigidez dinâmica com base na mudança de

compressibilidade. Segundo Schiavi *et al* (2007) é possível descrever a compressão do material resiliente, através do comportamento de fluência, de acordo com o tamanho da espessura, durante um longo período.

$$X_{10 \text{ years}} \approx d_L - d_B \text{ (mm)} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

d_L = espessura resiliente da camada inferior, sob uma carga estática de (250 ± 5) Pa após 120 segundos.

d_B = espessura final após 120 segundos sob uma carga estática de (2000 ± 20) Pa

Zuchetto *et al* (2016b) avaliaram cinco materiais fibrosos utilizados como camada resiliente em pisos flutuantes (Tabela 08). Para a análise da influência da compressão no desempenho quanto ao ruído de impacto, os materiais adotados tinham 1 cm de espessura, com variações nas densidades e espessura das fibras poliméricas que os constituíam.

A redução na espessura dos materiais resilientes pode ser indicada como um dos mais importantes aspectos a serem considerados, pois a forma como as fibras desses materiais sofre a acomodação em função da compressão pode determinar sua eficiência ao longo de sua vida útil.

Tabela 08 - Resultados de rigidez dinâmica antes e após o carregamento e a estimativa de deformação para 10 anos de uso

Materiais	Rigidez dinâmica antes do carregamento (MN/m³)			Estimativa da deformação em 10 anos (mm)	Rigidez Dinâmica após carregamento (MN/m³)
	Método 1	Método 2	Método 3		
M1	5,4	4,6	2,5	3,9	4,3
M2	4,0	3,9	2,0	1,5	3,2
M3	3,0	2,7	2,2	1,1	2,6
M4	4,3	4,6	2,5	9,6	4,1
M5	3,2	3,6	1,8	6,5	3,2

Fonte: Zuchetto *et al* (2016b)

Os materiais utilizados apresentaram comportamentos distintos em função da espessura das fibras. No entanto, não foi verificada uma relação direta entre espessura das

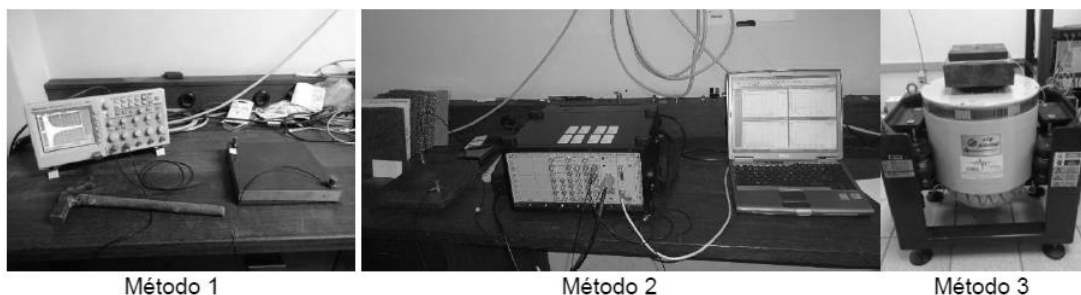
fibras e/ou densidade e a redução na eficiência global dos materiais. As estimativas de acordo com o ensaio de fluência à compressão (ISO 20392:2007) indicaram que após 10 anos de uso, os sistemas de pisos flutuantes compostos pelos materiais deste estudo podem apresentar uma perda de desempenho entre 3 e 4 dB.

Em outro estudo Zuchetto *et al* (2016a) diz que a redução do ruído de impacto estimado a partir dos valores de rigidez dinâmica evidenciou as diferenças indicadas anteriormente, com queda na eficiência dos materiais de aproximadamente de 4 dB, após a compressão dos mesmos, M1 (poliéster 180 kg/dm³) e M5 (polipropileno 1000 kg/dm³), e de 3 dB para os demais (poliéster 240 e 320 Kg/dm³ e polipropileno 500 kg/dm³).

Ou seja, estima-se que após 10 anos de uso, sob condições padrão de carga accidental, os sistemas de pisos flutuantes compostos pelos materiais deste estudo tenham uma perda de desempenho entre 3 dB e 4 dB. Eles obtiveram os valores de rigidez dinâmica a partir de três métodos diferentes (Figura 17) e calculados de acordo com a ISO 9052-1.

O método 1 consistiu-se na utilização de um osciloscópio marca Tektronix TDS 2024B para a aquisição de dados, com a vibração vertical causada pela excitação da placa de carregamento, através do impacto de um martelo. Foram utilizados dois acelerômetros Bruel & Kjaer 4383, acoplados a duas extremidades opostas da placa, de modo a se obter uma média dos dois valores, sendo o impacto causado no centro geométrico da placa.

Figura 17 - Métodos utilizados para a obtenção da rigidez dinâmica



Fonte: Adaptado de Zuchetto *et al* (2016a)

Os sinais, adquiridos através dos acelerômetros, foram processados em transformação rápida de Fourier (FFT), para a obtenção das frequências naturais dos materiais resilientes. Optou-se por realizar as medições em três amostras de mesmo material sobrepostas, a fim de facilitar a leitura da frequência de ressonância. Posteriormente, encontrou-se por cálculo o valor para uma amostra, considerando-se a terça parte do valor total. Os ensaios foram realizados no LNEC – Laboratório Nacional de

Engenharia Civil, em Lisboa/ Portugal. O método 2 seguiu os mesmos procedimentos do anterior, entretanto, para a aquisição de dados, foi utilizado um analisador Pulse Bruel & Kjaer, conectado a um computador.

Para o terceiro método utilizado, a vibração vertical foi feita na placa base, através de um shaker L315M da ETS Solution, enquanto dois acelerômetros 3035B2 da Dytran transmitiram os sinais para um data logger. Para tanto, um acelerômetro foi acoplado à placa base, e o outro à placa de carregamento, de forma a se obter a transmissibilidade da vibração. A amplitude do ensaio foi mantida constante, em 0,5mm, e o sinal foi do tipo sinusoidal. Este ensaio foi conduzido no Instituto Tecnológico Performance – UNISINOS (Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Campus São Leopoldo).

Este método também foi utilizado para a obtenção dos valores de rigidez dinâmica após o ensaio de 122 dias de fluência à compressão de acordo com a norma ISO 20392:2007. Foram utilizadas duas amostras de 20 x 20 cm de cada material, as quais foram submetidas a cargas de 4 kg e 8 kg, respectivamente. A norma estabelece intervalos de tempo em escala logarítmica para as leituras das deformações. Sendo assim, as medições foram feitas através de um paquímetro digital, com exatidão de 0,01 mm. Foram estabelecidos pontos de medição para cada amostra. Desta forma, todas as leituras foram conduzidas nestes pontos. O ensaio foi realizado em uma base robusta, de forma que as vibrações externas não influenciassem no mesmo. Os valores de deformação, obtidos após o tempo de ensaio, foram extrapolados 30 vezes, conforme permite a norma, a fim de verificar o comportamento dos materiais ao longo de sua vida útil. Os materiais utilizados nesse estudo apresentaram comportamentos distintos em função da espessura das fibras. No entanto, não foi verificada uma relação direta entre espessura das fibras e/ou densidade com a redução na eficiência global dos materiais. As estimativas indicaram que após 10 anos de uso os sistemas de pisos flutuantes compostos pelos materiais deste estudo podem apresentar uma perda de desempenho entre 3 dB e 4 dB.

Alonso e Patrício (2018) analisaram a influência das condições de compressão no desempenho acústico de camadas resilientes de pisos e a avaliação da redução de ruído a longo prazo no sistema de piso flutuante, determinaram que uma maior diminuição no som é encontrada em materiais resilientes macios.

Outro exemplo de estudo com fluência por compressão é o de Borges *et al* (2018), no qual eles determinaram essa característica com base no carregamento do material ao longo do tempo (Figura 18), de acordo com procedimentos da ISO 20392:2007. As mesmas

três amostras quadradas medindo 20,0 cm x 20,0 cm foram utilizadas para o teste de rigidez dinâmica. Seis amostras de cada mistura foram testadas, 3 para cada espessura.

Figura 18 – Teste de Fluência a compressão



Fonte: Borges *et al* (2018)

Em uma sala com temperatura e umidade controladas ($T = 20\text{ C} \pm 2\text{ C}$ e $RH = 72\% \pm 5\%$), as amostras foram colocadas sobre uma base rígida, livres da influência de vibrações. Depois, elas foram submetidas a uma carga estática de 200 kg/m^2 , através de uma placa de aço medindo $20,0\text{ cm} \times 20,0\text{ cm}$ colocada nas amostras. Então comparadores analógicos com precisão de $0,01\text{ mm}$ foram instalados para leitura de deformação. As amostras foram submetidas a uma carga de 200 kg/m^2 durante 18 dias. Os valores foram extrapolados para um tempo de uso 30 vezes maior, correspondendo a 1 ano e 6 meses.

Então, como pode ser observado, é importante a análise do presente estudo para a verificação do comportamento do material produzido (placa PEVA1,8), investigando qual será a estimativa do seu desempenho ao longo do tempo.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1 Metodologia da Pesquisa

Foi utilizada para este estudo as definições de Marconi e Lakatos (2010) que classificam a pesquisa científica quanto à natureza e a operacionalização. Quanto à natureza, a presente pesquisa caracterizou-se por ter uma base quantitativa, já que teve análise de dados coletados através de testes laboratoriais e quanto à operacionalização, a pesquisa teve um caráter bibliográfico e experimental, já que foram feitos estudos com os materiais fabricados e aplicados em situações de testes com mudanças de variáveis.

Neste trabalho foram fabricadas placas PEVA1,8 (Figura 19) em quatro conjuntos diferentes: PEVA1,8_A; PEVA1,8_B; PEVA1,8_C e PEVA1,8_D, que foram submetidas aos ensaios de ruído de impacto rigidez dinâmica e fluência à compressão respeitando o propósito de cada uma e comparando os resultados com o material comercial (MantaPET_A e MantaPET_B) (Figura 21). A espessura original das placas PEVA1,8 foi de 1,8 cm.

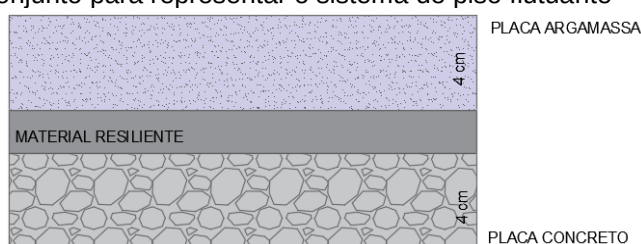
Figura 19 – Placa PEVA1,8 nas dimensões 20 cm x 20 cm



- PEVA1,8_A: foi descartada após o primeiro ensaio de ruído de impacto porque foi aplicada nesta amostra um tipo de resina que não se sabia ao certo sua composição e que alterou para pior os resultados de ruído de impacto e da rigidez dinâmica.

- PEVA1,8_B: esta amostra ficou submetida à carga estática no conjunto (Figura 20): placa de argamassa + placa cimentícia de EVA + placa de concreto que serviu para simular a compressão natural do material proposto quando usado como resiliente em sistema de piso flutuante, entre o contrapiso e a laje. Então, foi verificado o valor do isolamento do ruído de impacto e da rigidez dinâmica ao longo do tempo, inicialmente de ano em ano.

Figura 20 – Conjunto para representar o sistema de piso flutuante



- PEVA1,8_C: foi fabricada no mesmo lote que a PEVA1,8_A, PEVA1,8_B e permaneceu no conjunto durante três anos sem interrupção para verificação do valor de seu isolamento ao ruído de impacto e rigidez dinâmica.
- PEVA1,8_D: Foi fabricada após as placas acima, mas com o mesmo traço e não ficou submetida à carga no conjunto. Para essa amostra que não sofreu interferência, foi feito o ensaio de fluência à compressão que será explicado mais adiante e que serve para quantificar seu desempenho correspondente a 10 anos de vida útil, comparado com o material resiliente comercial (MantaPET_A) que ficou submetido à mesma situação.
- MantaPET_A: amostra de manta comercial composta por fibras recicladas fabricadas a partir de resíduo de PET (Figura 23) com 8 mm de espessura e densidade 30 kg/m³, de acordo com especificação do fabricante, ficou submetida à carga estática no sanduíche, mas com um tempo menor, devido ao acesso a esse material só ter sido depois da fabricação das placas PEVA1,8. A MantaPET_A também foi avaliada quanto ao seu desempenho referente ao isolamento ao ruído de impacto e de rigidez dinâmica até os dois anos, com 25 amostras de 20 cm x 20.

- MantaPET_B: não ficou submetida a carga no conjunto e essa amostra não sofreu interferência. Foi feito o ensaio de fluência à compressão para quantificar seu desempenho correspondente a 10 anos de vida útil.

Figura 21 – Amostra de MantaPET cortada nas dimensões 20 cm x 20 cm



Os ensaios experimentais para as amostras PEVA1,8 se dividiram em três tipos de medição: de ruído de impacto, de verificação de rigidez dinâmica e de fluência à compressão, sendo o de ruído de impacto e de rigidez dinâmica descritos nos fluxogramas abaixo (Figura 22 e 23) e resumidos com seus respectivos períodos na Tabela 10.

Figura 22 – Fluxograma do ensaio de Ruído de Impacto

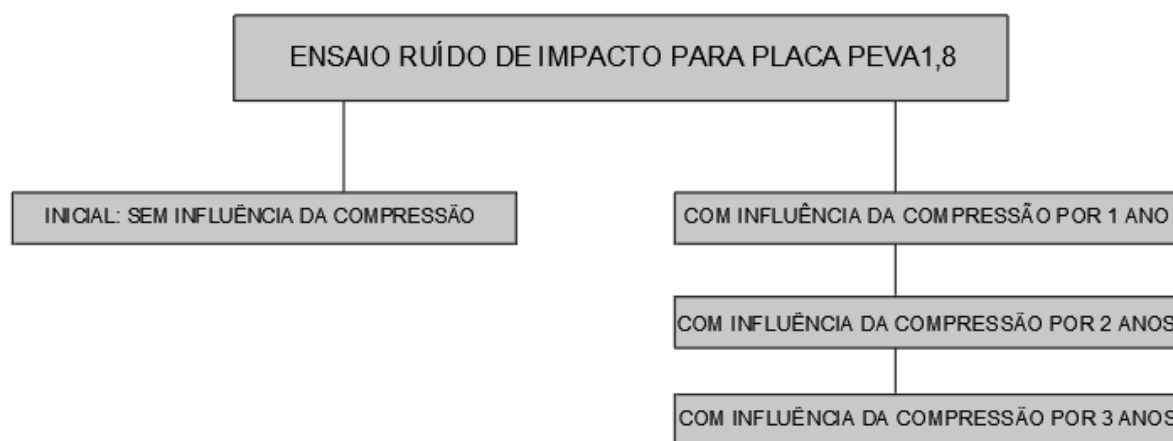
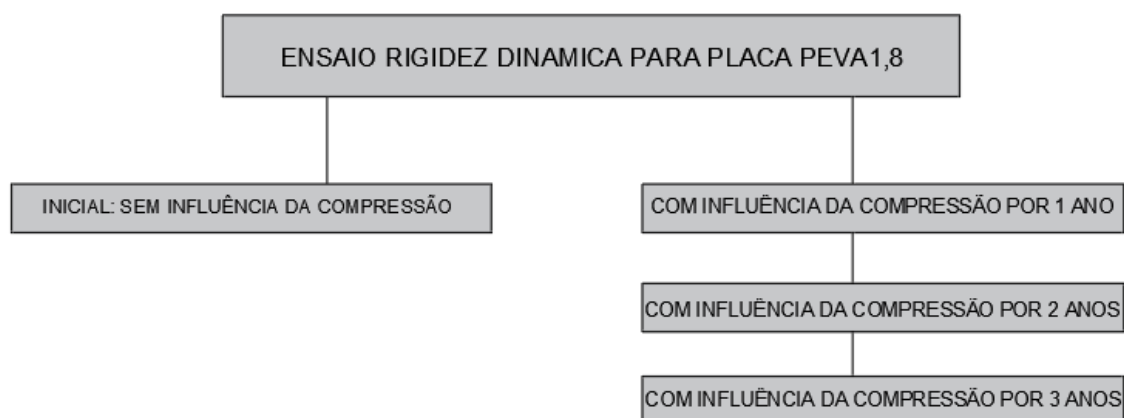


Figura 23 – Fluxograma do ensaio de rigidez dinâmica



Os mesmos ensaios também foram realizados com a amostra de MantaPET, só que com uma diferença de tempo, devido a sua obtenção ter sido mais tardia. E com o ensaio de fluência à compressão foi possível estimar a rigidez dinâmica e a redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto (ΔL) referente a 10 anos de uso do material.

A seguir na Tabela 09 tem-se a sequência dos ensaios e o mês respectivo em que cada um foi realizado, a partir do cronograma estimado. Durante o percurso houve contratempos que serão detalhados mais para frente, que interferiram no andamento do trabalho. Na Tabela 10 foram as normas utilizadas para cada ensaio que orientou os procedimentos adotados.

Tabela 09 – Cronograma dos ensaios de ruído de impacto e de rigidez dinâmica

	Ruído de Impacto	Período	Rigidez Dinâmica	Período
PEVA1,8_A	Inicial	Fevereiro/2016	Inicial	Fevereiro/2016
PEVA1,8_B	Inicial	Fevereiro/2016	Inicial	Fevereiro/2016
	1 ano	Fevereiro/2017	1 ano	Fevereiro/2017
	2 anos	Fevereiro/2018	2 anos	*
	3 anos	Janeiro/2019	3 anos	Março/2019
PEVA1,8_C	Inicial	Fevereiro/2016	Inicial	Fevereiro/2016
	3 anos	Janeiro/2019	3 anos	Março/2019
PEVA1,8_D	Inicial	Julho/2018	Inicial	Abril/2019
	-	-	10 anos	Novembro/2019
MantaPET_A	Inicial	Janeiro/2017	Inicial	Janeiro/2017
	1 ano	Janeiro/2018	1 ano	Janeiro/2018
	2 anos	Janeiro/2019	2 anos	Março/2019

MantaPET_B	Inicial	Janeiro/2017	Inicial	Agosto/2019
	-	-	10 anos	Novembro/2019

*Não foi possível realizar este ensaio no tempo previsto devido a quebra de equipamento, o que dificultou a dinâmica da pesquisa para se conseguir alternativas que chegassem ao mesmo objetivo.

Tabela 10 – Normas utilizadas nos ensaios

Ensaio	Normatização
Ruído de impacto	ISO 16283-2:2015 - Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 2: Impact sound insulation
Rigidez dinâmica	ISO 9052:1989 - Acoustics — Determination of dynamic stiffness — Part 1: Materials used under floating floors in dwellings
Fluência à compressão	ISO 20392:2007- Thermal-insulating materials — Determination of compressive creep

2.2 Fabricação de placas cimentícias com resíduo de EVA

Para a fabricação das placas cimentícias (intituladas PEVA1,8) foram coletados resíduos de EVA de uma indústria de calçados do Estado da Paraíba. Essa placa foi o principal material resiliente analisado neste estudo e comparado quanto ao desempenho com outro material destinado ao mesmo fim. Os resíduos se apresentaram na forma de retalhos (Figura 24).

Figura 24 – Resíduos de EVA coletados em forma de retalhos

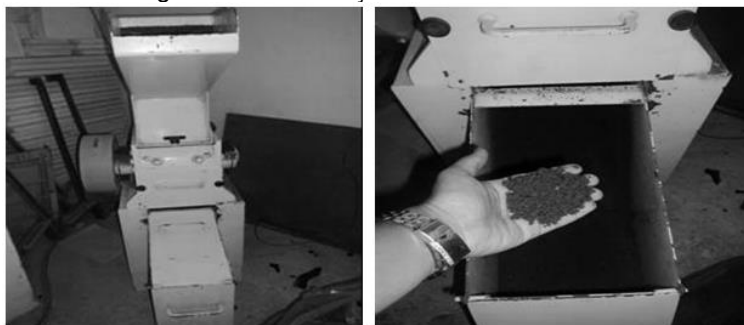


Fonte: Santos, 2013

Após a coleta foi realizado o beneficiamento do resíduo de EVA, o qual inicialmente procedeu-se com a sua trituração em moinho de facas rotativas (Primotécnica P1-001) (Figura 25), seguido de sua caracterização como agregado leve, através de ensaio de

composição granulométrica, segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2013). O resultado permitiu identificar o agregado com diâmetro máximo característico igual a 6,3 mm. O ensaio de massa unitária, segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2006), resultou em um material leve com 90,28 kg/m³.

Figura 25 – Trituração do resíduo de EVA



Fonte: Santos, 2013

Para a obtenção das amostras de material resiliente alternativo, utilizando compósito cimentício com agregado leve de EVA, foram moldadas placas com dimensões de 20 cm x 20 cm x 1,8 cm. Para isso, foram confeccionadas fôrmas metálicas (Figura 26), incluindo uma tampa e laterais removíveis, visando facilitar o processo de desforma das placas. Para a moldagem da placa na espessura desejável também foi utilizada uma régua de madeira (Figura 27) como gabarito para definir a quantidade e nivelar o material no interior do molde metálico, antes de aplicar a prensagem.

Figura 26– Forma metálica utilizada para moldagem das placas



Figura 27 – Régua para nivelamento



A placa cimentícia com EVA resultante foi moldada com um traço de 1:8 (cimento: EVA) com cimento CP II-F 32 e relação água cimento igual a 0,50. Percebe-se que, comparando-se à placa de Santos (2013), na qual foi utilizado o traço de 1:5, na nova placa PEVA1,8 foi reduzido o consumo de cimento, produzindo-se pré-moldados com maior porosidade e menor densidade, situação favorável ao bom desempenho acústico. Para determinar essa proporção entre os materiais foram feitos vários testes de composição, antes de iniciar a etapa de moldagem de grande quantidade da placa PEVA1,8. Para cada dosagem testada, foram moldadas 3 placas e com a dosagem caracterizada como ideal foram moldadas 25 placas de cada tipo (A, B, C e D) que serviram para fazer o ensaio de impacto, simulando piso flutuante no protótipo acústico, utilizando amostra com tamanho reduzido, igual a 1,0 m². Na mistura dos materiais durante a moldagem das placas cimentícia de EVA, a ordem de colocação dos materiais obedeceu ao que foi proposto por Garlet (1998), que apresentou uma boa homogeneização dos materiais. Então, o procedimento foi o seguinte:

- ✓ No recipiente para mistura dos materiais foi colocado todo o agregado de EVA, adicionando-se 1/3 da água de amassamento, misturando o material por cerca de um minuto para uma adicional absorção de água pelo agregado de EVA;
- ✓ Depois adicionou o cimento *Portland*, continuando a misturar por mais dois minutos;
- ✓ Em seguida, foi adicionado o restante da água e se misturou todo o material por mais três minutos (fator água/cimento = 0,50).

