



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

OTÁVIO JOAQUIM DA SILVA JÚNIOR

**INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS NA ISOLAÇÃO
SONORA DO BLOCO DE GESSO**

Recife
2023

OTÁVIO JOAQUIM DA SILVA JÚNIOR

**INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS NA ISOLAÇÃO
SONORA DO BLOCO DE GESSO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia civil. Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. José Jeferson do Rego Silva

Recife

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4/1502

S586i Silva Júnior, Otávio Joaquim da.
Influência das propriedades físicas e mecânicas na isolação sonora do bloco de gesso. / Otávio Joaquim da Silva Júnior. – 2023.
159 f.: il., fig., tab.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira.
Coorientador: Prof. Dr. José Jéferson do Rêgo Silva.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2023.
Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia civil. 2. Pasta de gesso. 3. Bloco de gesso.
4. Compósitos. 5. Isolação sonora. I. Oliveira, Tiago Ancelmo de
Carvalho Pires de (orientador). II. Silva, José Jéferson do Rêgo
(coorientador). III. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2023-131

OTÁVIO JOAQUIM DA SILVA JÚNIOR

**INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS NA
ISOLAÇÃO SONORA DO BLOCO DE GESSO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de Concentração Estruturas.

Aprovada em 16/02/2023

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira – UFPE

Coorientador: Prof. Dr. José Jéferson do Rêgo Silva - UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Marco Antônio Silva Pinheiro (examinador externo)
Universidade Federal de Santa Maria

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Stelamaris Rolla Bertoli (examinadora externa)
Universidade Estadual de Campinas

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Yêda Vieira Póvoas (examinadora externa)
Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Ângelo Just da Costa e Silva (examinador externo)
Universidade de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus pais, pois, sou o que sou graças a eles.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, meu grande guia nesta jornada, por todo seu amor, ajudando-me a caminhar mesmo nos momentos de maior dificuldade.

Aos meus pais, Otávio e Maria, meu irmão Otaciano, e a minha esposa, Tatiene, por sempre acreditarem em meu potencial e me apoiarem incondicionalmente.

Ao Prof. Dr. José Jeferson do Rego Silva, pela confiança, dedicação, apoio e incentivo na orientação deste trabalho, a quem considero mais que um orientador; um amigo.

Ao Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira, pela confiança e apoio na orientação deste trabalho.

Aos amigos e companheiros que sempre me incentivaram.

A TECOMAT pelo apoio, incentivo e investimento na realização deste trabalho, sempre acreditando no meu potencial.

A UFPE, UFSM e ITEP pela confiança e credibilidade dada à minha pesquisa.

RESUMO

Promover o aumento na capacidade de isolamento sonora dos elementos de vedação é um dos desafios que a comunidade científica tem enfrentado nos últimos anos, buscando para isso potencializar as propriedades físicas e mecânicas que possam influenciar na perda de transmissão sonora. Entre os materiais utilizados na construção civil brasileira destaca-se o bloco de gesso, pois possui dimensões que aumentam sua produtividade e menor densidade que os blocos cerâmico e de concreto. Contudo, sua capacidade de isolamento sonora não é diferente dos sistemas construtivos convencionais. Diante da necessidade de potencializar a isolamento sonora das vedações em bloco de gesso, analisou-se o índice de redução sonora de paredes executadas com blocos de gesso, espessura de 50mm e relação água/gesso de 1,0, e paredes executadas com blocos de gesso compósitos com adições de perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina, sendo caracterizado as propriedades físicas e mecânicas da pasta de gesso e respectivos compósitos. Ainda visando o aumento da capacidade de isolamento sonora do bloco de gesso, foi analisado a influência de separação elástica em parede dupla e parede simples com bloco de gesso contendo placa de lã de rocha incorporada. Os compósitos analisados modificaram levemente a densidade da pasta de gesso, aumentada em média 2% com as adições de perlita natural e alumina, e reduzida em 8% e 3% com as adições de perlita expandida e vermiculita, respectivamente. Contudo, proporcionaram significativas mudanças mecânicas e microestruturais, principalmente na dureza, resistência à compressão e flexão. Mas quanto à isolamento sonora, os compósitos foram extremamente eficientes, proporcionando aumentos de 3dB e 4dB, respectivamente, no Índice de Redução Sonora Ponderado (R_w) dos blocos de gesso compósitos de perlita natural e perlita expandida e 6dB nos blocos de gesso compósitos de vermiculita e alumina. Já a incorporação de placas de lã de rocha ao bloco de gesso proporcionou aumento de 4dB no R_w , com ganhos especialmente nas regiões abaixo da frequência crítica. A utilização de membrana elástica entre duas paredes em bloco de gesso também mostrou-se eficiente na isolamento sonora, aumentando o R_w do sistema em 10dB, em comparação com a parede simples. Os resultados apresentados, mostram à construção civil o potencial dos blocos de gesso compósitos em aumentar a capacidade de isolamento sonora.

Palavras-chave: pasta de gesso; bloco de gesso; compósitos; isolamento sonora.

ABSTRACT

Promoting an increase in the sound insulation capacity of sealing elements is one of the challenges that the scientific community has faced in recent years, seeking to enhance the physical and mechanical properties that may influence the sound transmission loss. Among the materials used in Brazilian civil construction, gypsum block stands out, as it has dimensions that increase its productivity and lower density than ceramic and concrete blocks. However, its sound insulation capacity is not different from conventional building systems. Faced with the need to enhance the sound insulation of gypsum block partition, the sound reduction index of walls built with gypsum blocks, 50 mm thick and water/plaster ratio of 1.0, and walls built with gypsum blocks were analyzed gypsum composites with additions of natural perlite, expanded perlite, vermiculite and alumina, characterizing the physical and mechanical properties of the gypsum plaster and respective composites. Still aiming to increase the sound insulation capacity of the gypsum block, the influence of elastic separation in double walls and single walls with gypsum block containing incorporated rock wool board was analyzed. The analyzed composites slightly modified the density of the gypsum plaster, increasing on average 2% with the additions of natural perlite and alumina, and reduced by 8% and 3% with the additions of expanded perlite and vermiculite, respectively. However, they provided significant mechanical and microstructural changes, mainly in hardness, resistance to compression and flexion. However, as for sound insulation, the composites were extremely efficient, providing increases of 3dB and 4dB, respectively, in the weighted sound reduction index (R_w) of the gypsum blocks composed of natural perlite and expanded perlite and 6dB in the gypsum blocks composed of vermiculite and alumina. The incorporation of rock wool plates to the gypsum block provided an increase of 4dB in R_w , with gains especially in regions below the critical frequency. The use of an elastic membrane between two gypsum block walls also proved to be efficient in terms of sound insulation, increasing the system's R_w by 10dB compared to the simple wall. The results presented show to civil construction the potential of composite gypsum blocks to increase the sound insulation capacity.

Keywords: gypsum paste; gypsum block; composites; sound insulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 –	Perda de peso dos elementos de gesso ao longo do tempo	26
Figura 02 –	Condutividade térmica em relação a densidade das amostras	27
Figura 03 –	Microestrutura da matriz de gesso (alongadas em forma de agulha)	28
Figura 04 –	Relação entre a densidade e a condutividade térmica de concretos com perlita	31
Figura 05 –	Relação entre o módulo de Young e a adição de perlita à matriz de polipropileno	32
Figura 06 –	Resistência à compressão de compósitos de concreto/perlita ao longo do tempo	33
Figura 07 –	Resistência à flexão de compósitos de gesso com adição de perlita	33
Figura 08 –	Relação entre taxa de divisão e a viscosidade da pasta de cimento e adições de 5%, 10% e 20% de vermiculita	35
Figura 09 –	Relação entre a densidade e os percentuais de adição de vermiculita	37
Figura 10 –	Relação entre a expansão térmica e a temperatura de aquecimento da alumina	38
Figura 11 –	Critérios do Índice de Redução Sonora Aparente Ponderado ($R'w$) em 24 países da Europa	39
Figura 12 –	Perda de transmissão sonora de partições uniformes	41
Figura 13 –	Paredes duplas e o efeito de isolamento por massa/mola/massa	42
Figura 14 –	Perda de transmissão sonora de sistemas drywall com material flexível	43
Figura 15 –	Perda de transmissão sonora de vedações em gesso acartonado, simples e duplo, utilizando câmara não padronizada	44
Figura 16 –	Aumento da isolamento sonora promovido pela adição de nanotubo de carbono mesoporoso (CNT) em tintas PVC	45
Figura 17 –	Isolação sonora promovida por tijolos de barro	45
Figura 18 –	Relação entre o Módulo de Young e a redução total de ruído	47

Figura 19 –	Micrografias eletrônicas de varredura de cristais de gesso obtidos em duas situações: (a) sem aditivo na água, levando a uma estrutura tipo agulha, (b) adição de ácido cítrico (1,5% em peso) em água, levando a cristais hexagonais	47
Figura 20 –	Amortecimento de sistema de piso fixado diretamente com parafusos e elastômero	49
Figura 21 –	Amostras dos materiais utilizados na pesquisa (estado anidro)	52
Figura 22 –	Bloco de gesso	54
Figura 23 –	Esquema de moldagem do bloco de gesso com placa de lã de rocha	55
Figura 24 –	Fabricação do bloco gesso acústico (placa de lã de rocha)	56
Figura 25 –	Pesagem da amostra de gesso em pó para determinação da massa unitária	57
Figura 26 –	Determinação da consistência normal com o aparelho de Vicat modificado	58
Figura 27 –	Determinação do tempo de início de pega com aparelho de Vicat	59
Figura 28 –	Caracterização do tempo de fim de pega com aparelho de Vicat	59
Figura 29 –	Ensaio de determinação da dureza	61
Figura 30 –	Ensaio de determinação da resistência à compressão	61
Figura 31 –	Ensaio de determinação da resistência à tração na flexão	62
Figura 32 –	Medição da velocidade de propagação da onda ultra-sônica e equipamento de Ultrassom Procec	63
Figura 33 –	Microscópio eletrônica de varredura do Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN)	65
Figura 34 –	Dispositivo de teste de resistência à flexão	66
Figura 35 –	Medição do índice de redução sonora (R) – Sala de emissão (esq.) e recepção (dir.)	67
Figura 36 –	Amostras submetidas aos ensaios de determinação do tempo de reverberação estrutural (Ts) e índice de redução sonora (R)	69
Figura 37 –	Marreta de aço (0,5kg)	71
Figura 38 –	Acelerômetro piezoelétrico modelo 4507 (Brüel & Kjaer)	71

Figura 39 – Medidor de Nível de Pressão Sonora (MNPS) modelo 2270 (Bruel & Kjaer)	71
Figura 40 – Mapa dos pontos de medição	72
Figura 41 – Densidade média da pasta de gesso e compósitos	79
Figura 42 – Dureza média da pasta de gesso e compósitos	81
Figura 43 – Relação entre dureza média e densidade média	82
Figura 44 – Resultados da resistência à compressão média da pasta de gesso e compósitos	84
Figura 45 – Relação entre resistência à compressão média e densidade média	85
Figura 46 – Relação entre resistência à compressão média e dureza média	86
Figura 47 – Resultados da resistência à tração na flexão média da pasta de gesso e compósitos	88
Figura 48 – Relação entre resistência à tração na flexão média e densidade média	89
Figura 49 – Correlação entre resistência à compressão e resistência à tração	90
Figura 50 – Módulo de elasticidade dinâmico médio da pasta de gesso e compósitos	92
Figura 51 – Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico médio e a densidade média	93
Figura 52 – Imagens de MEV das amostras de gesso padrão	94
Figura 53 – Imagens de MEV das amostras do compósito de perlita natural	95
Figura 54 – Imagens de MEV das amostras de pasta de gesso padrão e compósito de perlita natural na relação água/gesso de 1,1	96
Figura 55 – Imagens de MEV das amostras do compósito de perlita expandida	96
Figura 56 – Imagens de MEV das amostras de pasta de gesso padrão e compósito de perlita expandida na relação água/gesso de 1,1	98
Figura 57 – Imagens de MEV das amostras do compósito de vermiculita	98
Figura 58 – Imagens de MEV das amostras de pasta de gesso padrão e compósito de vermiculita na relação água/gesso de 1,1	99
Figura 59 – Imagens de MEV das amostras do compósito de alumina	100

Figura 60 –	Imagens de MEV das amostras de pasta de gesso padrão e compósito de alumina na relação água/gesso de 1,1	101
Figura 61 –	Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso maciço comerciais	108
Figura 62 –	Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso vazado comerciais	108
Figura 63 –	Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso padrão	110
Figura 64 –	Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso padrão	111
Figura 65 –	Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso compósito de perlita natural	112
Figura 66 –	Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso compósitos de perlita natural	113
Figura 67 –	Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso compósito de perlita expandida	114
Figura 68 –	Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso compósitos de perlita expandida	115
Figura 69 –	Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso compósito de vermiculita	116
Figura 70 –	Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso compósitos de vermiculita	117
Figura 71 –	Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso compósito de alumina	118
Figura 72 –	Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso compósitos de alumina	119
Figura 73 –	Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso padrão e compósitos	120
Figura 74 –	Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso padrão e membrana elástica	122
Figura 75 –	Índice de redução sonora (R) da parede dupla com bloco de gesso maciço de 50mm e membrana elástica	123

Figura 76 – Índice de redução sonora (R) – Influência de membrana elástica entre paredes	124
Figura 77 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso acústico	126
Figura 78 – Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso acústico	127
Figura 79 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso acústico revestida com pasta de gesso	128
Figura 80 – Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso acústico revestidos	130
Figura 81 – Índice de redução sonora (R) – Análise do bloco acústico	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Resistência à compressão de argamassas submetidas a temperaturas elevadas	36
Tabela 02 – Resultados de determinação da massa unitária dos materiais analisados	75
Tabela 03 – Resultados de determinação do tempo de início de pega dos materiais analisados	76
Tabela 04 – Resultados de determinação do tempo de fim de pega dos materiais analisados	77
Tabela 05 – Densidade média	78
Tabela 06 – Dureza média	80
Tabela 07 – Resistência à compressão média	83
Tabela 08 – Resistência à tração na flexão média	87
Tabela 09 – Módulo de elasticidade dinâmico médio	91
Tabela 10 – Dimensões dos blocos de gesso	102
Tabela 11 – Densidade média dos blocos de gesso	102
Tabela 12 – Dureza média dos blocos de gesso	103
Tabela 13 – Carga de flexão média dos blocos de gesso	104
Tabela 14 – Tempo de reverberação estrutural	106
Tabela 15 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso padrão	110
Tabela 16 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso compósito de perlita natural	112
Tabela 17 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso compósito de perlita expandida	114
Tabela 18 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso compósito de vermiculita	116
Tabela 19 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso compósito de alumina	118
Tabela 20 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso padrão e aplicação de emulsão elástica	123
Tabela 21 – Índice de redução sonora médio da parede dupla executada com blocos de gesso e aplicação de emulsão elástica	124

Tabela 22 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso acústico	127
Tabela 23 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso acústico revestido	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
$D_{nT,W}$	Diferença Padronizada de Nível Ponderada
FAD	Ficha de Avaliação de Desempenho
ITA	Instituição Técnica Avaliadora
PBQP-H	Programa Brasileira da Qualidade e Produtividade do Habitat
R	Índice de Redução Sonora
R_w	Índice Ponderado de Redução Sonora
R'_w	Índice de Redução Sonora Aparente Ponderado
PT	Perda de Transmissão
TR	Tempo de Reverberação
T_s	Tempo de Reverberação Estrutural
τ	Coefficiente de Transmissão Sonora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa	21
1.2	Objetivos	23
1.2.1	Objetivo geral	23
1.2.2	Objetivos específicos	23
2	ESTADO DA ARTE	24
2.1	Pasta de gesso	24
2.2	Compósitos de gesso	30
2.2.1	Perlita natural e perlita expandida	30
2.2.2	Vermiculita	34
2.2.3	Alumina	37
2.3	Isolação sonora em vedações verticais	39
2.3.1	Perda de transmissão sonora	41
2.3.2	Acréscimo de isolação sonora	44
2.4	Fator de perda por amortecimento em vedações verticais	48
3	METODOLOGIA	51
3.1	Preparação das amostras de caracterização	52
3.1.1	Preparação dos blocos de gesso	54
3.1.1.1	<i>Bloco de gesso acústico</i>	55
3.2	Caracterização das propriedades físicas e mecânicas	57
3.2.1	Propriedades físicas do pó de gesso e adições	57
3.2.2	Propriedades físicas da pasta de gesso e compósitos	58
3.3	Análise mecânica	60
3.3.1	Dureza e resistência à compressão	60
3.3.2	Resistência à tração na flexão	62
3.3.3	Módulo de elasticidade dinâmico	63
3.4	Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	64
3.5	Caracterização dos blocos de gesso	65
3.6	Análise acústica	67
3.6.1	Tempo de reverberação estrutural	70
3.6.2	Perda de transmissão sonora	73
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	75

4.1	Análise física e mecânica	75
4.1.1	Massa unitária	75
4.1.2	Consistência normal e tempo de pega.....	76
4.1.3	Densidade	78
4.1.4	Dureza.....	80
4.1.5	Resistência à compressão.....	82
4.1.6	Resistência à tração na flexão (160x40x40)	86
4.1.7	Módulo de elasticidade dinâmico	91
4.1.8	Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	93
4.1.9	Caracterização dos blocos de gesso	101
4.1.9.1	<i>Determinação da espessura, comprimento e altura</i>	101
4.1.9.2	<i>Determinação da densidade</i>	102
4.1.9.3	<i>Determinação da dureza</i>	103
4.1.9.4	<i>Determinação da carga de flexão</i>	104
4.2	Análise acústica	105
4.2.1	Tempo de reverberação estrutural.....	106
4.2.2	Perda de transmissão sonora	107
4.2.2.1	<i>Blocos de gesso comerciais</i>	108
4.2.2.2	<i>Vedação com blocos de gesso padrão</i>	109
4.2.2.3	<i>Vedação com blocos de gesso compósito de perlita natural</i>	111
4.2.2.4	<i>Vedação com blocos de gesso compósito de perlita expandida</i>	113
4.2.2.5	<i>Vedação com blocos de gesso compósito de vermiculita</i>	115
4.2.2.6	<i>Vedação com blocos de gesso compósito de alumina</i>	117
4.2.2.7	<i>Análise acústica dos blocos de gesso padrão e compósitos</i>	119
4.2.3	Influência de material resiliente entre vedações em bloco de gesso.....	121
4.2.4	Vedações com blocos de gesso acústico	126
5	CONCLUSÕES	132
	REFERÊNCIAS	138
	APÊNDICE A – ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA (R) DAS VEDAÇÕES ANALISADAS	147

1 INTRODUÇÃO

O conforto acústico envolve diversos parâmetros, objetivos e subjetivos, como o condicionamento, o isolamento, a redução de ruídos e vibrações, todos reunidos para um único intento: promover o bem-estar auditivo.

Visando estabelecer requisitos específicos de isolamento acústico entre unidades e entre uma unidade e áreas de uso coletivo, a ABNT publicou em 2013 a NBR 15575 – Norma de desempenho das edificações, dividida em 6 partes. Nesta norma são apresentados requisitos, critérios e métodos de isolamento acústico de vedações verticais externas (VVE), vedações verticais internas (VVI) entre unidades e entre uma unidade e áreas comuns, e vedações horizontais (sistema de piso) quanto aos ruídos aéreo e de impacto.

Os requisitos preconizados na norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021) para isolamento dos elementos de vedação vertical ao ruído aéreo, utilizam a Diferença Padronizada de Nível Ponderada ($D_{nT,w}$) como parâmetro, obtido pelo método de engenharia em ensaio de campo. Os procedimentos para realização dos ensaios são estabelecidos na norma ABNT NBR ISO 16283-1 (ABNT, 2018) e o valor único de isolamento é calculado conforme norma ABNT NBR ISO 717-1 (2021).

As edificações brasileiras utilizam os mais diversos sistemas construtivos, os quais possuem diferentes características e comportamentos frente às ondas sonoras. A padronização de procedimentos e caracterização dos principais sistemas brasileiros vêm sendo trabalhado ao longo dos últimos anos por entidades públicas e privadas, por exemplo, a elaboração de FADs (Fichas de Avaliação de Desempenho), desenvolvidas por Instituições Técnicas Avaliadoras (ITAs) e aprovadas pelo Programa Brasileira da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H).

Pesquisa realizada por Rasmussen e Rindel (2010) em 24 países da Europa no ano 2008, mostrou que os países não adotam os mesmos requisitos e critérios de isolamento acústico. O parâmetro adotado por cada país é função de sua tradição de avaliação ou tecnologia construtiva. Alguns países chegam a criar procedimentos específicos para compensar deficiências ou dificuldades nos procedimentos e condições de teste de campo. O R'_w (índice de redução sonora aparente ponderado) é o parâmetro de campo utilizado na maior parte dos países analisados, diferentemente do Brasil, que adotou o $D_{nT,w}$ (Diferença padronizada de nível ponderada), parâmetro também de campo.

Conhecer as propriedades acústicas dos materiais é então o desafio dos projetistas, que devem especificar sistemas construtivos que, após executados, atendam ao desempenho mínimo requerido.

O desempenho acústico de um sistema de vedação é função principalmente da perda de transmissão sonora (PT) ou transmission loss (TL), parâmetro que varia com o coeficiente de transmissão sonora (τ), parcela de energia sonora transmitida de um ambiente para outro, transpassando um obstáculo (BIES e HANSEN, 2009).

A perda de transmissão sonora refere-se exclusivamente à parcela de energia retida num ou mais elementos construtivos (ex.: parede, janela, porta, etc.), não havendo transmissões marginais. Avaliar este parâmetro é possível a partir de ensaios realizados em câmaras reverberantes de emissão e recepção, que estão totalmente isoladas uma da outra, e ambas isoladas do elemento avaliado.

Nas situações de campo, como previsto na norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021), a transmissão sonora pode ocorrer por duas formas: via direta, realizada exclusivamente através do elemento de vedação, e por caminhos marginais, quando a propagação da energia sonora ocorre pelos elementos envolventes dos compartimentos (MARTINS, 2008).

Na fase de elaboração dos projetos é de fundamental importância a utilização de uma metodologia que permita a estimativa do isolamento acústico ($D_{nT,W}$). Esta estimativa pode ser obtida com base na ISO 12354 (2017), utilizando as características do projeto e os parâmetros obtidos em testes acústicos de laboratório, como o Índice de Redução Sonora (R).

Softwares comerciais foram desenvolvidos com base na ISO 12354 (2017) para facilitar a obtenção do isolamento acústico estimado, como o SONarchitect, o Insul e o Bastian. No entanto, esses softwares possuem em seu banco de dados sistemas construtivos utilizados na Europa e Estados Unidos. Pesquisa realizada por Silva (2014) com o software SONarchitect mostrou que é essencial para os projetistas brasileiros a criação de seu próprio banco de dados, surgindo outra limitação – as propriedades dos materiais utilizados no Brasil.

Com base na ISO 12354 (2017), Takahashi (2016) desenvolveu o software *Hipnos Acústica* para predição do isolamento acústico de vedações verticais, internas e externas, e sistemas de piso. O Hipnos Acústica foi desenvolvido com um banco de dados nacional, servindo de ferramenta para projetistas acústicos.

Os dados de entrada dos softwares de predição do isolamento acústico são baseados nas propriedades dos materiais, como densidade, tipos de conexão, coeficiente de Poisson, fator de perda (amortecimento) e perda de transmissão, parâmetros que nem sempre são disponibilizados pelos fornecedores brasileiros.

Visando prever a perda da transmissão sonora, diversos estudos vêm sendo realizados com métodos aproximados, como o método dos elementos finitos (Díaz *et al.*, 2010) e o método de matriz de transferência 2D (Guo *et al.*, 2017), que analisam a perda de transmissão sonora em ressonadores perfurados, mostrando que a modelagem numérica e os testes experimentais utilizando tubo de impedância possuem bons resultados, deslocados apenas na região de ressonância.

A criação de um banco de dados com a caracterização dos principais sistemas construtivos utilizados no Brasil tem sido objeto de trabalho do Programa Brasileiro para a Qualidade do Habitat (PBQP-h) a partir de Fichas de Avaliação de Desempenho (FADs). Contudo, as FADs apresentam apenas o índice ponderado de redução sonora (R_w), mas não os resultados por faixa de frequência em bandas de 1/3 de oitava, que é um dado de entrada na predição do isolamento acústico.

O número de FADs publicadas ainda é relativamente pequeno, sendo trabalhos acadêmicos uma outra fonte para se obter o índice de redução sonora. Vedações verticais em bloco de gesso é um exemplo de sistema construtivo que não possui FAD, até o momento, e são poucos os trabalhos acadêmicos que caracterizam sua isolação sonora.

Silva, Rego e Pinheiro (2017) analisaram o índice de redução sonora de vedações verticais em bloco de gesso maciços com espessuras de 100mm, 70mm e 50mm, e vazados com espessuras de 100mm e 80mm, os quais, de forma geral, seguem a lei da massa, onde a isolação sonora aumenta com o aumento da densidade superficial, independente da tipologia dos blocos, maciço ou vazado.

Mas a caracterização das propriedades dos materiais, como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e fator de perda, são informações pouco divulgadas dos materiais, até mesmo em pesquisas científicas, bem como a relação entre essas propriedades e a isolação sonora.

Os sistemas de vedação vertical comumente utilizados na construção civil brasileira não possuem isolamento sonora compatível com o desempenho desejado, sendo necessário, em muitos projetos, a utilização de paredes duplas com materiais absorventes acústicos, como lãs minerais. Aumentar a densidades dos materiais é uma alternativa que acaba sendo utilizada, como a aplicação de blocos maciços ou preenchidos com materiais mais pesados.

A utilização de vedações com materiais compósitos, que amplifiquem a capacidade de isolamento sonora pela melhoria nas propriedades físicas e mecânicas, pode ser uma alternativa para a utilização de sistemas convencionais de alvenaria com melhor desempenho acústico.

Investigar as propriedades acústicas dos blocos de gesso, promovendo aumento no índice de redução sonora, seja pela utilização de materiais compósitos ou paredes duplas, é de grande relevância para a construção civil brasileira, permitindo que projetistas e construtores utilizem um sistema construtivo que proporcione o isolamento acústico mais eficiente.

1.1. Justificativa

A isolamento sonora das vedações é na atualidade um parâmetro essencial na elaboração de projetos, sendo de responsabilidade do projetista a especificação de sistemas construtivos que promovam o atendimento ao nível de desempenho desejado, em atendimento à norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021).