A Tabela 11 mostra as várias tentativas, em busca da melhor compatibilização entre a menor espessura das placas cimentícias com EVA, a redução da sua densidade e do consumo de cimento *Portland*, em função do valor da carga aplicada (prensagem) no material ainda no interior da forma metálica.

Tabela 11 – Estudo de composição da placa cimentícia com EVA

	Traço	Carga (kg)	Uso de régua niveladora (cm)	Uso de grampo	Espessura final da placa (cm)	Densidade da placa (kg/m ³)
P01	1:5	500	não	sim	1,82	1.089,04
P02	1:5	400	não	sim	2,15	1.005,81
P03	1:5	300	não	sim	2,23	1.081,25
P04	1:5	500	não	não	3,20	530,00
P05	1:5	400	não	não	3,50	517,60
P06	1:5	2x 300	não	não	3,20	544,10
P07	1:5	2x 400	não	não	3,10	565,60
P08	1:5	2x 500	não	não	3,00	599,90
P09	1:5	3x 500	não	não	3,20	560,60
P10	1:8	500	não	sim	2,00	790,10
P11	1:8	400	1,0	sim	1,50	741,70
P12	1:8	300	2,0	sim	1,30	644,20
P13	1:8	600	1,5	sim	1,00	835,00
P14	1:8	600	1,5	sim	1,80	462,50
P15	1:8	600	1,5	sim	1,90	432,89
P16	1:8	600	1,5	sim	1,70	318,82
P17	1:8	600	1,5	sim	1,60	337,96
P18	1:8	600	1,5	sim	1,50	352,00
P19	1:8	600	1,5	sim	1,80	353,19
P20	1:8	600	1,5	sim	1,80	360,83
P21	1:8	600	1,5	sim	1,80	345,27
P22	1:8	600	1,5	sim	1,60	383,75
P23	1:8	600	1,5	sim	1,50	373,50
P24	1:8	600	1,5	sim	1,70	381,32
P25	1:8	600	1,5	não	1,90	359,21
P26	1:8	600	1,5	não	1,90	377,78
P27	1:8	600	1,5	não	1,90	365,79
PEVA1,8	1:8	600	1,5	não	1,80	388,90

Durante a moldagem das placas cimentícia com EVA fez-se a colocação do material homogeneizado nas formas metálicas, já com suas superfícies com desmoldante (vaselina) aplicado. Após a colocação da tampa metálica sobre o material, já no interior do molde, o conjunto (molde, material e tampa) foi submetido a diferentes cargas (Tabela 12) durante os testes, sendo essa carga sempre aplicada no centro da tampa metálica por 60 segundos, utilizando uma prensa hidráulica (Figura 28).

Figura 28 – Aplicação de carga no conjunto com a prensa hidráulica



Então, foi utilizada a prensagem tendo como base o estudo de Arruda Filho *et al* (2012), que produziram placas nas dimensões de 18 cm x 16 cm x 3,0 cm com resíduos de EVA de traço 1:6 (cimento: agregado EVA) e relação água/cimento igual a 0,55. Eles utilizaram uma prensa hidráulica de 30 toneladas e moldes confeccionados com chapas de aço e a tensão de prensagem utilizada foi fixa e igual a 1,65 MPa, isto é, 475,20 kg de carga recebida pela placa. O estudo de Arruda Filho *et al* (2012) teve como objetivo verificar a resistência mecânica de elementos construtivos para forros e divisórias, a partir de matrizes cimentícias com incorporação de resíduos industriais (resíduo cerâmico, EVA) e fibras de sisal. Na presente pesquisa, após o processo de prensagem, o material foi mantido nas formas por 24 horas, e, em seguida, retirado e colocado em estufa a 100°C para forçar a secagem, por igual período. Esse processo tem como objetivo deixar a placa mais porosa e menos densa.

Tutikian *et al* (2017) dizem que estudos com propostas de misturas entre cimento, agregado natural e/ou agregados leves têm sido desenvolvidos para caracterizar e analisar a viabilidade técnica de diferentes tipos de misturas. As diferenças ocasionadas pela maior absorção de água dos agregados leves são indicadas como a principal preocupação na proposta de novos materiais cimentícios e os ensaios mais específicos de caracterização desses agregados ainda estão em fase de discussão.

O procedimento foi repetido até somar-se a quantidade de 100 placas, sendo 25 placas como referência, sem aplicação de cargas (confinamento entre as placas de concreto e argamassa) sobre elas (PEVA1,8_D) e submetidas a simulação da compressão de 10 anos; outras 25 delas para experimentar no conjunto com aplicação de cargas estáticas durante três anos ininterruptos (PEVA1,8_C); 25 que tiveram impermeabilização com resina (PEVA1,8_A) e as demais 25 placas para submeter a processo de compressão natural

estática com verificação de desempenho quanto ao ruído de impacto e rigidez dinâmica a cada ano, com as dimensões finais iguais a 20 cm x 20 cm x 1,8 cm (largura x comprimento x espessura), necessárias ao estudo.

As experimentações de moldagem das placas (Tabela 12) basearam-se na alteração da carga aplicada à prensa, de 300 kg a 660 kg, na alteração do traço, 1:5 (cimento: EVA), como usado por Santos (2013), para 1:8 (cimento: EVA), na utilização ou não de uma régua de madeira que teve como função o nivelamento do material dentro da forma, reduzindo a sua espessura, e na utilização ou não de um grampo do tipo sargento, para manter a carga aplicada por 24 horas, como especificado na Tabela 12. À placa final (PEVA1,8), foram aplicados 600 kg de carga na prensa, utilizou-se a régua de 1,5 cm, não se utilizou o grampo para segurar a tampa na forma metálica, visando à simplificação do processo, resultando numa placa de 1,8 cm de espessura, com 388,90 kg/m³. Durante o processo de manipulação das placas PEVA1,8 foi identificado um problema de desagregação parcial de partículas das superfícies das placas. Compreende-se que esse fenômeno é devido à secagem forçada em estufa das placas recém-moldadas, que resultou na interrupção da hidratação do aglomerante utilizado (cimento *Portland*) na moldagem.

Como solução, para a compatibilização entre o processo de moldagem proposto e as características desejadas para as placas foi aplicada uma pintura superficial no tipo PEVA1,8_A com um tipo de resina, visando evitar a perda de material das placas na etapa de sua manipulação até serem utilizadas nos sistemas de piso flutuante. No processo de pintura, as placas foram inicialmente mergulhadas em um recipiente com a resina (Figura 29) e, em seguida, foi feito o acabamento com o pincel.

Figura 29 – Aplicação da resina na placa cimentícia com EVA.



2.2.1 Fabricação das placas de concreto e de argamassa

Além da moldagem das placas PEVA1,8, foram moldadas 75 placas de concreto, com traço 1: 4: 4 (cimento: brita: areia), e 75 placas de argamassa com traço 1: 4 (cimento: areia), todas com 4 cm de espessura, nas mesmas dimensões (20 cm x 20 cm) em forma de madeira (Figura 30) para poder montar os conjuntos que simulassem o sistema de piso flutuante. Não houve prensagem, só adensamento de forma manual e foram desmoldadas após 24 h e depois foram para um tanque, no qual ficaram imersas em água saturada com cal, durante 7 dias, para completar o processo de cura.

Figura 30 – Moldagem das placas de concreto



Essas placas unem-se às placas de EVA (concreto + cimentícia com EVA + argamassa), formando conjuntamente partes individuais representativas (Figura 31) do sistema de piso flutuante (laje + material resiliente + contra piso; respectivamente), de modo a viabilizar o estoque em processo de compressão natural, todas individualmente submetidas à carga estática aplicada de aproximadamente 6 kg, com 3 corpos de prova de concreto de 2 kg aproximadamente cada. Nesse caso, utilizou-se como referência a carga correspondente ao peso próprio do contrapiso, somado às cargas acidentais estimadas para laje estrutural de dormitórios em edifícios residenciais (1,50 kN/m², segundo a NBR 6120: 2019).

Figura 31 – Conjunto para simular o sistema de piso flutuante



2.3 Procedimento de ensaio de ruído de impacto em piso flutuante

Os testes de ruído de impacto das amostras, foram realizados segundo a ISO 16283-2:2015, em protótipo de câmara acústica localizado no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) (Figura 32 e 33). Vale ressaltar que esse protótipo é o mesmo utilizado por Santos (2013).

O protótipo reproduz quartos de um edifício de dois pavimentos, cada um com dimensão de 2,86 m x 2,42 m (Figura 34). Sua alvenaria é em blocos de solo-cimento (paredes apoiadas sobre radier; embasamento em tijolos cerâmicos e fundação rasa em pedra argamassada) e a laje é pré-moldada convencional, com nervuras e blocos cerâmicos e espessura final de 13 cm.

Figura 32 – Localização dos protótipos no LABEME - UFPB



Fonte: Adaptado de

[https://www.google.com.br/maps/place/Laborat%C3%B3rio+de+Ensaio+de+Materiais+e+Estruturas+\(LABEME\)/@-7.142749,-34.8495362,79m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x7acc297df4e0e05:0x23fb32acf39ef0ab!8m2!3d-7.1428142!4d-34.8496789](https://www.google.com.br/maps/place/Laborat%C3%B3rio+de+Ensaio+de+Materiais+e+Estruturas+(LABEME)/@-7.142749,-34.8495362,79m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x7acc297df4e0e05:0x23fb32acf39ef0ab!8m2!3d-7.1428142!4d-34.8496789)

Figura 33 - Desenho esquemático da localização do protótipo 1

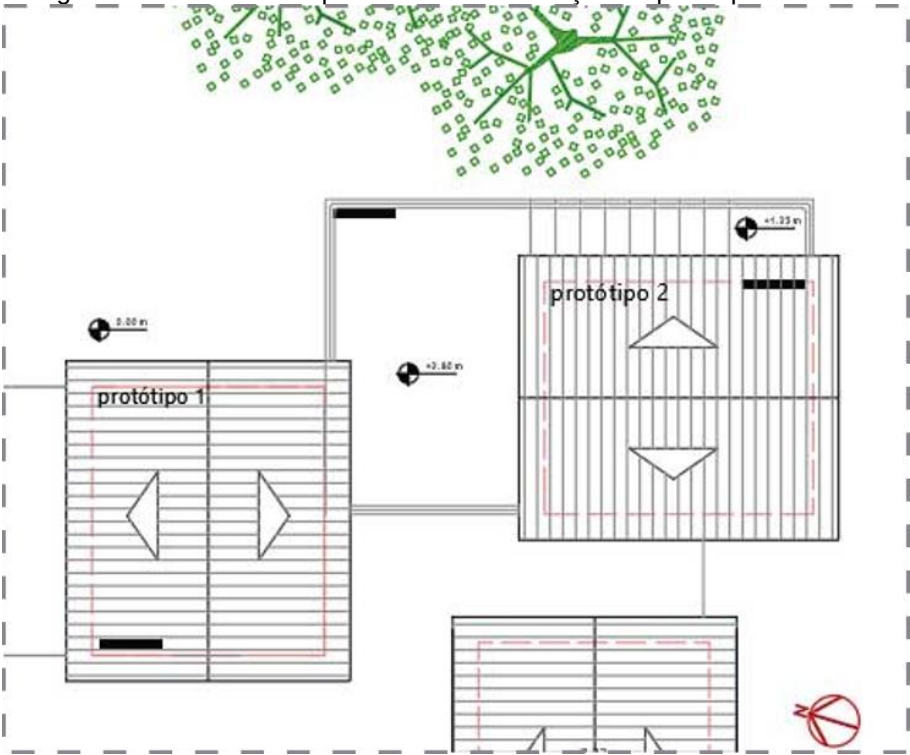
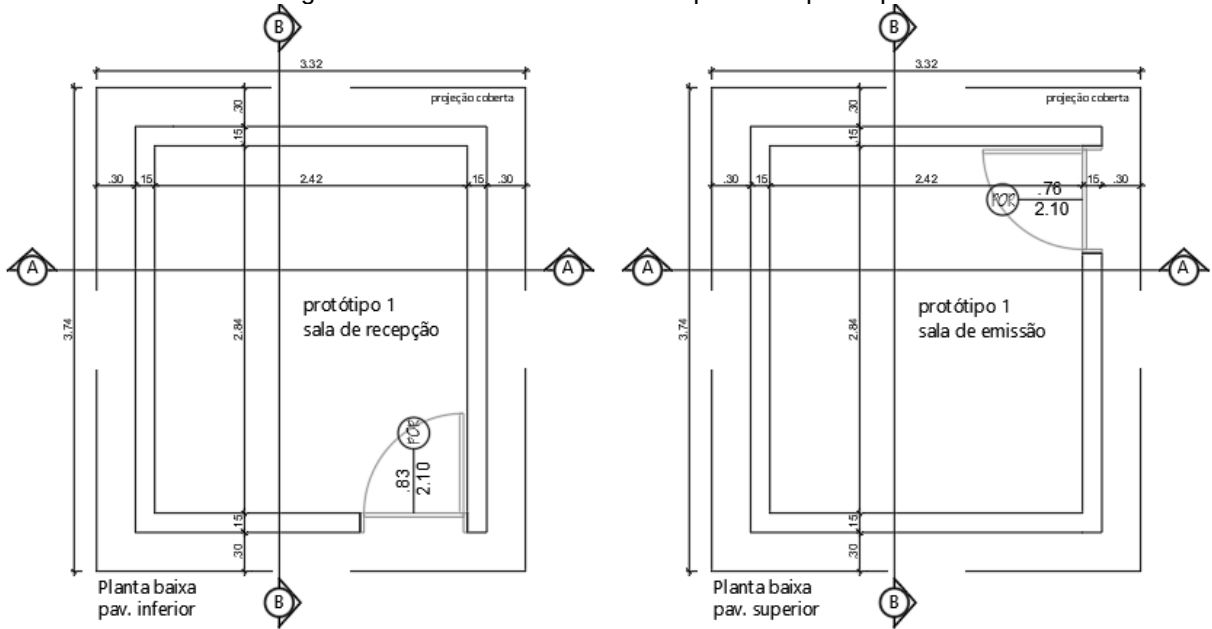
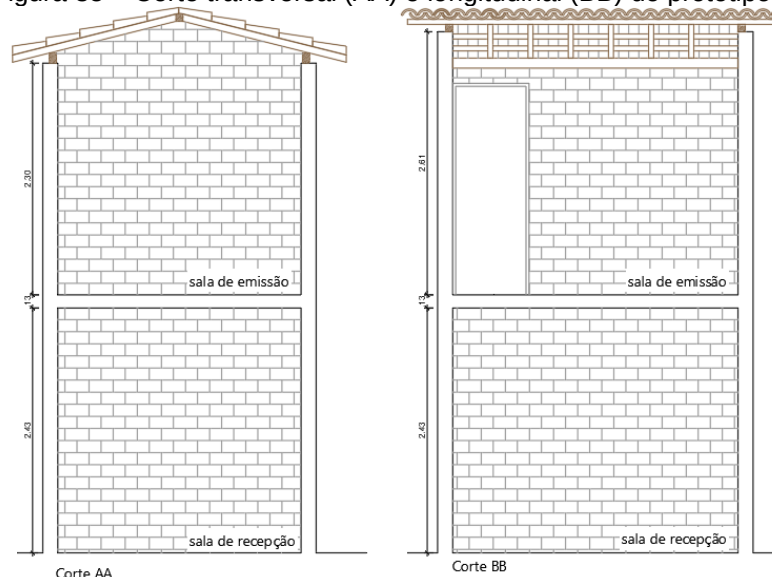


Figura 34 – Pavimento inferior e superior do protótipo 1



O pavimento superior tem pé-direito igual a 2,30 m (volume = 15,80 m³) (Figura 35), com acesso por uma porta em madeira maciça e o pavimento inferior tem pé-direito igual 2,43 m (volume = 17,51 m³), com acesso também por uma porta em madeira maciça, sendo o piso cimentado. A cobertura da câmara é feita em madeiramento e telha de cerâmica.

Figura 35 – Corte transversal (AA) e longitudinal (BB) do protótipo 1



O pavimento superior do protótipo funciona como câmara de emissão, onde as 25 placas foram posicionadas, de modo a formar um conjunto correspondente a 1m², sobre as quais foi posicionada uma placa de argamassa como contrapiso com espessura de 4 cm, com traço 1:4 (cimento: areia), revestida com cerâmica esmaltada (34 cm x 34 cm, PEI 4), assentada com argamassa colante tipo AC II e rejuntada com cimento branco, cuja dimensão de 1 m² está de acordo com o método de ensaio simplificado (amostra em tamanho reduzido). E o pavimento inferior funciona como câmara de recepção. O sistema de referência (REF) (sem material resiliente) faz alusão ao sistema de piso comum enquanto os outros sistemas utilizaram-se materiais resilientes para isolamento acústico.

Acima dessa última placa foi posicionada a máquina de impacto (tipo 3207 da marca Brüel & Kjær) (Figura 36) que utiliza cinco martelos de 500 g cada um, que durante o ensaio de ruído de impacto caem em queda livre de uma altura de 4 cm, com uma frequência de 10 golpes por segundo. A distância normalizada (ISO 16283-2: 2015) entre a máquina de impacto e as bordas do piso (encontro entre a laje e a parede) foi sempre de pelo menos 50 cm.

Figura 36 – Ensaio simplificado com a máquina de impacto



No pavimento inferior, com 2,43 m de pé-direito, foi posicionado o analisador acústico (tipo 2270 da marca Brüel & Kjær) (Figura 37), em quatro pontos distintos para cada ponto de localização da máquina de impacto no pavimento superior com as distâncias mínimas prescritas na norma (ISO 16283-2:2015): 70 cm entre as posições de microfone, 50 cm entre qualquer posição do microfone e dos limites da sala e 1,0 m entre qualquer posição do microfone e do piso superior que estava sendo estimulado pela máquina de impacto.

Figura 37 – Posicionamento do analisador acústico



Fonte: Santos, 2013

O nível de pressão sonora foi medido utilizando-se filtros de banda de um terço de oitava nas seguintes frequências centrais, em hertz: 100, 125, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500 e 3150. A partir da coleta de dados do ensaio e conforme a norma ISO 717-2, foi encontrado o número global do sistema de piso flutuante ensaiado, que foi classificado, segundo a NBR 15575-3:2013, quanto ao seu desempenho, em mínimo, intermediário ou superior. O analisador acústico para edificações utilizado nos

ensaios de ruído de impacto descritos anteriormente determina o nível de ruído medido na câmara de recepção (L_i) que é aplicado na Equação 18 para calcular os níveis de ruído de impacto padronizado (L'_{nT}), em dB, para cada frequência, em Hz. Os cálculos são feitos através da equação 19, que é definida pela norma ISO 16283-2:2015.

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log (T/T_0) \text{ dB} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

L'_{nT} = nível de ruído de impacto padronizado, em dB;

L_i = nível de ruído de impacto medido na câmara de recepção, em dB;

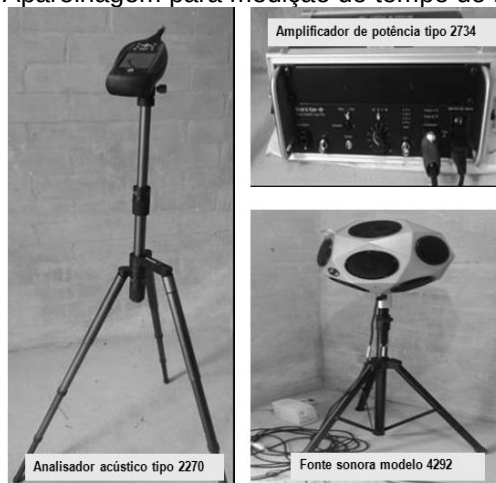
T = tempo de reverberação medido na câmara de recepção, em segundos;

T_0 = tempo de reverberação de referência = 0,5 segundos.

2.3.1 Ensaio de Tempo de Reverberação

De acordo com Pereira (2018), a reverberação do som ocorre quando há permanência do som no ambiente em decorrência de sucessivas reflexões, que podem ocorrer uma ou mais vezes no ambiente. Já o tempo de reverberação é o tempo decorrido para que um som deixe de ser percebido depois que a emissão da fonte for cessada. Essa é uma das principais características para o desempenho acústico de uma sala. Para efetuar o cálculo prescrito na ISO 16283-2:2015 é preciso obter o valor do Tempo de Reverberação (TR) e utilizar o analisador acústico, o amplificador de potência e uma fonte sonora (Figura 38).

Figura 38 – Aparelhagem para medição do tempo de reverberação



Fonte: Santos (2013)

De acordo com a NBR 11957:1988 o TR é o tempo necessário para que o nível de pressão sonora caia 60 decibéis no recinto analisado depois que a fonte sonora cessa. O tempo de decaimento máximo verificado no ensaio foi de 10s e esta verificação foi repetida três vezes.

O ensaio do TR seguiu a metodologia descrita na NBR 11957:1988, segundo a qual o tempo de reverberação deve ser medido no mínimo em três posições de microfone, com pelo menos duas medições em cada posição.

2.4 Tratamento dos resultados de acordo com a ISO 717- 2:2013

Essa norma prescreve o tratamento matemático que deve ser dado aos resultados obtidos das medições realizadas, segundo a ISO 16283-2: 2015. A ISO 717-2: 2013, fornece parâmetros (Tabela 12) que determinam o número único, que representa o desempenho acústico do sistema ensaiado, apresentado em $L'_{nT,w}$ (dB). Então, para encontrar o $L'_{nT,w}$, utiliza-se a confrontação, num mesmo gráfico, entre os valores da curva de perfil de desempenho medido do material e os valores pré-definidos de referência da curva padrão da ISO 717-2: 2013, de tal forma que o perfil de referência possa deslizar para baixo e para cima, de um em um decibel.

Tabela 12 – Valores de referência para ruído de impacto

Frequência Hz	Valores de referência (dB)	
	Bandas de um terço oitava	Bandas de oitava
100	62	67
125	62	
160	62	
200	62	67
250	62	
315	62	
400	61	65
500	60	
630	59	
800	58	62
1000	57	
1250	54	
1600	51	49
2000	48	
2500	45	
3150	42	

Fonte: Adaptado da ISO 717- 2:2013

De acordo com Pereira (2018), para a sistematização dos dados coletados, utilizou-se uma planilha dinâmica no Microsoft Excel, dividida em 5 partes: tabulação dos dados de reverberação, de ruído de fundo, de ruído de impacto, caracterização do nível global da amostra e gráfico comparativo do ambiente avaliado versus a curva padrão correspondente.

Na planilha sobre os tempos de reverberação, conforme ilustra a Figura 39, são inseridos os tempos nas frequências de 50 a 5000 Hz, referentes a T20 e T30, em cada uma das 3 posições medidas. Automaticamente, a planilha gera uma média das posições 1, 2 e 3 e, em seguida, gera uma média final dessas 3 médias, sendo este o resultado do tempo de reverberação do ambiente avaliado.

Figura 39 – Planilha do ensaio de Tempo de Reverberação

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
3																										
4	POS1	MED1			POS1	MED2				POS2	MED1			POS2	MED2				POS3	MED1			POS3	MED2		
5	FREQ	T20	T30		FREQ	T20	T30			FREQ	T20	T30		FREQ	T20	T30			FREQ	T20	T30		FREQ	T20	T30	
6	50	2,51	2,78		50	3,15	3,43			50	3,25	2,93		50	2,71	2,77			50	3,16	3,32		50	2,75	2,95	
7	63	1,72	2,07		63	1,59	1,94			63	1,13	1,8		63	1,25	1,11			63	1,17	1,63		63	2,29	1,87	
8	80	2,4	2,2		80	2,61	2,53			80	2,31	2,41		80	1,24	1,63			80	2,06	2,23		80	2,15	2,08	
9	100	2,16	2,16		100	2,46	2,28			100	2,07	2,19		100	2,16	2,22			100	1,81	1,82		100	1,22	1,86	
10	125	2,42	2,49		125	2,51	2,51			125	2,57	2,58		125	2,54	2,58			125	2,44	2,48		125	2,53	2,58	
11	160	2,29	2,36		160	2,51	2,53			160	2,21	2,4		160	2,32	2,42			160	2,38	2,43		160	2,11	2,27	
12	200	2,36	2,9		200	3,07	3,03			200	2,94	2,89		200	3,05	2,63			200	2,45	2,53		200	2,6	2,53	
13	250	2,74	2,66		250	2,94	2,93			250	2,43	2,73		250	3,35	3,47			250	2,74	2,82		250	2,5	2,88	
14	315	3,16	3,3		315	3,59	3,73			315	3,35	3,63		315	3,23	3,24			315	2,96	3,05		315	2,91	3,1	
15	400	2,86	3,01		400	3	3,12			400	3,19	3,07		400	2,81	2,84			400	2,83	3,07		400	2,8	3,1	
16	500	2,61	2,61		500	2,56	2,65			500	2,86	2,8		500	2,83	2,9			500	2,83	2,75		500	2,71	2,65	
17	630	3	2,86		630	2,78	2,7			630	2,9	2,93		630	3,07	2,88			630	3,27	3,02		630	2,87	2,78	
18	800	3,06	2,94		800	2,83	2,84			800	2,92	2,9		800	2,98	2,95			800	2,98	2,86		800	2,76	2,83	
19	1000	2,74	2,8		1000	2,84	2,76			1000	2,53	2,63		1000	2,79	2,78			1000	2,77	2,87		1000	2,84	2,82	
20	1250	2,57	2,52		1250	2,63	2,55			1250	2,44	2,5		1250	2,48	2,51			1250	2,46	2,73		1250	2,6	2,63	
21	1600	2,6	2,48		1600	2,51	2,48			1600	2,3	2,36		1600	2,45	2,41			1600	2,64	2,34		1600	2,52	2,47	
22	2000	2,35	2,38		2000	2,35	2,37			2000	2,14	2,16		2000	2,16	2,15			2000	2,28	2,22		2000	2,32	2,33	
23	2500	2,23	2,23		2500	2,25	2,22			2500	1,98	1,98		2500	2,01	2			2500	2,25	2,34		2500	2,21	2,21	
24	3150	1,97	1,96		3150	1,97	1,96			3150	1,95	1,83		3150	1,91	1,83			3150	1,88	1,98		3150	1,96	1,96	
25	4000	1,84	1,86		4000	1,93	1,85			4000	1,7	1,7		4000	1,71	1,71			4000	1,83	1,86		4000	1,86	1,86	
26	5000	1,77	1,74		5000	1,74	1,77			5000	1,74	1,7		5000	1,73	1,71			5000	1,69	1,7		5000	1,73	1,72	
27																										
28																										

Figura 40 – Exemplo de resultados do ensaio de Ruído de Fundo

Lzeq (no frequency weighting)				
FREQ				
50	49,5			
63	44,9			
80	37,8	Ruído de impacto	Diferença	Correção
100	31,9	72,6	40,7	72,6
125	42,0	68,6	26,6	68,6
160	44,0	78,1	34,1	78,1
200	54,5	74,7	20,2	74,7
250	50,7	77,4	26,7	77,4
315	45,8	77,9	32,1	77,9
400	48,3	75,2	26,9	75,2
500	46,6	75,6	29,0	75,6
630	45,2	78,5	33,3	78,5
800	45,3	71,2	25,9	71,2
1000	43,3	75,5	32,2	75,5
1250	42,2	76,7	34,5	76,7
1600	42,8	76,4	33,6	76,4
2000	41,8	76,0	34,2	76,0
2500	39,4	74,5	35,1	74,5
3150	35,9	74,5	38,6	74,5
4000	34,7			
5000	32,6			

Também é necessário coletar dados referentes ao ruído de fundo que são colocados na planilha, conforme ilustra a Figura 40. Deve-se observar os valores de ruído de fundo de L_{zeq} , para o caso destes valores serem superiores em mais de 10 dB – em relação à média final de ruído de impacto.

Caso esses valores se encontrem entre 6 dB e 10 dB, pode-se corrigir o valor do ruído de impacto utilizando a Equação 19. Quando a diferença entre o ruído de impacto e o ruído de fundo for menor ou igual a 6dB, basta diminuir 1,3 dB do ruído de impacto para se obter o ruído de impacto ajustado.

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

Equação 19

Onde:

L = ruído de impacto ajustado, em decibéis;

L_{sb} = ruído de impacto e ruído de fundo combinados, em decibéis;

L_b = nível do ruído de fundo, em decibéis.

A planilha referente ao ruído de impacto é constituída por 16 colunas para preenchimento com dados referentes ao ruído de impacto – para as 4 posições de máquina de impacto na câmara emissora – e, para cada posição, são realizadas 4 medições do analisador acústico na câmara de recepção. Cada grupo de 4 colunas representa uma posição da máquina de impacto na câmara emissora (Figura 41).

Figura 41 – Exemplo resultado ruído de impacto para a primeira posição da máquina

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Ruído de Impacto - laje pré-moldada											
2												
3	Projeto: 44											
4												
5	POS1	MED1		POS1	MED2		POS1	MED3		POS1	MED4	
6	FREQ			FREQ			FREQ			FREQ		
7	50			50			50			50		
8	63			63			63			63		
9	80			80			80			80		
10	100	73,2		100	72,9		100	73,2		100	71,9	
11	125	65,1		125	63,8		125	62,7		125	63	
12	160	75,3		160	72,9		160	73,3		160	73,1	
13	200	72,2		200	72,3		200	75,5		200	74,6	
14	250	71,1		250	72,8		250	74,2		250	75,1	
15	315	74,9		315	74,6		315	77,1		315	76,7	
16	400	76,1		400	75,8		400	74,7		400	73,9	
17	500	75,2		500	74,8		500	76,1		500	73,9	
18	630	76,3		630	77,7		630	77,6		630	77,7	
19	800	70,7		800	70		800	70		800	71,1	
20	1000	77,2		1000	75,4		1000	76,4		1000	75,6	
21	1250	74,9		1250	73,9		1250	74,7		1250	74,9	
22	1600	70,4		1600	69,9		1600	71,6		1600	70,9	
23	2000	75,8		2000	76,3		2000	75,8		2000	76	
24	2500	73,4		2500	74,4		2500	74,1		2500	72,8	
25	3150	71,3		3150	71,6		3150	72,2		3150	71,6	
26	4000			4000			4000			4000		
27	5000			5000			5000			5000		
28												
29												

Ao final do preenchimento das 16 colunas, automaticamente, a planilha calcula a média dessas 4 posições e, finalmente, uma média final referente à média das 4 posições.

Nos ensaios da pesquisa foram utilizados os valores de referência para bandas de um terço de oitava. Para as frequências de 100 a 315 Hz o valor é o mesmo, para as frequências de 315 a 1000 Hz diminui de um em um decibel, e para frequência 1000 a 3150 Hz, os valores diminuem em três decibéis.

Esse método se baseia no fundamento de que o perfil de referência se desloca de tal forma que parte do desempenho do sistema em análise fique negativo na seguinte condição: a diferença máxima mais próxima possível de 32 dB, com atenção para que esse valor não seja ultrapassado, como se pode ver na Tabela 13 a seguir.

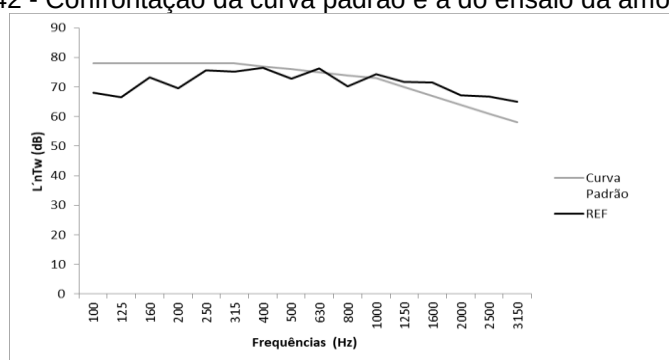
Tabela 13 – Níveis de ruído de impacto padronizado para a amostra REF.

Frequências (Hz)	Níveis de ruído de impacto padronizados ($L'_{nT,w}$)				
	Curva	L'_{nT} (dB)	Diferença		
	A dB	B dB	C dB	D dB	E dB
100	82	74,3	-7,7	0	0
125	82	72,1	-9,9	0	0
160	82	79,3	-2,7	0	0
200	82	75,2	-6,8	0	0
250	82	82,5	0,5	1	0,5
315	82	79,7	-2,3	0	0
400	81	81,3	0,3	1	0,3
500	80	77,6	-2,4	0	0
630	79	80,2	1,2	1	1,2
800	78	74,2	-3,8	0	0
1000	77	79,5	2,5	1	2,5
1250	74	76,9	2,9	1	2,9
1600	71	75,8	4,8	1	4,8
2000	68	70,1	2,1	1	2,1
2500	65	71,3	6,3	1	6,3
3150	62	69,4	7,4	1	7,4
Soma				9	28

Fonte: Santos (2013)

O número único do desempenho acústico com referência ao ruído de impacto do sistema ensaiado será o valor do perfil de referência (deslizante) medido em dB, para a frequência de 500 Hz, e caracterizará o desempenho acústico do material, cuja nomenclatura será $L'_{nT,w}$ (dB). Segundo a ISO 717-2:2013, todos os resultados dos ensaios que ultrapassarem esse perfil serão considerados desfavoráveis.

Figura 42 - Confrontação da curva padrão e a do ensaio da amostra REF.

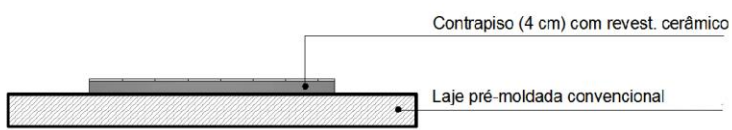


O gráfico (Figura 42) resulta da confrontação das curvas da Tabela 06, pois quando se alteram os valores dispostos da curva padrão a ISO 717-2:2013, a curva A (padrão) desloca-se para cima ou para baixo até que a diferença entre ela e a curva com o resultado do ensaio da amostra não ultrapasse 32 dB e que seja o mais próximo possível a esse valor.

Com o número global determinado, verifica-se na NBR 15575-3: 2013 a classificação correspondente da amostra, de acordo com os valores que classificam os sistemas de piso que separam as unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos, com cada nível de pressão sonora de impacto ponderado ($L'_{nT,w}$) de cada sistema.

Por exemplo, se o valor da confrontação das curvas foi de 80 dB, esse será o número global que classifica essa amostra quanto ao seu desempenho de isolamento ao ruído de impacto, sendo classificado como desempenho mínimo de acordo com a NBR 15575-3: 2013.

Tabela 14 – Especificações de cada sistema referência (REF) de piso flutuante

Amostra	Especificação do sistema	Imagem
REF.	 Contrapiso (4 cm) com revest. cerâmico Laje pré-moldada convencional	

O sistema de piso referência (REF) (Tabela 14) é composto pelo contrapiso moldado com argamassa com traço 1: 4 (cimento: areia), placa pré-moldada com 4 cm de espessura e com 1 m² de área, revestido com placa cerâmica esmaltada, dimensões iguais a 34 cm x 34 cm (PEI 4), fixada com argamassa colante tipo AC II e rejuntada com cimento branco.

Esse contrapiso foi utilizado depois de passar pelos 28 dias de cura. O sistema de referência constitui essa placa apoiada na laje suporte pré-moldada convencional do protótipo utilizado, sem material resiliente entre ela e a laje.

Atualmente, a norma brasileira de desempenho de edifícios não apresenta possibilidade de classificação de sistemas de pisos a partir de ensaios em laboratório. Por isso, os resultados deste trabalho foram classificados como de ensaios em campo para fins comparativos.

2.5 Teste de rigidez dinâmica

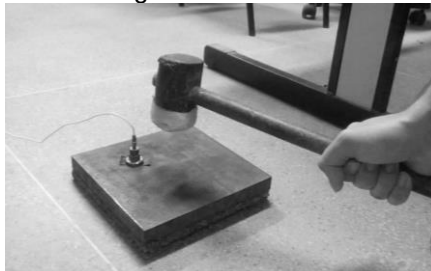
Uma das variáveis mais expressivas para análise do desempenho de sistema de piso flutuante como visto no capítulo da introdução é a rigidez dinâmica da amostra do material resiliente. No presente trabalho foram testadas no LABEME-CT-UFPB a amostra do material resiliente comercial (MantaPET) encontrado na medição em campo e também a amostra de material resiliente alternativo aqui proposto, placa cimentícia com EVA (PEVA1,8) e seus diferentes tipos, sendo experimentados quatro procedimentos para se determinar a rigidez dinâmica desses materiais até se chegar a um que gerasse resultados mais confiáveis para o teste.

Esse ensaio consistiu na determinação da rigidez dinâmica aparente por unidade de área da amostra, $s't$, com o método de ressonância. Neste método a frequência ressonante do sistema massa-mola de vibração vertical é mensurada, a mola sendo a amostra do material resiliente sob teste e a massa sendo uma placa de carga. No sistema dinâmico formado pelo conjunto é analisada apenas a componente vertical do deslocamento, portanto o estudo do fenômeno de ressonância ocorrido é explicado pelas regras dos sistemas com um grau de liberdade, ou seja, o fenômeno de vibração pode ser descrito em apenas uma coordenada.

De cada material ensaiado foram verificados os valores para todas as amostras de PEVA1,8 e MantaPET, com as dimensões de 20 cm x 20 cm. Por se tratar de material com face plana e regular não houve necessidade de nenhuma preparação adicional para as amostras. As amostras foram então colocadas entre duas superfícies horizontais, a base e a placa metálica de carga, individualmente. A placa utilizada é de aço, quadrada com dimensões 20 cm x 20 cm e com massa aproximadamente de 8 kg. Como base utilizou-se a superfície plana do piso em local previamente definido. A base, portanto, pôde ser considerada sem irregularidades. O ensaio adotado está preconizado na ISO 9052-1:1989.

No primeiro procedimento de tentativa em fevereiro de 2016, após montagem do sistema, conforme Figura 43, foi instalado no centro da placa de carga um acelerômetro. Utilizou-se uma plataforma de aquisição de dados NI CompactDAQ conectada ao notebook, juntamente com o *software Labview* para visualizar os pulsos captados pelo acelerômetro.

Figura 43 – Execução do teste de rigidez dinâmica na amostra PEVA1,8 – 1ª tentativa



O *software* fornece um gráfico de amplitudes em função do tempo para cada amostra ensaiada. Com o equipamento montado, procedeu-se a calibração do conjunto: a primeira amostra ensaiada foi de material com propriedades conhecidas a fim de comparar os resultados obtidos com estes valores cientes. Por fim, procedeu-se a excitação individual de cada amostra que foi realizada com martelo de borracha (Figura 52), fazendo impacto e procurando utilizar uma força parecida entre as marteladas.

Os dados de amplitude e tempo obtidos no ensaio possibilitaram plotar um gráfico no domínio da frequência no qual foi possível identificar o pico de frequência de cada amostra de material ensaiado. Para cada material foram realizadas medições da frequência de ressonância. Então foi possível calcular a rigidez dinâmica aparente das amostras a partir da equação 20, que nada mais é que a equação de ressonância explicitada para a rigidez:

$$s't = 4 \cdot \pi^2 \cdot m'_t \cdot f_r^2 \quad (\text{Equação 20})$$

Onde:

$s't$ = rigidez dinâmica por unidade de área da amostra

m'_t = densidade superficial da placa de carga

f_r = frequência de ressonância do sistema

Esse processo iniciou-se em fevereiro de 2016 e foi concluído no mês de março de 2016, sendo posteriormente iniciados os ensaios de influência da compressão natural da placa PEVA1,8. Porém, após uma análise mais cuidadosa, verificou-se que os resultados

desses testes de rigidez dinâmica estavam inconclusivos, em função da heterogeneidade e inconsistência entre os resultados das frequências de pico das amostras ensaiadas, demonstradas no capítulo 3 deste trabalho.

Esse fato levou a considerar a caracterização feita como não confiável. Então, decidiu-se utilizar um segundo procedimento de aquisição de dados. Contudo, precisou-se aguardar um período de aproximadamente um ano (janeiro de 2017) até a conclusão da manutenção do equipamento necessário para o teste: o Transdutor eletrodinâmico ET-140 da *Labworks* (Figura 44), o qual também poderia servir como excitador durante o ensaio, assim como foi o martelo utilizado na tentativa anterior, esse teste fez uso do sinal sinusoidal através da vibração vertical da placa de base.

Figura 44 – Exemplo do teste rigidez dinâmica – 2ª tentativa



No presente trabalho os resultados com este método não foram também conclusivos, pois não foi possível identificar uma frequência confiável para as amostras ensaiadas, devido ao não aparecimento do pico no gráfico, o que é determinante nessa análise. Os valores estão disponíveis no próximo capítulo. Zuchetto *et al* (2016a) dizem que os valores de rigidez dinâmica determinados a partir dos três métodos de obtenção da frequência de ressonância para sistemas de pisos flutuante apresentam diferenças entre si, sendo que os menores valores são obtidos através do método com a excitação na base do sistema pelo *shaker*.

Na terceira tentativa (janeiro de 2018), também realizada conforme a norma ISO 9052-1: 1989 (Figura 45), a partir da excitação com o martelo sobre a mesma placa metálica colocada sobre a amostra, placa PEVA1,8 e da MantaPET sucessivamente, quando foram

utilizados dois acelerômetros posicionados sobre a placa metálica. Novamente os resultados, coletados foram processados através da equação apresentada nessa norma. A partir dos acelerômetros posicionados sobre a placa metálica, captaram-se os sinais que traduziram a ressonância do conjunto, cujo valor foi aplicado na fórmula matemática, prevista na norma ISO 9052-1: 1989.

Figura 45 – Exemplo do teste de rigidez dinâmica: terceira tentativa



Nesse processo foram utilizados o software *SignalCalc Ace* e a aquisição de sinal pela plataforma de *hardware* Quattro (Figura 46), para gerar um gráfico analítico e finalmente se obter o resultado de rigidez dinâmica da amostra.

Figura 46 – Equipamentos para aquisição de sinal da terceira tentativa



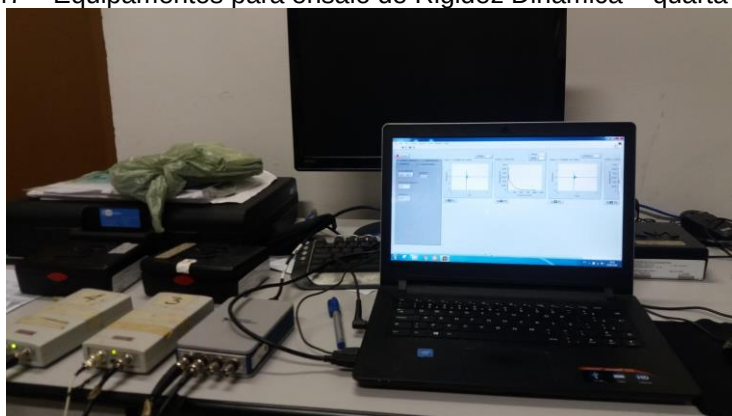
Fonte: <http://www.dataphysics.com/products-and-solutions/dynamic-signal-analyzers-signalcalc/signalcalc-ace.html>

Dessa vez, os resultados dos testes apresentaram o pico da frequência natural de cada amostra ensaiada e, considerando 10 (dez) repetições de marteladas nos testes, observou-se que havia homogeneidade nos resultados para cada tipo de amostra (material resiliente comercial e alternativo), sendo possível classificar a rigidez dinâmica das amostras com mais confiança.

Esse terceiro procedimento tinha sido o padrão adotado até então no presente estudo, sendo importante repeti-lo com fidelidade nos ensaios realizados, de acordo com a programação nos fluxogramas e cronograma que previram datas definidas.

Durante um ensaio a plataforma apresentou problema após ter sido afetada por uma queda de energia, o que prejudicou o andamento dos experimentos e a busca por uma alternativa para a realização do ensaio. Este problema interferiu na programação da amostra PEVA1,8_B que retornou para o conjunto sob carga estática não sendo possível fazer o teste para os dois anos. Então, após um ano aproximadamente (em março de 2019) conseguiu-se fazer melhoramento em um programa de aquisição para ser usado com a plataforma NIDAQ da primeira tentativa (Figura 47).

Figura 47 – Equipamentos para ensaio de Rigidez Dinâmica – quarta tentativa



Foram retomadas as medições dando início ao quarto procedimento, sendo assim possível continuar a verificação da rigidez para a PEVA1,8_B e PEVA1,8_C após 3 anos de influência da compressão e 2 anos para a MantaPET_A. E as medições da rigidez dinâmica da PEVA1,8_D e MantaPET_B, após o ensaio de fluência à compressão.

2.6 Processo de influência da compressão das placas PEVA1,8 e da MantaPET

2.6.1 Processo de simulação da compressão natural para as amostras PEVA1,8_B, PEVA1,8_C e MantaPET_A

Para investigar como essas placas cimentícias com EVA desempenham a função de material resiliente quando aplicadas em pisos flutuantes, e como elas se comportam em relação à variação de sua rigidez dinâmica após um tempo de aplicação submetida a cargas estáticas descritas no item 2.2.1 deste capítulo, parte-se da ideia de observação desse processo ao longo do tempo (Figura 48) e estimando um tempo mais longo com o ensaio de fluência à compressão com as placas PEVA1,8_D e MantaPET_B.

Figura 48 – Conjuntos com cargas estáticas



Então, depois das placas cimentícias de EVA serem testadas quanto ao seu desempenho acústico no protótipo do LABEME-CT-UFPB, elas foram analisadas novamente (desempenho acústico) após um período de 1 a 3 anos, de acordo com a Tabela 10, do início deste capítulo.

Portanto, o início do processo no qual o conjunto (placas: concreto + cimentícia com EVA + argamassa), representando partes do sistema de piso flutuante (laje + material resiliente + contra piso; respectivamente) em análise, começou em junho de 2016. Esse mesmo processo foi realizado com amostras de materiais resiliente comercial (MantaPET_A). As amostras foram dispostas pelo perímetro do protótipo acústico como apresentado na Figura 58.