Contudo, a maioria dos fornecedores não possuem o índice de redução sonora ponderado (R_w) de seu material, e os que possuem nem sempre conseguem a isolamento sonora que satisfaça as necessidades dos projetistas, sendo necessário, em alguns casos, a utilização de sistemas compostos, como paredes duplas ou triplas.

As vedações verticais em bloco de gesso, bastante utilizadas na região Nordeste do Brasil, não possuem muitas informações dos parâmetros acústicos, como índice de redução sonora ponderado (R_w), coeficiente de absorção sonora (α) e amortecimento (η).

A construção civil é o principal consumidor do gesso no Brasil, especialmente na produção de elementos pré-fabricados, como bloco de gesso, placa de gesso e gesso acartonado (Peres, Benachour e Santos, 2008). O bloco de gesso é o pré-fabricado utilizado como vedação vertical e possui isolamento sonora compatível com os demais sistemas construtivos comumente utilizados.

Atender as características mecânicas normativas é fundamental na fabricação do bloco de gesso, mas produzir blocos que atendam características como isolamento acústico, isolamento térmico e resistência ao fogo, também é essencial, dadas as exigências da norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021).

Silva, Rego e Pinheiro (2014) e Ferreira e Bertoli (2010) analisaram, respectivamente, a perda de transmissão sonora de vedações em blocos de gesso maciço com espessura de 100mm e bloco cerâmico vazado com 140mm de espessura, e ambas vedações apresentaram o mesmo índice de redução sonora ponderado (R_w), 39dB. Tais resultados mostram que o bloco de gesso, que possui menor densidade superficial, tem maior potencial de aumento da isolação sonora.

Melhorar então as propriedades acústicas dos blocos de gesso é fundamental, garantindo que sua aplicação continue sendo possível nas vedações previstas na norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021).

Em adição, o resíduo de gesso, classificado na resolução CONAMA 307/2002 como resíduo de construção de Classe B (resíduos recicláveis para outras destinações), acaba gerando ao produtor e ao consumidor um custo passivo de descarte. Logo, reduzir o consumo de gesso pela adição de materiais com menor impacto ambiental, e que promovam o aumento das propriedades acústicas, é de total interesse das indústrias produtoras de pré-fabricados de gesso.

A utilização de adições na construção civil é uma prática comum, como a utilização da escória de alto forno, que possui alto teor de alumina, em substituição ao cimento de argamassas, que reduz a massa do cimento e melhora suas propriedades mecânicas (Herrero *et al.*, 2016). Adições que reduzam o consumo de gesso e melhorem suas propriedades, especialmente acústicas, podem viabilizar sua aplicação na construção civil brasileira, assim como as adições largamente utilizadas em concretos e argamassas.

A isolação sonora e o amortecimento acústico estão diretamente relacionadas com as características físicas e mecânicas dos materiais e, visando melhorar estas características nos blocos de gesso, esta pesquisa aborda a adição de dois materiais granulares leves: vermiculita e perlita expandida, e a adição de dois materiais finos e mais densos: perlita natural e alumina. Tais materiais podem reduzir ou aumentar a densidade da pasta de gesso, modificando suas características microestruturais, físicas e mecânicas.

1.2. Objetivos

Diante da necessidade da construção civil em promover o aumento na capacidade de isolamento sonora das vedações em bloco de gesso, este trabalho estabelece a seguinte hipótese: A capacidade de isolamento sonora de vedações verticais em bloco de gesso pode ser aumentada por alterações físicas, mecânicas e microestruturais da pasta de gesso, obtidas com adição de minerais leves e pesados.

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar a influência das propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de blocos de gesso compósitos, produzidos com adição de perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina, nas propriedades acústicas de tempo de reverberação estrutural (T_s) e Índice de Redução Sonora (R).

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar e correlacionar as propriedades físicas (massa unitária e trabalhabilidade) e mecânicas (dureza, resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade dinâmico) da pasta de gesso padrão com os compósitos de gesso;
- Apresentar as características e alterações microestruturais ocorridas com a adição de minerais leves e pesados;
- Determinar o tempo de reverberação estrutural das vedações executadas com blocos de gesso padrão e compósitos;
- Determinar a isolamento sonora das vedações verticais formadas por blocos de gesso padrão e compósitos;
- Avaliar a influência de junta elástica na isolamento sonora de paredes duplas em bloco de gesso, correlacionando o tempo de reverberação estrutural com alterações no índice de redução sonora;
- Caracterizar a perda de transmissão sonora de blocos de gesso com placas de lã de rocha incorporada (bloco acústico).

2 ESTADO DA ARTE

O incremento de isolamento sonora aos sistemas construtivos convencionais é um desafio para a construção civil brasileira, uma vez que aumentar a massa das vedações vai de encontro à utilização de estruturas mais leves e à industrialização da construção civil, enquanto que a utilização de paredes duplas e triplas reduzem a área útil dos ambientes e aumentam o consumo de material.

Potencializar a isolamento sonora do bloco de gesso é uma alternativa factível, pois, apesar de ser um componente mais leve que os blocos cerâmicos e de concreto, possuindo densidade que varia entre 800kg/m^3 e 1100kg/m^3 , possui isolamento sonora similar.

Aumentar a isolamento sonora de um elemento de vedação é possível alterando suas propriedades internas, como módulo de elasticidade e amortecimento acústico.

2.1. Pasta de gesso

O gesso é um aglomerante hidráulico bastante utilizado na construção civil, servindo desde adição ao cimento até matéria prima na moldagem de elementos pré-fabricados, caso dos blocos de gesso. Além da construção civil, o gesso é utilizado na agricultura, na indústria química, na produção de papel e tintas e no tratamento de água.

O gesso é obtido pela calcinação da gipsita natural, processo realizado pela ação do calor, transformando o sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) em sulfato de cálcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), como mostrado na Equação (1).



O sulfato de cálcio hemihidratado, comercializado no estado anidro (pó), ao entrar em contato com água apresenta consistência pastosa, possibilitando a moldagem de elementos diretamente no local, caso dos revestimentos, ou a fabricação de elementos pré-fabricados, como as placas e blocos.

As propriedades da pasta de gesso estão diretamente ligados à relação água/gesso, ao tempo de secagem e as adições aplicadas.

As fibras são comumente utilizadas como adição à pasta de gesso, que possui naturalmente uma ruptura frágil, visando aumento na tenacidade e resistência

à flexão. Estudos realizados por Ngah *et al.* (2020) mostram que as alterações microestruturais, causadas pela adição de fibra de vidro, modificam as propriedades da pasta de gesso, de tal forma que a ruptura deixa de ser frágil e passa a ser dúctil, mesmo comportamento obtido por Lucolano, Boccarusso e Langella (2019) quando utilizado fibras de cânhamo.

Gencel *et al.* (2016) apresentou em seu trabalho a redução da densidade do gesso por adição de diatomita (rocha sedimentar), mantendo a resistência à compressão pela utilização de fibras de polipropileno. Os resultados obtidos mostram que a utilização de 20% de diatomita com 1% de fibra de polipropileno reduz em até 12% a densidade do gesso, aumenta em até 52% sua resistência à compressão e reduz em até 22% a condutividade térmica. Os efeitos da adição de fibra de polipropileno (PP) também foram estudados por Barakat e Salam (2019), mostrando que sua adição reduz o tempo de pega e a porosidade dos blocos de gesso.

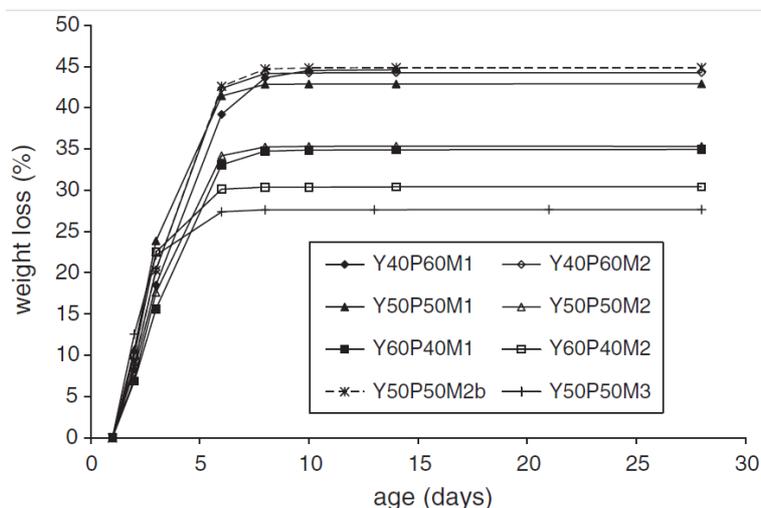
A redução na densidade da pasta de gesso por adição de bentonita foi estudada por Jiang *et al.* (2019), obtendo reduções de quase 20% na condutividade térmica quando utilizado até 40% de bentonita, resultados semelhantes aos obtidos por Gencel *et al.* (2016) com adição de 20% de diatomita.

Os resultados mostram que os elementos de gesso, com utilização das adições citadas, podem ser ainda mais leves, resistentes e de baixa condutividade térmica que os já utilizados comercialmente, sendo possível sua aplicação em blocos de gesso. No entanto, os trabalhos não analisaram parâmetros acústicos, como a isolamento sonora.

Tornar o gesso mais leve e resistente tem motivado muitas pesquisas, especialmente com compósitos reciclados. A utilização de fibras de polipropileno (lenços umedecidos) na formação de compósitos de gesso foi estudado por Gómez *et al.* (2021), mostrando que adições de até 3,5% de fibras de polipropileno apresentaram redução irrelevante na densidade, não ultrapassando 1%.

Como mostra a Figura 1, a perda de massa é significativamente menor quando o gesso e o resíduo de papel são misturados no estado anidro (sem água). A baixa perda de água da amostra Y50P50M3 (50% de gesso, 50% de resíduo de papel, onde a mistura de gesso e papel foi realizada no estado anidro) proporciona à amostra o melhor comportamento mecânico Agulló, Aguado e Garcia (2006).

Figura 1 – Perda de peso dos elementos de gesso ao longo do tempo



Fonte: Agulló, Aguado e Garcia (2006)

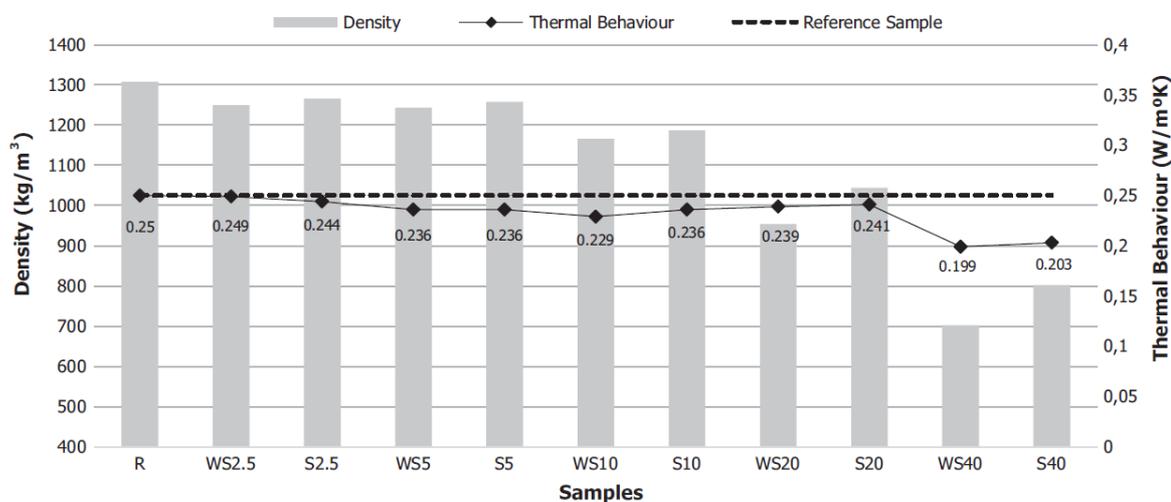
Com base nestes resultados pode-se afirmar que as propriedades de resistência são melhor aproveitadas quando as adições ao gesso são misturadas com o pó (estado anidro), e não na pasta de gesso. Tal informação foi de grande relevância nesta pesquisa, pois mostra que a metodologia de mistura dos compósitos pode influenciar nas propriedades mecânicas.

A reciclagem do gesso vem sendo largamente estudada, mas sua aplicação na construção civil ainda não é recomendada, dada a variabilidade na composição dos resíduos.

Estudos realizados por Erbs *et al.* (2015) mostram que o gesso reciclado de obras que utilizam o gesso acartonado, possuem baixa resistência e dureza, o que corrobora com Fernandes (2016), que reutilizando gesso aplicado em revestimentos e placas, mostra que a microestrutura do gesso comercial e do gesso reciclado são semelhantes, sendo o módulo de finura, ocasionado pela trituração do gesso reciclado, um dos responsáveis por proporcionar o aumento no consumo de água e, conseqüentemente, contribuindo na redução da dureza e resistência à compressão.

Assim como a reciclagem, a adição de materiais à mistura de gesso vem sendo explorada, buscando-se melhorar suas propriedades físicas e mecânicas. O compósito gesso/madeira, estudado por Morales, Rodríguez e Pedreño (2016), reduz significativamente a densidade e a condutividade térmica de elementos de gesso. A pesquisa mostra que a utilização de 40% de madeira (WS40 e S40) reduz em 54% a densidade do gesso e 20% a condutividade térmica, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Condutividade térmica em relação a densidade das amostras



Fonte: Morales, Rodríguez e Pedreño (2016)

Compósitos de gesso formados por EPS, XPS e Lã de rocha, aplicados entre o substrato e o revestimento de gesso, foi estudo por Uygunoglu, Özgüven e Çalis (2016), mostrando que a utilização do XPS também contribui para redução na condutividade térmica, cerca de 4,8 vezes menor que o revestimento sem o XPS.

Cunha (2012) também obteve uma boa redução na condutividade térmica, analisando compósitos de gesso com fibra de coco seco, aplicados à placas pré-moldadas. Além da melhoria na condutividade térmica, a pesquisa mostrou que a adição de fibra de coco seco contribuiu para o aumento da resistência à flexão, assim como a fibra de sisal estuda por Brandão (2015), sendo alternativas aplicáveis e sustentáveis.

A adição de lãs minerais foi alvo da pesquisa realizada por Piñeiro, Merino e García (2015), incorporando resíduos de lã de vidro e lã de rocha à pasta de gesso. O estudo mostrou que as lãs minerais melhoram em mais de 25% a resistência à flexão da pasta de gesso, sendo mais eficiente que a fibra de vidro.

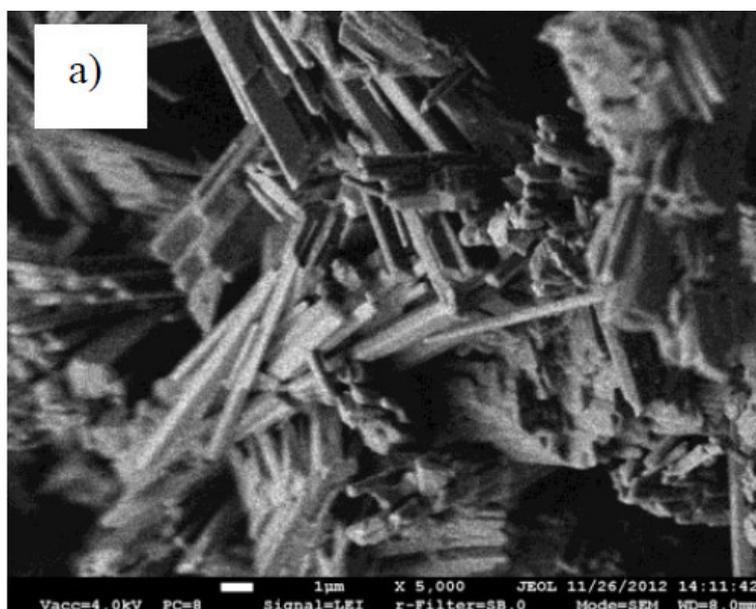
A capacidade de absorção de água, propriedade fundamental para os elementos pré-moldados de gesso, foi estudada por Barriguete *et al.* (2020), obtendo reduções significativamente maiores em compósitos de gesso com resíduos de cabo plástico, em comparação com amostras de gesso padrão.

Tais estudos indicam que painéis compósitos, formados por materiais não homogêneos, podem influenciar positivamente nas propriedades das vedações verticais. Contudo, as pesquisas citadas não avaliaram a eficiência no isolamento acústicos dos compósitos de gesso, informação relevante e foco deste trabalho.

Mudanças no comportamento microestrutural da pasta de gesso, causada por alterações na relação água/gesso ou por adições minerais, influenciam diretamente nas propriedades mecânicas.

A forma dos cristais da pasta de gesso se assemelha a estruturas finas e alongadas, em forma de agulha, como observado por Czaderna *et al.* (2018) e Pervyshin *et al.* (2017), e mostrado na Figura 3. Já Barbosa, Ferraz e Santos (2014) verificou que a taxa de crescimento e o tamanho dos cristais está diretamente ligada à relação água/gesso, quanto maior esta relação mais lento é o crescimento dos cristais, formando cristais grandes e alongados (agulhas), o que torna o gesso mais poroso e menos resistente.

Figura 3 – Microestrutura da matriz de gesso (alongadas em forma de agulha)



Fonte: Pervyshin *et al.* (2017)

A utilização do látex na mistura do gesso, por exemplo, foi estudada por Eve *et al.* (2007) e por Avalos *et al.* (2005), mostrando na análise por MEV a formação de um filme polimérico de látex que reveste os grãos de gesso, hidratados e não hidratados, contribuindo para uma maior compactação das misturas e formação homogênea dos cristais, melhorando conseqüentemente as propriedades de flexão e elasticidade do compósito. Estes resultados corroboram com o estudo realizado por Pedreño-Rojas *et al.* (2019), que incorporou resíduos de policarbonato à matriz de gesso e também obteve um compósito homogêneo e de baixa porosidade, sendo a dimensão da adição um influenciador da porosidade e resistência.

Compósitos que permitam maior interação com o gesso, como é o caso do silicone, podem proporcionar um crescimento lento dos cristais, como visualizado na Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) realizada por Munhoz (2008). Tais alterações microestruturais contribuem para a formação de grãos cristalinos e, conseqüentemente, redução na porosidade devido ao preenchimento uniforme dos vazios, melhorando a trabalhabilidade e aumentando a resistência à compressão.

Já Urzulin, Akasaki e Pinto (2016) analisaram a microestrutura de elementos de gesso compósitos com borracha de pneu, mostrando que adições de maior dimensão (borracha grossa) prejudicam a formação dos cristais de gesso, que perdem seu formato bem definido, prismático e alongado, acarretando numa menor resistência.

A análise microestrutural do gesso é fundamental no conhecimento e análise das propriedades mecânicas, e conseqüentemente das propriedades acústicas. Estudos realizados por Barbosa, Ferraz e Santos (2014) mostram, através da análise de espectroscopia de dispersão de energia por raio X (EDS), que o gesso comercial possui grande pureza, sendo composto essencialmente por cálcio, enxofre e oxigênio, composição química do sulfato de cálcio.

Na produção dos elementos pré-moldados de gesso é fundamental o controle da relação água/gesso, não podendo essa relação comprometer a resistência, trabalhabilidade e tempo de endurecimento.

Assim como a relação água/gesso, o tempo de secagem influencia diretamente nas propriedades mecânicas dos elementos de gesso. Estudo realizado por Padevĕt, Tesárek e Plachý (2011), mostra que o módulo de elasticidade dinâmico da pasta de gesso tende a crescer ao longo do tempo de secagem, até que a massa do gesso torne-se constante.

O bloco de gesso possui a limitação de ser utilizado apenas como elemento de vedação, não estrutural, e uma das causas dessa limitação é a baixa resistência mecânica. Buscando aumentar a resistência mecânica dos elementos pré-moldados de gesso, Kanno (2009) propõe a redução no consumo de água no gesso beta, através da moldagem por meio de compressão. Como conseqüência à baixa quantidade de água, os cristais são aderidos entre si por ligações de hidrogênio, sem nenhuma molécula de água entre elas, ou seja, um monocristal.

As alterações microestruturais mostram-se eficientes não só modificando as propriedades mecânicas, mas também as características acústicas de compósitos

de gesso. Estudos realizados por Elkhessaimi, Doyen e Smith (2017) indicam que mudanças na morfologia dos cristais pode deslocar a frequência crítica para altas frequências, reduzindo o incômodo nas frequências mais perceptíveis ao ouvido humano.

O comportamento microestrutural e mecânico do gesso, comercial e reciclado, vem sendo bastante estudado, bem como a utilização de adições à pasta de gesso. Contudo, poucos estudos correlacionam a interferência microestrutural de adições com as propriedades acústicas, sendo este um dos objetivos deste trabalho.

Isto posto, analisar e estabelecer correlações entre as propriedades do gesso e suas características acústicas é de suma importância para a construção civil nacional.

2.2. Compósitos de gesso

A aplicação de materiais compósitos é largamente utilizada na construção civil, seja como adição ou substituição em concretos e argamassas, melhoramento de solos ou reforço em pastas de gesso. Os compósitos amplificam propriedades específicas de materiais convencionais, sendo responsável por diversas linhas de pesquisa.

As adições possuem as mais diversas funções: reduzir o impacto ambiental, melhorar propriedades mecânicas, aumentar a durabilidade, aumentar a capacidade de isolamento sonora, térmica e de resistência ao fogo são alguns exemplos.

A utilização de adições em elementos pré-moldados de gesso, como blocos e placas, é uma linha de pesquisa em desenvolvimento, sendo limitada a quantidade de trabalhos acadêmicos publicados, especialmente a aplicação de rochas e minerais.

Neste trabalho foi abordada a utilização de 4 minerais como adição na matriz do gesso, utilizados na produção de blocos pré-moldados: perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina.

2.2.1. Perlita natural e perlita expandida

A perlita é um mineral formado basicamente por óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de potássio (K_2O). Quando submetida a temperaturas entre 800° e 1200° a perlita expande-se, aumentando de volume em até 20 vezes,

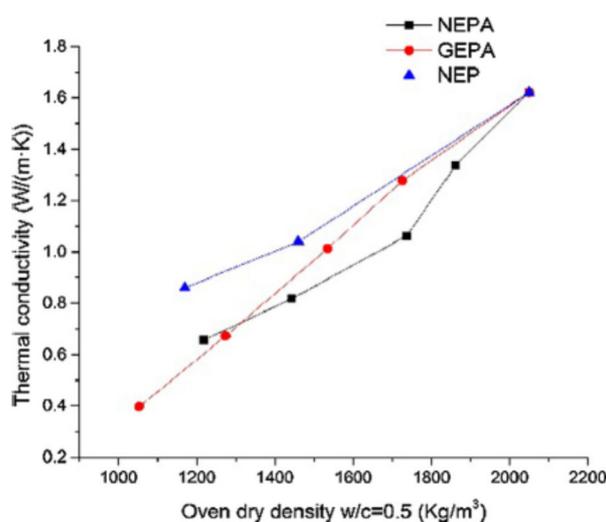
tornando-se um material extremamente leve ($32\text{kg/m}^3 - 240\text{kg/m}^3$) denominado perlita expandida (Ghassabzadeha *et al.*, 2010).

Estudos com a perlita natural estão sendo desenvolvidos para verificar sua aplicação como pozolana natural, sendo uma possível adição ou substituição parcial ao cimento. Estudos realizados por Karein *et al.* (2018), mostram que a resistência do concreto pode ser aumentado em até 25%, com adições de 10% e 15% de perlita natural. A pesquisa mostra também que o aumento na superfície específica da perlita natural contribui para potencializar o aumento da resistência à compressão e o índice de durabilidade.

Já a perlita expandida, aplicada como agregado em concretos e argamassas, reduz a densidade e a resistência, mas se mostra eficiente no isolamento térmico e acústico, bem como no aumento da resistência ao fogo (Rashad, 2016).

Wang *et al.* (2018) observou que o concreto com adição de perlita não interfere na lei de Abrams, pois concretos com relação a/c de 0,5 possuem maior resistência que concretos de relação a/c de 0,7, mas influencia significativamente na condutividade térmica. Como mostrado na Figura 4, a condutividade térmica do concreto com adição de perlita expandida é diretamente proporcional à densidade, tendo a adição de aerogel contribuído para a redução na condutividade térmica.

Figura 4 – Relação entre a densidade e a condutividade térmica de concretos com perlita



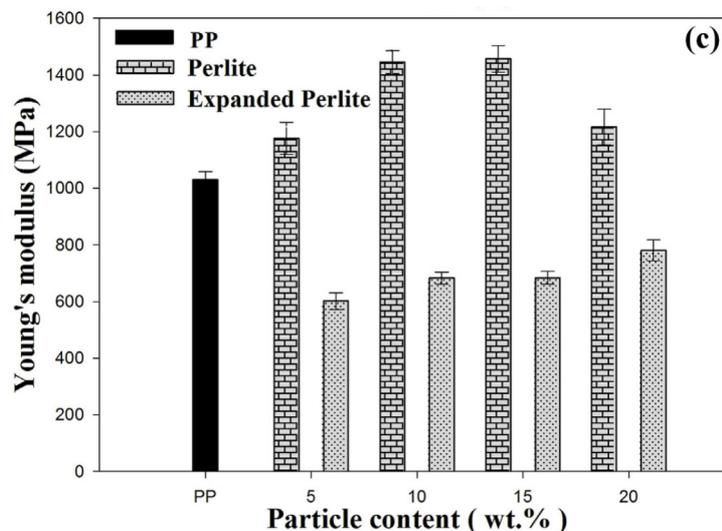
Fonte: Wang *et al.* (2018)

Neste trabalho será possível estabelecer correlações semelhantes à de Wang, relacionando, no entanto, a densidade com a isolamento sonora.

A trabalhabilidade dos concretos e argamassas também é afetada com a adição de perlita, como observado por Guenanou, Khelafi e Aattache (2019). A utilização da perlita aumenta o teor de água na dosagem, sendo recomendada a utilização de aditivos superplastificantes para obtenção de uma mesma consistência sem adição de perlita. Essa informação é de grande relevância no estudo da pasta de gesso, pois a redução na consistência pode comprometer a moldagem das amostras.

Apesar de reduzir a resistência à compressão e a trabalhabilidade, a perlita pode aumentar significativamente o módulo de elasticidade, parâmetro capaz de influenciar na isolamento sonora. Pesquisas realizadas por Raji *et al.* (2019) mostram que o compósito polipropileno/perlita, com substituição entre 10% e 15% do polipropileno por perlita, aumenta em até 41% o módulo de elasticidade (Módulo de Young), como mostrado na Figura 5.