2.6.2 Processo acelerado com ensaio de Fluência à compressão com as amostras PEVA1,8_D e MantaPET_B

Em relação ao teste acelerado tinha-se a sugestão de ser realizado com o equipamento Transdutor eletrodinâmico ET-140 da *Labworks*. A ideia era simular cargas dinâmicas sobre os mesmos tipos de conjuntos de placas, submetidas a influência da compressão acelerada, em um período determinado (24 horas, por exemplo) que

representasse em curto espaço de tempo, de forma realística, a quantidade de cargas dinâmicas experimentadas por pisos flutuantes durante 10 anos nas edificações, por exemplo. O mesmo procedimento também seria realizado com o material resiliente comercial para se ter o comparativo.

O Transdutor eletrodinâmico ET-140 da *Labworks* seria apenas um excitador, que deveria simular cargas dinâmicas sobre as amostras de materiais resilientes com interesse nos ensaios. Mas no decorrer do processo o equipamento quebrou, como foi dito, na tentativa do segundo procedimento de teste de rigidez dinâmica e então teve-se que buscar outra maneira para estimar esse valor. Portanto, pesquisando sobre o tema e procurando uma solução foi encontrado o teste de fluência à compressão realizado pelo Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (itt Performance), que verifica o desempenho das amostras.

De acordo com Klippel *et al* (2017), o teste de fluência à compressão é realizado com a finalidade de se verificar a influência das cargas aplicadas nas amostras ao longo do tempo de uso de um sistema de piso e essa verificação é feita de acordo com ISO 20392:2007. Segundo Kim *et al* (2015), a espessura após 10 anos poderia ser obtida pela regressão linear a partir da equação 17 e a deformação a longo prazo é calculada com base na Equação 18 de Findley (1994) *apud* Kim *et al* (2015), citadas no item 1.4.2 deste trabalho.

Os testes consistem na aplicação de cargas de 8 kg, em amostras de 20 x 20 cm. A norma prescreve que a deformação deve ser verificada com um relógio comparador em determinados períodos (Tabela 15), que correspondem a 10 anos de vida útil para todas as amostras.

As medidas são feitas no mesmo lugar para todas as amostras, em uma sala com temperatura controlada, com as amostras posicionadas em cima de uma base robusta para evitar interferências relacionadas à dilatação do material, bem como a vibrações externas. Os testes geralmente são realizados durante 123 dias (Tabela 15).

O dia de medição foi de acordo com o exemplo dado na ISO 20392:2007, e os resultados das medições são extrapolados em 30 vezes, conforme indicado na norma. Esse procedimento permite a avaliação do desempenho das amostras em uma condição de carregamento lento, ao longo do tempo de uso do sistema de piso flutuante. Os dias programados foram de acordo com a Tabela 16.

Tabela 15 – Exemplo de cronograma da ISSO 20392:2007

Day	Time	Test duration h	Day of week
0	10:00 a.m.	0 (loading)	Mon
0	10:01 a.m.	0,017	Mon
0	11:00 a.m.	1,0	Mon
0	3:00 p.m.	5,0	Mon
1	10:00 a.m.	24	Tues
2	10:00 a.m.	48	Wed
4	2:00 p.m.	100	Fri
7	10:00 a.m.	168	Mon
9	10:00 a.m.	216	Wed
11	10:00 a.m.	254	Fri
14	10:00 a.m.	336	Mon
18	10:00 a.m.	432	Fri
24	10:00 a.m.	576	Thurs
32	10:00 a.m.	768	Fri
42	10:00 a.m.	1 008	Mon
53	10:00 a.m.	1 272	Fri
65	10:00 a.m.	1 560	Wed
80	10:00 a.m.	1 920	Thurs
100	10:00 a.m.	2 400	Wed
123	10:00 a.m.	2 952	Fri
156	10:00 a.m.	3 744	Wed
190	10:00 a.m.	4 560	Tues
231	10:00 a.m.	5 544	Mon
295	10:00 a.m.	7 080	Tues
365	10:00 a.m.	8 760	Tues

Fonte: ISO 20392:2007

Tabela 16 – Cronograma do ensaio de fluência a compressão

Quantidade de medição	Quantidade de dias	Sequência	Data	Dia da semana	Hora
1	0	0	25/07	Quinta	14:00
2	0	0	25/07	Quinta	14:01
3	0	0	25/07	Quinta	15:00
4	0	0	25/07	Quinta	19:00
5	1	1	26/07	Sexta	14:00
6	2	1	27/07	Sábado	14:00
7	4	2	29/07	Segunda	18:00
8	7	3	01/08	Quinta	14:00
9	9	2	03/08	Sábado	14:00
10	11	2	05/08	Segunda	14:00
11	14	3	08/08	Quinta	14:00
12	18	4	12/08	Segunda	14:00
13	24	6	18/08	Domingo	14:00
14	32	8	26/08	Segunda	14:00
15	42	10	05/09	Quinta	14:00
16	53	11	16/09	Segunda	14:00
17	65	12	28/09	Sábado	14:00
18	80	15	13/10	Domingo	14:00
19	100	20	02/11	Sábado	14:00
20	123	23	25/11	Segunda	14:00

Como pode ser visto na Figura 49, estas foram as condições de ensaio, quando foram verificados os desempenhos de três amostras, sendo três unidades da placa PEVA1,8_D e três da MantaPET_B, a uma temperatura ambiente de 25° C. As amostras ficaram posicionadas sob uma placa de aço (20 cm x 20 cm) com 8 kg (200 kg/m²) aproximadamente e sobre uma placa de argamassa (20 cm x 20 cm).

Todo este sistema ficou apoiado em cima de treliças de ferro que proporcionaram o recuo necessário para que o paquímetro digital de 0,01mm de precisão (Figura 50) da marca Messen pudesse ser encaixado para se realizar as leituras de deformação da espessura das amostras, que além do que a norma prescreve foram medidas em quatro pontos de cada amostra com paquímetro, o que possibilitou uma verificação maior quanto aos dados de medição. O paquímetro foi utilizado em substituição ao relógio comparador seguindo a referência de Zuchetto *et al* (2016a)

Figura 49 – Amostras do ensaio de fluência a compressão



Figura 50 – Medição realizada com paquímetro



Todo o material (sistema de placas e treliças) ficou apoiado em bancada de concreto com proteção para que não houvesse interferências externas no posicionamento das amostras.

Essa simulação visou avaliar as possíveis variações na rigidez dinâmica de materiais resilientes alternativo e comercial, após um determinado tempo de aplicação em pisos flutuantes dos edifícios. Também verificou a influência do grau de variação da rigidez dinâmica dos materiais resilientes no desempenho acústico e na classificação dos sistemas de piso flutuante que separam as unidades habitacionais autônomas em edifícios multipavimentos. Assim, buscou-se atingir os objetivos previstos nesse estudo, que são a comparação do desempenho da placa cimentícia com resíduo de EVA proposta, ao longo do tempo, e fazer comparação com a manta comercial aplicada em sistema de piso flutuante simplificado.

2.7 Estimativa da redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto (ΔL) ao longo do tempo.

A redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto (ΔL) pode ser determinada para o material resiliente antes e após a compressão durante a vida útil do piso, a partir de modelos teóricos da norma ISO 12354-2: 2017, tendo como base ensaios em laboratório de rigidez dinâmica, conforme a norma ISO 9052-1: 1989, e de fluência à compressão, de acordo com os procedimentos da norma ISO 20392:2007.

Os valores de rigidez dinâmica (s') e da massa do contrapiso (m') são utilizados para a estimativa do ΔL conforme as equações 21 e 22 fornecidas pela ISO 12354-2: 2017, por meio dos valores da frequência de ressonância f_0 (Hz). Pois a alteração da espessura do material resiliente ao longo de um período, sob uma certa carga altera sua rigidez dinâmica.

$$\Delta L = 30 \log (f / f_0) \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

$f = 500 \text{ Hz}^1$;

f_0 = frequência de ressonância, de acordo com a com a equação 23.

$$f_0 = 160 \sqrt{s' / m'} \quad (\text{Equação 22})$$

Onde:

s' = é a rigidez dinâmica por unidade de área medida de acordo com a ISO 9052-1:1989;

m' = é a massa por unidade de área de um piso flutuante.

¹ A frequência central de banda de oitava (f), foi adotada neste trabalho como 500 Hz, de acordo com Schiavi *et al* (2007).

Em síntese o presente trabalho tem registro de comportamento dos materiais quanto a sua aplicação em sistemas de piso flutuante em períodos estipulados, nos quais, foram feitos ensaios de ruído de impacto no sistema de piso flutuante, simulado em protótipo, e em sequência, a caracterização da rigidez dinâmica dos materiais resilientes comercial (manta de PET reciclada: MantaPET_A e MantaPET_B) e alternativo (placas cimentícias PEVA1,8_A, PEVA1,8_B, PEVA1,8_C e PEVA1,8_D). As diferenças entre as medições são o tempo e a forma como esse processo foi feito.

Então, houve uma medição inicial de isolamento ao ruído de impacto e da rigidez dinâmica, sem ter sido submetido a carga estática no conjunto e definida para logo após a finalização da produção das amostras de material resiliente alternativo (placas PEVA1,8), uma repetição dos ensaios sequenciais de rigidez dinâmica e teste de redução de ruído de impacto com os mesmos materiais resilientes cujas datas foram pensadas no cronograma inicial para ser depois de períodos de 1 ano, 2 anos e 3 anos para as placas PEVA1,8 (B, C e D) e 1 ano e 2 anos para a MantaPET devido ao tempo de sua obtenção. A seleção da manta acústica foi em função do que foi encontrado em caso real existente em edifício multipavimentos local. Só que o tempo de influência da compressão para este material foi menor, pois a amostra só foi conseguida depois que a pesquisa com a placa PEVA1,8 já tinha iniciado.

Ao final do período do presente trabalho depois que as placas foram submetidas ao ensaio de fluência à compressão, que simulou o comportamento dos materiais referentes na vida útil (VU) de 10 anos do sistema de piso flutuante, foi possível estimar o valor de redução do nível de pressão sonora do ruído impacto (ΔL) de acordo com a rigidez dinâmica obtida. A NBR 15575:2013, classifica a vida útil de um material resiliente em sistema de piso flutuante em 13 anos, mas a presente pesquisa só verificou o tempo de 10 anos com base nas referências que usaram o mesmo período e porque quanto mais tempo para classificação, mais tempo se levava para fazer o ensaio. E estava perto do prazo final do cronograma previsto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os problemas enfrentados na realização de alguns ensaios, conforme já relatado no capítulo de procedimentos metodológicos, provocou a necessidade de ajustes no cronograma inicial para se adequar ao tempo máximo de conclusão do presente trabalho, o que levou a um desfalque no prazo de influência da compressão no conjunto de dois anos da placa PEVA1,8_B, com divisão das etapas de acordo com o fluxograma apresentado no capítulo anterior.

Em todo caso, ao conjunto de dados que foram possíveis de serem registrados, conforme as condições de com e sem compressão no conjunto e acelerado (simulação de 10 anos), pretendeu-se a partir da sistematização, atender aos objetivos previstos nesse estudo, identificando até que ponto há variação da rigidez dinâmica dos materiais resilientes testados, após serem aplicados, e qual a repercussão dessa questão na alteração no comportamento do correspondente sistema de piso flutuante proposto, ao longo do tempo.

Na Tabela 17 apresentam-se os dados característicos da placa PEVA1,8 (Figura 25), cuja caracterização física é a seguinte: espessura igual a 1,8 cm, densidade igual a 388,9 kg/m³. Destaca-se que tais valores são mais baixos quando comparados com aquelas produzidas por Santos (2013), a EVA_ar0 e EVA_ar1. Inclusive a PEVA1,8 apresenta também menor consumo de cimento Portland, uma vez que agora se adotou o traço 1:8. O cálculo da densidade superficial (7,0 kg/m²) também confirma uma redução, se comparada às demais placas EVA analisadas no estudo de Santos (2013), como mostra na Tabela 17.

Tabela 17 – Comparativo entre a placa PEVA1,8 proposta no estudo atual e as estudadas anteriormente por Santos (2013) a EVA_ar0 e EVA_ar1.

	Densidade (kg/m ³)	Densidade Superficial (kg/m ²)	Espessura (cm)
EVA_ar0	626,8	15,67	2,5
EVA_ar1	592,9	20,75	3,5
PEVA1,8	388,9	7,00	1,8

3.1 Resultados quanto à redução ao ruído de impacto dos sistemas de piso flutuante propostos após os períodos de simulação de compressão no conjunto.

3.1.1 Resultado inicial do ensaio ruído de impacto das placas PEVA1,8 e da MantaPET.

A Tabela 18 apresenta o resultado das médias finais dos níveis de ruído de impacto com respectivo gráfico (Figura 51), da placa cimentícia com EVA (PEVA1,8) e do material comercial (MantaPET), medidos na câmara de recepção do protótipo com laje pré-moldada do LABEME-UFPB. Os tipos A, B e C da placa PEVA1,8 correspondem ao mesmo lote de fabricação, portanto compartilham do mesmo valor inicial de medição. E que se repete o mesmo procedimento para a MantaPET tipo A e tipo B.

Tabelas 18 – Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para os sistemas de pisos comparados

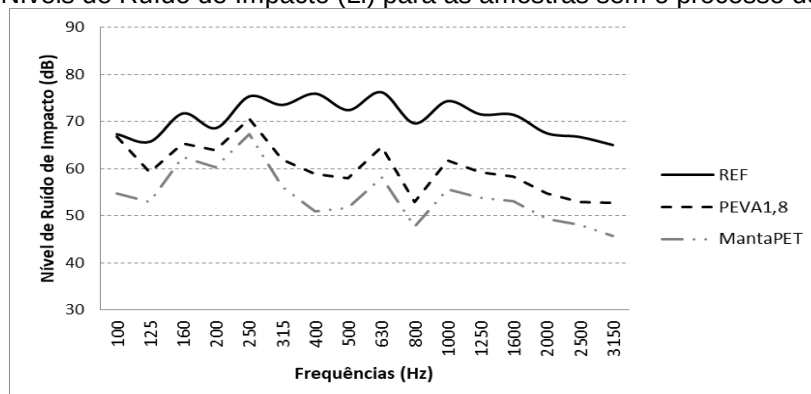
Frequência	Sistema REF.	PEVA1,8	MantaPET
Hz	dB	dB	dB
100	67,3	66,8	54,8
125	65,7	59,2	52,9
160	71,7	65,4	62,4
200	68,6	64	60,4
250	75,3	70,6	67,3
315	73,5	62	56,2
400	75,9	58,9	50,9
500	72,4	58	51,7
630	76,2	64,7	58,2
800	69,6	52,9	47,7
1000	74,3	61,8	55,6
1250	71,5	59,3	53,9
1600	71,4	58,3	53,1
2000	67,5	54,8	49,3
2500	66,7	53	48,0
3150	65	52,8	45,7

REF: sistema de piso de referência com contrapiso (4 cm) revestido com cerâmica sobre laje pré-moldada convencional (13 cm).

PEVA1,8: sistema de piso flutuante com revestimento em cerâmica esmaltada sobre contra piso (4 cm), sobre placas PEVA1,8 (espessura: 1,8 cm e densidade: 388,90 kg/m³) e sobre laje pré-moldada convencional (13 cm).

MantaPET: sistema de piso flutuante com revestimento em cerâmica esmaltada sobre contra piso (4 cm), sobre manta acústica (8 mm) e sobre laje pré-moldada convencional (13 cm).

Figura 51 – Níveis de Ruído de Impacto (Li) para as amostras sem o processo de compressão



Após a sistematização dos dados aplicando-se os valores dos níveis de ruído de impacto (Li) e os respectivos tempos de reverberação, além da verificação do ruído de fundo, tem-se os seguintes valores para o número global da amostra $L'_{nT,w}$ (Tabela 19). Em relação à capacidade de isolamento ao ruído de impacto da placa PEVA1,8, como material resiliente aplicado em sistema de piso flutuante, obteve-se o número global igual a 61 dB, resultando numa redução de 14 dB com relação à amostra de referência (REF), alcançando classificação de desempenho Intermediário, conforme os parâmetros da norma NBR 15.575-3:2013. E o número global para a MantaPET foi de 55 dB com redução de 20 dB para a amostra de referência, atingindo o desempenho superior (S).

Tabela 19 – Comparativo entre desempenho das placas PEVA1,8 e MantaPET

Amostras	$L'_{nT,w}$ (dB)	Nível de isolamento de ruído de impacto (dB)	Desempenho
Sistema de REF	75	0	Mínimo (M)
PEVA1,8	61	14	Intermediário (I)
MantaPET	55	20	Superior (S)

A Tabela 20 traz o comparativo entre os resultados obtidos para as placas cimentícias com EVA, desenvolvidas no estudo de Santos (2013). Vale destacar que a repetição do ensaio com a amostra de REF resultou num valor para $L'_{nT,w}$ igual a 75 dB, que foi diferente daqueles 80 dB obtidos por Santos (2013). Essa diferença pode ser justificada por correções adotadas na sistematização dos dados, sobretudo nos cálculos das médias, bem como na aplicação dos valores nas equações previstas na norma e, talvez até, por melhorias no isolamento acústico do protótipo que foram implementadas mais recentemente.

Tabelas 20 – Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para os sistemas de pisos comparados

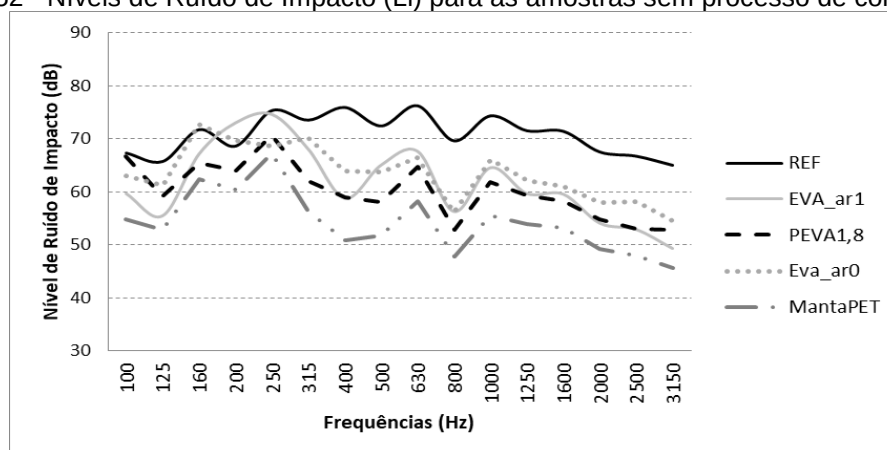
Frequência	Sistema REF.	PEVA1,8	MantaPET	EVA_ar0	EVA_ar1
Hz	dB	dB	dB	dB	dB
100	67,3	66,8	54,8	63,1	59,7
125	65,7	59,2	52,9	61,3	55,5
160	71,7	65,4	62,4	72,7	67,2
200	68,6	64	60,4	69,7	73,1
250	75,3	70,6	67,3	68,6	74,7
315	73,5	62	56,2	70,3	68,1
400	75,9	58,9	50,9	63,9	58,8
500	72,4	58	51,7	63,8	65,1
630	76,2	64,7	58,2	66,5	67,7
800	69,6	52,9	47,7	56,2	56,3
1000	74,3	61,8	55,6	66,1	64,6
1250	71,5	59,3	53,9	62,1	59,7
1600	71,4	58,3	53,1	61,0	59,6
2000	67,5	54,8	49,3	58,0	54,1
2500	66,7	53	48,0	58,2	52,9
3150	65,0	52,8	45,7	54,5	49,3

A Tabela 21 e a Figura 52 apresentam o desempenho acústico ao ruído de impacto no piso, comparando todas as amostras ensaiadas, com resultado para todas as frequências prescritas para o caso, no qual se pode constatar que a PEVA1,8 tem comportamento parecido com as placas estudadas por Santos (2013), mesmo quando se considera que uma delas possui bolsão de ar (1,0 cm) e tem maior espessura total (3,5 cm). Dessa forma, destaca-se isso como outra importante vantagem da placa PEVA1,8 ao se comparar com as estudadas por Santos (2013).

Tabela 21 – Comparativo entre desempenho das placas PEVA1,8, placas de Santos (2013) (EVA_ar0 e EVA_ar1) e MantaPET

Amostras	$L'_{nT,w}$ (dB)	Nível de isolamento de ruído de impacto (dB)	Desempenho
REF	75	0	Mínimo (M)
EVA_ar0	62	13	Intermediário (I)
EVA_ar1	61	14	Intermediário (I)
PEVA1,8	61	14	Intermediário (I)
MantaPET	55	20	Superior (S)

Figura 52 - Níveis de Ruído de Impacto (Li) para as amostras sem processo de compressão



No que concerne à estrutura física das amostras comparadas, a PEVA1,8 possui dimensões mais favoráveis que as estudadas por Santos (2013) que também resultou no mesmo nível de desempenho (Tabela 22) no teste de ruído de impacto no piso. Essa análise valoriza a PEVA1,8 pelo propósito de manter praticamente o mesmo desempenho acústico, mas com redução da espessura do material resiliente, o que é desejável tendo em vista a menor interferência na espessura total do sistema de piso onde ele possa ser inserido e consequentemente na altura do pé-direito do ambiente.

3.1.2 Resultado do ruído de impacto das placas PEVA1,8_B e MantaPET_A após um ano compressão no conjunto.

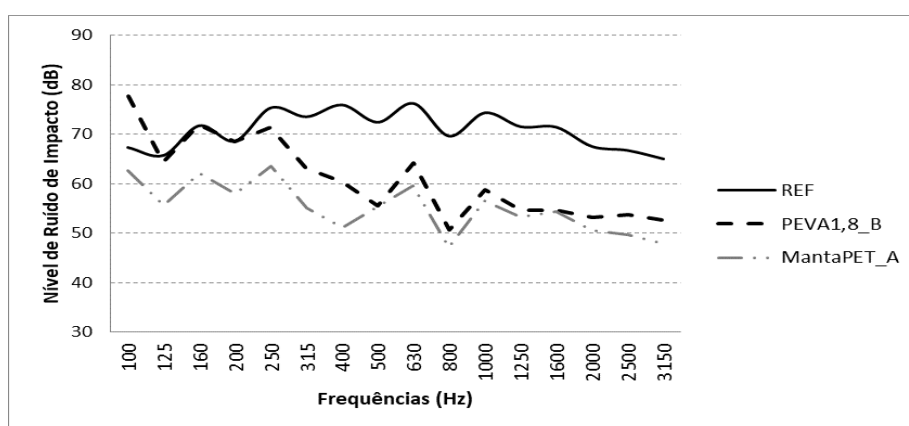
A Tabela 22 e a Figura 53 apresentam os resultados das médias finais dos níveis de ruído de impacto, medidos na câmara de recepção do protótipo com laje pré-moldada durante os ensaios com a placa cimentícia com EVA (PEVA1,8_B) e o material comercial (MantaPET_A) depois de submetidas a um ano de compressão no conjunto proposto.

Tabelas 22 – Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para os sistemas de pisos comparados após um ano de compressão.

Frequência	Sistema REF.	PEVA1,8_B	MantaPET_A
Hz	dB	dB	dB
100	67,3	77,7	62,7
125	65,7	64,3	55,6
160	71,7	71,9	62,2
200	68,6	68,5	58,0
250	75,3	71,4	63,5
315	73,5	63,1	55,0

400	75,9	60,4	51,2
500	72,4	55,5	55,5
630	76,2	64,2	59,6
800	69,6	50,6	47,1
1000	74,3	58,7	56,6
1250	71,5	54,6	53,2
1600	71,4	54,6	54,4
2000	67,5	53,1	50,6
2500	66,7	53,7	49,7
3150	65,0	52,7	47,9

Figura 53 - Níveis de Ruído de Impacto (Li) para as amostras após um ano



Após a sistematização dos dados aplicando-se os valores dos níveis de ruído de impacto (Li) e os respectivos tempos de reverberação, além da verificação do ruído de fundo, tem-se os seguintes valores para $L'_{nT,w}$ (Tabela 23). Em relação à capacidade de isolamento ao ruído de impacto da placa PEVA1,8_B e da MantaPET_A, como material resiliente aplicado em sistema de piso flutuante, simulando um ano de uso conforme os parâmetros da norma NBR 15575-3:2013, percebe-se que a MantaPET_A tem melhor nível de isolamento do que a PEVA1,8_B, mas agora ambas permanecendo no mesmo nível de desempenho intermediário, devido à pequena variação para cima nos valores $L'_{nT,w}$, que no caso da MantaPET foi determinante para mudar de faixa de desempenho.

Tabela 23 – Comparativo entre desempenho das placas PEVA1,8_B e MantaPET_A após um ano de compressão

Amostras	$L'_{nT,w}$ (dB)	Nível de isolamento de ruído de impacto (dB)	Desempenho
REF	75	0	Mínimo (M)
PEVA1,8_B	62	13	Intermediário (I)
MantaPET_A	56	19	Intermediário (I)

3.1.3 Resultado do ruído de impacto das placas PEVA1,8_B e MantaPET_A após dois anos de compressão no conjunto.

A Tabela 24 apresenta o resultado das médias finais dos níveis de ruído de impacto, medidos na câmara de recepção do protótipo com laje pré-moldada durante os ensaios com a placa cimentícia com EVA (PEVA1,8_B) e o material comercial (MantaPET_A) depois de submetidas a dois anos de compressão no conjunto.

Tabelas 24 – Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para os sistemas de pisos comparados após 2 anos de compressão.

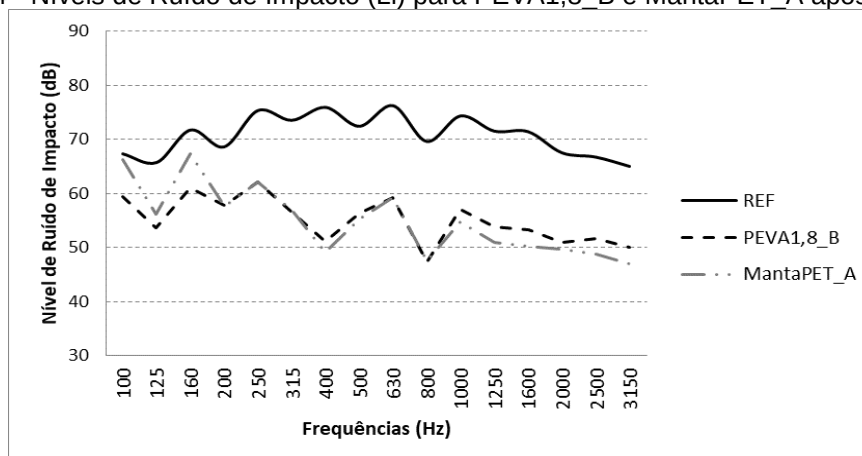
Frequência	Sistema REF.	PEVA1,8_B	MantaPET_A
Hz	dB	dB	dB
100	67,3	59,4	66,3
125	65,7	53,7	56,2
160	71,7	61,0	67,4
200	68,6	57,7	57,6
250	75,3	62,2	62,2
315	73,5	56,5	56,8
400	75,9	51,2	49,1
500	72,4	56,4	55,3
630	76,2	59,3	59,3
800	69,6	47,3	47,5
1000	74,3	57,0	54,8
1250	71,5	53,9	50,9
1600	71,4	53,2	50,2
2000	67,5	51,0	49,6
2500	66,7	51,6	48,8
3150	65,0	50,0	46,9

Após a sistematização dos dados aplicando-se os valores dos níveis de ruído de impacto (Li) (Figura 54) e os respectivos tempos de reverberação, além da verificação do ruído de fundo, tem-se os seguintes valores para $L'_{nT,w}$ (Tabela 25). Em relação à capacidade de isolamento ao ruído de impacto da placa PEVA1,8_B, como material resiliente aplicado em sistema de piso flutuante, conforme os parâmetros da norma NBR 15575-3:2013, e da MantaPET_A, as duas amostras se mantiveram com classificação de desempenho intermediário. O resultado sugere que é mais vantajoso adotar o material resiliente MantaPET_A, já que a partir do modo de fabricação da placa PEVA1,8_B não se consegue reduzir espessura e massa comparável a amostra comercial, lembrando que a espessura representa maior impacto na altura do pé-direito dos ambientes com o piso flutuante instalado.

Tabela 25 – Comparativo entre desempenho das amostras PEVA1,8_B e MantaPET_A em relação a amostra de REF após dois anos de compressão.

Amostras	$L'_{nT,w}$ (dB)	Nível de isolamento de ruído de impacto (dB)	Desempenho
Sistema REF	75	0	Mínimo (M)
PEVA1,8_B	59	16	Intermediário (I)
MantaPET_A	56	19	Intermediário (I)

Figura 54 - Níveis de Ruído de Impacto (Li) para PEVA1,8_B e MantaPET_A após dois anos

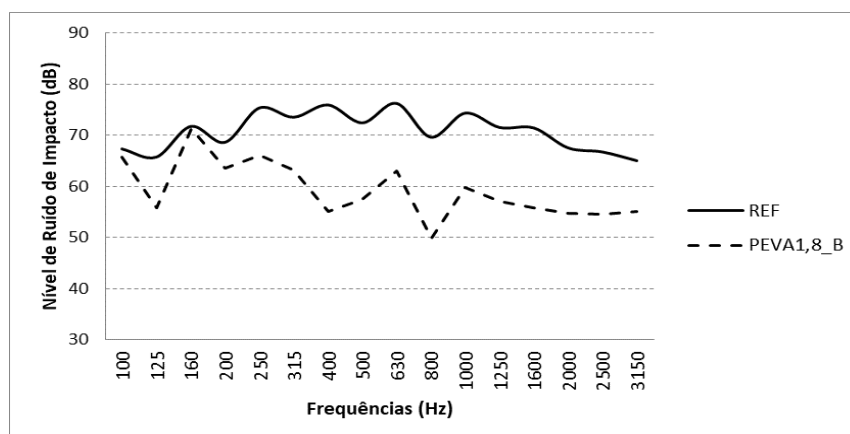


De acordo com a Tabela 25 o desempenho da MantaPET_A ao longo dos 2 anos só diminuiu 1 dB, resultando em 56 dB. Diferente da placa PEVA1,8_B em que o resultado do ruído de impacto diminuiu, melhorando o seu desempenho. Deve-se destacar que essas placas vão ficando menos rígidas com o passar do tempo, sob carregamento estático, por outro lado como observado durante a manipulação das placas nos ensaios, elas vão ficando mais frágeis e quebradiças.

Porém, cabe lembrar que tais alterações nas placas ocorrem durante o manuseio, ao qual foram submetidas várias vezes, pela necessidade de realização dos testes. De qualquer modo, num caso real o fenômeno não aconteceria se o material tiver sido aplicado em um sistema de piso flutuante, quando não haveria tal manipulação, já que a proposta do material é ficar confinado entre o contrapiso e a laje estrutural. Em todo caso, as implicações dessas observações ao longo do tempo, devem ser investigadas em pesquisas futuras.

O comportamento da placa PEVA1,8 (Figura 55; Tabela 26) depois de três anos de compressão tende a se aproximar daquele desempenho inicial da MantaPET.

Figura 55 - Níveis de Ruído de Impacto (Li) para PEVA1,8_B após três anos



Tabelas 26 – Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para os sistemas de pisos com a placa PEVA1,8_B após 3 anos

Frequência	Sistema REF.	PEVA1,8_B
Hz	dB	dB
100	67,3	65,8
125	65,7	55,8
160	71,7	71,3
200	68,6	63,6
250	75,3	66,1
315	73,5	63,2
400	75,9	55,0
500	72,4	57,4
630	76,2	63,0
800	69,6	49,9
1000	74,3	59,8
1250	71,5	57,1
1600	71,4	55,8
2000	67,5	54,8
2500	66,7	54,6
3150	65	55,0

Em síntese, apresentam-se os valores dos números globais (Tabela 27) de acordo com o tempo para cada amostra, onde é possível perceber que para um ano de compressão ambas as amostras apresentam diferença (oscilação para cima) de apenas 1 dB. Mas, quando a placa PEVA1,8_B é submetida aos dois anos de compressão no conjunto, esse valor oscila para baixo (2 dB relativo ao valor inicial), melhorando o comportamento do material no sistema de piso flutuante. De qualquer modo, as oscilações são pequenas para os dois materiais resilientes testados.

Tabela 27 – Comparativo entre desempenho da placa PEVA1,8_B e da MantaPET_A ao longo do tempo

$L'_{nT,w}$ (dB)				
Amostras	Desempenho inicial	Após um ano	Após 2 anos	Após três anos
PEVA1,8_B	61	62	59	60
MantaPET_A	55	56	56	-

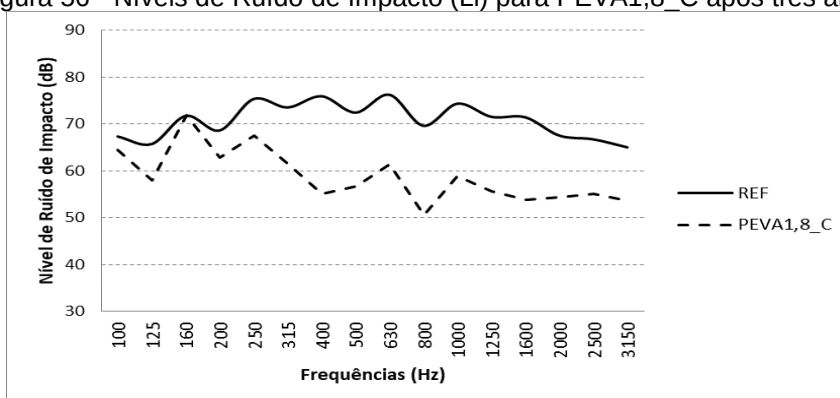
O resultado de isolamento ao ruído de impacto no piso flutuante com a amostra da placa PEVA1,8_C, aquela que ficou no conjunto durante três anos sem interferência, isto é, sem ter sido retirada do sistema sanduíche para ser submetida aos ensaios de ruído de impacto a cada 12 meses, confirmou o valor de 60 dB para $L'_{nT,w}$ (Tabela 28 e Figura 56). Ou seja, confirmou o resultado acima da Tabela 28 para a placa PEVA1,8_B, que ficou no conjunto também por três anos, mas com interrupções a cada 12 meses para realizar os testes de ruído de impacto.

Isto demonstra que a retirada das amostras do sistema proposto em sanduíche (concreto + material resiliente + argamassa), por curtos períodos suficientes para realizar os ensaios de ruído de impacto, não interferiu nos resultados obtidos para caracterizar o desempenho acústico do material.

Tabelas 28 – Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (L_i) para os sistemas de piso Flutuante com a placa PEVA1,8_C em três anos no conjunto sem interferência ao longo do tempo.

Frequência	Sistema REF.	PEVA1,8_C
Hz	dB	dB
100	67,3	64,4
125	65,7	58,0
160	71,7	71,8
200	68,6	62,9
250	75,3	67,6
315	73,5	61,6
400	75,9	55,0
500	72,4	56,7
630	76,2	61,4
800	69,6	50,5
1000	74,3	58,9
1250	71,5	55,7
1600	71,4	53,8
2000	67,5	54,4
2500	66,7	55,1
3150	65,0	53,7

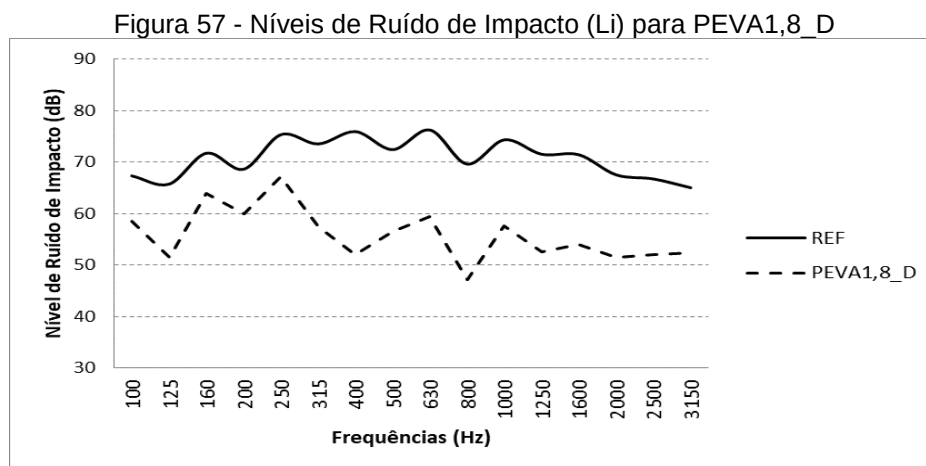
Figura 56 - Níveis de Ruído de Impacto (Li) para PEVA1,8_C após três anos



A amostra da placa PEVA1,8_D, que ficou armazenada livre de carregamento apresentou o mesmo número global ($L'_{nT,w}$), 61 dB (Tabela 29 e Figura 57), o que confirma o mesmo valor inicial das amostras PEVA1,8_B e PEVA1,8_C, lembrando que todas são amostras comparáveis devido ao mesmo processo de fabricação e mesmo procedimento de ensaio.

Tabela 29 – Resultados das médias dos níveis de ruído de impacto (Li) para o sistema de piso flutuante com a placa PEVA1,8_D

Frequência	Sistema REF.	PEVA1,8_D
Hz	dB	dB
100	67,3	58,5
125	65,7	51,5
160	71,7	64,0
200	68,6	59,9
250	75,3	67,2
315	73,5	57,4
400	75,9	52,0
500	72,4	56,6
630	76,2	59,5
800	69,6	47,2
1000	74,3	57,6
1250	71,5	52,5
1600	71,4	54,0
2000	67,5	51,5
2500	66,7	52,0
3150	65,0	52,4



O fato é que a placa PEVA submetida aos testes influência da compressão, considerando apenas a carga estática correspondente ao peso do contrapiso e das cargas normais que atuam sobre o piso em edifícios residenciais tende a alterar a característica do material (compósito cimentício com EVA) deixando a amostra menos rígida. Neste sentido, os resultados indicam que pode haver melhora no seu desempenho como material resiliente, na medida em que apresentou redução, ainda que pequena de 1 dB no valor de $L'_{nT,w}$ (60 dB).

A Tabela 30 apresenta todos os valores de $L'_{nT,w}$ que traduzem a variação do desempenho ao ruído de impacto dos materiais analisados antes do ensaio de fluência à compressão. Outro aspecto interessante a destacar é a comparação entre os materiais resilientes diferentes aqui analisados, a placa PEVA1,8 e a MantaPET, submetidos a processos semelhantes de compressão. O notável é que enquanto a tendência para a placa PEVA1,8 é reduzir o valor de $L'_{nT,w}$, para a MantaPET ocorre o contrário e na mesma proporção, ou seja, o primeiro reduz e o segundo aumenta 1 dB.

Tabela 30 – Comparativo entre desempenho das amostras ao longo do tempo

Amostras	$L'_{nT,w}$ (dB)			
	Desempenho inicial	Após um ano	Após dois anos	Após três anos
PEVA1,8_B	61	62	59	60
PEVA1,8_C	61	-	-	60
PEVA1,8_D	61	-	-	-
MantaPET_A	55	56	56	-

3.2 Resultados da rigidez dinâmica inicial da placa PEVA1,8 (tipo B, C e D) e da MantaPET (tipo A e B), após simulação de compressão no conjunto.

3.2.1 Resultado inicial do ensaio de rigidez dinâmica da placa PEVA1,8 e da MantaPET.

Os resultados da frequência de ressonância e da respectiva rigidez dinâmica aparente, s'_t , para a placa PEVA1,8_B, obtidos na primeira tentativa de realização dos ensaios (teste iniciais), estão na Tabela 31, cujos valores foram respectivamente, 58,29 Hz e 22,66 MN/m³ (média de três amostras). Deve-se lembrar que a placa PEVA1,8_A, na qual foi aplicada uma pintura superficial com resina, obteve um valor de rigidez dinâmica alto (36,0 MN/m³) e foi desconsiderada do estudo, desde a fase inicial. Na ocasião, considerou-se que a resina teria influenciado negativamente no resultado, devido ao fato de que depois de aplicada na placa PEVA1,8_A deve ter preenchido os vazios entre a composição de cimento com o resíduo de EVA, deixando a placa menos porosa e mais rígida.

Tabela 31 - Resultados dos testes iniciais da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente (s'_t) para várias amostras de materiais resilientes (comerciais e alternativos).

Amostra	Densidade (kg/m ³)	Espessura (cm)	f_r (Hz)	s'_t (MN/m ³)
PEVA1,8_B	388,9	1,8	58,29	22,66

Visando tirar a dúvida em relação à confiabilidade nos resultados obtidos inicialmente nos ensaios de rigidez dinâmica das amostras, como relatado no Capítulo anterior, adotou-se o terceiro procedimento (no segundo procedimento não foi possível verificar os picos de frequência). Deste modo, a repetição dos ensaios confirmou a obtenção de pico de frequência natural, com valores praticamente iguais entre eles, o que gerou mais confiabilidade no teste. Assim, as médias das frequências (55,23 Hz) e da rigidez dinâmica (20,00 MN/m³) obtidas para 25 amostras da placa PEVA1,8_B, apresentadas na Tabela 32, são próximas aos respectivos valores encontrados na primeira tentativa.

Tabela 32 - Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente (s'_t) para a placa PEVA1,8_B sem compressão (medição inicial).

Amostra	f_r (Hz)	s'_t (MN/m ³)
PEVA 1,8 B 01	63,75	26,0
PEVA 1,8 B 02	46,13	14,0
PEVA 1,8 B 03	66,00	28,0
PEVA 1,8 B 04	71,63	33,0
PEVA 1,8 B 05	55,63	20,0
PEVA 1,8 B 06	38,25	09,0

PEVA 1,8 B 07	45,63	13,0
PEVA 1,8 B 08	49,13	16,0
PEVA 1,8 B 09	46,50	14,0
PEVA 1,8 B 10	54,25	19,0
PEVA 1,8 B 11	52,63	18,0
PEVA 1,8 B 12	42,63	12,0
PEVA 1,8 B 13	40,50	11,0
PEVA 1,8 B 14	43,50	12,0
PEVA 1,8 B 15	59,88	23,0
PEVA 1,8 B 16	64,63	27,0
PEVA 1,8 B 17	72,50	34,0
PEVA 1,8 B 18	56,88	21,0
PEVA 1,8 B 19	55,13	20,0
PEVA 1,8 B 20	56,88	21,0
PEVA 1,8 B 21	61,25	14,0
PEVA 1,8 B 22	47,00	24,0
PEVA 1,8 B 23	45,25	13,0
PEVA 1,8 B 24	80,63	42,0
PEVA 1,8 B 25	64,63	27,0
Média final	55,23	20,00
Desvio padrão	11,00	8,24

No caso da amostra com a MantaPET_A as verificações de rigidez dinâmica foram iniciadas a partir deste terceiro procedimento de ensaio de rigidez dinâmica, devido a obtenção tardia do material, como já explicado anteriormente. O valor de rigidez dinâmica para a MantaPET_A foi igual a 2,00 MN/m³ (ver apêndice¹, Tabela 45), bem abaixo daquele encontrado para a placa PEVA1,8_B, o que era esperado já que as composições dos materiais são diferentes, sendo a placa PEVA1,8_B mais rígida e mais espessa. O notável é que os resultados das 25 amostras da MantaPET foram iguais.

Com base também no terceiro procedimento adotado foi possível determinar a rigidez dinâmica inicial para a amostra PEVA1,8_D, assim como as frequências de ressonâncias correspondente a todas as 25 unidades de amostras ensaiadas (ver apêndice, Tabela 46). A média para a amostra PEVA1,8_D foi igual a 60,4 Hz para frequência de ressonância e 24,5 MN/m³ para rigidez dinâmica.

Os resultados obtidos para as amostras placa PEVA1,8_B e PEVA1,8_D, foram verificados estatisticamente com uso de análise de variância (ANOVA) com fator único, com o auxílio do programa Excel (Tabela 33), com erro primitivo $\alpha=0,05$, para verificar se os valores obtidos da propriedade, no caso rigidez dinâmica, são aceitáveis, isto é, por hipótese, se são semelhantes. De acordo com o Valor de Prova obtido de 0,1318669, que foi maior do que o erro primitivo (α) e o valor de F de 2,34976 que foi menor do que o F

¹ Os valores dos ensaios das amostras que estão sinalizadas em “ver apêndices” estão dispostos nas Tabelas 45 a 52 respectivamente, de acordo com os seus títulos.

crítico de 4,0426521 (região de rejeição), verifica-se que se deve aceitar a igualdade entre os valores encontrados para tais amostras.

Tabela 33 – Análise de variância entre as amostras PEVA1,8_B e PEVA1,8_D

Fonte da variação	Soma quadrática	gl	Média Quadrática	F	Valor- P	F crítico
Entre grupos	212,18	1	212,18	2,34976	0,1318669	4,0426521
Dentro dos grupos	4334,32	48	90,29833333			
Total	4546,5	49				

3.2.2 Resultado de rigidez dinâmica da placa PEVA1,8_B e da MantaPET_A após um ano de compressão no conjunto.

Após um ano de compressão no conjunto foi possível verificar o valor da rigidez dinâmica das amostras placa PEVA1,8_B e da MantaPET_A (ver apêndice, Tabelas 47 e 48 respectivamente). Os resultados mostram que o valor da rigidez dinâmica, após um ano do processo de compressão no conjunto, submetendo a placa PEVA1,8_B à cargas estáticas, reduziu-se de 20,0 MN/m³ para 14,2 MN/m³, o que confirma a característica menos rígida da placa e corrobora com as observações já feitas anteriormente. No caso da MantaPET_A, o valor da rigidez dinâmica aumentou de 2 MN/m³ para 3,14 MN/m³. Cabe destacar que das 25 amostras da MantaPET_A só foi possível fazer o teste com 14 delas (de qualquer forma, mais da metade), como pode ser observado na Tabela 48 do apêndice, em razão da quebra do equipamento no momento das medições. Naquela ocasião, as amostras voltaram para o conjunto para dar continuidade ao processo de influência da compressão, enquanto se buscava soluções para retomar as medições, visando cumprir o prazo estimado para a finalização do trabalho.