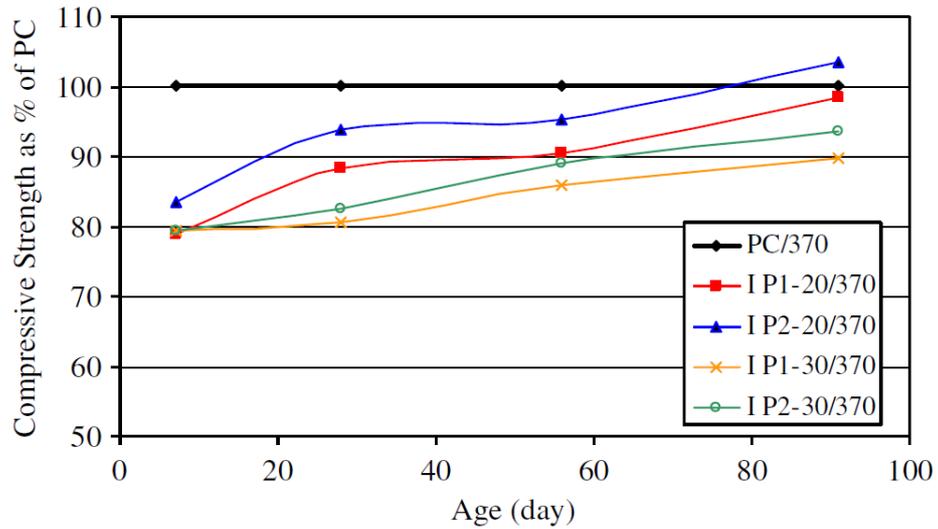
Figura 5 – Relação entre o módulo de Young e a adição de perlita à matriz de polipropileno



Fonte: Raji *et al.* (2009)

A perlita é um forte aliado do cimento no aumento da durabilidade e da resistência mecânica ao longo do tempo. Estudos realizados por Fodil e Mohamed (2018) e Erdem *et al.* (2007), mostraram que a adição de até 10% de perlita reduziu significativamente a taxa de corrosão em um ambiente contendo 5% de NaCl durante um ano, e aumentou a resistência do concreto com idades acima de 91 dias, como mostrado na Figura 6.

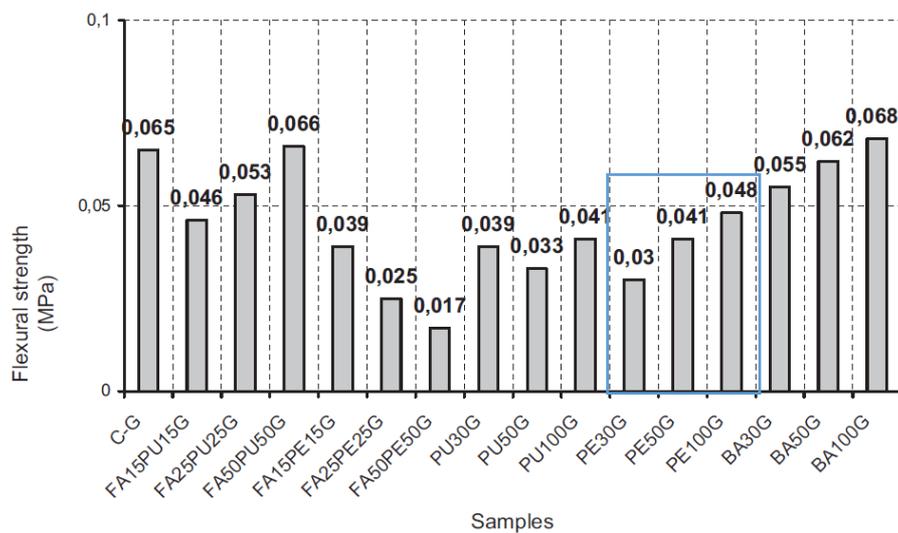
Figura 6 – Resistência à compressão de compósitos de concreto/perlita ao longo do tempo



Fonte: Erdem *et al.* (2007)

Como adição ao gesso, Binici e Aksogan (2017) mostraram que o aumento no percentual de perlita adicionado à mistura, acarreta uma redução da resistência à compressão. Mas, quanto à resistência à flexão, o aumento no percentual de perlita, adições de 30%, 50% e 100%, proporciona ganhos na resistência, como indicado na Figura 7.

Figura 7 – Resistência à flexão de compósitos de gesso com adição de perlita



Fonte: Binici e Aksogan (2017)

A utilização da perlita também vem sendo estudada em edificações em situação de incêndio, aumentando o tempo de resistência ao fogo. Pesquisas realizadas por Krzyzaka *et al.* (2018) mostram que a perlita adicionada à matriz de resina epóxi, analisada em altas temperaturas como camada de revestimento, resiste a altas temperaturas com menor perda de massa, sendo factível a utilização como material de revestimento em vedações submetidas à altas temperaturas.

A capacidade de isolamento térmico do gesso é maior que outros materiais utilizados na construção civil, como o bloco cerâmico e de concreto, e pode ser ampliada com a adição de perlita e outros materiais leve. Como mostrado por Dolezelová *et al.* (2021), compósitos de gesso, produzidos com adição de perlita expandida, podem aumentar a condutividade térmica (λ) em mais de 80%. Testes de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), realizadas por Mekaddem *et al.* (2019), indicam que a perlita expandida é responsável por atribuir ao compósito capacidades adequadas de armazenamento de energia.

A absorção sonora de compósitos de perlita foi estudado por Zhao *et al.* (2014), mostrando que a adição de perlita expandida possui melhor absorção sonora que adições de escória e argila. Mas as propriedades de isolação sonora e amortecimento acústico de compósitos gesso/perlita são pouco exploradas, não havendo estudos conclusivos sobre sua influência na isolação sonora.

Ainda são escassas as informações sobre a influência da perlita nas propriedades (físicas, mecânicas e acústicas) da pasta de gesso, justificando o estudo deste compósito.

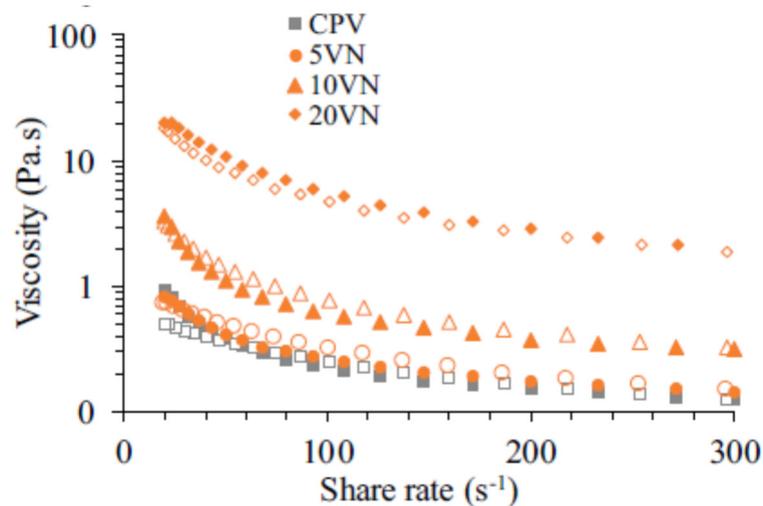
2.2.2. Vermiculita

A vermiculita é um silicato hidratado de formato lamelar, contendo quantidades variáveis de ferro, magnésio, potássio e alumina, utilizado largamente na construção civil para redução de peso, caso das argamassas leves.

A presença de alumínio, silício e magnésio permite a utilização da vermiculita como substituição em parte da massa do cimento, semelhante a outras adições como sílica ativa e pozolana. Contudo, sua significativa área superficial demanda das argamassas maior quantidade de água. Estudos reológicos realizados por Rojas-Ramirez *et al.* (2019) mostram que a utilização de até 5% de vermiculita, em substituição ao cimento, não alteram significativamente as propriedades reológicas

de pastas de cimento, como mostrado na Figura 8. Informação de grande relevância por impactar diretamente no tempo de pega da pasta de gesso, afetando o tempo de moldagem e endurecimento dos pré-moldados.

Figura 8 – Relação entre taxa de divisão e a viscosidade da pasta de cimento e adições de 5%, 10% e 20% de vermiculita



Fonte: Rojas-Ramirez *et al.* (2019)

A vermiculita tem se mostrado um forte aliado das argamassas cimentícias no isolamento térmico. Koksall, Gencil e Kaya (2015) utilizou relações vermiculita/cimento de 4, 6 e 8 (em volume) para mostrar que o aumento no teor de vermiculita eleva a porosidade e reduz o peso unitário, reduzindo a condutividade térmica. No entanto, a resistência à compressão e flexão também são reduzidas.

Argamassas que utilizam a vermiculita como adição ou substituição parcial do agregado apresentam maior capacidade de absorção de água, como mostrado por Li *et al.* (2017) e Mo *et al.* (2018). Essa mudança impacta diretamente na resistência em altas temperaturas (600°C e 800°C), pois como mostrado na Tabela 1, a utilização de 30% (V30) e 60% (V60) de vermiculita apresentam uma menor redução percentual da resistência à compressão, em comparação com argamassas convencionais.

Tabela 1 – Resistência à compressão de argamassas submetidas a temperaturas elevadas

Mistura	Resistência à compressão (MPa)		
	Temperatura da sala	600 °C	800 °C
C0	33,03	18,62 (– 44%)	8,42 (– 75%)
C1	13,77	8,74 (– 37%)	3,93 (– 71%)
V30	16,62	11,61 (– 30%)	4,97 (– 70%)
V60	12,11	8,36 (– 31%)	3,99 (– 67%)

Fonte: Mo (2018)

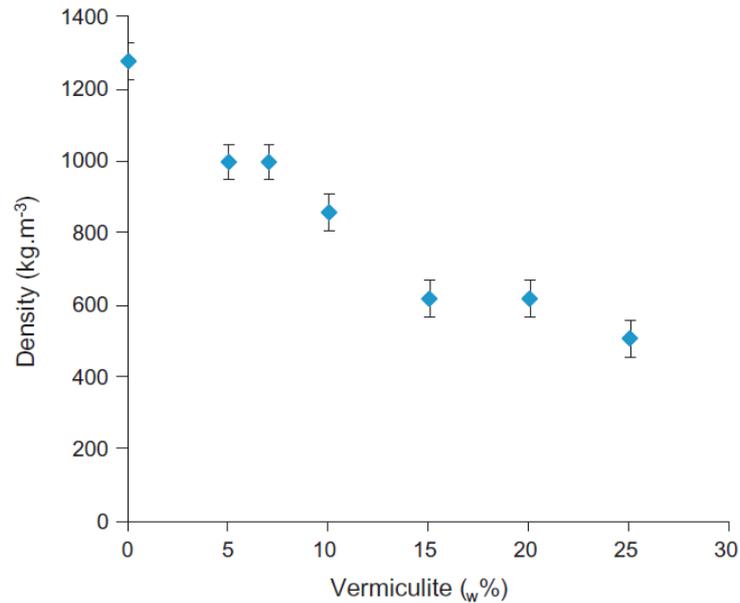
Quando utilizado vermiculita como adição à pasta de gesso, observa-se uma boa aderência entre os materiais, com o preenchimento parcialmente das lamelas existentes na interface, o que pode contribuir para melhores resultados de resistência à flexão, como observado por Oliveira *et al.* (2012).

Já a adição conjunta de vermiculita e perlita à matriz de gesso, apresenta significativa redução no módulo de elasticidade, como mostrado por Abidi, Joliff e Favotto (2016), causado por aumentos na taxa de porosidade. Logo, quanto maior a adição percentual de perlita e/ou vermiculita, menor o módulo de elasticidade.

Outro impacto causado pelo aumento na porosidade da pasta de gesso, por adição da vermiculita, é a redução na condutividade térmica, sendo possível uma redução acima de 15% quando utilizado 20% de vermiculita, como mostrado por Gencel *et al.* (2014).

Assim como na adição em argamassas e concretos, a adição de vermiculita reduz significativamente a densidade da pasta de gesso, podendo chegar facilmente a uma redução de até 60% quando utilizado 25% de vermiculita (Figura 9), sendo a adição de vermiculita proporcional à porosidade e ao módulo de Young (Martias, Joliff e Favotto, 2014).

Figura 9 – Relação entre a densidade e os percentuais de adição de vermiculita



Fonte: Martias, Joliff e Favotto (2014)

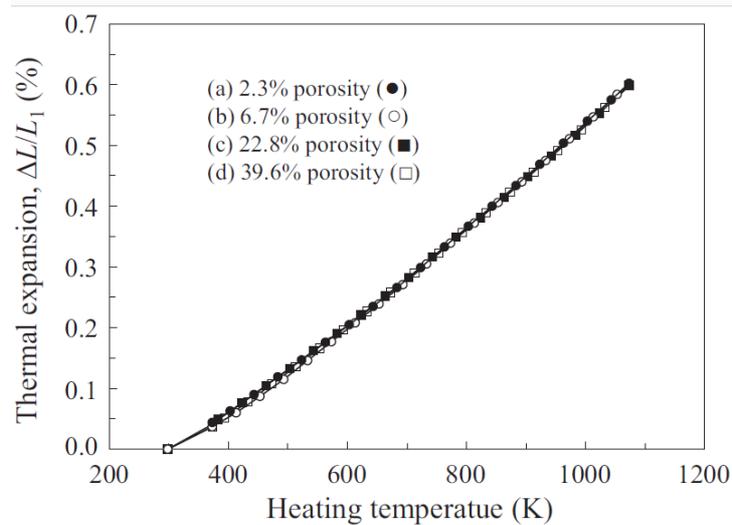
A utilização da vermiculita como adição em argamassas, concretos e pasta de gesso contribui para melhoria do desempenho térmico e redução da densidade, mas pouco se sabe sobre sua influência nas propriedades acústicas. Neste trabalho será analisado o amortecimento acústico e a isolamento sonora do compósito gesso/vermiculita.

2.2.3. Alumina

A alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3) é um composto químico extraído da bauxita, utilizado na produção de alumínio e também como abrasivo, dada sua elevada dureza. Na construção civil a alumina é especialmente utilizada na indústria de materiais cerâmicos.

A alumina é um material extremamente denso e com alto módulo de elasticidade, aproximadamente 280GPa. Hirata, Takehara e Shimonosono (2017) mostram que esse módulo de elasticidade pode ser reduzido com o aumento da porosidade da alumina, não influenciando o aumento da porosidade na expansão térmica em altas temperaturas, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Relação entre a expansão térmica e a temperatura de aquecimento da alumina



Fonte: Hirata, Takehara e Shimonosono (2017)

A utilização da alumina tem sido investigada como substituição à parte da massa do cimento em concretos, e os resultados mostram uma maior estabilidade volumétrica, sem interferir significativamente nas propriedades mecânicas (Li *et al.*, 2019). Já na utilização como agregado, a alumina foi analisada por Alonso *et al.* (2019), mostrando um acréscimo acima de 20% na resistência de concretos com agregado reciclado utilizado em estradas.

Testes de Microscopia eletrônica de varredura desenvolvidos por Gopalakrishnan e Chinnaraju (2019) mostram que a finura da alumina, superior à cinza volante, pode contribuir para o aumento da durabilidade de estruturas de concreto, pois interferem diretamente no processo de cristalização. Mudanças microestruturais como esta serão observadas no compósito gesso/alumina.

A utilização da alumina na construção civil ainda é pouco difundida, sendo a maior parte das pesquisas focadas na adição ou substituição em parte do cimento utilizado em argamassas e concreto ou como material inerte (agregado). Não se tem conhecimento da utilização da alumina como adição ao gesso e sua interferência nas propriedades mecânicas e acústicas, sendo esse um dos objetivos deste trabalho.

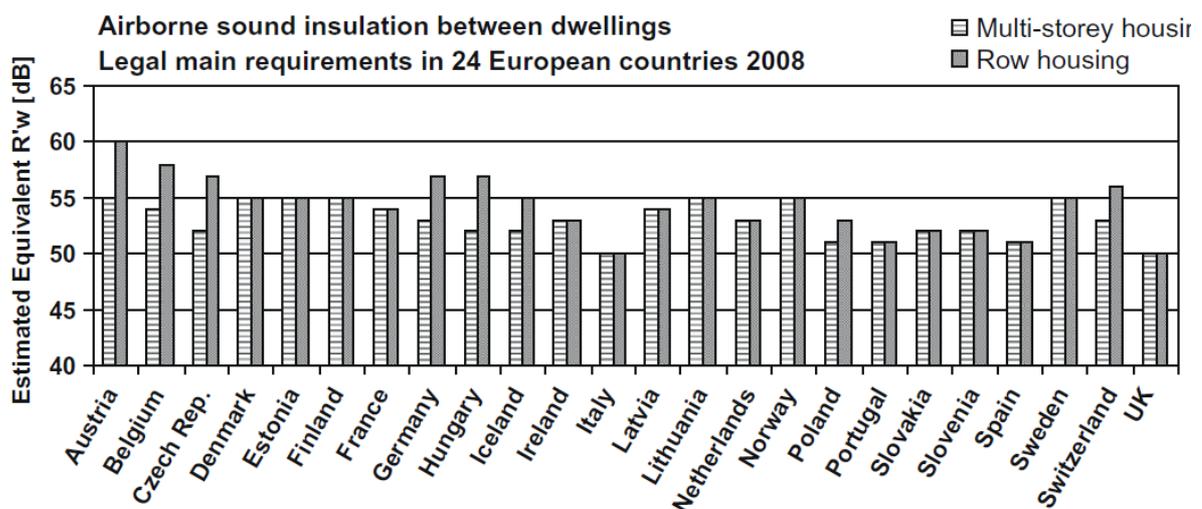
2.3. Isolação sonora em vedações verticais

A isolamento sonora é um tema bastante abordada por pesquisadores que estudam a acústica de edifícios, seja na caracterização de materiais comumente utilizados na construção civil ou no desenvolvimento de materiais e sistemas que aumentem a perda de transmissão sonora. A comunidade científica têm se empenhado em apresentar ao mercado, tecnologias que possam garantir o isolamento acústico desejado utilizando sistemas construtivos seguros, econômicos e sustentáveis.

Como forma de avaliar o desempenho acústico de vedações, verticais e horizontais, a normatização brasileira através da norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021), regulamenta os valores máximos de Diferença Padronizada de Nível Ponderada ($D_{nT,W}$) para ruídos aéreos, parâmetro adotado para determinar a energia transmitida. Contudo, a norma ABNT NBR 15575 apresenta apenas os critérios de Diferença Padronizada de Nível Ponderada, remetendo à norma ABNT NBR ISO 16283 para os procedimentos de medição.

Em 24 países da Europa, que utilizam o Índice de Redução Sonora Aparente Ponderado (R'_w) como parâmetro normativo de isolamento acústico, o critério mais baixo é o da Itália e do Reino Unido, onde é exigido R'_w acima de 50dB (Rasmussen, 2010). A Figura 11 apresenta o R'_w exigido em cada um dos 24 países.

Figura 11 – Critérios do Índice de Redução Sonora Aparente Ponderado (R'_w) em 24 países da Europa



Fonte: Rasmussen (2010)

No Brasil, a norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021) preconiza o maior critério de $D_{nT,W}$ para paredes entre unidades autônomas, onde um dos ambientes seja dormitório, que é 45dB, valor difícil de ser obtido com os sistemas construtivos convencionais utilizados atualmente nas construções residenciais brasileiras.

A Diferença Padronizada de Nível (Equação 2) é o parâmetro de isolamento acústico medido em campo, obtido pela diferença entre os níveis de pressão sonora da fonte, na sala de emissão e na sala de recepção, tendo como referência o tempo de reverberação da sala de recepção.

$$D_{nT} = L1 - L2 + 10\text{Log}\frac{T}{T_0} \quad (2)$$

Onde,

D_{nT} – Diferença padronizada de nível;

$L1$ – Média temporal e espacial do nível de pressão sonora da fonte na sala de emissão;

$L2$ – Média temporal e espacial do nível de pressão sonora da fonte na sala de recepção;

T – Tempo de reverberação da sala de recepção, em segundos;

T_0 – tempo de reverberação de referência, em edifícios, $T_0=0,5s$.

Contudo, na fase de projeto o parâmetro utilizado na especificação das vedações, visando o atendimento ao desempenho requerido em campo, é o Índice de Redução Sonora Ponderado (R_w), obtido em laboratório.

Os testes de isolamento sonora podem ser realizados em câmaras reverberantes, conforme ISO 10140 (2021) ou tubos de impedância, conforme ASTM E2611-19 (2019).

No entanto, estudos realizados por Caballol e Raposo (2018) mostram que a utilização de tubos de impedância em amostras de concreto e gesso apresentam alta variabilidade nos resultados, não sendo um método confiável.

Nos ensaios realizados em câmara reverberante (campo reverberante) a transmissão sonora dá-se exclusivamente pelo elemento de teste, posicionado entre as duas câmaras (emissão e recepção), não havendo transmissões marginais.

O Índice de Redução Sonora Ponderado (R_w) é o principal dado de entrada para predição do isolamento acústico em campo, realizada com base na ISO 12354 (2017), que considera também a ocorrência de transmissões marginais ou por flancos, influenciada diretamente pelo fator de perda (amortecimento).

2.3.1. Perda de transmissão sonora

A parcela de energia sonora que não é transmitida de um ambiente para outro é chamada de coeficiente de transmissão (τ) (Bies e Hansen, 2009). A perda de transmissão sonora ou transmission loss (TL) pode então ser definida com uma função do coeficiente de transmissão (Equação 3):

$$TL = -10 \log_{10} \tau \quad (3)$$

Onde,

τ – Coeficiente de transmissão

A perda de transmissão de elementos de vedação simples, na região controlada pela massa, segue a lei da massa (Equação 4):

$$TL = 20 \log(Mf) - 47,4 \quad (4)$$

Onde,

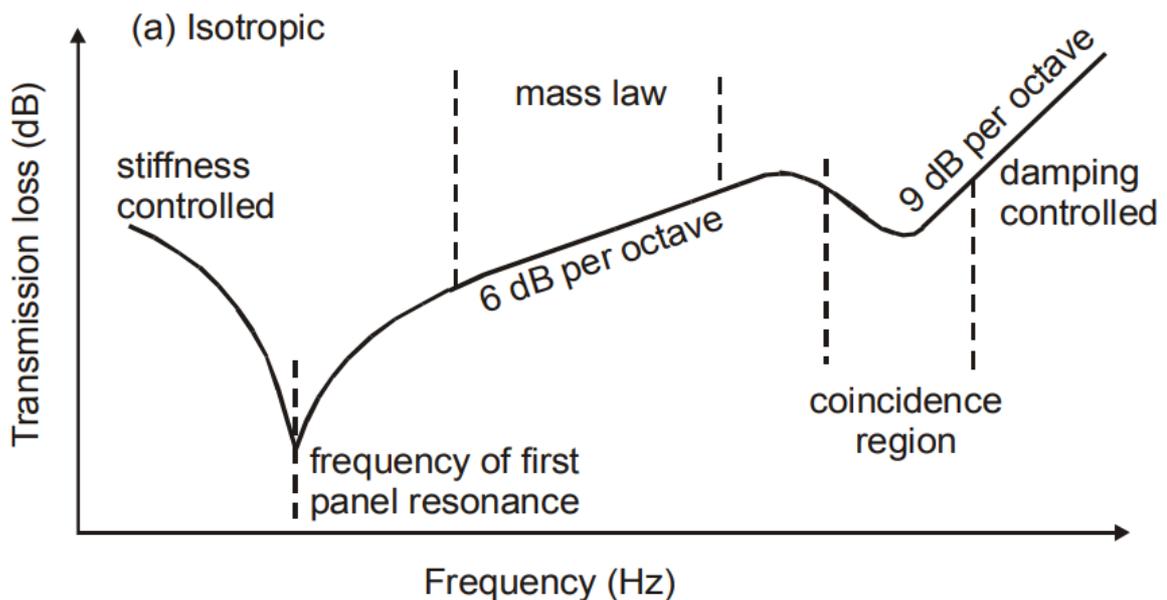
M – Densidade superficial (kg/m^2);

f – Frequência de incidência (Hz).

Assim, a perda de transmissão é função da densidade superficial do material e da frequência da onda incidente.

O comportamento geral da perda de transmissão sonora de uma partição uniforme, em função da frequência, pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Perda de transmissão sonora de partições uniformes

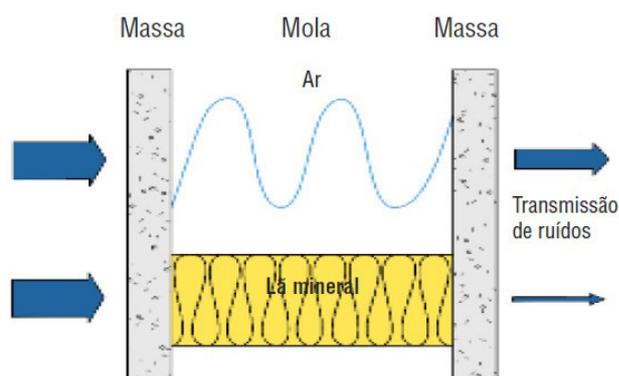


Fonte: (Bies e Hansen, 2009)

Como forma mais direta de se aumentar a perda de transmissão sonora, aumenta-se a massa do elemento de vedação, lei da massa. Contudo, o aumento excessivo na espessura e rigidez de painéis, reduz o desempenho esperado com a lei da massa. Na prática da construção civil, poucos elementos de vedação terão o desempenho previsto na lei da massa (Bies e Hansen, 2009).