De qualquer modo, após a solução encontrada para a continuidade dos ensaios de rigidez dinâmica, como já foi relatado no capítulo anterior, foi verificada mais uma vez o valor dessa propriedade para a MantaPET, só que agora com outro lote do material, aqui denominada MantaPET_B, levando em conta a necessidade de não interromper o processo de influência da compressão da MantaPET_A que havia retornado ao conjunto. Como já dito anteriormente, a solução para o prosseguimento das medições foi adotar o quarto procedimento, que confirmou o mesmo valor obtido com a amostra MantaPET_A (ver apêndice, Tabela 49), considerando o seu resultado inicial (sem influência da compressão),

demonstrando uma coerência nos resultados dos testes entre os dois procedimentos diferentes utilizados para aquisição de sinal.

3.2.3 Resultado da rigidez dinâmica após três anos de compressão no conjunto para as placas PEVA1,8_B e PEVA1,8_C, e dois anos para a MantaPET_A.

Com base no quarto procedimento adotado, foi possível dar continuidade às medições de rigidez dinâmica das amostras, de modo a completar o tempo de três anos de compressão com carga estática para as placas PEVA1,8_B e PEVA1,8_C, e o tempo de dois anos para a MantaPET_A (ver apêndice, Tabela 50, 51 e 52 respectivamente). A comparação de interesse aqui é confrontar os valores de rigidez dinâmica encontrados para as amostras PEVA1,8_B (3 anos de influência da compressão no conjunto, com interrupção e retirada das amostras a cada 12 meses para a realização dos ensaios), com aqueles da placa PEVA1,8_C (3 anos ininterruptos de influência da compressão). Também possibilitou comparar com os resultados obtidos com a MantaPET_A, que também teve menor tempo (2 anos) de compressão no conjunto.

Percebe-se que após 3 anos de influência da compressão no conjunto o valor da rigidez dinâmica para a PEVA1,8_B foi igual a 17,7 MN/m³, maior do que a medição anterior, mas continuou menor em relação à medição inicial (sem compressão no conjunto). Essa diferença entre a rigidez obtida para um e dois anos deve ter sido pela mudança dos equipamentos utilizados, mas de qualquer modo confirma uma diminuição da rigidez dinâmica ao longo do tempo para este material.

O resultado obtido para a MantaPET_A, após 2 anos no conjunto com carga estática, revela que continua com a mesma tendência de variação no sentido de aumentar a rigidez dinâmica, que agora subiu para 3,56 MN/m³.

A rigidez dinâmica da placa PEVA1,8_C, após 3 anos no conjunto com compressão estática, mantido nas condições de modo ininterrupto, foi 13,0 MN/m³, diminuído 11,5% de seu valor inicial.

As duas amostras de placas, PEVA1,8_B e PEVA1,8_C, depois dos mesmos três anos, sendo a primeira sem interrupção do processo a cada 12 meses (para retirada das placas e realizar testes de ruído de impacto e de rigidez dinâmica) e a segunda mantida confinada entre as placas de concreto e argamassa (conjunto representativo) durante três anos ininterruptamente, tiveram os seus resultados verificados com análise de variância

(ANOVA). Neste caso, foram considerados os parâmetros com fator único, com o auxílio do programa Excel (Tabela 35), com erro primitivo $\alpha=0,05$, para verificar se os valores encontrados (rigidez dinâmica) são aceitáveis entre as amostras, isto é, se por hipótese são semelhantes. A análise indicou que apesar dos valores de rigidez dinâmica das amostras de placas PEVA1,8_B e PEVA1,8_C ficarem na faixa de 20 MN/m³, a conclusão é diferente do caso anterior. Isto porque, de acordo com o Valor de Prova obtido (0,004012367), que foi menor do que o erro primitivo (α), e o valor de F (9,13648294) que foi maior do que o F crítico (4,042652129), característica da região de rejeição, então não se deve aceitar a igualdade entre os valores de rigidez dinâmica das amostras analisadas.

Tabela 35 – Análise de variância entre as amostras PEVA1,8_B e PEVA1,8_D

Fonte da variação	Soma quadrática	gl	Média Quadrática	F	Valor- P	F crítico
Entre grupos	278,48	1	278,48	9,13648294	0,004012367	4,042652129
Dentro dos grupos	1463,04	48	30,48			
Total	1741,52	49				

Então, apresentam-se resumidamente na Tabela 36 o comparativo entre todos os valores encontrados para a rigidez dinâmica das amostras em placas PEVA1,8 (B e C) e em MantaPET_A, em função dos respectivos tempos de influência da compressão no conjunto.

Tabela 36 – Comparativo entre os resultados de rigidez dinâmica das amostras ao longo do tempo

Amostras	Rigidez dinâmica (MN/m ³)			
	Inicial	Após um ano	Após dois anos	Após três anos
PEVA1,8_B	20,0	14,2	-	17,7
PEVA1,8_C	20,0	-	-	13,0
PEVA1,8_D	24,5	-	-	-
MantaPET_A	2,0	3,1	3,5	-

PEVA1,8_B: submetida a influência da compressão durante três anos com análise de rigidez dinâmica e redução ao ruído de impacto ao longo do tempo;

PEVA1,8_C: submetida a influência da compressão durante três anos sem interrupção com retirada das amostras para fazer testes de rigidez dinâmica e ruído de impacto a cada 12 meses;

PEVA1,8_D: submetida a compressão durante três meses no ensaio de Fluência à Compressão;

MantaPET_A: submetida a influência da compressão durante dois anos com análise de rigidez dinâmica e redução ao ruído de impacto ao longo do tempo;

Verifica-se que a tendência da rigidez dinâmica para placa PEVA1,8 é diminuir ao longo do tempo e para a MantaPET ao contrário aumenta, ficando mais rígida com o passar do tempo. Contudo, há que se considerar a pequena espessura da MantaPET, neste caso. O fenômeno destacado na comparação entre os materiais diferentes deve ser relacionado à estrutura do material, que para a placa PEVA1,8 foi possível constatar que se trata de um

material quebradiço em que as frágeis ligações entre cimento e agregado foram quebradas devido a compressão a qual as placas foram submetidas durante os ensaios e que resultou em uma diminuição da rigidez.

O mesmo não acontece com a MantaPET, por ela ser um material composto por fibras, quando é submetido a um carregamento, como se pode ver nas análises do ensaio de fluência à compressão, a medida que ele vai se comprimindo, as suas fibras vão se juntando, deixando o material com menos vazios, portanto, aumentando o valor de sua rigidez dinâmica. Esta análise está de acordo com Zini *et al* (2016), quando afirma que os materiais resilientes em um sistema de piso flutuante têm sua composição constantemente comprimida e que esta condição causa uma deformação, reduzindo sua taxa de vazios. Então quanto menor a deformação mais se mantém a propriedade de amortecimento do material, influenciada pelos seus vazios.

Brancher *et al* (2016) também afirmam que a morfologia da argamassa analisada em seus estudos evidenciou que não há interação química entre os grãos de areia e o cimento. E que argamassas com EVA mostram a mesma característica morfológica. Eles afirmam ainda que o EVA tem uma estrutura porosa e os depósitos de cimento superficialmente em seus grãos favorecem o aumento de índice de vazios do sistema.

A baixa rigidez do sistema é mantida sempre que não há intrusão de partículas de cimento nos poros dos agregados de EVA, preservando a dissipação de energia mecânica pelo material e o amortecimento interno e conseqüentemente a redução do ruído de impacto. A dissipação de energia do impacto mecânico é explicada pelo aumento do tempo de contato do amortecimento da energia cinética pela natureza elástica do material. Sob essas circunstâncias o espectro de excitação mantém a amplitude de força com diferentes distribuições ao longo do tempo.

3.3 Resultado das medições do ensaio de fluência à compressão para as amostras PEVA1,8_D e MantaPET_B.

O ensaio de fluência à compressão contou com três amostras de cada material, sendo a placa PEVA1,8_D de numeração 08,15 e 24 e MantaPET_B 01,02 e 03. As amostras ficaram submetidas a uma carga de 200 kg/m², durante 123 dias. Os valores foram extrapolados, de acordo com a ISO 20392:2007 para um tempo de uso 30 vezes maior, correspondente a 10 anos em um sistema de piso flutuante.

Na Tabela 37 tem-se os valores das medições iniciais dos pontos medidos, onde o valor da espessura inicial (Ds), sem carregamento, foi a média dos quatro pontos da amostra, medido com o paquímetro digital.

Tabela 37 – Valores iniciais do ensaio de fluência à compressão

Amostra	Espessura inicial em mm (Ds)	Peso inicial (g)
PEVA1,8_D_08	19,96	400,0
PEVA1,8_D_15	21,98	380,0
PEVA1,8_D_24	22,01	480,0
MantaPET_B_01	8,00	0,010
MantaPET_B_02	8,00	0,010
MantaPET_B_03	8,00	0,010

Abaixo os resultados das duas medições do primeiro dia, que foram feitas logo após a amostra ser submetida ao carregamento da placa metálica (200 kg/m²). A medição inicial é chamada de DI pela norma, e a segunda é uma medição feita após 60 segundos de carregamento, intitulada de X0, como é recomendado pela ISO 20392: 2007 e como pode ser visto na Tabela 38.

Tabela 38 – Dados do primeiro dia de medição (25/07/2019)

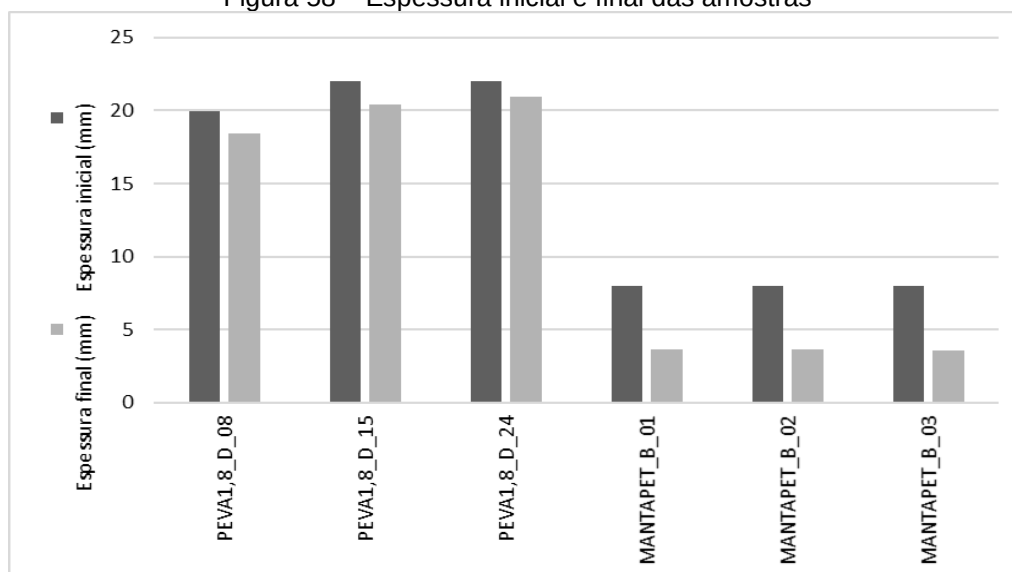
Amostras	Primeira Medição (mm) (DI)	Segunda Medição (mm) (X0)
PEVA1,8_D_08	19,27	18,58
PEVA1,8_D_15	21,00	20,45
PEVA1,8_D_24	21,21	21,10
MantaPET_B_01	4,21	4,14
MantaPET_B_02	4,02	3,98
MantaPET_B_03	4,61	4,45

A última medição, depois de 123 dias, foi realizada de acordo com o cronograma estipulado na metodologia, com valores relatados na Tabela 39 e Figura 58, e que se classifica com uma variação de 3,42 % de deformação da placa PEVA1,8_D, deformando apenas 0,73 mm (X_{10 years}) de sua espessura, valor estipulado para 10 anos de uso em um sistema de piso flutuante, de acordo com a equação 23 abaixo.

Tabela 39 – Dados da última medição (25/11/2019)

Amostra	Última Medição (mm)	Média das amostras (mm)	Peso final (g)
PEVA1,8_D_08	18,46	19,93	400,0
PEVA1,8_D_15	20,39		375,0
PEVA1,8_D_24	20,94		480,0
MantaPET_B_01	3,63	3,61	0,010
MantaPET_B_02	3,63		0,000
MantaPET_B_03	3,57		0,000

Figura 58 – Espessura inicial e final das amostras



Os cálculos foram realizados de acordo com os dados da Tabela 40, através de uma equação de regressão linear (Equação 23) com os valores da espessura medida por 123 dias em um intervalo de escala de registro. A deformação a longo prazo é calculada com base na Equação 22 de Findley (1944) *apud* ISO 20392:2007, e a espessura da deformação após 10 anos é calculada, conforme indicado pela Equação 23². O número 87.600 na equação 23 denota o valor convertido na unidade de tempo de 10 anos.

$$X_t = X_0 + mt^b \text{ (mm)} \quad \text{(Equação 22)}$$

$$X_{10 \text{ years}} = X_0 + m87600^b \text{ (mm)}, \quad \text{(Equação 23)}$$

$$m = 10^a, \quad a = y_m - bx_m,$$

$$b = \frac{\sum x_t y_t - \frac{\sum x_t \sum y_t}{n}}{\sum x_t^2 - \frac{(\sum x_t)^2}{n}}$$

Onde:

X_t é deformação no tempo t ;

X_0 é inicialmente a deformação (60 s após o carregamento);

X_m é valor médio de x_t .

² Com parâmetros m e b de 0,11 e 0,08 respectivamente para a placa PEVA1,8_D e 0,079 e 0,26 para a MantaPET_B.

Tabela 40 – Cálculos com dados do ensaio de Fluência à compressão para a Placa PEVA1,8_D

Tempo t h	Log t	Deformação Xt			Deformação relativa Et			Média Et	FC Xct			Média Xct	Log Xct
		Amostra			Amostra				Amostra				
		1	2	3	1	2	3		1	2	3		
168	2,22	1,11	0,72	0,20	5,56	3,27	0,90	3,24	0,42	0,17	0,09	0,22	-0,65
216	2,33	1,92	0,63	0,19	9,61	2,86	0,86	4,44	1,23	0,08	0,08	0,46	-0,33
336	2,52	0,73	0,89	0,30	3,65	4,04	1,36	3,01	0,04	0,34	0,19	0,19	-0,72
432	2,63	0,70	0,64	0,30	3,50	2,91	1,36	2,59	0,01	0,09	0,19	0,29	-0,53
576	2,76	0,85	0,89	0,16	4,25	4,04	0,72	3,03	0,16	0,34	0,05	0,55	-0,25
768	2,88	0,76	0,58	0,40	3,80	2,63	1,81	2,74	0,07	0,03	0,29	0,13	-0,88
1008	3,00	1,30	0,60	0,40	6,51	2,85	1,81	3,72	0,61	0,05	0,29	0,31	-0,50
1272	3,10	0,91	0,67	0,31	4,55	3,04	1,40	2,99	0,22	0,12	0,20	0,18	-0,74
1560	3,19	1,04	0,62	0,42	5,21	2,82	1,90	3,31	0,35	0,07	0,09	0,17	-0,76
1920	3,28	0,74	0,65	0,18	3,70	2,95	0,81	2,48	0,05	0,10	0,07	0,07	-1,15
2400	3,38	0,73	0,75	0,40	3,65	3,41	1,81	2,95	0,04	0,20	0,29	0,17	-0,76
2952	3,47	0,81	0,61	0,27	4,05	2,77	1,22	2,68	0,12	0,06	0,16	0,11	-0,95

A MantaPET_B apresentou uma variação de 20,15%, deformando 1,61 mm de sua espessura inicial (8 mm), valor também estimado para 10 anos de uso em um sistema de piso flutuante. Os cálculos foram realizados de acordo com os dados da Tabela 41 e Figura 74. As amostras da placa PEVA1,8_D foram as que apresentaram menor deformação ao longo do tempo, seguindo a mesma tendência dos valores encontrados por autores como Zuchetto *et al* (2015), que para suas amostras com EVA na composição de argamassa com cimento Portland, com espessura de apenas 3 cm, resultou numa deformação de 0,12 mm para o tempo estimado de 1 ano e 6 meses.

Borges (2015) também verificou que suas amostras com 75% de EVA na composição com cimento Portland deformaram 0,17 mm, para a mesma quantidade de tempo de Zuchetto *et al* (2015).

Tabela 41 – Cálculos com dados do ensaio de FC para a Placa MantaPET_B

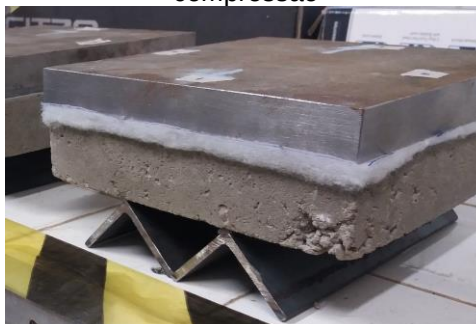
Tempo t h	Log t	Deformação Xt			Deformação relativa Et			Média Et	FC Xct			Média Xct	Log Xct
		Amostra			Amostra				Amostra				
		1	2	3	1	2	3		1	2	3		
168	2,22	0,27	0,07	0,68	3,37	0,87	8,5	4,24	0,20	0,03	0,52	0,25	-0,60
216	2,33	0,33	0,12	0,81	4,12	1,50	10,12	5,24	0,26	0,08	0,65	0,33	-0,48
336	2,52	0,35	0,14	0,86	4,37	1,75	10,75	5,62	0,28	0,10	0,70	0,36	-0,44
432	2,63	0,41	0,16	0,88	5,12	2,00	11,0	6,04	0,34	0,12	0,72	0,39	-0,40
576	2,76	0,44	0,19	0,91	5,50	2,37	11,37	6,41	0,37	0,15	0,75	0,42	-0,37
768	2,88	0,51	0,22	0,96	6,37	2,75	12,00	7,04	0,44	0,18	0,80	0,47	-0,32
1008	3,00	0,52	0,25	0,98	6,5	3,12	12,25	7,29	0,45	0,21	0,82	0,49	-0,30
1272	3,10	0,53	0,27	1,01	6,62	3,37	12,62	7,53	0,46	0,23	0,85	0,51	-0,29
1560	3,19	0,54	0,29	1,02	6,75	3,62	12,75	7,70	0,47	0,25	0,86	0,52	-0,28
1920	3,28	0,55	0,32	1,03	6,87	4,00	12,87	7,91	0,48	0,28	0,87	0,54	-0,26
2400	3,38	0,57	0,37	1,04	7,12	4,62	13,0	8,24	0,50	0,33	0,88	0,57	-0,24
2952	3,47	0,58	0,39	1,06	7,25	4,87	13,25	8,45	0,51	0,35	0,90	0,58	-0,23

Kim *et al* (2015) observaram também a deformação a longo prazo de materiais como o EVA e EPS, e afirmaram que a espessura das amostras não alterou significativamente e, portanto, não são fisicamente comprimidas.

Borges (2015) diz que materiais com células abertas e com baixa densidade tendem a mudar sua capacidade de amortecimento ao longo do tempo. Ela se baseou nos estudos de Dikavičius e Miškinis (2009), que constataram que existem alterações significativas na capacidade de amortecimento ao impacto mecânico em materiais com células abertas, quando comparados aos materiais de células fechadas.

O referido fenômeno pode ser ilustrado na Figura 59, pela diferença característica entre os materiais comparados no presente estudo, quando se pode notar que a partir do quarto dia de ensaio de fluência à compressão a placa PEVA1,8_D está aparentemente intacta enquanto a MantaPET_B está bem deformada (primeiro plano da imagem), mostrando claramente que o material da manta está extrapolando a largura de 20 cm das placas do ensaio (metálica, em cima, e argamassa, embaixo).

Figura 59 – Comportamento da amostra MantaPET_B, em destaque durante o ensaio de fluência à compressão



Neves *et al* (2008) asseveram que quando os materiais são compressíveis, a diminuição de espessura do material, quando sujeito a carga, pode provocar um aumento da rigidez dinâmica. Também dizem que a massa volumétrica aparente não pode ser um fator de comparação, porque as perdas internas de energia dependem da estrutura do material.

Lee e Kim (2014) analisaram a deflexão de pisos flutuantes com diversos materiais, entre eles EVA, EPS, usando o modelo de Winkler que é normalmente utilizado para investigar a deflexão de materiais suportados por uma base contínua de rigidez constante. Os autores indicaram que a deflexão do piso flutuante aumentou rapidamente à medida que o módulo tangente de material resiliente diminuiu, especialmente para o piso com módulo inferior a 0,5 MPa. Em seu estudo o módulo tangente do EPS resultou em 0,85 MPa e do EVA 0,23 MPa, ressaltando que estes materiais não estavam misturados ao cimento.

Portanto, concluíram que o material resiliente cujo módulo tangente seja superior a 0,5 MPa é recomendado para apoiar o carregamento em sistemas de pisos flutuantes.

Essas observações apoiaram as conclusões de Klippel *et al* (2017) que afirmaram que a deformação do material fibroso tem uma dependência da sua densidade, mesmo que as composições tenham a mesma espessura. Ressalta-se que quanto maior for a densidade, menor será a deformação durante o tempo de uso do material como a camada resiliente de um piso flutuante sob carga permanente.

Para Gnip *et al* (2013) a deformação é menor nas amostras com maior espessura, tomando como exemplo os dados encontrados no seu estudo em que a deformação do material testado foi de 0,3% para espessuras de 80 mm e 150 milímetros e entre 1% e 1,3% para as amostras com espessuras de 30 mm e 40 mm. Isto também acontece no presente estudo, ao comparar as espessuras das amostras, no qual a placa PEVA1,8_B tem maior espessura (20 mm) do que a MantaPET_B (8 mm), e foi a que deformou menos. Estes valores representam uma baixa deformação na espessura das amostras da placa PEVA1,8, e conseqüentemente uma pequena mudança de suas propriedades ao longo da vida útil do sistema. Assim, pode-se considerar que placa PEVA1,8 não reduz a sua capacidade de isolamento de ruído de impacto, em função da pequena deformação (redução de espessura) resultante da compressão durante o tempo de uso como material resiliente no piso flutuante. No caso da MantaPET o comportamento é o inverso, embora nos testes realizados a diferença obtida ainda seja pequena, mas os resultados indicam que a tendência é que este material deforme a tal ponto que diminua seu desempenho ao ruído de impacto ao longo do tempo. De qualquer modo, há necessidade de ensaios com prazos mais longos para ser assertivo sobre essa tendência.

3.3.1 Resultado da redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto, (ΔL) em dB, estimado a partir da rigidez dinâmica para as placas PEVA1,8_D e MantaPET_B, na simulação de dez anos de vida útil.

Ao término dos 123 dias de teste de fluência à compressão, foi calculada a rigidez dinâmica das mesmas amostras. Para as amostras PEVA1,8_D, o valor da rigidez dinâmica diminuiu 3,4%, passando de 24,5 MN/m³ para 23,67 MN/m³. No caso da MantaPET_B aumentou 33,5%, variando de 2,0MN/m³ (valor inicial) para 2,67 MN/m³ (final do ensaio), (Tabelas 42 e 43, respectivamente).

Tabela 42 - Resultados calculados da frequência de ressonância (f_r) e da rigidez dinâmica aparente (s'_t) para PEVA1,8_D, após ensaio de fluência à compressão

PEVA 1,8_D	f_r (Hz)	s'_t (MN/m³)
PEVA 1,8_08_D	60,21	23
PEVA 1,8_15_D	68,50	30
PEVA 1,8_24_D	52,42	18
Média final	60,38	23,67
Desvio Padrão	8,04	6,02

Tabela 43 - Resultados calculado da frequência de ressonância (f_r) e da rigidez dinâmica aparente (s'_t) para MantaPET_B, após ensaio de fluência à compressão

MantaPET_B	f_r (Hz)	s'_t (MN/m³)
MantaPET_B_01	20	3
MantaPET_B_02	19,5	2
MantaPET_B_03	20,0	3
Média final	19,83	2,67
Desvio Padrão	0,28	0,57

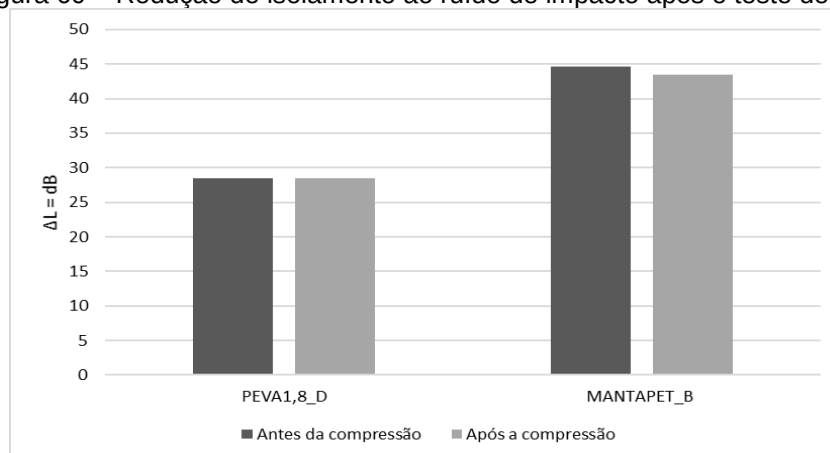
A redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto (ΔL), estimado pela rigidez dinâmica das amostras deste estudo, após os testes de fluência à compressão, foi nulo (0 dB) para a placa PEVA1,8_D e de 1,2 dB para a MantaPET_B. Os cálculos foram feitos de acordo com as equações 15 e 16, com os resultados plotados no gráfico apresentado na Figura 60, onde se pode observar os valores correspondentes à condição estimada antes da aplicação da carga de compressão (28,5 dB para placa PEVA1,8_D e 44,7 dB para MantaPET_B) e depois da carga de compressão (28,5 dB para placa PEVA1,8_D e 43,5 dB para MantaPET_B).

As diferenças nos valores de rigidez dinâmica após os 123 dias sob carga permanente indicaram manutenção do desempenho quanto à redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto (ΔL) para a placa PEVA1,8_B e queda de desempenho, ainda que de apenas 1 dB para a MantaPET_B. Segundo Moreira *et al* (2010), este comportamento provavelmente ocorre porque a amostra com placa PEVA1,8 contém cimento, e, por isso, deforma menos e mantém o mesmo desempenho acústico ao longo do tempo. Contudo, a MantaPET oferece melhor eficiência em termos de isolamento ao ruído de impacto comparado à placa PEVA1,8.

O resultado obtido para a MantaPET_B, que após o teste de fluência à compressão, sob uma carga de 200 kg/m² em um sistema de piso flutuante, indica que se pode ter uma redução no isolamento ao ruído de impacto de aproximadamente 1 dB, o que confirma as conclusões de Klippel *et al* (2017). Esses autores que também estudaram o uso de resíduo de PET como material resiliente, também indicaram que após 10 anos de uso, sob uma

carga de 200 kg/m², ter-se-ia uma perda de no máximo 1 dB, em um sistema de piso flutuante. Neves *et al* (2008) destacam que as equações adotadas sobrestimam o valor determinado para a redução sonora, mas que, no entanto, elas podem servir para comparar o desempenho de diversos materiais.

Figura 60 – Redução de isolamento ao ruído de impacto após o teste de FC.



Caniato *et al* (2016) dizem que se a deformação relativa a 7 anos do material for menor que 20%, a rigidez dinâmica pode ser considerada constante e a variação da redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto (ΔL) deve ser menor que 3 dB. Tomando tais referências, pode-se constatar que as indicações são coerentes com o resultado para a placa PEVA1,8, que obteve variação de rigidez dinâmica menor do que 20 % e o ΔL foi também menor do que 3 dB. Com relação ao que Caniato *et al* (2016) diz em relação a rigidez dinâmica maior do que 20%, como foi o caso do resultado obtido para a MantaPET, uma redução maior do que 3 dB pode ser uma perspectiva para este material, no longo prazo, o que no máximo alteraria sua faixa de desempenho de acordo com NBR 15575-3:2013.

Então, a fim de resumir e facilitar o entendimento dos resultados obtidos, segue na Tabela 44 os valores correspondentes para as amostras de acordo com o seu tipo, o tipo de ensaio realizado (Ruído de impacto ou Rigidez dinâmica) e o tempo de compressão no conjunto com carga estática (de 1 a 3 anos) e para o tempo de 10 anos simulados a partir do teste de fluência à compressão e sucessivamente a estimativa de redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto após esse teste.

Tabela 44 – Resumo dos valores das amostras ensaiadas

Amostras	Ruído de impacto	L'nTw	Rigidez dinâmica	s'	Redução do nível de
----------	------------------	-------	------------------	----	---------------------

Avaliação da influência da compressão de placas cimentícias com resíduo de EVA como material resiliente alternativo no isolamento ao ruído de impacto

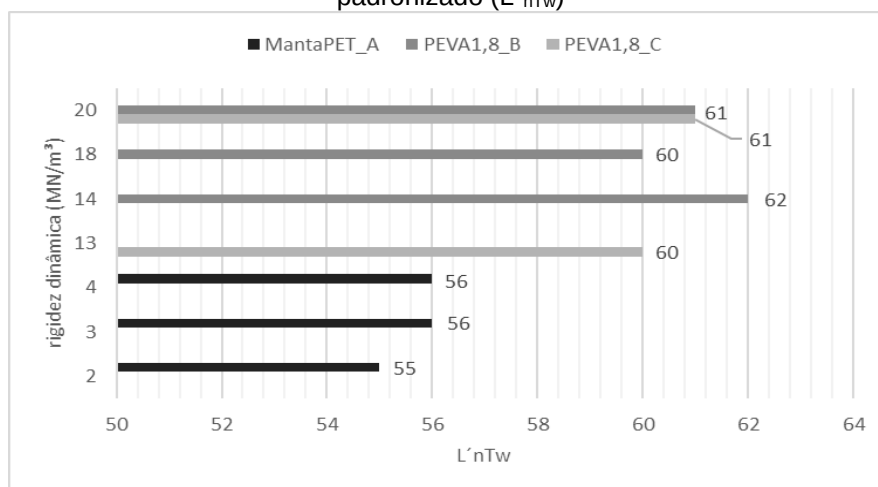
					pressão sonora
PEVA1,8_B	Inicial	61 dB	Inicial	20,0 MN/m ³	-
	1 ano	62 dB	1 ano	14,2 MN/m ³	-
	2 anos	59 dB	2 anos	*	-
	3 anos	60 dB	3 anos	17,7 MN/m ³	-
PEVA1,8_C	Inicial	61 dB	Inicial	20,0 MN/m ³	-
	3 anos	60 dB	3 anos	13,0 MN/m ³	-
PEVA1,8_D	Inicial	61 dB	Inicial	24,5 MN/m ³	$\Delta L = 28,5$ dB
			Após FC	23,67 MN/m ³	$\Delta L = 28,5$ dB
MANTAPET_A	Inicial	55 dB	Inicial	2,0 MN/m ³	-
	1 ano	56 dB	1 ano	3,1 MN/m ³	-
	2 anos	56 dB	2 anos	3,5 MN/m ³	-
MANTAPET_B	Inicial	55 dB	Inicial	2,0 MN/m ³	$\Delta L = 44,7$ dB
			Após FC	2,67 MN/m ³	$\Delta L = 43,5$ dB

Na Figura 63 tem-se a relação entre rigidez dinâmica e desempenho acústico para os materiais que foram envelhecidos naturalmente (PEVA1,8_B, PEVA1,8_C e MantaPET_A). Os resultados para PEVA1,8_D e MantaPET_B, não estão inseridos na Figura 77, pois não foram realizados ensaios de ruído de impacto com essas amostras no fim do estudo, devido ao desfalque ocorrido por três placas de cada material terem sido retiradas para fazer o teste de fluência à compressão. Então para as placas PEVA1,8_D e MantaPET_B só se tem a estimativa de redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto, por estimativa após o teste de fluência à compressão como pode ser visto na Tabela 44.

Portanto, na Figura 61 percebe-se que para a MantaPET_A a medida em que a rigidez dinâmica vai aumentando ao longo do tempo, de 2 MN/m³ a 4 MN/m³, o seu desempenho (L'_{nTw}) vai diminuindo em apenas 1 dB. Para a placa PEVA1,8_B o valor da rigidez dinâmica reduz ao longo do tempo e seu L'_{nTw} vai diminuindo em 1 dB melhorando seu desempenho.

Percebe-se que ao longo de três anos apesar do aumento da rigidez dinâmica devido a influência de cargas sobre o material resiliente a perda de desempenho é baixa entre as amostras. O que também acontece com a simulação de 10 anos de uso no teste de fluência à compressão em que a redução do nível de pressão sonora do ruído de impacto (ΔL) é baixa ao longo do tempo, em torno de 1dB para a MantaPET e 0 dB para a placa PEVA1,8, mantendo praticamente estável o desempenho dos materiais em relação ao nível de pressão sonora do ruído de impacto ao longo do tempo.

Figura 61 - Relação entre resultado de rigidez dinâmica (MN/m^3) e nível de ruído de impacto padronizado (L'_{nTw})



Esses resultados foram possíveis para uma análise de uso de acordo com a variação da rigidez dinâmica ao longo do tempo levando em consideração a fluência à compressão, seja por meio do ensaio de acordo com a ISO 20392:2007 ou pela proposta da influência através do conjunto simplificado analisado ao longo de três anos, mas não se tem a influência de outras variáveis para se fazer uma comparação mais ampla, como por exemplo a diferença de revestimento de piso e outras tipologias de laje para poder descrever como o material proposto se comporta em outras situações. Pois são dados que precisam ser discutidos para uma melhor especificação de uso do material o que facilitaria as decisões de projeto de acordo com a especificidade de cada construção.

Hopkins (2018) diz que avanços em medições em acústica para edificações em multipavimentos têm implicações relacionadas às habilidades exigidas dos profissionais que planejam nessa área. Desenvolvimentos em técnicas de construção exigem que os especialistas em acústica (re)projtem prédios sem afetar negativamente a saúde e o bem-estar das pessoas. No entanto, as atividades de pesquisa tornaram-se ligeiramente marginalizadas e apenas alguns grupos são capazes de cobrir os três aspectos-chave: medição, previsão e avaliação subjetiva. Como consequência, a indústria carece de profissionais com profunda experiência.

CONSIDERAÇÃO FINAL

Com base nos resultados obtidos, observa-se que foi possível realizar o procedimento de influência da compressão proposto que permitiu avaliar o desempenho acústico de materiais resilientes, após aplicados em sistemas de pisos flutuantes. A partir do estudo desenvolvido, que teve como base longo prazo de medições, foi acessada a alteração da rigidez dinâmica dos diferentes materiais resilientes testados e a correspondente variação das suas capacidades de isolamento ao ruído de impacto no sistema de piso flutuante simulados. As principais conclusões são:

- a placa cimentícia PEVA1,8, produzida em laboratório, através de um processo diferente de moldagem, visando reduções de espessura, densidade e consumo de cimento Portland, se mostrou eficiente para aplicação como material resiliente alternativo em sistemas de piso flutuante, obtendo classificação de desempenho intermediário (NBR 15575-3; ABNT, 2013);
- a correlação entre a menor rigidez dinâmica do material resiliente e o maior nível de isolamento de pressão nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado (L'_{nTw}) foi confirmada ao comparar o desempenho dos dois materiais resilientes diferentes testados, o que corrobora com dados da literatura. Antes do processo de influência da compressão a placa PEVA1,8 obteve rigidez dinâmica de 20 MN/m³ e L'_{nTw} = 61 dB, enquanto a MantaPET obteve rigidez dinâmica de 2 MN/m³ e L'_{nTw} = 55 dB);
- O aumento da capacidade de isolamento acústico da placa PEVA1,8 foi de apenas 1 dB (redução de L'_{nTw} de 61 dB para 60 dB), após três anos de influência da compressão no conjunto, mantendo a mesma classificação de desempenho intermediário (NBR 15575-3; ABNT, 2013), enquanto a sua rigidez dinâmica variou de 20,0 MN/m³ até para 13 MN/m³, quando não interrompeu o processo de compressão no conjunto a cada 12 meses, quando foram feitas as medições de rigidez dinâmica e L'_{nTw} . A placa

PEVA1,8 tende a perder rigidez dinâmica, no longo prazo, mas praticamente sem correspondência com aumento no isolamento ao ruído de impacto (L'_{nTw});

- A MantaPET variou sua rigidez dinâmica de 2 MN/m³ para 3,5 MN/m³, após dois anos de compressão no conjunto com carga estática, e reduziu sua capacidade de isolamento acústico em apenas 1 dB (aumento de L'_{nTw} de 55 dB para 56 dB). Enquanto a placa PEVA1,8 tende a perder rigidez durante o envelhecimento, a MantaPET tende a aumentar sua rigidez, embora ambos com pouca variação nas respectivas capacidades de isolamento ao ruído de impacto;
- a estimativa do comportamento de uso desses materiais resilientes em sistema de piso flutuante, com base no ensaio de fluência à compressão e em cálculos (modelos teóricos) de estimativa de redução do nível de pressão sonora de ruído de impacto (ΔL) mostrou que ocorreria deformação menor para PEVA1,8 (média de 0,73 mm; 3,42 % da sua espessura inicial 20 mm), comparado com a MantaPET (média de 1,61 mm; 20,15 % da sua espessura inicial 8 mm), mas os valores de ΔL praticamente não teriam variação (PEVA1,8 com $\Delta L = 0$ dB; MantaPET com $\Delta L = 1,2$ dB). Ou seja, apesar de deformarem diferentemente, ambos não teriam comprometimento nas suas capacidades de isolamento ao ruído de impacto no piso flutuante ao longo do tempo;
- tanto os ensaios de compressão até 3 anos, quanto as estimativas de comportamento dos dois materiais resilientes testados após o teste de fluência à compressão confirmaram as mesmas tendências relativas às variações da rigidez dinâmica (redução para PEVA1,8 e aumento para MantaPET), porém praticamente sem alterar o desempenho ao ruído de impacto nos sistemas de piso flutuantes;

É importante lembrar que os ensaios para registrar a capacidade de isolamento ao ruído de impacto dos materiais resilientes testados foram feitos em um protótipo de câmara acústica no LABEME-UFPB, construído com laje pré-moldada convencional, que tem desempenho considerado mínimo comparado com a laje maciça. Outra questão a destacar é para o tipo de ensaio simplificado com uso de tamanho reduzido da área de ensaio (1 m²),

que de acordo com Miskinis *et al* (2012) os valores de $L_{nT,w}$ obtidos são considerados superestimados. Portanto, os resultados obtidos, não devem ser utilizados com a finalidade de se obter um valor absoluto de isolamento, pois o efeito dos vínculos entre os elementos construtivos e a contribuição das transmissões marginais são de extrema relevância para a determinação do isolamento ao ruído de impacto em sistemas de pisos flutuantes, o que não foi avaliado na presente pesquisa.

A conclusão do estudo a destacar é que a placa PEVA1,8 tem potencial para ser utilizada como material resiliente em sistemas de pisos flutuantes, uma vez que em sua composição o EVA, em combinação com cimento Portland, confere uma interessante característica, que devido à pouca deformação das placas ao longo do tempo, pode propiciar maior estabilidade para suportar o peso dos materiais adicionados sobre elas, após a execução do piso flutuante. O fato está de acordo com Zini *et al* (2016) quando afirmam que o material resiliente para fins de isolamento ao ruído de impacto de pisos deve oferecer estabilidade e pouca deformação ao longo do tempo de uso.

4.1 Recomendações para pesquisas futuras com a utilização de resíduos de EVA aplicados em sistemas de pisos flutuantes:

- Investigar outras propriedades das placas PEVA1,8, tais como: desempenho térmico, resistência ao fogo, durabilidade, entre outras recomendadas pela NBR 15575:2013;
- Investigar a placa PEVA1,8 quanto à sua microestrutura interna e sua porosidade, antes e após o processo de envelhecimento;
- Proposta de fabricação e análise de um pré-moldado cimentício com EVA para impedir as pontes acústicas entre o piso e a parede do ambiente na execução de pisos flutuantes;
- Aplicar a placa PEVA1,8 em uma situação real onde haja a diferença do tamanho de um metro quadrado para a dimensão total de dormitório em uma unidade autônoma de edifício multipavimentos e que se consiga perceber o comportamento da amostra quando a argamassa de contrapiso é lançada por cima da placa cimentícia favorecendo uma aderência entre os elementos do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, A.; PATRICIO, J. **Comparative study on the efficiency of impact sound reduction provided by same materials when disposed on homogeneous and on non-homogeneous floors.** In: Euronoise, 2018. Crete. p 1153 – 1160.

ANDRADE, J. J. O. **Propriedade dos Polímeros.** In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

ARRUDA FILHO, N. T.; DANTAS, C. P.; LEAL, A. F.; BARBOSA, N.P.; SILVA, C. G.; ALEXANDRE, M. V. **Resistência mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando resíduos industriais e fibras de sisal.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Impresso), v. 16, p. 08-29, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT – Agregados - Determinação da composição granulométrica.** NBR 248, 2003.

_____. **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** NBR 45, 2006.

_____. **Ações para o cálculo de estruturas de edificações.** NBR 6120, 2019.

_____. **Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – desempenho – parte 3 – requisitos para os sistemas de pisos internos.** NBR 15575-3, 2013.

_____. **Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos.** NBR 8800, 2008.

_____. **Projeto de Estrutura de concreto – Procedimentos.** NBR 6118, 2014.

_____. **Reverberação - Análise do tempo de reverberação em auditórios - Método de ensaio.** NBR 11957, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA QUALIDADE ACÚSTICA (PROACÚSTICA). **Manual ProAcústica sobre a Norma de Desempenho.** Guia prático sobre cada uma das partes relacionadas à área de acústica nas edificações da Norma ABNT NBR 15575:2013 Edificações habitacionais – Desempenho. 2015

BARON, N.; BONFIGLIO, P.; FAUSTI, P. **Dynamic stiffness of materials used for reduction in impact noise: comparison between different measurement techniques.** 2004. In: Congressos Iberoamericanos de Acústica. Guimarães, 2004. p. 1–8

BEENTJES, W.; MUCHALL, R.; KRAMER, J. **A simple system to quantify the improvement of impact sound insulation by floor coverings.** In: Euronoise. Grécia, 2018.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

BORGES, J. G. K. **Análise das propriedades acústicas de contrapisos produzidos com materiais reciclados**, 2015. Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.

BORGES, J. K.; PACHECO, F.; TUTIKIAN, B.; OLIVEIRA, M. F. **An experimental study on the use of waste aggregate for acoustic attenuation: EVA and rice husk composites for impact noise reduction**. Construction and Building Materials. n. 161, p. 501–508, 2018.

BOUTTOUT, A.; AMARA, M. **Sound Insulation between Buildings: The Impact Noise Transmission through Different Floor Configurations**. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering. Vol:10, No:1, 2016

BRANCHER, L. R.; NUNES, M. F. O.; GRISA, A. M. C.; PAGNUSSAT, D. T.; ZENI, M. **Acoustic Behavior of Subfloor Lightweight Mortars Containing Micronized Poly (Ethylene Vinyl Acetate) EVA**. Materials, v. 9, n. 51, p. 1–9, 2016.

BRANCO, F.G; GODINHO, Luís. **On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission**. Construction and Building Materials. n 45, p. 184–191, 2013

CÂMARA BRASILEIRA PARA A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho das edificações habitacionais**: Guia orientativo para atendimento à Norma 15575/2013. Brasília, 2013.

CANIATO, M; SBAIZERO, O.; SCHMID, C. **Recycled materials for noise reduction in Floating floors**. In: XXII International Congress on Sound and Vibration, Florence (Italy), p. 12-16, 2015.

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. n 102, p. 226–232, 2016.

CARVALHO, R. P. **Acústica arquitetônica**. Brasília: Thesaurus, 2006. 167p.

CATAI, R. E.; PENTEADO, A. P.; DALBELLO, P. F. **Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico**. In: 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2006

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures**. 3. ed. Berkeley: Computers & Structures, 2003.

CORNACCHIA, G. M. M. **Investigação in-situ do isolamento sonoro ao ruído de impacto em edifícios residenciais**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

CROCE, B. P.; NUNES, M. A. A.; COELHO, F. C.; MOURA, N. F.; PIRES, J. L. G. **Análise de sensibilidade da metodologia de ensaio de campo para a estimativa do desempenho de lajes ao ruído de impacto segundo a ISO 16283-2: 2015**. Anais do XXVII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica - SOBRAC2017. Brasília, DF: SOBRAC2017, 2017. v. 1. p. 514-523.

CUSHMAN e WAKEFIELD. Certificação LEED – O que é e como funciona? 2018. Disponível em: <http://www.cushwakebrasil.com/certificacao-leed/>. Acesso em: Janeiro de 2020.

D’ALESSANDRO, F.; ASDRUBALI, F.; BALDINELLI, G. **Multi-parametric characterization of a sustainable lightweight concrete containing polymers derived from electric wires**. Construction and Building Materials. n. 68, p. 277–284, 2014.