Para obtenção de maiores resultados de perda de transmissão sonora, sem que haja aumento de massa, são utilizadas paredes duplas ou triplas, formando o efeito conhecido como massa/mola/massa (Gerges, 2000), como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Paredes duplas e o efeito de isolamento por massa/mola/massa

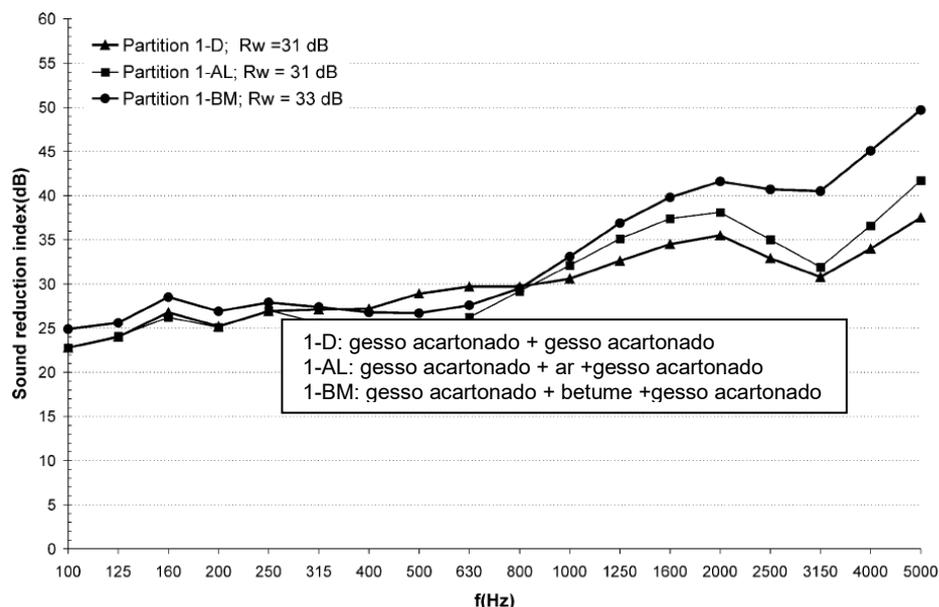


Fonte: (Luca, 2015)

O grande problema no efeito massa/mola/massa são as conexões entre as duas massas, criando as chamadas “pontes acústicas”. Na teoria das paredes duplas considera-se que não há conexões estruturais, mas nas construções reais há diversas conexões (perfis, parafusos, etc.). A teoria apresentada por Sharp propõe que a potência transmitida pelo painel no lado receptor é proporcional ao quadrado da velocidade de propagação do som e à sua área irradiada (Long, 2014).

Uma forma de mitigar o efeito das conexões na perda de transmissão sonora foi estudada por Bravo *et al.* (2002), mais especificamente na região da frequência crítica, sendo aplicado material flexível (betume) entre duas placas de gesso acartonado no sistema drywall, obtendo resultados que aumentam a perda de transmissão sonora ponderada em 2dB. Como pode ser observado na Figura 14, a inserção do material flexível influencia principalmente nas baixas frequências (100Hz-200Hz) e altas frequências (1600Hz-5000Hz).

Figura 14 – Perda de transmissão sonora de sistemas drywall com material flexível



Fonte: (Bravo *et al.*, 2002)

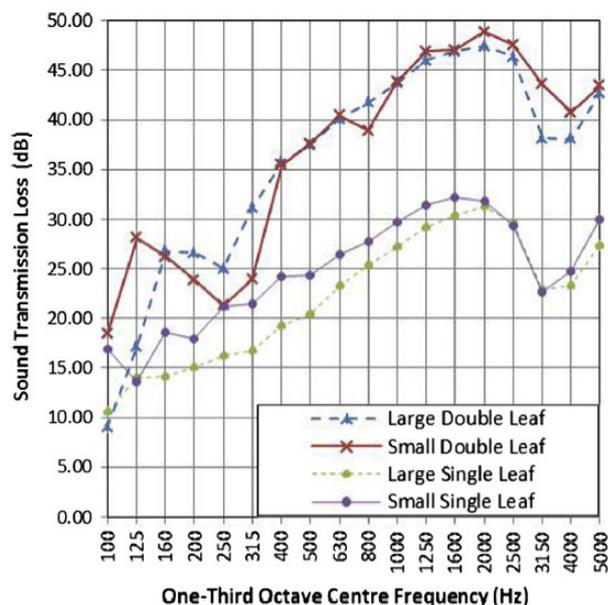
Assim como Bravo *et al.* (2002) avaliou a influência de material flexível entre placas de gesso acartonado no sistema drywall, este trabalho avaliará sua aplicação no sistema de blocos de gesso.

Os testes em laboratório são essenciais no desenvolvimento de projetos, sendo de responsabilidade dos fornecedores informar o índice de redução sonora de seu produto. Contudo, o Brasil possui poucos laboratórios para o ensaio de isolamento.

Como forma de viabilizar a realização de uma maior quantidade de ensaios em laboratório, Wareing, Davy e Pearse (2015) estudaram a realização de testes em condições não padronizadas. Os testes foram realizados com amostras de 1550mmX950mm, sendo uma das câmaras reverberantes e outra semi-aneecóica.

O laboratório apresentou bons resultados e, como mostrado na Figura 15, a frequência de coincidência, região regida pelo amortecimento, está na faixa de frequência entre 3150Hz e 4000Hz, tanto para vedações com placa de gesso acartonado simples quanto dupla. Esta informação é de grande relevância, pois o índice de redução sonora ponderado (R_w) é avaliado apenas nas frequências entre 100Hz e 3150Hz, sendo pouco impactado pela frequência de coincidência.

Figura 15 – Perda de transmissão sonora de vedações em gesso acartonado, simples e duplo, utilizando câmara não padronizada



Fonte: (Wareing, Davy e Pearse 2015)

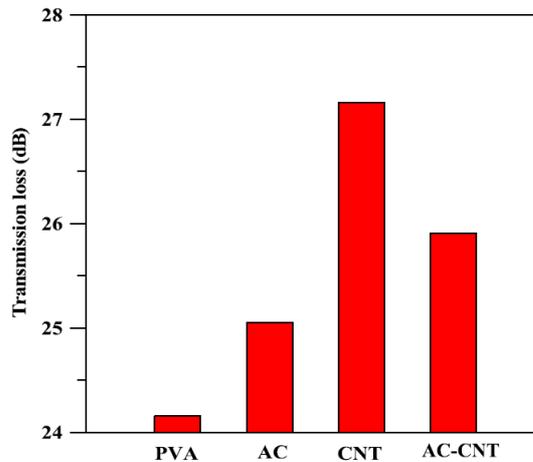
2.3.2. Acréscimo de isolamento sonora

A isolamento sonora de um material é altamente dependente da tecnologia adotada para sua construção. Os materiais convencionalmente utilizados na construção civil brasileira, como blocos cerâmicos e blocos de concreto, são pesados e seguem a lei da massa.

Aumentar a isolamento sonora de elementos de vedação é uma das tarefas mais complexas e trabalhosas, uma vez que aumentar a massa dos elementos gera maior sobrecarga à estrutura, e utilizar paredes duplas ou triplas acarreta um aumento na espessura das paredes, reduzindo a área útil dos ambientes.

Utilizar a lei da massa ou o efeito de massa-mola-massa é, sem dúvidas, a forma mais direta de melhorar o desempenho acústico de uma vedação. Porém, em situações onde as vedações já estão executadas e não se pode modificar o sistema construtivo, o aumento do isolamento acústico é possível com a utilização de revestimentos melhorados. Huq *et al.* (2016) mostrou que a utilização de nanotubo de carbono mesoporoso (CNT) adicionado à matriz de tintas PVA (acetato de polivinila), melhoram em até 3dB a isolamento sonora, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Aumento da isolação sonora promovido pela adição de nanotubo de carbono mesoporoso (CNT) em tintas PVC

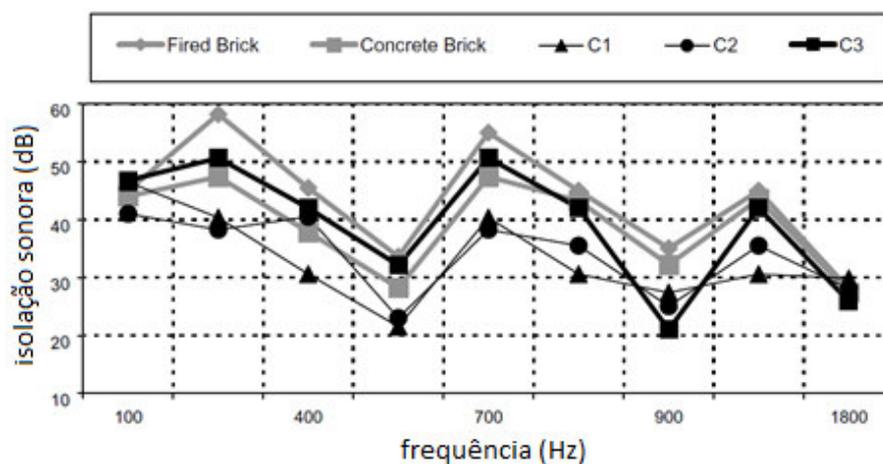


Fonte: (Huq *et al.*, 2016)

O estudo de materiais compósitos na produção de componentes que proporcionem aumento do isolamento acústico, tem sido um tema crescente na pesquisa científica, visto que a lei da massa e o efeito de massa/mola/massa podem limitar a utilização de alguns sistemas construtivos:

- Binici *et al.* (2009) investigaram compósitos de tijolos de barro com adições de 10% de cimento (C1), pedra pomes basáltica (C2) e gesso (C3), mostrando que compósitos com adição do gesso proporciona maior isolação sonora que os demais materiais investigados, especialmente na primeira frequência de ressonância. Observa-se, no entanto, uma significativa redução na isolação sonora numa segunda frequência de ressonância (900Hz), como mostrado na Figura 17;

Figura 17 – Isolação sonora promovida por tijolos de barro



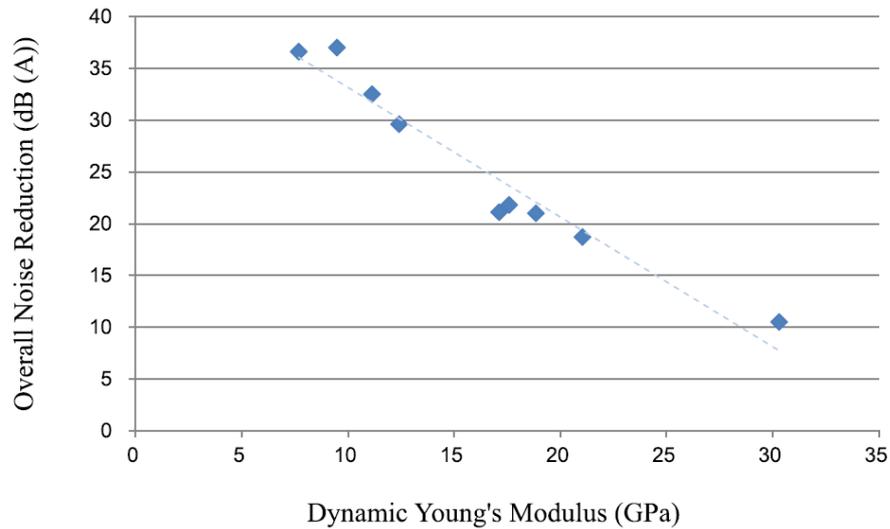
Fonte: (Binici *et al.*, 2009)

- Binici *et al.* (2012) analisaram a aplicação de materiais fibrosos e porosos, mostrando que aglomerados utilizando resíduos de algodão, cinza volante e resina epóxi melhoram as propriedades térmicas, acústicas e de resistência à flexão. Aumentando a espessura do resíduo de algodão, colocado entre duas placas de aglomerados, observou-se o incremento na isolação sonora, funcionando o resíduo de algodão como material amortecedor;
- Xu *et al.* (2017) avaliaram a utilização de rochas e minerais, leves e pesados, às misturas de concretos e argamassas, observando que o isolamento acústico de compósitos de policloreto de vinila (PVC) com adição de mica, percentuais de 1%, 5%, 10%, 20% e 30%, apresentou maiores perdas de transmissão sonora quando utilizado 10% de mica, até a frequência crítica. Após a frequência crítica observa-se que a perda de transmissão cresce com o aumento no percentual de mica;
- Rashad (2018) estudou a utilização de agregado leve de argila expandida em misturas de concreto e argamassa, mostrando aumento no isolamento térmico e acústico, e maior capacidade de resistência ao fogo.

O comportamento acústico de compósitos formados por materiais não convencionais, como partículas inorgânicas e nanomateriais, também tem sido alvo de investigações. Estudos realizados por Shi *et al.* (2017) mostram que a utilização de nanotubos vazados apresentam resultados de perda de transmissão sonora superiores a 57dB, com espessura de apenas 10mm. Já a aplicação de esferas de vidro em compósitos de polietileno foi analisada por Liang e Jiang (2012), mostrando um aumento na perda de transmissão sonora com o aumento do volume de esferas.

Os materiais compósitos se destacam dos convencionais quando aprimoram as propriedades mecânicas, como rigidez e amortecimento, o que está diretamente ligado à perda de transmissão sonora. Como forma de aumentar a isolação sonora, Zhang e Poon (2018) reduziram o módulo de elasticidade dinâmico de elementos cimentícios pela adição de vermiculita, obtendo a relação apresentada na Figura 18.

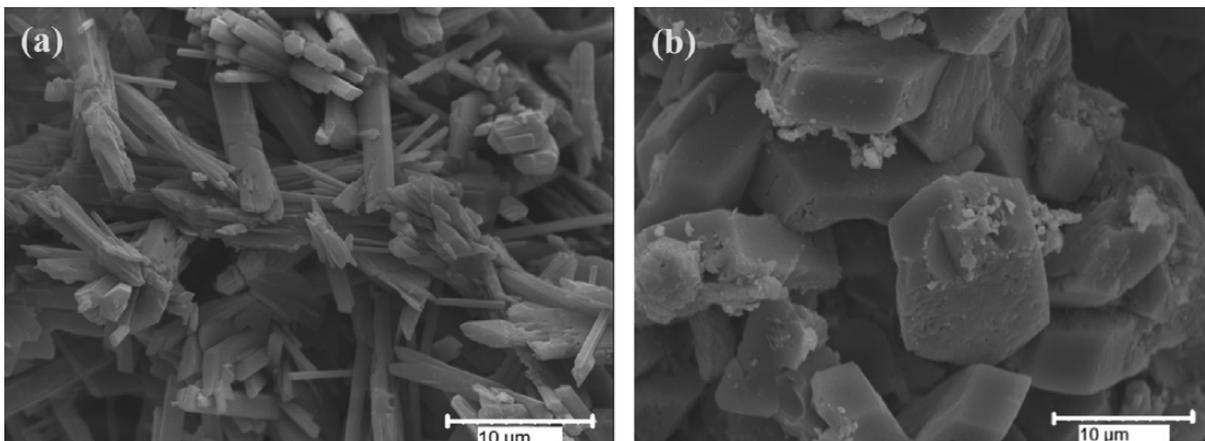
Figura 18 – Relação entre o Módulo de Young e a redução total de ruído



Fonte: (Zhang e Poon 2018)

Alterar a microestrutura dos materiais é uma das formas também investigadas para aumentar a perda de transmissão sonora. A modificação microestrutural da pasta de gesso foi possível com a utilização de 1,5% de ácido cítrico, transformando a estrutura tipo agulha em cristais hexagonais (Figura 19), o que ocasionou o translado da frequência crítica para resultados acima de 3700Hz (Elkhessaimi, Doyen e Smith, 2017), proporcionando uma maior capacidade de isolamento sonora do material e ganhos no índice de redução sonora ponderado (R_w).

Figura 19 – Micrografias eletrônicas de varredura de cristais de gesso obtidos em duas situações: (a) sem aditivo na água, levando a uma estrutura tipo agulha, (b) adição de ácido cítrico (1,5% em peso) em água, levando a cristais hexagonais.



Fonte: (Elkhessaimi, Doyen e Smith, 2017)

Os materiais compósitos apresentam potencial para elevar a capacidade de isolamento sonora de sistemas construtivos convencionalmente utilizados na construção civil nacional, visando o atendimento aos critérios exigidos na norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021). Assim, este trabalho aborda a análise de blocos de gesso compósitos, adição de materiais leves e pesados, para aumento no índice de redução sonora (R).

Seja por alterações físicas, químicas ou microestruturais, as pesquisas apresentadas neste item mostram que o aumento na isolamento sonora é factível, sem no entanto aumentar significativamente a massa ou utilizar elementos duplos ou triplos. Contudo, poucos trabalhos avaliam a isolamento sonora sob condições normatizadas, como abordado nesta pesquisa.

2.4. Fator de perda por amortecimento em vedações verticais

O amortecimento está associado à capacidade dos materiais ou sistemas em dissipar energia acústica, sendo o fator de perda (η) a relação entre a potência dissipada e a potência armazenada.

O fator de perda por amortecimento (η) é obtido pela relação entre potência (Π), energia (E) e frequência (ω), conforme apresentado na Equação (5).

$$\eta = \frac{\Pi}{\omega E} \quad (5)$$

Já o amortecimento interno do material está relacionado ao fator de perda mecânica (η_{mec}), que relaciona a energia dissipada com a energia injetada. Logo, quanto maior for a dissipação interna de energia de vibração menor será a velocidade de vibração, e conseqüentemente menor o nível de ruído gerado.

O fator de perda mecânica possui valores típicos, que podem ser encontrados na literatura. Möser (2009) indica que o gesso acartonado, cuja densidade é de 1.200kg/m³, possui 0,008 de fator de perda mecânica.

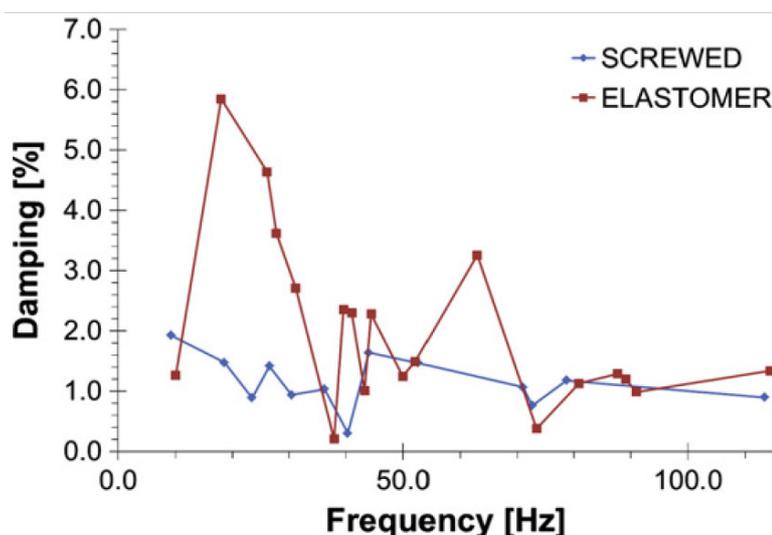
O fator de perda por amortecimento ou fator de perda total (η) pode ser obtido experimentalmente por medições do tempo de reverberação estrutural (T_s), conforme mostrado na Equação (6).

$$\eta = \frac{2,2}{f T_s} \quad (6)$$

O conhecimento do amortecimento dos materiais é fundamental no isolamento acústico, especialmente ao ruído de impacto. Sistemas de piso com camadas formadas por materiais elásticos de alto amortecimento são utilizados no sistema de contrapiso flutuante, promovendo redução no nível de pressão sonora de impacto.

A transmissão sonora entre elementos de um mesmo sistema, também está diretamente relacionada com o amortecimento. Como mostrado por Bolmsvik e Brandt (2013) em experimento, a utilização de material elastômero na fixação do sistema de piso, possui maior amortecimento que a fixação diretamente com parafusos, como mostrado na Figura 20. A maior dispersão de resultados do amortecimento é observada quando utilizado elastômero, o que é explicado pelos autores como consequência do deslocamento ao longo das bordas, onde o elastômero está localizado.

Figura 20 – Amortecimento de sistema de piso fixado diretamente com parafusos e elastômero



Fonte: (Bolmsvik e Brandt 2013)

O fator de perda pode ser determinado experimentalmente por diferentes métodos, podendo ser alta a variação dos resultados entre os métodos. Jaouen, Renault e Deverge (2008) analisaram o amortecimento de uma espuma utilizando nove métodos, sendo observada uma alta dispersão entre os métodos quando o material possui elevado fator de perda.

Já Pereira, Arenas e Zumelzu (2011) analisaram o fator de perda por quatro métodos, sendo três métodos ressonantes, baseados na norma ASTM E756-04 (2004), e um método não ressonante (método de feixe simplesmente suportado). Os testes foram realizados dentro de uma câmara com condições controladas utilizando amostras compostas de alumínio e PET. Os resultados mostram que o uso complementar dos quatro métodos possibilitará uma caracterização mais precisa do material em diferentes faixas de frequência.

O método ressonante foi adotado por Wei e Kukureka (2000), mostrando-se eficiente na determinação do amortecimento de materiais rígidos com alto amortecimento, permitindo sua utilização na determinação do amortecimento de elementos de gesso e compósitos.

Já Davy (2003) utilizou o método de ressonância de banda para medir o fator de perda em placas de gesso acartonado, obtendo resultados entre 0,013 e 0,020, razoavelmente constantes em toda faixa de frequência. Os resultados obtidos experimentalmente por Davy estão acima dos valores indicados por Möser (2009) em sua bibliografia, mostrando que as propriedades de cada material podem fazer variar significativamente o fator de perda.

O tempo de reverberação estrutural (T_s), necessário para determinação do fator de perda total (η), foi obtido por Paixão (2002) através de excitações, realizadas com martelo de impacto, e medições de aceleração em diferentes posições dos transdutores, método baseado no Anexo E da Norma ISO 140-3 (1995) – substituída por ISO 10140 (2021). As medições foram realizadas em laboratório e permitiram a obtenção do fator de perda total de elementos de vedação.

Aplicando também o método de excitações por martelo de impacto, Martins (2008) e Dias (2017) analisaram o tempo de reverberação estrutural de elementos de vedação, realizando medições em construções reais (in situ). O método foi adaptado da ISO 10848-1 (2017) e permitiu aos autores caracterizar o tempo de reverberação estrutural das paredes e lajes.

Nesta pesquisa adotou-se também o método de excitações por martelo de impacto, sendo o tempo de reverberação estrutural medido nas mesmas vedações verticais utilizada para determinação do índice de redução sonora (R).

3 METODOLOGIA

A caracterização das propriedades acústicas das vedações em bloco de gesso simples, formada apenas por pasta de gesso, e compósitos, obtidos com a incorporação de perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina à pasta de gesso, são o objetivo principal deste trabalho. Os materiais também tiveram suas propriedades físicas e mecânicas caracterizadas, pois impactam diretamente no comportamento acústico.

Visando o melhor conhecimento microestrutural do gesso e dos compósitos estudados, foram realizados testes de MEV, caracterizando o impacto microestrutural dos compósitos na matriz do gesso.

O pó de gesso e os compósitos, em seu estado anidro, foram caracterizados com a determinação da massa unitária.

As propriedades da pasta de gesso e dos compósitos foram caracterizadas por ensaios de tempo de pega, conforme procedimentos descritos na norma ABNT NBR 12128 (2019).

Já a análise mecânica da pasta de gesso e compósitos foi realizada a partir de ensaios de dureza e resistência à compressão, aplicando a norma ABNT NBR 12129 (2019); resistência à flexão, sendo adotada a norma ABNT NBR 13279 (2005) e módulo de elasticidade dinâmico, tomando como referência a norma ABNT NBR 15630 (2008).

As propriedades físicas e mecânicas dos blocos de gesso foram analisados conforme requisitos preconizados na norma ABNT NBR 16494 (2017), sendo realizado testes dimensionais (espessura, comprimento e altura), de dureza e de resistência à flexão, conforme procedimentos descritos na norma ABNT NBR 16495 (2016).

As propriedades acústicas dos blocos de gesso, produzidos com pasta de gesso (padrão), adições de perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina, e blocos produzidos com lã de rocha, foram determinadas em laboratório, no elemento de vedação inteiro (parede), sendo o amortecimento e a isolamento sonora caracterizados por medições do fator de perda e índice de redução sonora (R), respectivamente.

A Figura 21 ilustra os materiais, no estado anidro, utilizados para moldagem dos corpos de prova e blocos de gesso.

Figura 21 – Amostras dos materiais utilizados na pesquisa (estado anidro)



Amostra de gesso em pó



Amostra de perlita natural



Amostra de perlita expandida



Amostra de vermiculita



Amostra de alumina

3.1. Preparação das amostras de caracterização

Para caracterização das propriedades mecânicas foram preparados 2 tipos de amostra: cúbicas de 50x50x50mm, utilizadas para determinação da dureza, resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico, e prismáticas de 40x40x160mm, utilizadas para determinação da resistência à flexão.

As amostras foram preparadas em laboratório, sendo utilizadas nesta pesquisa as 6 relações água/gesso (0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 e 1.2) que proporcionaram a melhor consistência da pasta de gesso sem necessidade de aditivos, tanto para a amostra padrão quanto os compósito.

Adotou-se nessa pesquisa a adição de 5% de cada um dos compósitos (perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina), em relação a massa de gesso.

Visando uma melhor análise estatísticas dos resultados, foram produzidos 30 corpos de prova de cada amostra, sendo utilizado o método de amplitude interquartil (IQR – Interquartile Range) para determinação de valores outliers, os quais foram eliminados do valor médio dos resultados.

O Quadro 1 apresenta a nomenclatura que será utilizada para indicar cada amostra.

Quadro 1 – Nomenclatura das amostras (pasta) utilizadas nos ensaios de caracterização

RELAÇÃO ÁGUA/GESSO	PADRÃO (sem adição)	ADIÇÃO (5%)			
		PERLITA NATURAL	PERLITA EXPANDIDA	VERMICULITA	ALUMINA
0.7	PA07	PN07	PE07	VE07	AL07
0.8	PA08	PN08	PE08	VE08	AL08
0.9	PA09	PN09	PE09	VE09	AL09
1.0	PA10	PN10	PE10	VE10	AL10
1.1	PA11	PN11	PE11	VE11	AL11
1.2	PA12	PN12	PE12	VE12	AL12

Inicialmente o pó de gesso foi submetido a um pré-tratamento, passando na peneira com abertura de 2,0mm para remoção de torrões e impurezas. O gesso e as adições foram pesados e misturados no estado anidro, formando um material seco e homogêneo.

A preparação da pasta de gesso foi realizada aplicando-se o seguinte procedimento:

- a) Colocar a quantidade de água em um recipiente impermeável e não reativo;
- b) Polvilhar a massa de gesso/compósito sobre a água;
- c) Deixar repousar por 2 minutos;
- d) Misturar manualmente de forma contínua pelo período de 2 minutos, removendo os “grumos” de gesso;

- e) Preencher os moldes em camadas, batendo com uma espátula, de forma a evitar o aprisionamento de bolhas de ar.
- f) Rasar e nivelar a superfície dos corpos de prova, sem alisar ou pressionar;
- g) Desmoldar a amostra após completo endurecimento da pasta;
- h) Identificar os corpos de prova e secar em área coberta e com ar circulante, até que a massa se torne constante.

3.1.1. Preparação dos blocos de gesso

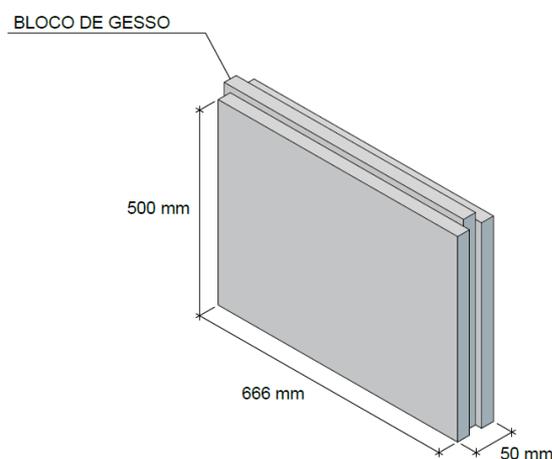
Os blocos de gesso utilizados na construção das vedações verticais, empregadas nos testes para obtenção do fator de perda e do índice de redução sonora, foram produzidos individualmente em laboratório.

Dada a limitação do laboratório, os blocos de gesso foram produzidos apenas com a relação água/gesso de 1.0, relação utilizada na produção dos blocos de gesso comerciais, e os blocos de gesso compósitos com adição de 5% da massa do gesso. Além dos blocos de gesso padrão e compósitos, foram produzidos blocos com placas de lã de rocha (15mm).

Foram produzidos 50 blocos de gesso para cada sistema testado, sendo utilizado 38 blocos para execução da parede, submetida aos testes acústicos, e 12 blocos para caracterização física e mecânica.

Os blocos de gesso produzidos foram maciços e seguiram as dimensões padronizadas na norma ABNT NBR 16494 (2017): 500mm de altura, 666mm de comprimento e espessura de 50mm (Figura 22).

Figura 22 – Bloco de gesso



Fonte: (Autor, 2022)

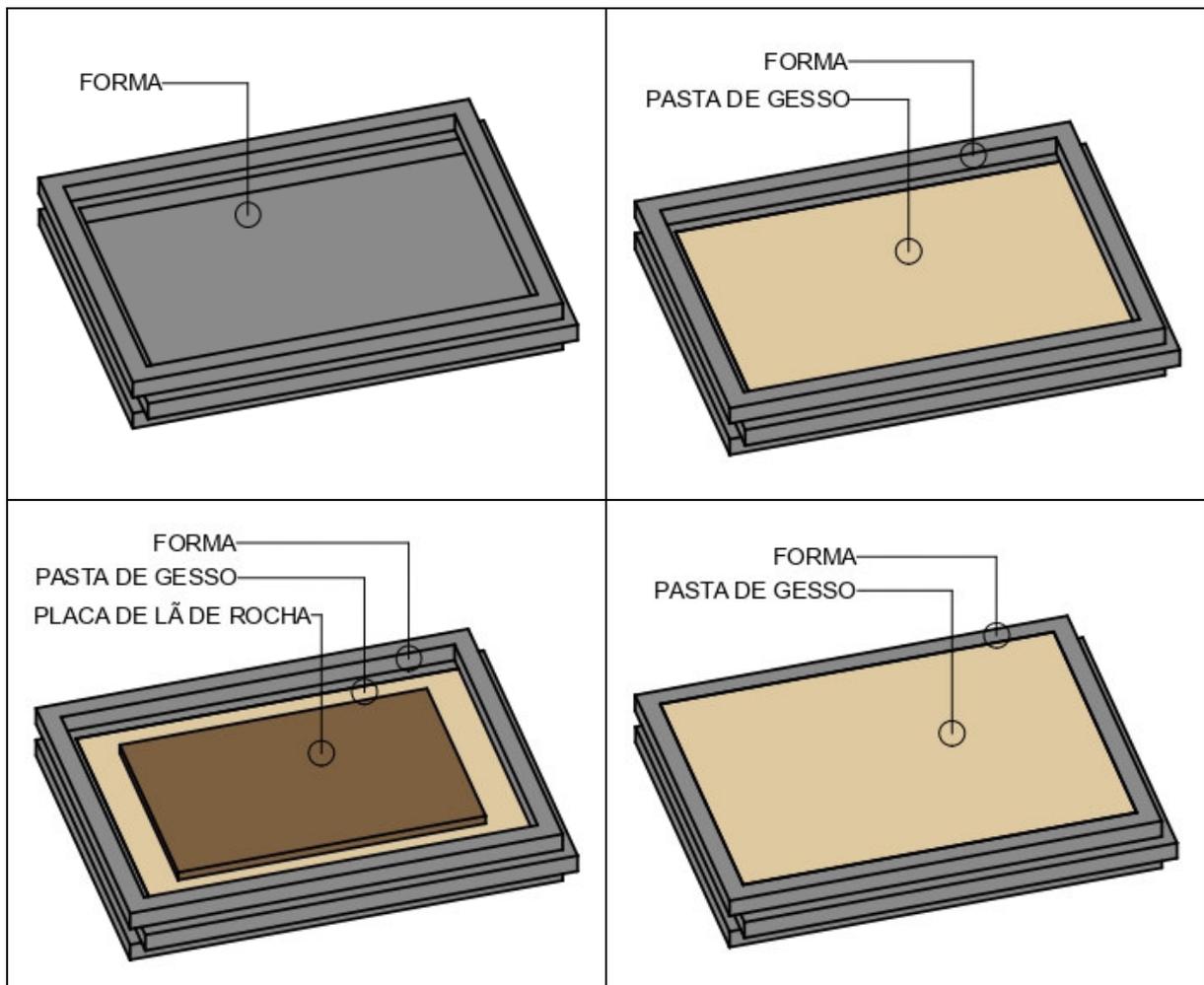
A preparação da pasta de gesso utilizada na produção dos blocos seguiu os procedimentos de mistura descritos no item 3.1.

3.1.1.1. Bloco de gesso acústico

Neste trabalho, denominou-se como “bloco acústico” aqueles produzidos com placa de lã de rocha incorporada.

Os blocos acústicos foram produzidos apenas com pasta de gesso, sem adições, seguindo o mesmo procedimento de mistura dos demais blocos. Contudo, no momento de moldagem do bloco, a pasta de gesso era colocada em 1/3 da fôrma, em seguida era colocada a placa de lã de rocha, com dimensões compatíveis com a fôrma utilizada, e por fim o restante da fôrma era preenchida com pasta de gesso, conforme esquema ilustrativo mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Esquema de moldagem do bloco de gesso com placa de lã de rocha



Fonte: (Autor, 2019)

A placa de lã de rocha utilizada possui espessura de 15mm e densidade de 150kg/m³, havendo sido envolvida com plástico filme para evitar o contato direto da pasta de gesso com a lã de rocha. A Figura 24 ilustra a moldagem do bloco acústico no momento de colocação da placa de lã de rocha.

Figura 24 – Fabricação do bloco gesso acústico (placa de lã de rocha)



Fonte: (Autor, 2022)

A caracterização dos blocos de gesso foi realizada conforme a norma ABNT NBR 16494 (ABNT, 2017), sendo analisado os requisitos dimensionais (espessura, altura, comprimento), densidade, dureza e propriedades mecânicas (carga de flexão).

O Quadro 2 apresenta a nomenclatura utilizada na identificação dos blocos de gesso e respectivas vedações.

Quadro 2 – Nomenclatura das vedações em bloco de gesso

NOMENCLATURA	DESCRIÇÃO
BPA	Bloco de gesso padrão produzido em laboratório com relação água/gesso de 1.0
BPN	Bloco de gesso compósito, produzido em laboratório com relação água/gesso de 1.0 e adição de 5% de perlita natural
BPE	Bloco de gesso compósito, produzido em laboratório com relação água/gesso de 1.0 e adição de 5% de perlita expandida
BVE	Bloco de gesso compósito, produzido em laboratório com relação água/gesso de 1.0 e adição de 5% de vermiculita
BAL	Bloco de gesso compósito, produzido em laboratório com relação água/gesso de 1.0 e adição de 5% de alumina
BAC	Bloco de gesso acústico, produzido em laboratório com relação água/gesso de 1.0 e placa de lã de rocha incorporada

3.2. Caracterização das propriedades físicas e mecânicas

3.2.1. Propriedades físicas do pó de gesso e adições

As propriedades físicas do pó de gesso e das adições foram caracterizadas no estado anidro por ensaio de determinação da massa unitária.

A determinação da massa unitária foi realizada tomando-se uma amostra do pó de gesso e fazendo-a passar pela peneira com abertura de 2,0mm, sendo a amostra depositada num recipiente de volume conhecido.

O peneiramento foi realizado adicionando-se massas de 100g até o transbordamento do recipiente, que foi então pesado em balança com resolução de 0,1g.

A massa unitária foi então calculada pela expressão abaixo (7):

$$\text{Mu} = \frac{M}{V} \quad (7)$$

Onde,

Mu – Massa unitária, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

M – Massa do gesso, expressa em gramas (g);

V – Volume do recipiente, expresso em centímetros cúbicos (cm³).

A massa unitária da amostra foi obtida pela média aritmética de duas medições consecutivas, sendo a diferença entre elas menor que 5%.

A Figura 25 ilustrada a pesagem da amostra de gesso no estado anidro (pó) para determinação da massa unitária.

Figura 25 – Pesagem da amostra de gesso em pó para determinação da massa unitária



Fonte: (Autor, 2022)

3.2.2. Propriedades físicas da pasta de gesso e compósitos

A pasta de gesso e dos compósitos no estado fresco foi caracterizada pelos ensaios de consistência normal, tempo de início de pega e tempo de fim de pega, seguindo os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 12128 (ABNT, 2017). No estado endurecido a pasta de gesso foi caracterizada pela determinação da densidade.

Os ensaios foram realizados em laboratório, ambiente com temperatura e umidade controlados, e foram utilizados os seguintes equipamentos: molde, base, aparelho de Vicat e aparelho de Vicat modificado.

A amostra de teste foi inicialmente passada na peneira com abertura de 2,0mm para um pré-tratamento, removendo-se torrões e impurezas.

O teste de consistência normal foi realizado polvilhando uma porção da amostra de pó de gesso, devidamente identificada e pesada, em 150g de água destilada, previamente misturada com 10mL da solução de citrato de sódio a 20g/L. A mistura ficou em repouso por 2 minutos e foi homogeneizada por 1 minuto, obtendo uma consistência pastosa e uniforme.

A pasta de gesso foi então transferida para o molde e verificado com o aparelho de Vicat modificado a leitura, obtendo-se uma consistência normal quando a sonda cônica atingiu uma penetração de 30 ± 2 mm, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Determinação da consistência normal com o aparelho de Vicat modificado



Fonte: (Autor, 2022)

O tempo de início e fim de pega, que caracteriza o tempo que a pasta de gesso pode ser trabalhada e o tempo de seu endurecimento, respectivamente, foi determinado tomando-se a quantidade de água e pasta (relação água/gesso) estabelecida no teste de consistência normal.

No teste de tempo de pega é utilizado o aparelho de Vicat, sendo estabelecido o tempo de início de pega como o intervalo, em segundos, entre o instante em que o pó de gesso entra em contato com a água e o instante em que a agulha do aparelho de Vicat penetra na pasta de gesso, estacionando a 1mm da base, como ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Determinação do tempo de início de pega com aparelho de Vicat



Fonte: (Autor, 2022)

Já o tempo de fim de pega é compreendido entre o intervalo de tempo, em segundos, entre o instante em que o pó de gesso entra em contato com a água e o instante em que a agulha não mais penetra na pasta, deixando apenas uma leve impressão, como ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Caracterização do tempo de fim de pega com aparelho de Vicat



Fonte: (Autor, 2022)

Os testes de consistência normal, início de pega e fim de pega foram realizados para o pó de gesso e para os compósitos de perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina. O que permitiu analisar o impacto das adições no tempo de trabalho e de endurecimento da pasta de gesso.

A tempo de início e fim de pega de cada uma das amostras foi determinado pela média aritmética de duas medições consecutivas, sendo a variação entre as duas menor que 5%.

A densidade da pasta de gesso e compósitos foi determinada aplicando-se a formulação apresentada na norma de blocos de gesso, ABNT NBR 16495 (ABNT, 2016), uma vez que as normas que abordam a pasta de gesso não apresentam tal análise. Os corpos de prova cúbicos de 50x50x50mm foram utilizados para caracterização da densidade das amostras.

A densidade, expressa em quilogramas por metro cubico (kg/m^3), é dada pela expressão abaixo (8):

$$\text{Dens} = \frac{M}{Vt} \quad (8)$$

Onde,

Dens – Densidade, expressa em quilogramas por metro cubico (kg/m^3);

M – Massa da amostra, expressa em quilogramas (kg);

Vt – Volume total da amostra, expressa em metros cúbicos (m^3);

3.3. Análise mecânica

As propriedades mecânicas da pasta de gesso e compósitos foi analisada com base nos ensaios de dureza, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade dinâmico.

3.3.1. Dureza e resistência à compressão

Os ensaios de dureza e resistência à compressão foram realizados conforme procedimentos descritos na norma ABNT NBR 12129 (ABNT, 2017), utilizando corpos de prova cúbicos com 50mm de aresta, moldados conforme procedimento descrito no item 3.1.

O ensaio de dureza foi realizado posicionando uma esfera de aço, com diâmetro de 10mm ($\pm 0,5\text{mm}$), no centro do corpo de prova, e aplicando uma carga inicial de 50N, que foi aumentada para 500N em 2 segundos e mantida constante por 15 segundos, como ilustrado na Figura 29. Em seguida foi retirada a carga e medida a profundidade da impressão com um paquímetro (resolução de 0,01mm).

Figura 29 – Ensaio de determinação da dureza



Fonte: (Autor, 2022)

O teste foi realizado em 3 faces de cada amostra, face inferior de moldagem e duas outras faces laterais, sendo utilizado a média das três medições como resultado da amostra. O resultado de cada relação a/g foi obtido com a média das trinta amostras.

A dureza, em Newtons por milímetro quadrado, é dada pela expressão (9):

$$D = \frac{F}{\pi \phi t} \quad (9)$$

Onde,

D – Dureza, expressa em Newtons por milímetro quadrado (N/mm²);

F – Carga, expressa em Newtons (N);

ϕ – Diâmetro da esfera, expressa em milímetros (mm);

t – Média da profundidade, expresso em milímetros (mm).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado nos mesmos 30 corpos de prova submetidos ao ensaio de dureza, sendo utilizado uma das faces não submetida à penetração, nem a face superior. O ensaio foi realizado aplicando-se carga contínua entre 250N/s e 750N/s até ruptura, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Ensaio de determinação da resistência à compressão



Fonte: (Autor, 2022)

A resistência à compressão, em MPa, é dada pela expressão (10):

$$R_c = \frac{P}{S} \quad (10)$$

Onde,

R_c – Resistência à compressão, expressa em megapascal (MPa);

P – Carga de ruptura, expressa em Newtons (N);

S – Área de seção transversal, expressa em milímetros quadrados (mm²).

3.3.2. Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão em pasta de gesso não possui procedimento normativo brasileiro, sendo utilizado o procedimento para argamassas de assentamento, descrito na norma ABNT NBR 13279 (ABNT, 2005).

Foram utilizados 30 corpos de prova prismáticos com dimensões de 40mm X 40mm X 160mm, moldados conforme procedimento descrito no item 3.1.

O ensaio foi realizado posicionando-se o corpo de prova no dispositivo de apoio, de modo que a face rasada não fique em contato com o dispositivo de apoio nem com o dispositivo de carga, e aplicando-se uma carga de 50N/s (± 10 N/s) até a ruptura, como ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Ensaio de determinação da resistência à tração na flexão



Fonte: (Autor, 2022)

A resistência à tração, em MPa, é dada pela expressão (11):

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad (11)$$

Onde,

R_f – Resistência à tração na flexão, expressa em megapascal (MPa);

F_f – Carga aplicada verticalmente no centro do prisma, expressa em Newtons (N);

L – Distância entre os suportes, expressa em milímetros (mm).

3.3.3. Módulo de elasticidade dinâmico

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico de pastas de gesso não possui procedimento normativo brasileiro, sendo utilizado neste trabalho o procedimento para argamassas de assentamento, descrito na norma ABNT NBR 15630 (ABNT, 2008).

A utilização de métodos não destrutivos para obtenção do módulo de elasticidade é bastante aplicado, pois preserva o elemento de teste e elimina interferências dimensionais. Plachy *et al.* (2009) utilizaram o método de excitação por impulso em blocos de gesso e obtiveram resultados do módulo de elasticidade consistentes e com baixa variabilidade.

Para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico faz-se necessário a determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica, da densidade do material e do coeficiente de Poisson.

A velocidade de propagação da onda ultra-sônica foi medida com equipamento de Ultrassom Procec (modelo pundit lab), conforme ilustrado na Figura 32, e a densidade com medições das dimensões e peso. Já o coeficiente de Poisson foi adotado 0,2 (Brandão e Carvalho, 2019), dada a indisponibilidade de equipamentos para medição experimental.

Figura 32 – Medição da velocidade de propagação da onda ultra-sônica e equipamento de Ultrassom Procec



Fonte: (Autor, 2022)

Os teste foram realizados em 30 corpos de prova cúbicos com 50mm de aresta, moldados conforme procedimento descrito no item 3.1.

O módulo de elasticidade dinâmico, em MPa, é dado pela expressão (12):

$$E_d = V^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (12)$$

Onde,

E_d – módulo de elasticidade dinâmico, expressa em megapascal (MPa);

ρ – Massa específica, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);

V – Velocidade da onda ultra-sônica, expressa em milímetros por micro segundos ($\text{mm}/\mu\text{s}$);

μ – Coeficiente de Poisson.

3.4. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização microestrutural permite o conhecimento dos materiais envolvidos e a interação da pasta de gesso com as adições, sendo possível correlacionar o comportamento microestrutural com as propriedades mecânicas, reológicas e acústicas (Barbosa, Ferraz e Santos, 2014; Rojas-Ramirez *et al.*, 2019; Shi *et al.*, 2017).

A caracterização microestrutural da pasta de gesso e compósitos foi realizada por imagens de MEV, que tem como princípio básico tornar visível o que não se pode ver a olho nu.

A análise por MEV foi realizada nas amostras padrão (sem adição) e nos compósitos de perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina, nas relações a/g de 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 e 1.2.

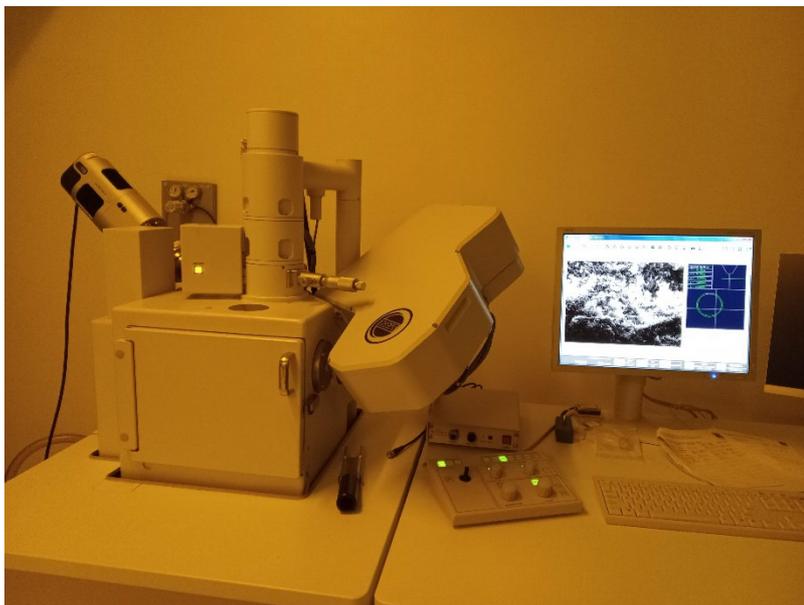
As amostras analisadas no microscópio eletrônico de varredura foram fraturadas, extraídas dos corpos de prova cúbicos de 50x50x50 (mm) após ensaio de resistência à compressão e secagem em estufa por 24h à 40°C para retirada de umidade.

As amostras fraturadas foram então fixadas ao porta-amostras (suporte metálico) e submetidas ao processo de recobrimento com carbono, melhorando a emissão de elétrons e, conseqüentemente, a obtenção de imagens mais nítidas.

O porta amostras foi então analisado no microscópio eletrônico de varredura, obtendo-se imagens com ampliação de 1000 vezes ($10\mu\text{m}$).

As amostras foram analisadas no microscópio eletrônica de varredura JEOL, modelo 6460, ilustrado na Figura 33, pertencente ao Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN).

Figura 33 – Microscópio eletrônica de varredura do Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN)



Fonte: (Autor, 2022)

3.5. Caracterização dos blocos de gesso

Os blocos de gesso analisados, produzidos em laboratório, foram caracterizados quanto a densidade, dureza e dimensões (espessura, altura, comprimento) seguindo os procedimentos de ensaio descritos na norma ABNT NBR 16494 (ABNT, 2017) e os critérios preconizados na norma ABNT NBR 16495 (ABNT, 2016).

A resistência à flexão foi determinada utilizando-se os procedimentos descritos na BS EN 12859 (2011), sendo adotada esta norma por avaliar a resistência do bloco inteiro.

Os testes foram realizados em 12 blocos de gesso, selecionados aleatoriamente das 50 amostras que foram preparados para cada condição (padrão e compósitos).

A espessura dos blocos foi obtido com a média de 4 medições, realizadas utilizando paquímetro com resolução de 0,05mm. Enquanto que a altura e o comprimento foram obtidos pela média de 3 medições, realizadas com trena de 1,0mm de resolução.

A massa dos blocos foi determinada por pesagem em balança com resolução de 100g, sendo obtida quando a massa do bloco foi considerada constante, ou seja, não apresentou variação num intervalo superior a 4 horas.

A densidade do bloco (D) foi então obtida pela relação entre a massa do bloco (M) e seu volume total (Vt), conforme a expressão (13):

$$D = \frac{M}{V_t} \quad (13)$$

Onde,

D – Densidade do bloco, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

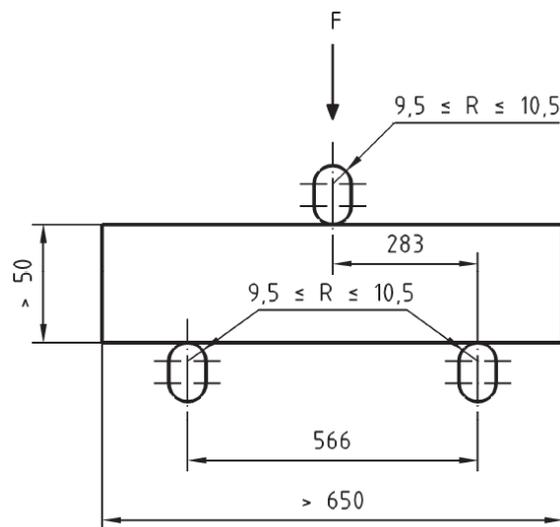
M– Massa do bloco, expressa em quilogramas (kg);

Vt – Volume total do bloco, expressa em metros cúbicos (m³);

A dureza dos blocos foi determinada aplicando-se a mesma metodologia utilizada na pasta de gesso, descrita no Item 3.3.1.

O ensaio de resistência à flexão foi realizado com aplicação de carregamento (20N/s) em três pontos, utilizando-se o dispositivo de teste mostrado na Figura 34, até a ruptura do bloco de gesso.

Figura 34 – Dispositivo de teste de resistência à flexão



Fonte: BS EN 12859 (2011)

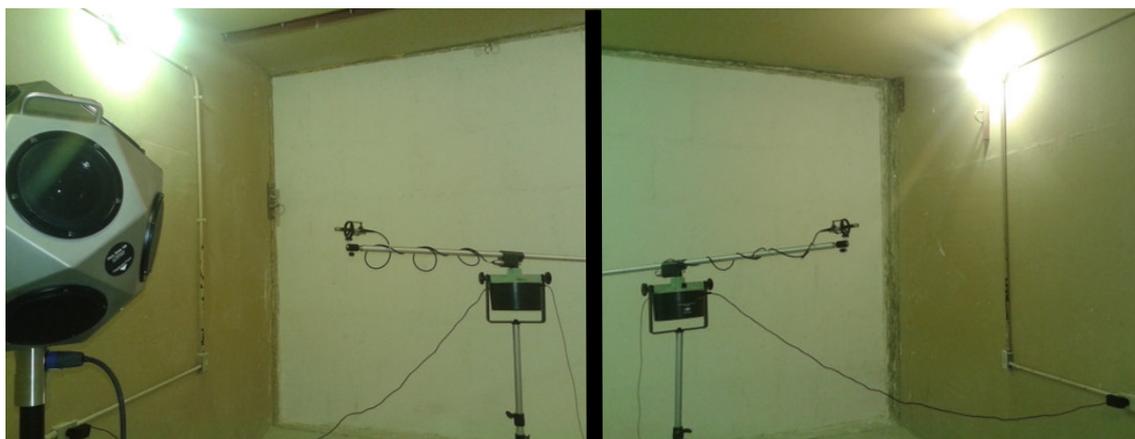
Os resultados da resistência à flexão dos blocos de gesso são então expressos em termos da carga de ruptura, quilonewtons (KN).

3.6. Análise acústica

A análise acústica consistiu na determinação de dois parâmetros de fundamental importância no isolamento acústico de elementos de vedação ao ruído aéreo: o tempo de reverberação estrutural (T_s) e o índice de redução sonora (R).

Visando caracterizar inicialmente os blocos de gesso comerciais, foram realizados ensaios de determinação do índice de redução sonora em blocos de gesso maciço, espessuras de 100mm, 70mm e 50mm e blocos de gesso vazado, espessuras de 100mm e 80mm. Os testes foram realizados no Laboratório de Engenharia Acústica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), conforme procedimentos descritos na ISO 10140-2 (2021) e os índices de redução sonora padronizados ponderados calculados conforme a norma ABNT NBR ISO 717-1 (2021). A Figura 35 ilustra as medições de perda de transmissão em câmara reverberante, emissão e recepção.

Figura 35 – Medição do índice de redução sonora (R) – Sala de emissão (esq.) e recepção (dir.)



Fonte: (Autor, 2022)

O tempo de reverberação estrutural e o índice de redução sonora foram medidos nas câmaras reverberantes para ensaio de isolamento sonora do laboratório de Ambiente Construído do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Pernambuco (ITEP).

As duas câmaras do laboratório, emissão e recepção, possuem volumes de 60m^3 e 67m^3 , respectivamente, e são separadas por um pórtico metálico móvel, desconectado das paredes por tubos isolantes de espuma elastomérica (borracha sintética de alta densidade).

As câmaras reverberantes foram executadas com paredes e lajes de concreto armado com 30cm de espessura e portas acústicas (1,50m x 2,50m), vedadas com

borracha em todo o seu contorno e fechada sob pressão, garantindo uma boa estanqueidade.

A câmara reverberante foi executada de forma que as paredes não fossem paralelas, e difusores acústicos foram instalados nas paredes e tetos, promovendo um campo difuso.