DIKAVIČIUS, V.; MIŠKINIS, K. **Change of Dynamic Stiffness of Open and Closed Cell Resilient Materials after Compressibility Test**. Materials science (MEDŽIAGOTYRA). v. 15, n. 4, 2009.

DOLAN, J. D., MURRAY, T. M., JOHNSON, J. R., RUNTE, D., SHUE, B. C. **Preventing Annoying Wood Floor Vibrations**. Journal of Structural Engineering, pp. 19-24, January, 1999.

FERRAZ, Rafaela. **Atenuação de ruído de impacto em pisos de edificações de pavimentos múltiplos**. 2008. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

FERREIRA, Ana Rafaela P. C. **Soluções técnicas para isolamento sonoro de edifícios de habitação**. Dissertação (mestrado) – Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

FORET, R.; CHÉNÉ, J.; 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. Denmark, 2011.

GARLET, G. **Aproveitamento de resíduos de E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) como agregado para concreto leve na construção civil**. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

GNIP, I.; VAITKUS, S.; VEJELIS, S. **An estimated prediction of the deformability of mineral wool (MW) slabs under long-term compressive stress**. Construction and Building Materials. n. 38, p. 675–680, 2013.

HAAN, C. **Implementation of the floor impact noise monitoring system through the field test-bed operation**. In: Euronoise, Grécia, 2018.

HAGBERG, K.; THORSSON, P. **Uncertainties in standard impact sound measurement and evaluation procedure applied to light weight structures**. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010. Sydney, Australia. 2010.

HASSAN, O. A. B. **Building Acoustics and Vibration: Theory and practice**. London: World Scientific Publishing Company, 2009.

HAX, S. P. **Estudo do potencial dos resíduos de E.V.A. no isolamento de ruído de impacto nas edificações**. 2002. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

HEISSLER, R. F. **Análise comparativa do isolamento acústico em diferentes geometrias: ensaios em campo e simulações computacionais**. 2018. Dissertação (mestrado profissional) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2018.

HOPKINS, C. **Sound transmission in buildings: recent developments and current challenges in measurement and prediction**. In: Euronoise. Crete, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO – **Acoustics — Determination of dynamic stiffness — Part 1: Materials used under floating floors in dwellings**. ISO 9052-1, 1989.

_____. **Acoustic – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation**. ISO 16283-2:2015

_____. **Acoustic – Rating of sound insulation in building elements – Part 2: Impact sound insulation**. ISO 717-2, 2013.

_____. **Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 2: Impact sound insulation between rooms**. ISO 12354-2, 2017.

_____. **Thermal-insulating materials — Determination of compressive creep**. ISO 20392, 2007.

KIM, K.; GAB, C. J.; KWAN, S. Y.; JANG, Y. S. **Correlation between dynamic stiffness of resilient materials and heavyweight impact sound reduction level**. Building and Environment; n. 44, p. 1589-1600, 2009.

KIM, K.; YEON, J.; YANG, K.; KIM, M. **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.

KIM, H.; PARK, S.; LEE, S. **Acoustic Performance of Resilient Materials Using Acrylic Polymer Emulsion Resin**. Materials. n. 9, July 2016

KLIPPEL FILHO, S.; LABRES, H. S.; PACHECO, F.; CHRIST, R.; PIRES, J. R.; HEISSLER, R. F.; OLIVEIRA, M. F. **Uso da lã de PET para a absorção sonora e o isolamento acústico**. Acústica e vibrações. No. 49, dezembro de 2017

LEE, J.; KIM, J. **Deflection of Resilient Materials for Reduction of Floor Impact Sound**. The Scientific World Journal. Article ID 612608, 11 pages, 2014

LIMA, D. V. F. **Controle de vibrações induzidas em uma laje de academia de ginástica com a utilização de amortecedores de massa sintonizados**. Dissertação (mestrado) – Universidade de Brasília, 2007.

LYRA, M. **Blocos intertravados de concreto com Resíduos de copolímero de etileno-acetato de Vinila – EVA – para pavimentação de calçadas e passeios públicos**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, 2007.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7 ed. – São Paulo: Atlas, 2010.

MATEUS, D. **Acústica de Edifícios e Controle de Ruído**. Coimbra: FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2008.

MATEUS, D.; SANTOS, P. **Previsão da transmissão marginal de sons de percussão entre compartimentos sobrepostos**. Acústica 2008. Coimbra, 2008.

MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E.; DAVIS, D. B. **Vibrations of Steel Framed Structural Systems Due to Human Activity**, Steel Design Guide Series 11, American Institute of Steel Construction, 2016.

MISKINIS, K.; DIKAVICIUS, V.; RAMANAUSKAS, J.; NORVAISIENE, R. **Dependence between reduction of weighted impact sound pressure level and specimen size of floating floor construction**. Material Science (Medziagotyra). Vol. 18, Nº 1, 2012.

MOREIRA, A.; ANTONIO, J.; TADEU, A. **Impact sound reduction of concrete layers containing cork granules**. In: Internoise. Portugal, 2010.

MORIMOTO, C. E. Gateway. 2005 Disponível em: <https://www.hardware.com.br/termos/gateway>. Acesso em: Janeiro de 2020

NEVES, A.; ANTÓNIO, J.; NOSSA, A. **Resultados experimentais da rigidez dinâmica de materiais usados sob pavimentos flutuantes**. Coimbra, 2008. Disponível em: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Coimbra08/id212.pdf>. Acesso em: janeiro de 2020.

NIENKOETTER, G. M.; JÚNIOR, R. M. S. C.; MARCHIORI, F. F.; ROMAN, H. R.; SOUZA, M. **Impacto do tratamento acústico de lajes no custo das edificações residenciais do CUB**. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), Maceió, 2014. p 1206-1215.

NUNES, M. F. de O.; JORGE, V.; PAGNUSSAT, D. T. **Estimativa de incerteza em ensaios de ruído de impacto: posição dos equipamentos em medições em campo**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 5, n. 2, p. 22-30, dez. 2014. ISSN 1980-6809.

OGAWA, M. O. A.; FILHO, M. C. A.; RASSI, P. F. **Isolamento acústico ao ruído de Impacto em lajes de edifícios habitacionais**. Monografia (Curso de Engenharia Civil) Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

OLIVEIRA, M. F.; PATRICIO, J. V. **Impact Noise of Non-homogeneous Floors: Analysis of Different Input Parameters for Computational Modeling Predictions**. Journal of Civil Engineering and Architecture, v. 11, p. 274-281, 2017.

PACHECO, F.; KRUMENAUER, M.; MEDEIROS, D. R.; OLIVEIRA, M. F.; TUTIKIAN, B. F., **Development of lightweight concrete subfloor with ethylene vinyl acetate (EVA) aggregates waste to reduce impact sound in flooring system**. Journal of the Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia (DYNA). volume 84, n. 201, pp. 290-295, 2017.

PEDROSO, M. A. T. **Estudo comparativo entre as modernas composições de pisos flutuantes quanto ao desempenho no isolamento ao ruído de impacto**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2007.

PEREIRA, D. A. M. **Desenvolvimento de ferramentas para predição de isolamento do ruído de impacto em edificações de pavimentos múltiplos com laje nervurada**. Tese (Doutorado).2018. Universidade Federal da Paraíba, 2018.

REZENDE, J.B. de, RODRIGUES, F. C.; VECCI, M. A. M. **Uma análise de critérios de desempenho acústico para sistemas de piso em edificações**. Juiz de Fora, MG, maio 2014. p. 28-30.

RIBEIRO, P. I. S. **Estudo do comportamento dinâmico de um sistema de piso em aço com lajes secas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2017.

SANTOS, F. A. **Avaliação de placas cimentícias com resíduo de EVA quanto ao seu nível de isolamento acústico em sistemas de pisos flutuantes**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, 2013.

SCHIAVI, A.; BELLI, A. P.; CORALLO, M.; RUSSO, F. **Acoustical performance characterization of resilient materials used under floating floors in dwellings**. Acta Acustica United with Acustica. Vol. 93, p 477 – 485, 2007.

SCHIAVI, A.; BARBARESI, L.; DI BELLA, A.; PRATO, A. **Method for the in-situ estimation of the normalized impact sound pressure level of floating floors built on hollow brick and concrete base floors from dynamic stiffness of resilient layers**. In: Euronoise. Crete, 2018.

SILVA, P. **Acústica arquitetônica e condicionamento de ar**. Belo Horizonte: EDTAL, 2005. 277 p.

SILVA, R. T. **Ondas Sonoras**. Notas de aula, 2004. Disponível em: http://www.fisica.ufpb.br/~romero/pdf/18_ondasII_VI.pdf. Acesso em: dezembro de 2019.

SILVA, R. M. C. **Avaliação Acústica de Edifícios Habitacionais - Análise dos Coeficientes de Ponderação Associados aos Índices de Desempenho Acústico de Habitações**. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2014.

SILVA, H. R. T.; CAVALCANT, B. M. M.; MARQUES, D. V.; EGERT, P.; MAGNAGO, R. F.; CONSONI, D. R.; ZANCO, J. J. **Placas ecoeficientes: aproveitamento de resíduo de EVA em compósitos usados para isolamento acústico**. Mix Sustentável. v.3, n.2, p.40-47. Florianópolis, 2017.

SORIANO, H. L. **Introdução à Dinâmica das Estruturas**. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2014

SOUZA, L.C.L.; ALMEIDA, M.G.; BRAGAN, A.L. **Bê-á-bá da acústica arquitetônica: ouvindo a Arquitetura**. São Carlos: EdUFSCar, 2006.

STEWART, M. A.; MACKENZIE, R. K. **A Comparison of the Predicted Dynamic Stiffness of Resilient Layers with Calculated Values Obtained From the Measured Acceleration Response**. Building Acoustics, vol. 7, no. 4. 2000

TUTIKIAN, B. F.; NUNES, M. F. O.; LEAL, L. C.; MARQUETTO, L. **Lightweight concrete with EVA recycled aggregate for impact noise attenuation**. Materiales de Construcción. v. 63, n. 310, p. 309-316, abril/junho, 2013.

TUTIKIAN, B. F.; ZUCHETTO, L. K.; SOUZA, R. P. de; OLIVEIRA, M. F. de. **Uso de agregado leve de EVA em contrapiso argamassado para isolamento ao ruído de impacto em edificações residenciais**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 295-306, jul./set. 2017.

YOO, S. Y.; JEON, J. Y. **Investigation of the effects of different types of interlayers on floor impact sound insulation in box-frame reinforced concrete structures.** Building and Environment. Vol. 76, p 105-112. 2014.

ZINI, A.; ZUCHETTO, L. K.; NUNES, M. F. O.; GRISA, A. M. C.; PAGNUSSAT, D. T.; ZENI, M. **Sound insulation of floors: a new composite with a resilient layer of recycled polymer.** Journal of Civil Engineering and Architecture. Vol. 10, p. 861-869. 2016.

ZUCHETTO, L. K., R.P. SOUZA, R. P., NUNES, M. M. O., TUTIKYAN, B. F. **Estudo de contrapisos leves a base de EVA (Etileno Acetato de Vinila) para desempenho acústico e reduzidas cargas permanentes.** In: Conpat, Lisboa, 2015a.

ZUCHETTO, L. K.; NUNES, M. F. O.; TUTIKYAN, B. F. **Dynamic stiffness evaluation of floor covering system made out of recycled EVA – Ethylene Vinyl Acetate.** In: 44th Inter-Noise Congress & Exposition on Noise Control Engineering. São Francisco, Califórnia. 2015b.

ZUCHETTO, L. K.; NUNES, M. F. O.; PATRÍCIO, J. V.; AZEVEDO, F. S. **Estimativa da redução a sons de impacto: Determinação da rigidez de materiais resilientes.** In: 10^o Congresso Nacional de Mecânica Experimental (CNME). Lisboa, Portugal. 2016a.

ZUCHETTO, L. K.; NUNES, M. F. O.; PATRICIO, J. V. **Influence of the compression conditions in the acoustic performance of resilient layers of floors.** In: International Commission on Acoustics (ICA), Buenos Aires. 2016b

APÊNDICE

A seguir são dispostos nas Tabelas 45 a 52, os resultados dos ensaios de rigidez dinâmica das amostras (PEVA1,8 tipos B, C e D) e MantaPET_A, com seus respectivos tempos de influência da compressão, de acordo com os títulos das tabelas.

Tabela 45 – Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente (s'_t) para o material comercial (PET) sem compressão (medição inicial).

Amostra	f_r (Hz)	s'_t (MN/m³)
MantaPET_A_01	17,50	2,0
MantaPET_A_02	18,38	2,0
MantaPET_A_03	18,88	2,0
MantaPET_A_04	17,50	2,0
MantaPET_A_05	16,75	2,0
MantaPET_A_06	18,38	2,0
MantaPET_A_07	19,25	2,0
MantaPET_A_08	19,25	2,0
MantaPET_A_09	18,88	2,0
MantaPET_A_10	16,75	2,0
MantaPET_A_11	16,50	2,0
MantaPET_A_12	16,75	2,0
MantaPET_A_13	18,00	2,0
MantaPET_A_14	18,38	2,0
MantaPET_A_15	17,50	2,0
MantaPET_A_16	18,00	2,0
MantaPET_A_17	17,50	2,0
MantaPET_A_18	18,38	2,0
MantaPET_A_19	18,88	2,0
MantaPET_A_20	17,13	2,0
MantaPET_A_21	17,13	2,0
MantaPET_A_22	17,50	2,0
MantaPET_A_23	17,13	2,0
MantaPET_A_24	17,50	2,0
MantaPET_A_25	17,50	2,0
Média final	17,81	2,0
Desvio padrão	0,81	0

Tabela 46 - Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente (s'_t) para a placa PEVA1,8_D

Amostra	f_r (Hz)	s'_t (MN/m³)
PEVA 1,8_D_01	62,0	25,0
PEVA 1,8_D_02	56,2	21,0
PEVA 1,8_D_03	52,0	18,0
PEVA 1,8_D_04	50,0	16,0
PEVA 1,8_D_05	60,5	24,0
PEVA 1,8_D_06	59,7	23,0
PEVA 1,8_D_07	85,0	47,0

PEVA 1,8 D 08	74,0	35,0
PEVA 1,8 D 09	92,5	55,0
PEVA 1,8 D 10	54,5	19,0
PEVA 1,8 D 11	57,0	21,0
PEVA 1,8 D 12	54,0	19,0
PEVA 1,8 D 13	61,0	24,0
PEVA 1,8 D 14	53,5	19,0
PEVA 1,8 D 15	63,0	26,0
PEVA 1,8 D 16	59,5	23,0
PEVA 1,8 D 17	52,5	18,0
PEVA 1,8 D 18	51,7	17,0
PEVA 1,8 D 19	56,5	21,0
PEVA 1,8 D 20	56,7	21,0
PEVA 1,8 D 21	49,7	16,0
PEVA 1,8 D 22	58,5	22,0
PEVA 1,8 D 23	86,7	49,0
PEVA 1,8 D 24	47,0	14,0
PEVA 1,8 D 25	56,2	21,0
Média final	60,4	24,5
Desvio padrão	11,79	10,62

Tabela 47 - Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente (s'_t) para placa PEVA1,8 B com 1 ano de compressão no conjunto.

Amostra	f_r (Hz)	s'_t (MN/m³)
PEVA 1,8 B 01	40,00	10
PEVA 1,8 B 02	46,13	14
PEVA 1,8 B 03	40,00	10
PEVA 1,8 B 04	33,13	07
PEVA 1,8 B 05	44,75	13
PEVA 1,8 B 06	41,75	11
PEVA 1,8 B 07	37,50	09
PEVA 1,8 B 08	41,38	11
PEVA 1,8 B 09	45,25	13
PEVA 1,8 B 10	61,63	25
PEVA 1,8 B 11	62,13	25
PEVA 1,8 B 12	50,00	16
PEVA 1,8 B 13	60,75	24
PEVA 1,8 B 14	53,00	18
PEVA 1,8 B 15	56,00	20
PEVA 1,8 B 16	55,63	20
PEVA 1,8 B 17	51,75	17
PEVA 1,8 B 18	45,63	13
PEVA 1,8 B 19	39,63	10
PEVA 1,8 B 20	36,63	09
PEVA 1,8 B 21	35,25	08
PEVA 1,8 B 22	50,00	16
PEVA 1,8 B 23	42,25	12
PEVA 1,8 B 24	44,38	13
PEVA 1,8 B 25	45,63	13
Média final	46,40	14,28
Desvio padrão	8,25	5,22

Tabela 48 - Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente (s'_t) para a amostras MantaPET A após 1 ano

Amostra	f_r (Hz)	s'_t (MN/m ³)
MantaPET A 01	-	-
MantaPET A 02	25,38	4
MantaPET A 03	21,00	3
MantaPET A 04	21,50	3
MantaPET A 05	-	-
MantaPET A 06	24,88	4
MantaPET A 07	-	-
MantaPET A 08	-	-
MantaPET A 09	24,00	4
MantaPET A 10	20,13	3
MantaPET A 11	-	-
MantaPET A 12	-	-
MantaPET A 13	18,88	2
MantaPET A 14	23,63	4
MantaPET A 15	-	-
MantaPET A 16	22,25	3
MantaPET A 17	20,63	3
MantaPET A 18	21,50	3
MantaPET A 19	-	-
MantaPET A 20	20,63	3
MantaPET A 21	-	-
MantaPET A 22	21,00	3
MantaPET A 23	-	-
MantaPET A 24	-	-
MantaPET A 25	19,25	2
Média final	21,76	3,14
Desvio padrão	0,98	0,22

Tabela 49 - Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente (s'_t) para o material comercial (PET) sem processo de compressão.

Amostra	f_r (Hz)	s'_t (MN/m ³)
MantaPET B 01	17,0	2,0
MantaPET B 02	17,0	2,0
MantaPET B 03	17,0	2,0
MantaPET B 04	16,2	2,0
MantaPET B 05	16,7	2,0
MantaPET B 06	17,0	2,0
MantaPET B 07	17,5	2,0
MantaPET B 08	18,2	2,0
MantaPET B 09	16,5	2,0
MantaPET B 10	17,7	2,0
MantaPET B 11	17,0	2,0
MantaPET B 12	17,0	2,0
MantaPET B 13	16,5	2,0
MantaPET B 14	16,5	2,0
MantaPET B 15	17,0	2,0
MantaPET B 16	17,8	2,0
MantaPET B 17	17,0	2,0
MantaPET B 18	18,0	2,0
MantaPET B 19	16,7	2,0
MantaPET B 20	16,5	2,0
MantaPET B 21	16,5	2,0
MantaPET B 22	16,0	2,0

MantaPET B 23	16,0	2,0
MantaPET B 24	16,0	2,0
MantaPET B 25	16,0	2,0
Média final	16,85	2,0
Desvio padrão	0,61	0

Tabela 50 - Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente (s'_t) para placa PEVA1,8_B após três anos de compressão no conjunto.

Amostra	f_r (Hz)	s'_t (MN/m³)
PEVA 1,8_B_01	54,75	19,0
PEVA 1,8_B_02	63,75	26,0
PEVA 1,8_B_03	44,0	13,0
PEVA 1,8_B_04	45,25	13,0
PEVA 1,8_B_05	52,0	18,0
PEVA 1,8_B_06	41,25	11,0
PEVA 1,8_B_07	44,75	13,0
PEVA 1,8_B_08	52,25	18,0
PEVA 1,8_B_09	54,5	19,0
PEVA 1,8_B_10	74,25	36,0
PEVA 1,8_B_11	52,75	18,0
PEVA 1,8_B_12	50,25	16,0
PEVA 1,8_B_13	52,25	18,0
PEVA 1,8_B_14	45,0	13,0
PEVA 1,8_B_15	75,25	37,0
PEVA 1,8_B_16	51,0	17,0
PEVA 1,8_B_17	49,25	16,0
PEVA 1,8_B_18	42,0	11,0
PEVA 1,8_B_19	46,75	14,0
PEVA 1,8_B_20	45,0	13,0
PEVA 1,8_B_21	46,25	14,0
PEVA 1,8_B_22	53,75	19,0
PEVA 1,8_B_23	42,0	11,0
PEVA 1,8_B_24	49,0	16,0
PEVA 1,8_B_25	60,75	24,0
Média final	51,52	17,72
Desvio Padrão	8,94	6,77

Tabela 51 - Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente (s'_t) para MantaPET_A com dois anos de compressão no conjunto.

Amostra	f_r (Hz)	s'_t (MN/m³)
MantaPET_A_01	22,25	3
MantaPET_A_02	29,00	5
MantaPET_A_03	20,75	3
MantaPET_A_04	20,75	3
MantaPET_A_05	26,75	5
MantaPET_A_06	24,0	4
MantaPET_A_07	24,0	4
MantaPET_A_08	22,25	3
MantaPET_A_09	24,50	4
MantaPET_A_10	21,75	3
MantaPET_A_11	23,25	4
MantaPET_A_12	21,25	3
MantaPET_A_13	22,25	3
MantaPET_A_14	22,0	3
MantaPET_A_15	21,25	3

MantaPET A 16	23,25	4
MantaPET A 17	21,50	3
MantaPET A 18	25,50	4
MantaPET A 19	23,75	4
MantaPET A 20	23,50	4
MantaPET A 21	25,25	4
MantaPET A 22	23,75	4
MantaPET A 23	20,50	3
MantaPET A 24	23,0	3
MantaPET A 25	22,25	3
Média final	23,13	3,56
Desvio Padrão	2,0	0,64

Tabela 52- Resultados da frequência de ressonância (f_r) e rigidez dinâmica aparente (s'_t) para PEVA1,8_C após 3 anos com compressão estática no conjunto de modo ininterrupto

Amostra	f_r (Hz)	s'_t (MN/m³)
PEVA 1,8 C 01	36,5	9,00
PEVA 1,8 C 02	45,0	13,0
PEVA 1,8 C 03	36,25	9,00
PEVA 1,8 C 04	42,0	11,0
PEVA 1,8 C 05	46,5	14,0
PEVA 1,8 C 06	45,75	14,0
PEVA 1,8 C 07	42,0	11,0
PEVA 1,8 C 08	44,0	13,0
PEVA 1,8 C 09	46,0	14,0
PEVA 1,8 C 10	54,0	19,0
PEVA 1,8 C 11	52,0	18,0
PEVA 1,8 C 12	43,0	12,0
PEVA 1,8 C 13	40,0	10,0
PEVA 1,8 C 14	37,5	9,0
PEVA 1,8 C 15	37,25	9,0
PEVA 1,8 C 16	38,5	10,0
PEVA 1,8 C 17	36,0	8,00
PEVA 1,8 C 18	40,0	10,0
PEVA 1,8 C 19	42,5	12,0
PEVA 1,8 C 20	55,0	20,0
PEVA 1,8 C 21	41,5	11,0
PEVA 1,8 C 22	48,0	15,00
PEVA 1,8 C 23	45,0	13,0
PEVA 1,8 C 24	56,75	21,0
PEVA 1,8 C 25	55,75	20,0
Média final	44,27	13,00
Desvio padrão	6,33	3,87