Toda estrutura da câmara é apoiada sobre amortecedores elásticos (neoprene), os quais transferem a carga da estrutura para os pilares de apoio e estes para a fundação, evitando que vibrações externas possam interferir nos resultados.

As paredes ensaiadas (amostras), com dimensões de 3,90x2,60m, foram executadas em pórticos metálicos fora da câmara, e após adquirirem a resistência necessária foram levadas para o local de teste. As paredes submetidas aos testes não possuíam revestimento, sendo caracterizado exclusivamente o bloco de gesso.

A parede executada com os blocos de gesso padrão (BPA) foi a primeira a ser submetida aos testes para obtenção do tempo de reverberação estrutural (T_s) e do índice de redução sonora (R).

A parede BPA foi então revestida com emulsão elástica Viapol Antirruído, produto a base de asfalto, composto com cargas de borracha reciclada e emulsionado em água. A emulsão foi aplicada em duas demãos, tendo um consumo média de $3,55\text{kg/m}^2$ e proporcionando uma espessura média de 2,0mm. Os testes foram então realizados para obtenção do tempo de reverberação estrutural (T_s) e do índice de redução sonora (R), estando a face emulsionada voltada para o ambiente de emissão.

A parede BPA revestida com emulsão recebeu então a segunda parede, tornando-se uma parede dupla com separação viscoelástica, sendo essa nova vedação submetida aos mesmos testes.

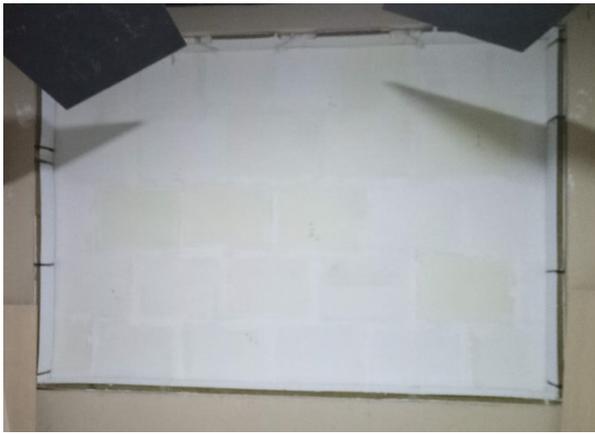
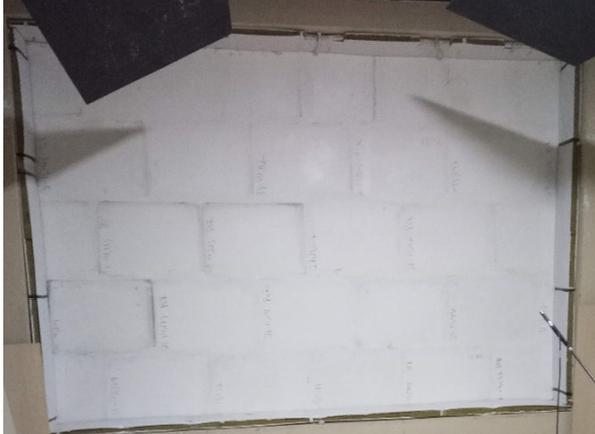
Os testes então seguiram com as paredes executadas com os blocos de gesso compósitos de perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina.

A parede com os blocos de gesso acústico foi executada na sequência, e submetida aos testes para obtenção do tempo de reverberação estrutural (T_s) e do índice de redução sonora (R). Visando aumentar a massa da parede, foi aplicado revestimento em pasta de gesso com espessura de 25mm em cada face, totalizando uma parede com 100mm de espessura, que foi submetida aos mesmos testes.

Os testes para obtenção do tempo de reverberação estrutural (T_s) e do índice de redução sonora (R) são ilustradas na Figura 36.

Figura 36 – Amostras submetidas aos ensaios de determinação do tempo de reverberação estrutural (T_s) e índice de redução sonora (R)

	
<p>Parede em bloco de gesso maciço (50mm)</p>	<p>Parede em bloco de gesso maciço (50mm) e revestimento com emulsão elástica</p>
	
<p>Parede dupla com bloco de gesso maciço (50mm) e revestimento com emulsão elástica</p>	<p>Parede em bloco de gesso maciço compósito de perlita natural (50mm)</p>

	
<p>Parede em bloco de gesso maciço compósito de perlita expandida (50mm)</p>	<p>Parede em bloco de gesso maciço compósito de vermiculita (50mm)</p>
	
<p>Parede em bloco de gesso maciço compósito de alumina (50mm)</p>	<p>Parede em bloco de gesso maciço com placa de lã de rocha (50mm)</p>

3.6.1. Tempo de reverberação estrutural

O teste de caracterização do tempo de reverberação estrutural (T_s) foi realizado medindo-se experimentalmente o nível de aceleração, sendo adaptado o procedimento descrito na norma ISO 10848-1 (2017).

O tempo de reverberação estrutural (T_s) é obtido pelo decaimento de 60dB no nível de aceleração após interrupção de uma excitação estrutural. Sendo o decaimento uma curva linear, o T_s pode ser obtido para decaimentos menores e extrapolado para os 60dB.

Para obtenção do nível de aceleração foi utilizado uma marreta de aço de 0,5kg (Figura 37), um acelerômetro piezoelétrico modelo 4507 da Bruel & Kjaer (Figura 38) e um medidor de Nível de Pressão Sonora (MNPS) modelo 2270 da

Bruel & Kjaer (Figura 39). Os dados para obtenção do nível de aceleração foram compilados e tratados em software desenvolvido e fornecido pela Bruel & Kjaer.

Figura 37 – Marreta de aço (0,5kg)



Fonte: O autor (2020).

Figura 38 – Acelerômetro piezoelétrico modelo 4507 (Bruel & Kjaer)



Fonte: O autor (2020).

Figura 39 – Medidor de Nível de Pressão Sonora (MNPS) modelo 2270 (Bruel & Kjaer)



Fonte: O autor (2020).

A excitação estrutural da vedação foi realizada com a marreta de aço (0,5kg) e a resposta do impulso captada pelo acelerômetro, conectado ao analisador e fixado à vedação com cera de abelha.

As medições foram realizadas nas vedações posicionadas dentro da câmara reverberante, não havendo conexão rígida da amostra com as paredes das câmaras.

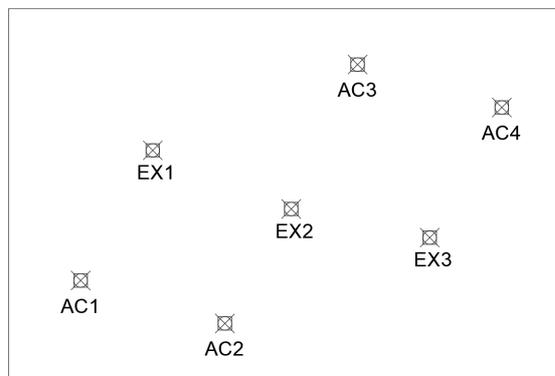
As paredes foram testadas em 24 pontos, sendo 12 pontos em cada lado. A face voltada para a câmara de emissão foi chamada de Lado 01 e a face voltada para a câmara de recepção foi chamada de Lado 02. Os 12 pontos de medição foram obtidos com 4 posições de acelerômetro e 3 pontos de excitação.

A posição dos acelerômetros e os pontos de impacto obedeceram as seguintes distâncias mínimas:

- 0,5m entre pontos de medição e limites da amostra;
- 1,0m entre o posicionamento do acelerômetro e o ponto de excitação;
- 0,5m entre os posicionamentos do acelerômetro;
- 0,5m entre os pontos de impacto.

O mapa de pontos de medição é ilustrado na Figura 40, identificando o posicionamento dos acelerômetros (AC) e os pontos de excitação (EX).

Figura 40 – Mapa dos pontos de medição



As medições com o analisador, modelo 2270, permitiram a obtenção da aceleração em função do tempo, sendo então aplicada a Equação (14) para transformação em nível de aceleração (L_a).

$$L_a = 10 \log \left(\frac{a^2}{a_0^2} \right) \quad (14)$$

Onde,

L_a – nível de aceleração (dB)

a – aceleração (m/s^2)

a_0 – Aceleração de referência ($a_0 = 1 \times 10^{-6} m/s^2$)

Aplicada a Equação (14), o tempo de reverberação estrutural (T_s) é obtido pelo decaimento de 60dB no nível de aceleração. Contudo, foi utilizado a extrapolação linear para decaimentos de 20dB, uma vez o decaimento obtido graficamente foi sempre superior a este valor.

Para os decaimentos de 20dB foi obtida uma linha de tendência reta, e então aplicada a equação da reta para o decaimento de 60dB, obtendo-se assim o tempo de reverberação estrutural (T_s).

O resultado experimental do tempo de reverberação estrutural (T_s) da amostra foi obtido pela média aritmética dos valores obtidos em cada uma das 24 medições.

3.6.2. Perda de transmissão sonora

A parcela de energia sonora não transmitida de um ambiente para outro, retira por um obstáculo, é chamada de coeficiente de transmissão (τ) (Bies e Hansen, 2009). A perda de transmissão sonora ou transmission loss é então função do coeficiente de transmissão, apresentado na Equação (16):

$$TL = -10 \log_{10} \tau \quad (16)$$

Onde,

TL – Perda de transmissão (Transmission Loss);

τ – Coeficiente de transmissão (τ);

A perda de transmissão sonora experimental foi medida em laboratório, nas câmaras reverberantes do ITEP, e seguiram os procedimentos descritos na norma internacional ISO 10140-2 (2021):

- Medição de emissão: na sala de emissão (maior volume) foram realizadas 10 medições, sendo duas posições de fonte e 5 posições de microfone para cada posição de fonte;
- Medição de recepção: na sala de recepção (menor volume) foram realizadas 10 medições, sendo duas posições de fonte e 5 posições de microfone para cada posição de fonte;
- Ruído residual (ruído de fundo): o ruído residual foi medido na sala de recepção nos mesmos 5 pontos onde foram realizadas as medições de recepção;
- Tempo de reverberação (TR): o tempo de reverberação foi medido em três pontos na sala de recepção, sendo duas medições para cada ponto, num total de seis tempos de reverberação.

As medições no nível de pressão sonora de emissão, recepção e ruído de fundo tiveram duração de 15 segundos, tempo mínimo preconizado na ISO 10140-2 (2021) e foram medidos em bandas de 1/3 de oitava, no intervalo de frequência entre 50Hz e 10.000Hz.

Os resultados foram então compilados no software do equipamento, fornecendo o índice de redução sonora em cada banda de frequência e o índice de redução sonora ponderado (R_w).

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise dos resultados foi dividida em duas etapas: análise física e mecânica dos materiais e compósitos; e análise acústica das vedações, sendo posteriormente estabelecida uma correlação entre as propriedades mecânicas e acústicas.

4.1. Análise física e mecânica

O gesso e os compósitos tiveram o pó caracterizados por determinação da massa unitária, enquanto que as características da pasta foram determinadas por testes de densidade, consistência normal e tempo de pega. Já os ensaios mecânicos caracterizaram a dureza, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade dinâmico. As alterações microestruturais foram analisadas por imagens de MEV.

4.1.1. Massa unitária

A massa unitária do gesso, da perlita natural, da perlita expandida, da vermiculita e da alumina foi determinada em laboratório. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no teste de massa unitária para cada um dos materiais analisados, gesso padrão e compósitos.

Tabela 2 – Resultados de determinação da massa unitária dos materiais analisados

Amostra	Medição	Massa da amostra (g)	Volume do recipiente (cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Massa unitária média (g/cm ³)
Gesso	1	5429	7530	0,721	0,719
	2	5393	7530	0,716	
Perlita natural	1	9061	7530	1,203	1,197
	2	8971	7530	1,191	
Perlita expandida	1	489	7530	0,065	0,065
	2	497	7530	0,066	
Vermiculita	1	1347	7530	0,179	0,179
	2	1350	7530	0,179	
Alumina	1	7471	7530	0,992	0,993
	2	7488	7530	0,995	

Fonte: O autor (2020).

Os resultados apresentados Tabela 2 mostram que a perlita expandida e a vermiculita são compósitos mais leves que o gesso, enquanto que a perlita natural e a alumina são compósitos mais densos.

Com esta caracterização é possível estabelecer duas linhas de análise no estudo de isolamento sonora dos blocos compósitos: elementos de gesso mais leves que o padrão (compósitos de perlita expandida e vermiculita) e elementos mais densos que o gesso padrão (compósitos de perlita natural e alumina).

4.1.2. Consistência normal e tempo de pega

O teste de consistência normal e o tempo de pega da pasta de gesso e compósitos foi realizado conforme procedimentos descritos na norma ABNT NBR 12128 (ABNT, 2017).

O teste de consistência normal foi realizado com objetivo de estabelecer a massa de gesso necessária para o ensaio de tempo de pega, sendo obtido a pasta de consistência normal do gesso com relação a/g de 0,42.

A pasta de consistência normal, relação a/g de 0,42, foi mantida no ensaio de tempo de pega da pasta de gesso e dos compósitos, sendo utilizado adições de 5% de perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina na pasta de gesso dos materiais compósitos.

O tempo de início e fim pega da pasta de gesso e compósitos são apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3 – Resultados de determinação do tempo de início de pega dos materiais analisados

Amostra	Medição	Tempo de início de pega (s)	Tempo médio de início de pega (min)
Gesso	1	590	9,79
	2	585	
Perlita natural	1	740	12,31
	2	737	
Perlita expandida	1	585	9,54
	2	560	
Vermiculita	1	550	9,21
	2	553	
Alumina	1	720	11,79
	2	695	

Fonte: O autor (2020).

Tabela 4 – Resultados de determinação do tempo de fim de pega dos materiais analisados

Amostra	Medição	Tempo de fim de pega (s)	Tempo médio de fim de pega (min)
Gesso	1	1160	18,92
	2	1110	
Perlita natural	1	1110	18,75
	2	1140	
Perlita expandida	1	960	15,88
	2	945	
Vermiculita	1	960	15,96
	2	955	
Alumina	1	1170	19,08
	2	1120	

Fonte: O autor (2020).

A norma ABNT NBR 13207 (ABNT, 2017) estabelece que, para o gesso de fundição, o tempo de início de pega deve ser menor que 10 minutos e o tempo de fim de pega não deve ultrapassar 20 minutos.

A pasta de gesso padrão atende aos critérios da referida norma, tanto para início quanto fim de pega, sendo considerado um gesso padrão.

Os compósitos de gesso com adição de perlita expandida e vermiculita, materiais granulares e porosos, apresentaram tempo de início de pega levemente menores. Já o tempo de fim de pega deste compósitos foi menor que a pasta de gesso padrão. Isso mostra que a adição de perlita expandida e vermiculita acelera o endurecimento da pasta de gesso, o que pode ser considerado um ganho na produção de elementos pré-moldados, pois reduz o tempo de desmoldagem.

Os compósitos de perlita natural e alumina apresentaram tempo de início de pega mais elevados, acima do tempo máximo estabelecido na norma ABNT NBR 13207 (ABNT, 2017). Porém, o tempo de fim de pega nos dois compósitos ficou abaixo do tempo máximo estabelecido, e muito próximo da pasta de gesso padrão. Assim, pode-se concluir que os compósitos de perlita natural e alumina demoram um pouco mais para iniciar o endurecimento, mas isso não comprometendo o tempo de desmoldagem.

4.1.3. Densidade

A densidade das amostras de pasta de gesso padrão e compósitos foi determinada pela relação entre a massa e o volume dos corpos de provas cúbicos de 50x50x50mm. O resultado da densidade dos 30 corpos de prova utilizados no teste foram submetidos à análise de valores outliers, sendo obtido a densidade média sem interferência de resultados considerados atípicos.

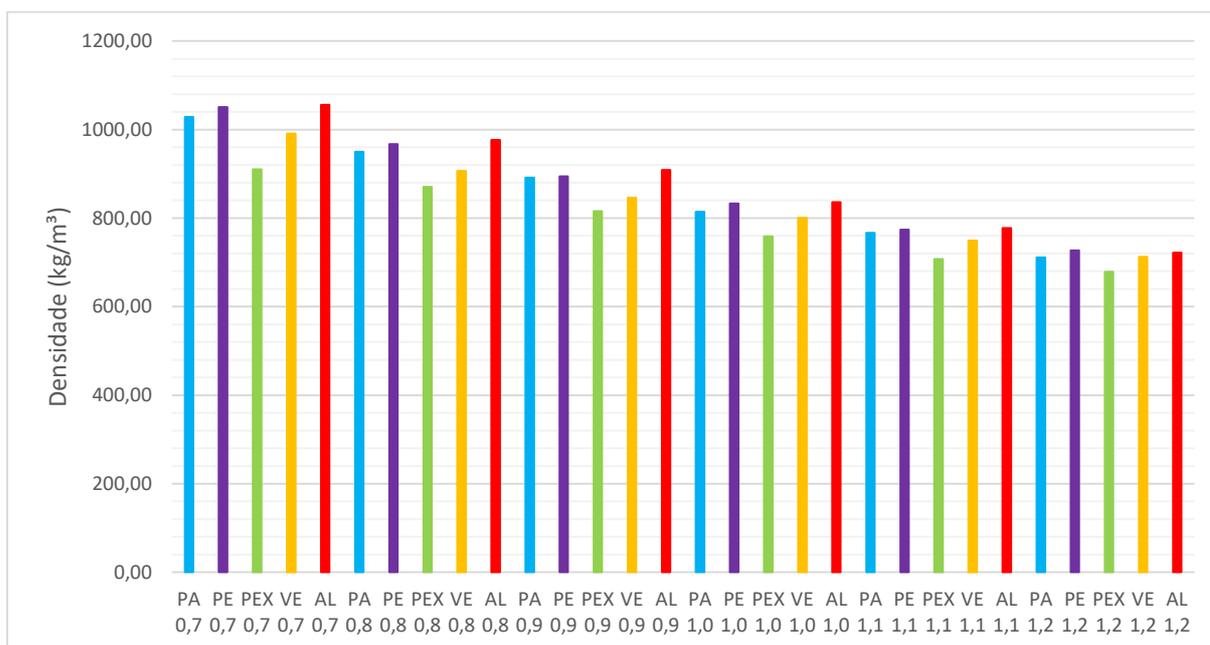
A Tabela 5 apresenta a densidade média das amostras analisadas e classificação conforme critérios da norma ABNT NBR 16494 (2017), enquanto a Figura 41 apresenta graficamente a densidade média das amostras agrupadas por relação água/gesso.

Tabela 5 – Densidade média

Amostra/ Compósito	Relação Água/Gesso	Densidade média (kg/m³)	Desvio Padrão (kg/m³)	Coefficiente de variação (%)	Classificação
Gesso (Padrão)	0,7	1028,40	13,9	1,4	Média densidade
	0,8	949,79	9,2	1,0	Média densidade
	0,9	891,60	23,7	2,7	Média densidade
	1,0	814,14	6,6	0,8	Média densidade
	1,1	766,44	18,7	2,4	Baixa densidade
	1,2	711,19	8,6	1,2	Baixa densidade
Perlita natural	0,7	1051,25	5,4	0,5	Média densidade
	0,8	967,17	6,8	0,7	Média densidade
	0,9	894,09	5,3	0,6	Média densidade
	1,0	832,82	4,4	0,5	Média densidade
	1,1	774,10	4,2	0,5	Baixa densidade
	1,2	727,17	6,1	0,8	Baixa densidade
Perlita expandida	0,7	909,96	17,0	1,9	Média densidade
	0,8	870,28	12,1	1,4	Média densidade
	0,9	815,61	13,3	1,6	Média densidade
	1,0	759,03	12,1	1,6	Baixa densidade
	1,1	707,67	16,3	2,3	Baixa densidade
	1,2	678,61	13,5	2,0	Baixa densidade
Vermiculita	0,7	991,35	13,3	1,3	Média densidade
	0,8	906,90	5,2	0,6	Média densidade
	0,9	845,89	8,2	1,0	Média densidade
	1,0	800,75	5,7	0,7	Média densidade
	1,1	749,60	6,0	0,8	Baixa densidade
	1,2	712,57	8,3	1,2	Baixa densidade
Alumina	0,7	1056,01	7,8	0,7	Média densidade
	0,8	976,41	7,2	0,7	Média densidade
	0,9	908,82	5,2	0,6	Média densidade
	1,0	835,96	7,7	0,9	Média densidade
	1,1	777,75	9,2	1,2	Baixa densidade
	1,2	722,11	9,8	1,4	Baixa densidade

Fonte: O autor (2020).

Figura 41 – Densidade média da pasta de gesso e compósitos



Fonte: (Autor, 2022)

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que o aumento na relação a/g reduz a densidade da pasta de gesso, sendo, em geral, a partir da relação 1,1 que a pasta atinge a baixa densidade.

Apesar da massa específica da perlita natural e da alumina serem maiores que do gesso, a adição de 5% na massa do gesso proporcionou aumentos menores que 3% na densidade dos compósitos.

A adição de vermiculita, material de massa específica menor que o gesso, também não proporcional redução significativa na densidade do compósito, obtendo-se uma redução máxima de 5%. Já o compósito com adição de perlita expandida, material com menor massa específica, mostrou ser o mais eficiente na diminuição da densidade, apresentando reduções entre 5% e 11% quando comparado com a pasta de gesso padrão.

O desvio padrão e coeficiente de variação, apresentados na Tabela 5, mostram uma boa homogeneidade nos resultados, visto que o coeficiente de variação não chegou a 3%.

4.1.4. Dureza

A dureza da pasta de gesso foi determinada conforme procedimentos descritos na norma ABNT NBR 12129 (ABNT, 2017), sendo no entanto utilizado as relações água/gesso pré-estabelecidas neste trabalho.

Assim como na densidade, o ensaio de dureza foi realizado nos corpos de prova cúbicos de 50x50x50mm, em amostras de pasta de gesso padrão e compósitos. O resultado de dureza dos 30 corpos de prova utilizados no teste foram submetidos à análise de valores outliers, sendo obtido a dureza média sem interferência de resultados considerados atípicos.

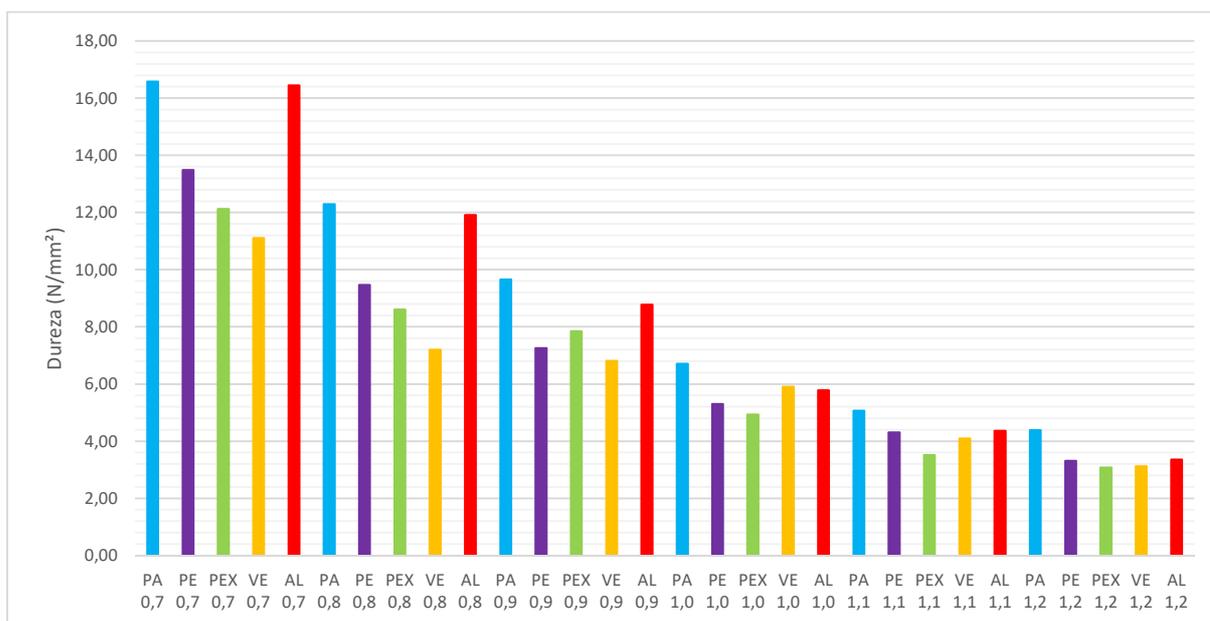
A Tabela 6 apresenta a dureza média das amostras analisadas, enquanto a Figura 42 apresenta graficamente a dureza média das amostras agrupadas por relação água/gesso.

Tabela 6 – Dureza média

Amostra/ Compósito	Relação Água/Gesso	Dureza média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Gesso (Padrão)	0,7	16,58	0,87	5,3
	0,8	12,29	1,22	9,9
	0,9	9,66	1,39	14,4
	1,0	6,71	0,55	8,1
	1,1	5,07	0,43	8,5
	1,2	4,38	0,77	17,6
Perlita natural	0,7	13,49	0,84	6,2
	0,8	9,47	0,58	6,1
	0,9	7,26	0,41	5,6
	1,0	5,31	0,00	0,0
	1,1	4,30	0,15	3,6
	1,2	3,31	0,19	5,8
Perlita expandida	0,7	12,13	2,48	20,5
	0,8	8,61	0,92	10,7
	0,9	7,85	1,18	15,0
	1,0	4,93	0,61	12,4
	1,1	3,52	0,33	9,4
	1,2	3,08	0,18	5,9
Vermiculita	0,7	11,11	1,55	14,0
	0,8	7,20	1,24	17,2
	0,9	6,81	0,88	12,9
	1,0	5,91	0,26	4,3
	1,1	4,10	0,30	7,4
	1,2	3,12	0,18	5,9
Alumina	0,7	16,46	1,10	6,7
	0,8	11,92	0,43	3,6
	0,9	8,77	1,04	11,9
	1,0	5,78	0,44	7,6
	1,1	4,36	0,21	4,9
	1,2	3,36	0,33	9,7

Fonte: O autor (2020).

Figura 42 – Dureza média da pasta de gesso e compósitos



Fonte: (Autor, 2022)

Os resultados apresentados na Tabela 6 e na Figura 42 mostram que a dureza da pasta de gesso e compósitos é reduzida com o aumento na relação água/gesso.

Todas as adições utilizadas reduziram a dureza da pasta. No entanto, em baixas relações água/gesso, 0,7 e 0,8, a adição de alumina pouco impactou na dureza da pasta. Nas demais relações a redução foi bem mais significativa, superando 20%.

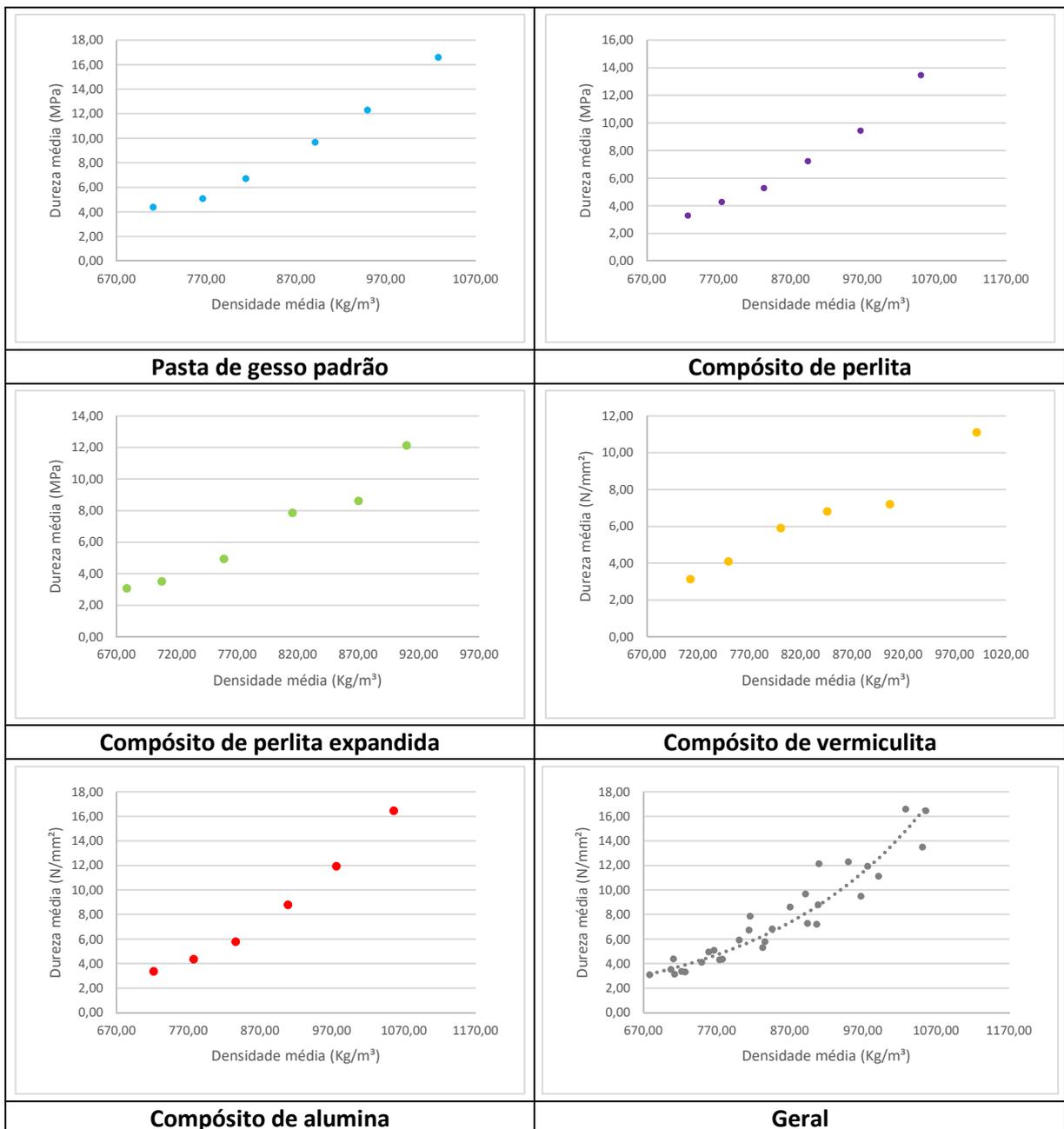
A adição de perlita natural apresentou reduções entre 15% e 25% na dureza da pasta de gesso, em relação ao gesso padrão. Já a perlita expandida apresentou uma redução mais constante, em torno de 30%, exceto a relação água/gesso de 0,9 cuja redução foi de 19%.

A adição de vermiculita, em comparação com a pasta de gesso padrão, apresentou uma significativa variação nos resultados, não permitindo uma correlação com as relações água/gesso analisadas. A redução variou entre 12% (relação 1,0) e 42% (relação 0,8).

O desvio padrão e coeficiente de variação, apresentados na Tabela 6, mostram uma significativa variação nos resultados, estando 1/3 das amostras analisadas com coeficiente de variação acima de 10%. As adições de Perlita expandida e vermiculita, materiais granulares e mais leves, foram os que apresentaram maior variação de resultados.

A correlação da dureza média com a densidade média de todas amostras analisadas é apresentada na Figura 43, mostrando que a dureza cresce exponencialmente com o aumento da densidade, tanto na pasta de gesso padrão como nos compósitos.

Figura 43 – Relação entre dureza média e densidade média



4.1.5. Resistência à compressão

A resistência à compressão da pasta de gesso foi determinada conforme procedimentos descritos na norma ABNT NBR 12129 (ABNT, 2017), sendo no entanto utilizado as relações água/gesso pré-estabelecidas neste trabalho.

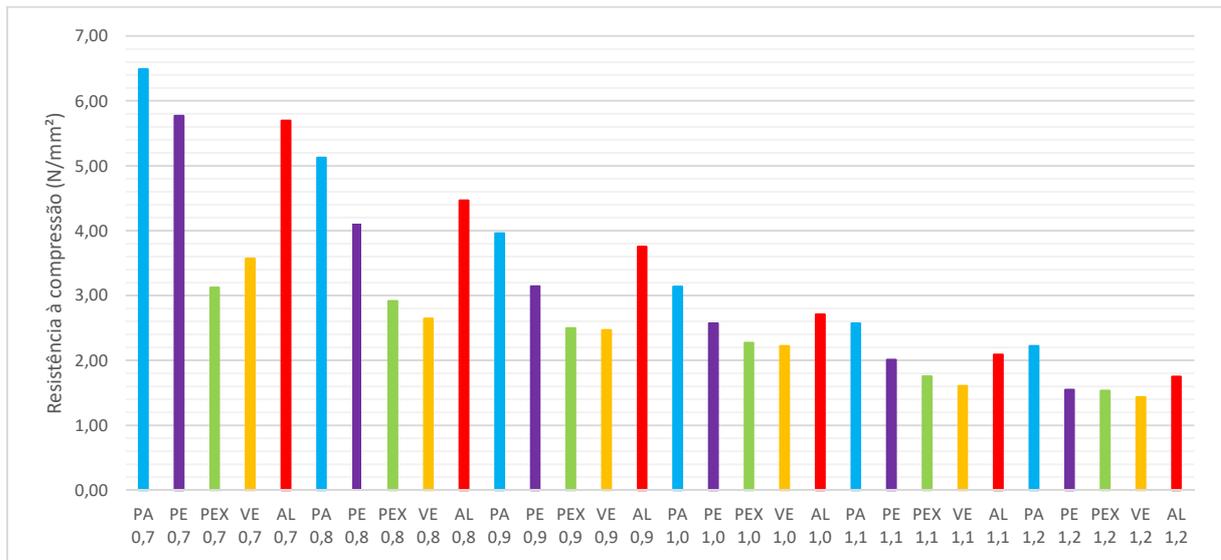
O ensaio de resistência à compressão também foi realizado nos corpos de prova cúbicos de 50x50x50mm, em amostras de pasta de gesso padrão e compósitos. O resultado dos 30 corpos de prova utilizados no teste foram submetidos à análise de valores outliers, sendo obtido a resistência média sem interferência de resultados considerados atípicos.

A Tabela 7 apresenta a resistência à compressão média das amostras analisadas e a Figura 44 apresenta graficamente a resistência à compressão média das amostras agrupadas por relação água/gesso.

Tabela 7 – Resistência à compressão média

Amostra/ Compósito	Relação Água/Gesso	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Gesso (Padrão)	0,7	6,49	0,69	10,7
	0,8	5,13	0,79	15,4
	0,9	3,96	0,42	10,6
	1,0	3,14	0,30	9,7
	1,1	2,57	0,39	15,0
	1,2	2,23	0,31	13,7
Perlita natural	0,7	5,77	0,40	6,9
	0,8	4,10	0,33	8,0
	0,9	3,14	0,29	9,1
	1,0	2,57	0,26	10,0
	1,1	2,01	0,15	7,5
	1,2	1,55	0,11	6,9
Perlita expandida	0,7	3,12	0,24	7,6
	0,8	2,92	0,25	8,5
	0,9	2,50	0,18	7,0
	1,0	2,27	0,18	8,1
	1,1	1,76	0,10	5,9
	1,2	1,53	0,13	8,8
Vermiculita	0,7	3,57	0,45	12,6
	0,8	2,65	0,28	10,5
	0,9	2,47	0,31	12,7
	1,0	2,23	0,12	5,5
	1,1	1,61	0,13	7,9
	1,2	1,44	0,14	10,0
Alumina	0,7	5,70	0,63	11,0
	0,8	4,47	0,33	7,3
	0,9	3,75	0,31	8,3
	1,0	2,71	0,21	7,9
	1,1	2,09	0,14	6,6
	1,2	1,75	0,12	6,9

Fonte: O autor (2020).

Figura 44 – Resultados da resistência à compressão média da pasta de gesso e compósitos

Fonte: (Autor, 2022)

Os resultados apresentados na Tabela 7 e na Figura 44 mostram que, de forma geral, a resistência à compressão da pasta de gesso e compósitos é reduzida com o aumento na relação água/gesso, e todas as adições utilizadas reduzem a resistência à compressão.

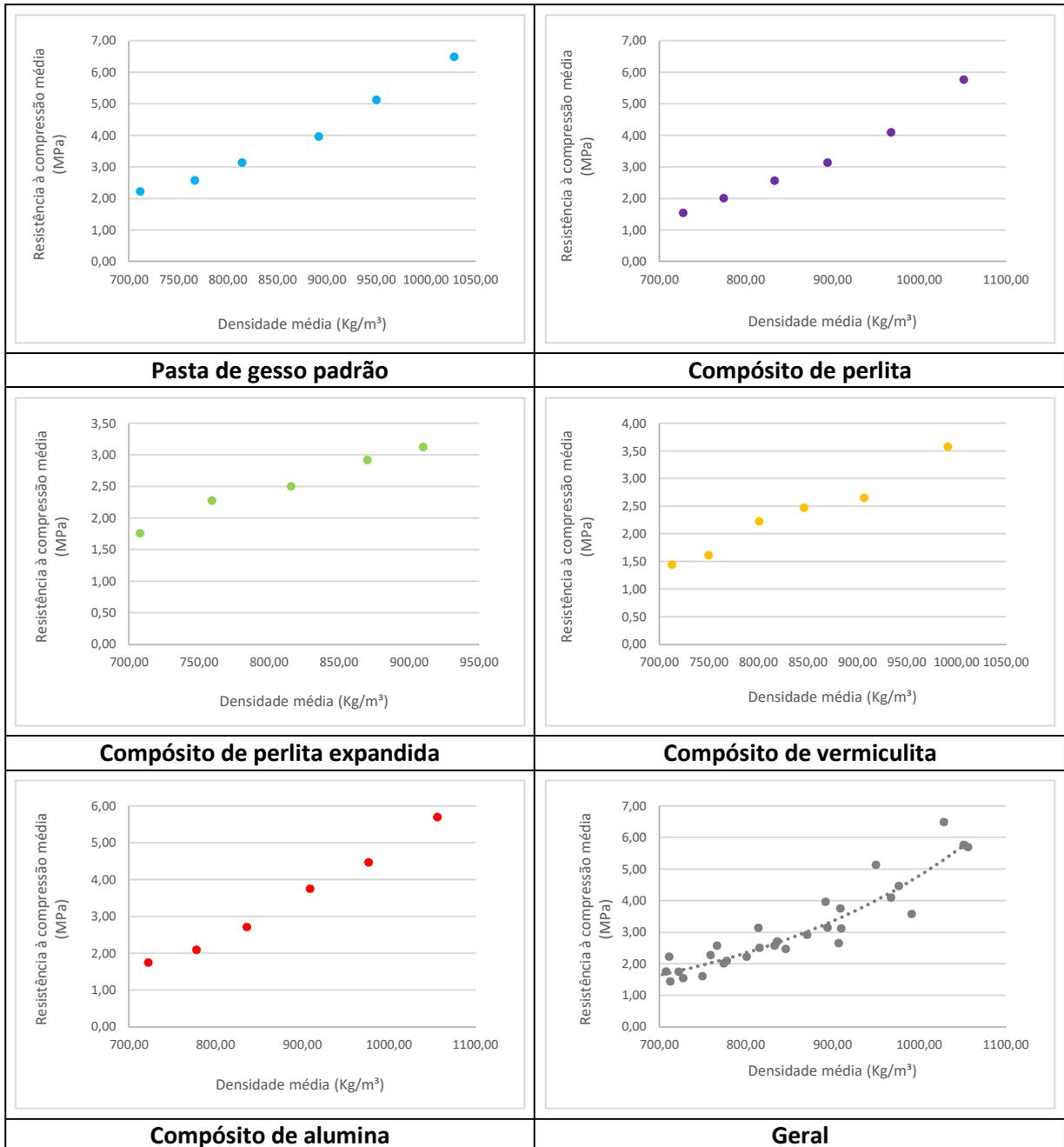
O compósito com adição de alumina apresentou a menor redução na resistência à compressão da pasta de gesso, variando entre 5% e 20%. Já a adição de perlita natural reduziu a resistência entre 10% e 30%.

As adições de perlita expandida e vermiculita, materiais granulares e porosos, apresentaram a maior redução na resistência à compressão, variando entre 30% e 50%.

O desvio padrão de todas amostras analisadas foi menor que 0,8MPa. Contudo, o coeficiente de variação das amostras de pasta de gesso padrão e compósito de vermiculita apresentaram resultados acima de 10% na maior parte das relações água/gesso analisadas, mostrando uma significativa variação nos resultados.

A correlação da resistência à compressão média com a densidade média de todas amostras analisadas é apresentada na Figura 45, mostrando que a resistência à compressão cresce exponencialmente com o aumento da densidade, tanto na pasta de gesso padrão como nos compósitos. A exceção ocorre nos compósitos de perlita expandida e vermiculita, que dentro da densidade analisadas possuem uma correlação linear.

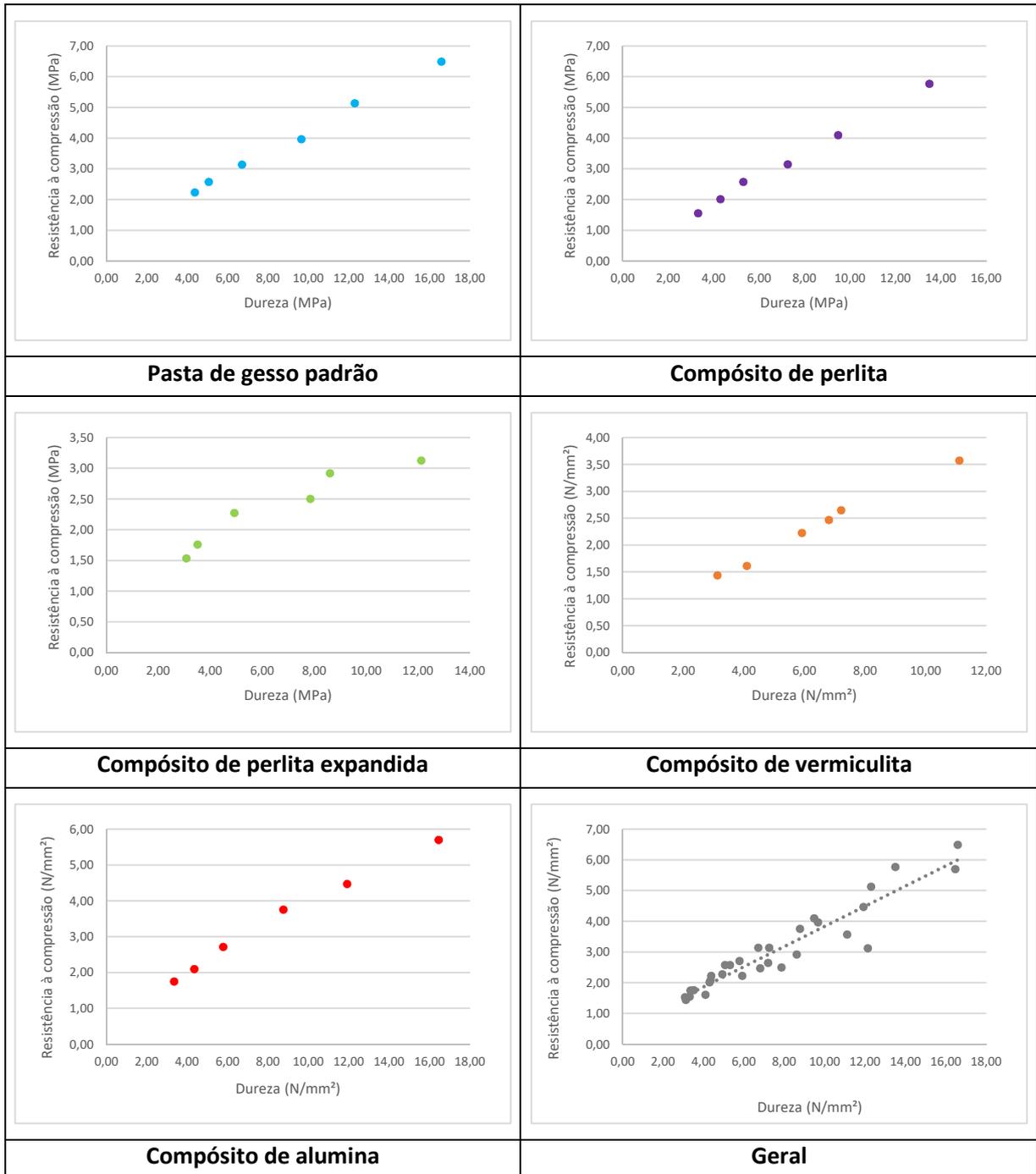
Figura 45 – Relação entre resistência à compressão média e densidade média



A resistência à compressão foi ainda correlacionada com a dureza das amostras (Figura 46), mostrando que os compósitos não alteram o comportamento mecânico da pasta de gesso, visto que a resistência à compressão cresce linearmente com o aumento da dureza.

Destaca-se o fato dos compósitos de perlita expandida e vermiculita não apresentarem o mesmo comportamento das demais amostras, haja vista que as propriedades de resistência à compressão e dureza destes compósitos, analisadas em função da relação água/gesso, não seguiram o padrão dos demais. Isso pode ser atribuído à variabilidade nos resultados destes compósitos.

Figura 46 – Relação entre resistência à compressão média e dureza média



4.1.6. Resistência à tração na flexão (160x40x40)

Na atual normatização brasileira, não há exigências de resistência à flexão para pasta de gesso. Contudo, visando analisar o influências das adições na pasta de gesso padrão, adotou-se os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 13279 (ABNT, 2005), aplicável à argamassas para assentamento e revestimento.

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados nos corpos de prova prismáticos de 160x40x40mm, em amostras de pasta de gesso padrão e compósitos. O resultado dos 30 corpos de prova utilizados no teste foram submetidos à análise de valores outliers, sendo obtido a resistência média sem interferência de resultados considerados atípicos.

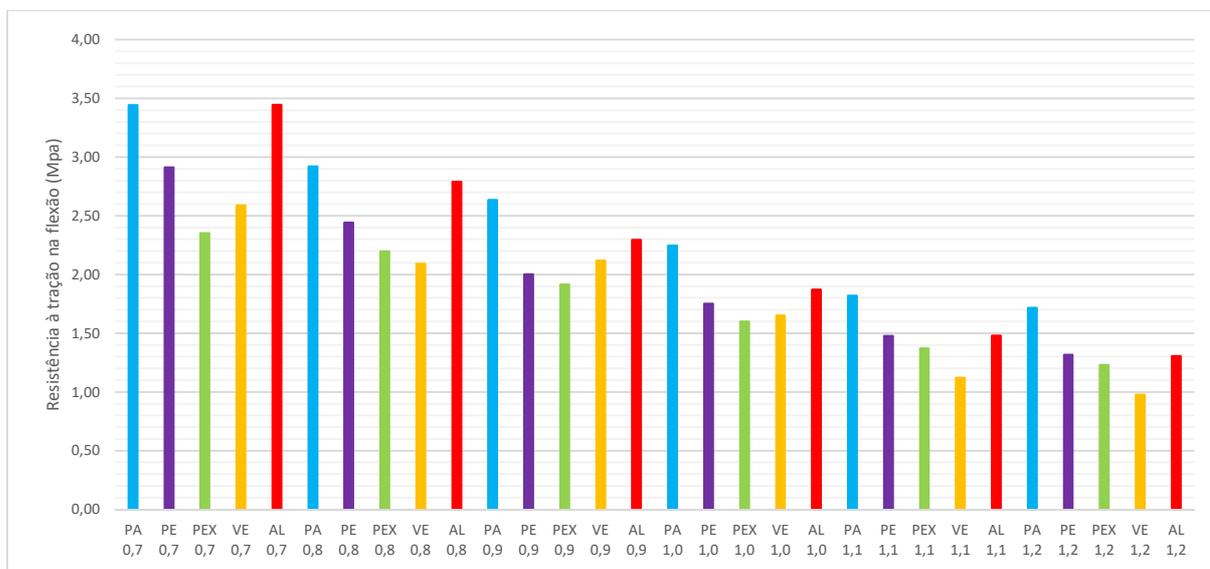
A Tabela 8 apresenta os resultados médios de resistência à tração na flexão das amostras analisadas, e a Figura 47 apresenta graficamente a resistência à tração média das amostras agrupadas por relação água/gesso.

Tabela 8 – Resistência à tração na flexão média

Amostra/ Compósito	Relação Água/Gesso	Resistência à tração média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Gesso (Padrão)	0,7	3,44	0,40	11,5
	0,8	2,92	0,28	9,7
	0,9	2,63	0,20	7,6
	1,0	2,25	0,18	8,2
	1,1	1,82	0,14	7,9
	1,2	1,72	0,23	13,4
Perlita natural	0,7	2,91	0,18	6,1
	0,8	2,44	0,11	4,3
	0,9	2,00	0,09	4,3
	1,0	1,75	0,12	6,8
	1,1	1,48	0,12	7,9
	1,2	1,32	0,10	7,3
Perlita expandida	0,7	2,35	0,17	7,2
	0,8	2,20	0,16	7,3
	0,9	1,91	0,08	4,3
	1,0	1,60	0,08	5,2
	1,1	1,37	0,09	6,4
	1,2	1,23	0,08	6,4
Vermiculita	0,7	2,59	0,16	6,0
	0,8	2,09	0,16	7,4
	0,9	2,12	0,16	7,5
	1,0	1,65	0,12	7,3
	1,1	1,12	0,06	4,9
	1,2	0,98	0,03	3,2
Alumina	0,7	3,44	0,31	9,0
	0,8	2,79	0,22	7,9
	0,9	2,30	0,21	9,1
	1,0	1,87	0,06	3,4
	1,1	1,48	0,08	5,4
	1,2	1,31	0,08	6,2

Fonte: O autor (2020).

Figura 47 – Resultados da resistência à tração na flexão média da pasta de gesso e compósitos



Fonte: (Autor, 2022)

Os resultados apresentados na Tabela 8 e na Figura 47 mostram que, de forma geral, a resistência à flexão da pasta de gesso e compósitos é reduzida com o aumento na relação água/gesso, e todas as adições utilizadas reduzem a resistência à tração na flexão.

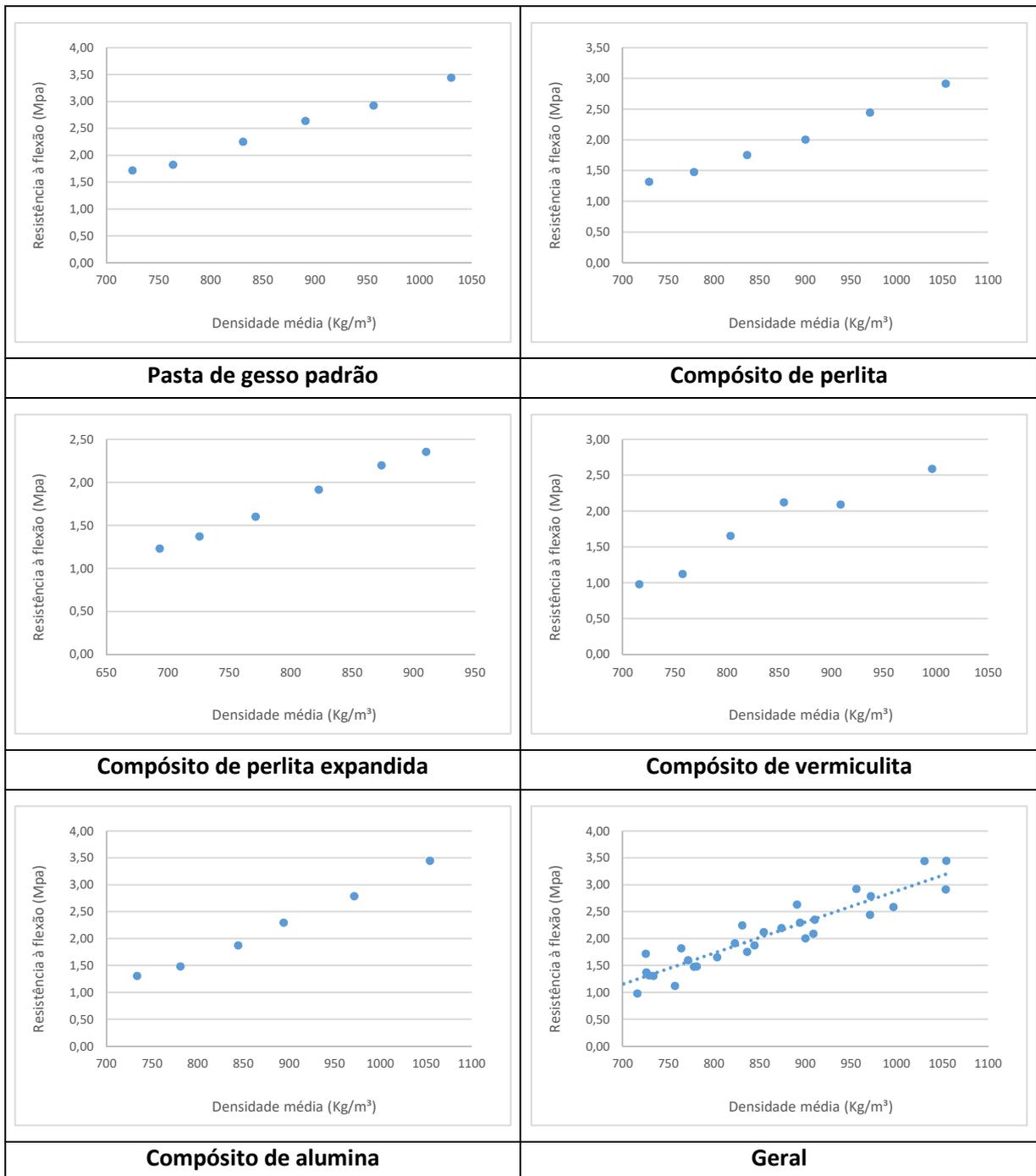
O compósito com adição de alumina apresentou a menor redução na resistência à flexão da pasta de gesso, variando entre 1% e 25%. Já a adição de perlita natural reduziu a resistência entre 15% e 25%.

As adições de perlita expandida e vermiculita, materiais granulares e porosos, apresentaram a maior redução na resistência à tração na flexão, variando entre 20% e 45% no compósito de vermiculita e entre 25% e 35% no compósito de perlita expandida.

O desvio padrão de todas amostras analisadas foi menor que 0,4Mpa e o coeficiente de variação, na maior parte das amostras analisadas, ficou abaixo de 10%, mostrando que o ensaio possui uma repetibilidade confiável.

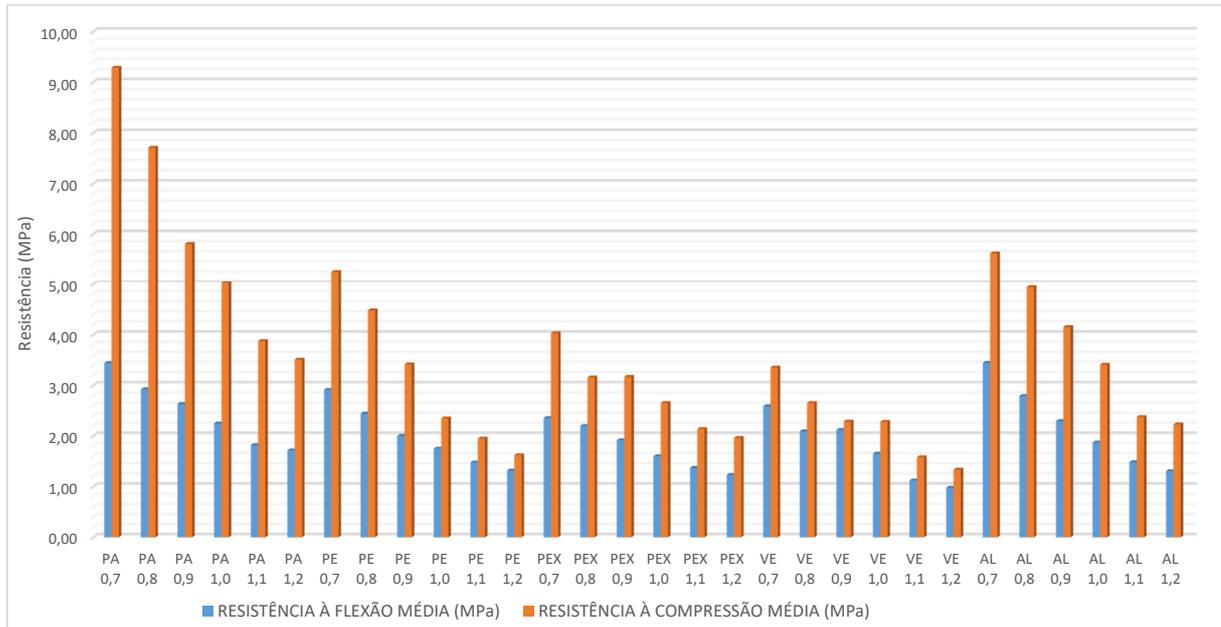
A correlação da resistência à flexão média com a densidade média de todas amostras analisadas é apresentada na Figura 48, mostrando que, no intervalo de densidade analisado, a resistência à flexão cresce linearmente com o aumento da densidade, tanto na pasta de gesso padrão como nos compósitos.

Figura 48 – Relação entre resistência à tração na flexão média e densidade média



A Figura 49 apresenta a correlação entre as resistências à tração na flexão e compressão da pasta de gesso padrão e compósitos, agrupadas por relação água/gesso.

Figura 49 – Correlação entre resistência à compressão e resistência à tração



Fonte: (Autor, 2022)

A amostra padrão e os compósitos de perlita natural e alumina apresentaram comportamentos semelhantes, sendo a relação entre as resistências inversamente proporcional à relação água/gesso, ou seja, a diferença entre as resistências aumenta à medida que a relação a/g é diminuída.

Nas amostras padrão a relação variou entre 1,9 e 1,3; nas amostras de perlita natural variou entre 2,0 e 1,2; e nas amostras de alumina variou entre 1,7 e 1,2. Esses resultados mostram que as adições de perlita natural e alumina reduzem as resistências, mas não modificam as proporcionalidades do gesso padrão.

Já nas amostras de perlita expandida e vermiculita não foi possível estabelecer uma relação entre as resistências e a relação água/gesso. Tal conclusão permite afirmar que estas adições modificam as propriedades mecânicas do gesso de tal forma, que suas resistências à tração na flexão e compressão deixam de ser correlacionáveis.

4.1.7. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido utilizando-se os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 15630 (ABNT, 2008), aplicável à argamassas para assentamento e revestimento.

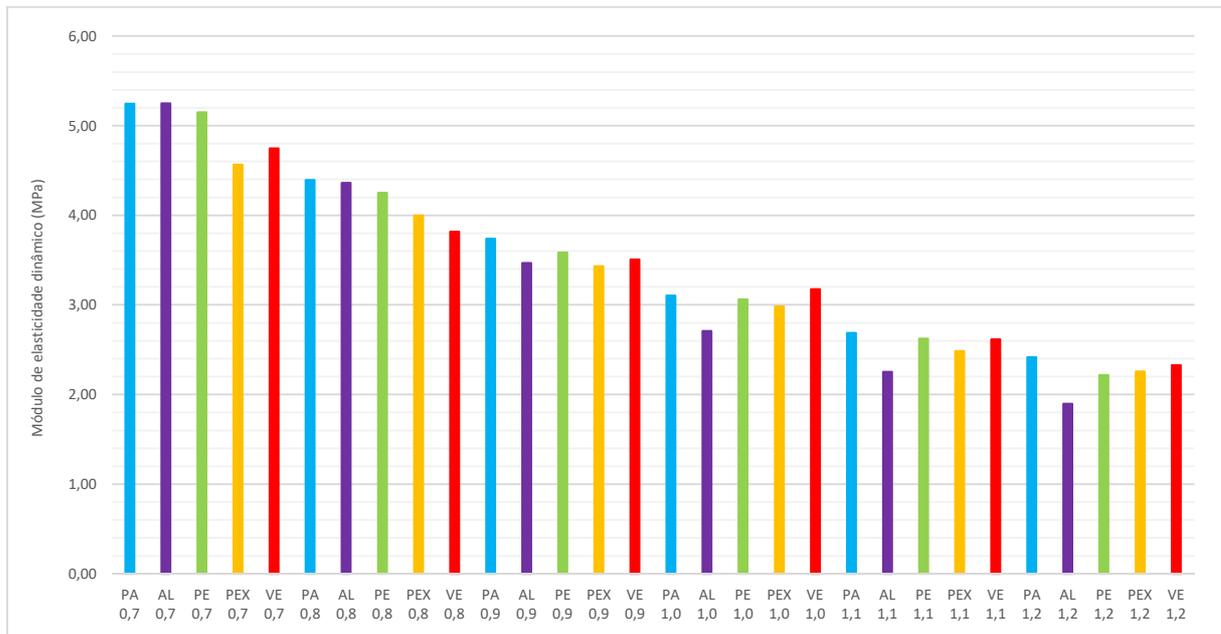
O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido a partir de testes realizados nos corpos de prova cúbicos de 50x50x50mm, em amostras de pasta de gesso padrão e compósitos. O resultado dos 30 corpos de prova utilizados no teste foram submetidos à análise de valores outliers, sendo obtido o módulo de elasticidade médio sem interferência de resultados considerados atípicos.

A Tabela 9 apresenta os resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico das amostras analisadas, e a Figura 50 apresenta graficamente o módulo de elasticidade dinâmico médio das amostras agrupadas por relação água/gesso.

Tabela 9 – Módulo de elasticidade dinâmico médio

Amostra/ Compósito	Relação Água/Gesso	Módulo de elasticidade dinâmico médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de variação (%)
Gesso (Padrão)	0,7	5,25	0,23	4,4
	0,8	4,39	0,21	4,7
	0,9	3,74	0,13	3,5
	1,0	3,10	0,13	4,1
	1,1	2,69	0,16	6,1
	1,2	2,42	0,14	5,8
Perlita natural	0,7	5,15	0,07	1,4
	0,8	4,25	0,10	2,4
	0,9	3,59	0,08	2,3
	1,0	3,06	0,07	2,3
	1,1	2,63	0,06	2,3
	1,2	2,22	0,06	2,7
Perlita expandida	0,7	4,57	0,18	4,0
	0,8	4,00	0,13	3,1
	0,9	3,43	0,17	5,0
	1,0	2,98	0,08	2,7
	1,1	2,48	0,09	3,7
	1,2	2,26	0,09	4,1
Vermiculita	0,7	4,75	0,17	3,6
	0,8	3,82	0,26	6,9
	0,9	3,51	0,11	3,1
	1,0	3,18	0,06	2,0
	1,1	2,62	0,05	1,9
	1,2	2,33	0,07	3,1
Alumina	0,7	5,25	0,16	3,0
	0,8	4,36	0,15	3,5
	0,9	3,47	0,30	8,7
	1,0	2,71	0,05	2,0
	1,1	2,25	0,03	1,4
	1,2	1,90	0,09	4,7

Fonte: O autor (2020).

Figura 50 – Módulo de elasticidade dinâmico médio da pasta de gesso e compósitos

Fonte: (Autor, 2022)

Os resultados apresentados na Tabela 9 e na Figura 50 mostram que, de forma geral, o módulo de elasticidade dinâmico decresce com o aumento na relação água/gesso.

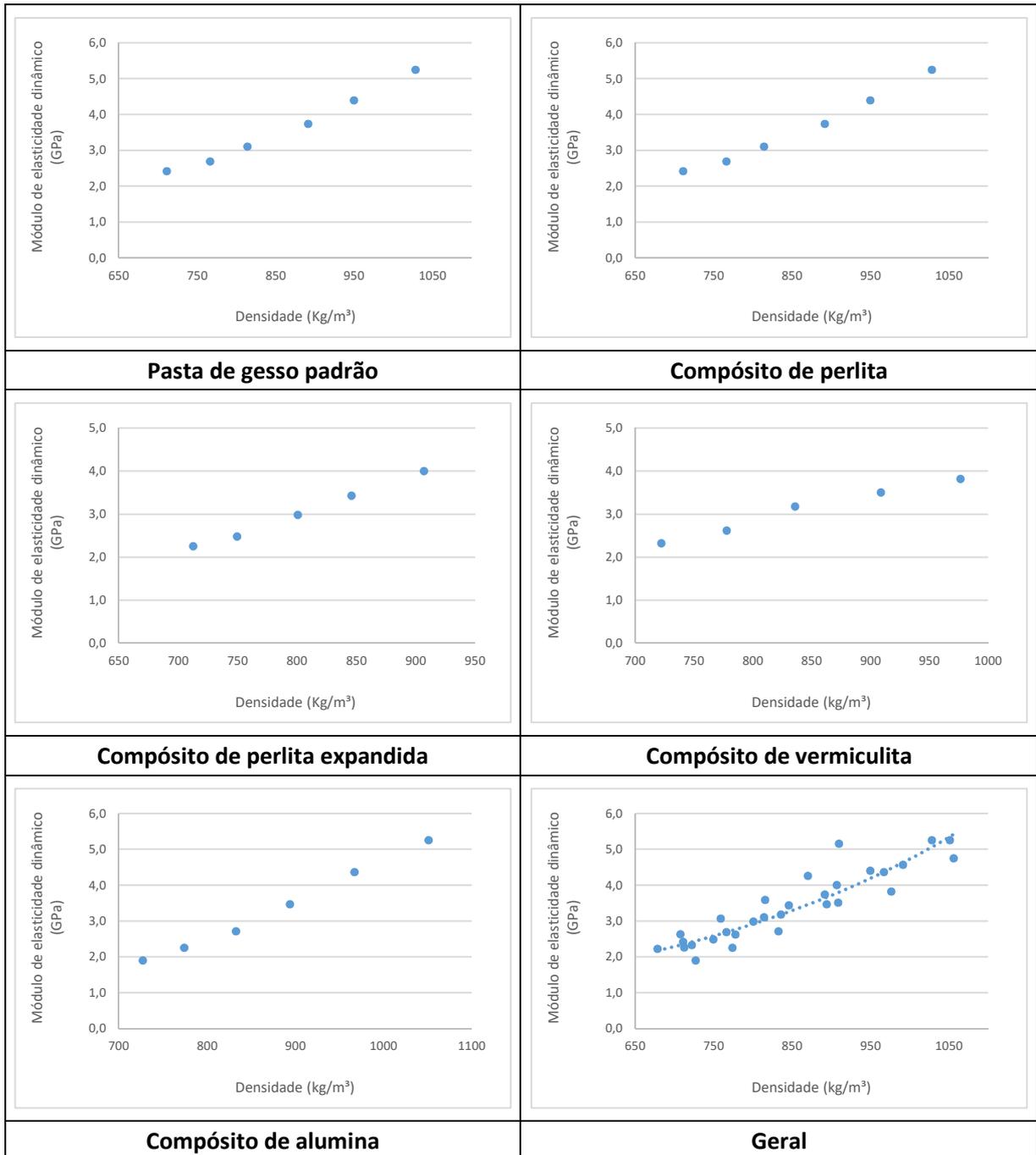
Todas as adições utilizadas reduziram o módulo de elasticidade dinâmico da pasta de gesso e compósitos. Contudo, o compósito de alumina apresentou uma redução linear e constante em função da relação água/gesso, o que não aconteceu com os demais compósitos, saindo de 0,0% na relação água/gesso de 0,7 para 21% na relação água/gesso de 1,2, mostrando-se o compósito mais eficiente.

O compósito de perlita natural foi o que apresentou a menor eficiência na redução do módulo de elasticidade dinâmico, chegando a apenas 8%, eficiência não muito diferente dos compósitos de vermiculita e perlita expandida, que foi de 13%, cada.

O desvio padrão e o coeficiente de variação, apresentados na Tabela 9, mostram uma baixa variação nos resultados, ficando o desvio padrão abaixo de 0,3MPa e o coeficiente de variação não atingindo 9%.

A correlação do módulo de elasticidade dinâmico médio com a densidade média de todas amostras analisadas é apresentada na Figura 51, mostrando que o módulo de elasticidade dinâmico cresce exponencialmente com o aumento da densidade, tanto na pasta de gesso padrão como nos compósitos.

Figura 51 – Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico médio e a densidade média

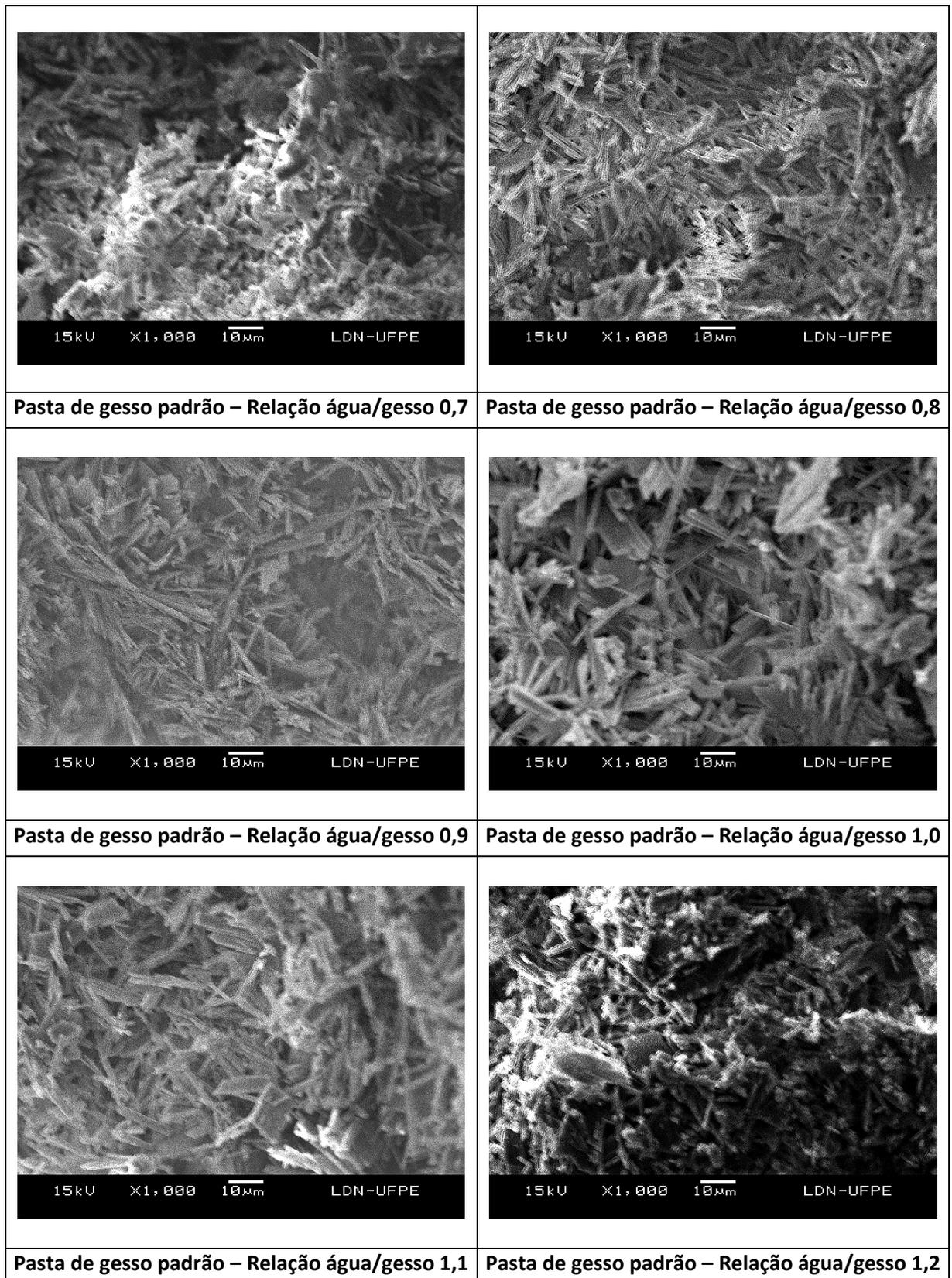


4.1.8. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens obtidas no MEV foram analisadas e comparadas, tanto avaliando a influência da relação água/gesso quando das adições aplicadas.

A Figura 52, Figura 53, Figura 55, Figura 57 e Figura 59 ilustram, respectivamente, as imagens de MEV das amostras de gesso padrão, compósito de perlita expandida, compósito de perlita natural, compósito de vermiculita e compósito de alumina.

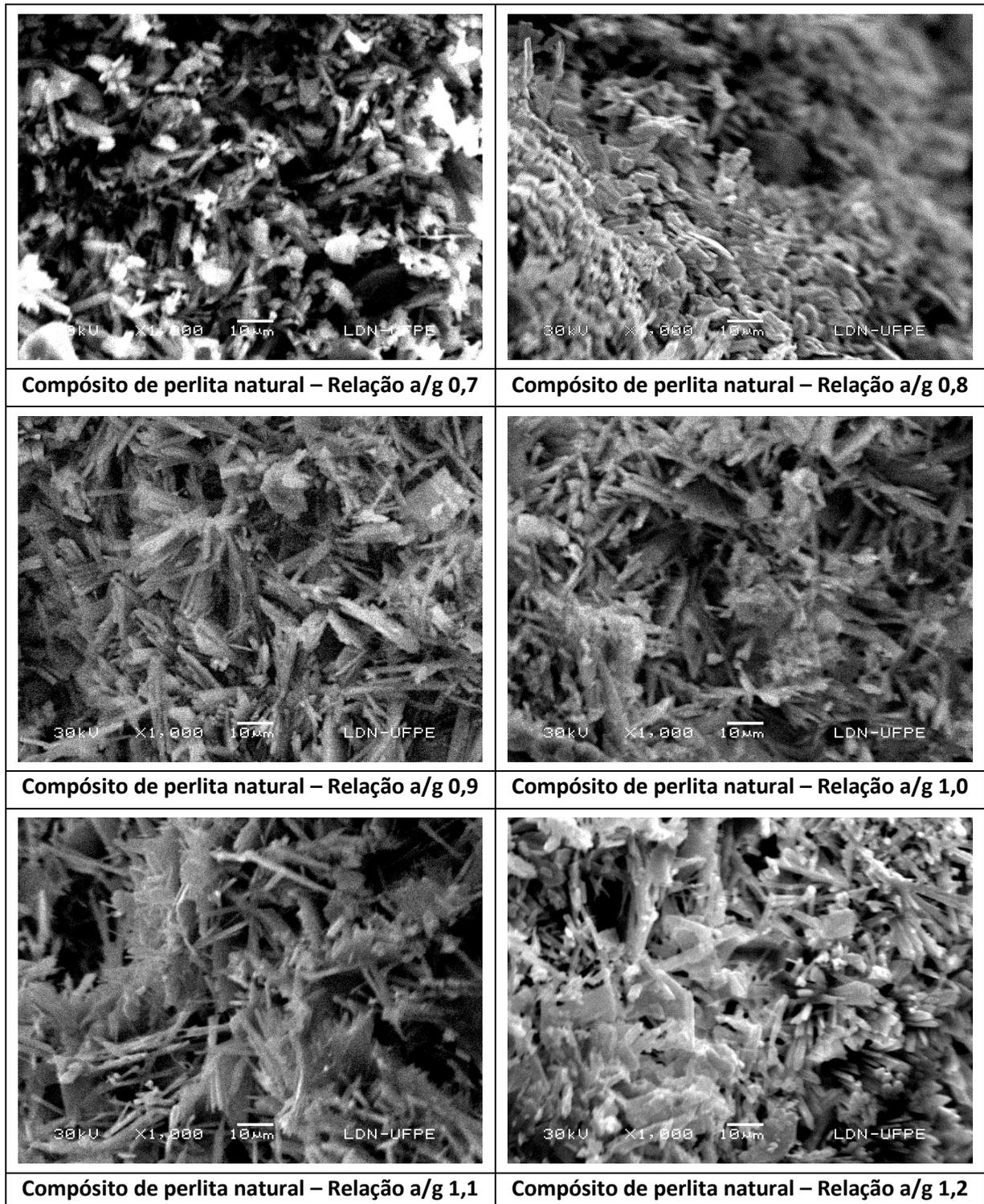
Figura 52 – Imagens de MEV das amostras de gesso padrão



As imagens obtidas na MEV, ilustradas na Figura 52 concordam com as afirmações de Czaderna *et al.* (2018) e Pervyshin *et al.* (2017), apresentado estruturas finas e alongadas, em forma de agulha.

Analisando as imagens obtidas com ampliação de 1.000 vezes (Figura 52), observa-se que o aumento na relação água/gesso provoca um afastamento entre os cristais, que tornam-se mais finos e alongados, originando estruturas mais frágeis e susceptíveis à ruptura, corroborando com os resultados obtidos por Barbosa, Ferraz e Santos (2014).

Figura 53 – Imagens de MEV das amostras do compósito de perlita natural



Assim como na pasta de gesso padrão, o compósito de perlita natural, ilustrado na Figura 53, apresentou afastamento entre os cristais quando aumentada a relação água/gesso, tornando-os mais finos e alongados. Contudo, a adição da perlita natural amplifica essa alteração, sendo observado, por exemplo, que na relação água gesso de 1,1 (Figura 54) os cristais do compósito com perlita natural são mais finos e alongados e estão bem mais afastados. O que pode justificar a redução na resistência, mesmo com aumento na densidade.

Figura 54 – Imagens de MEV das amostras de pasta de gesso padrão e compósito de perlita natural na relação água/gesso de 1,1

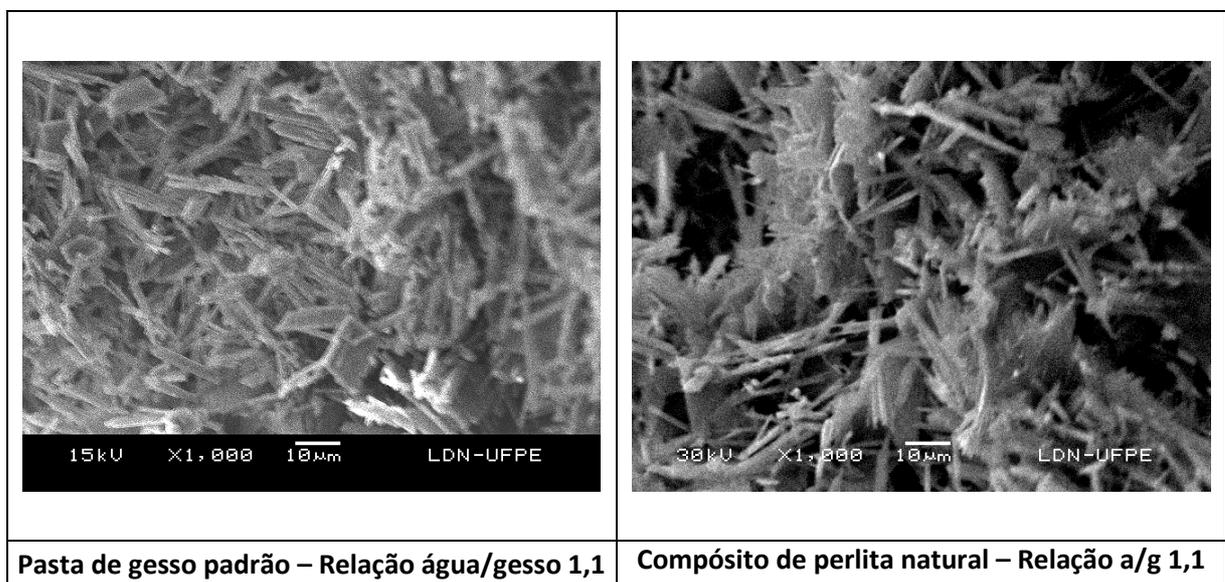
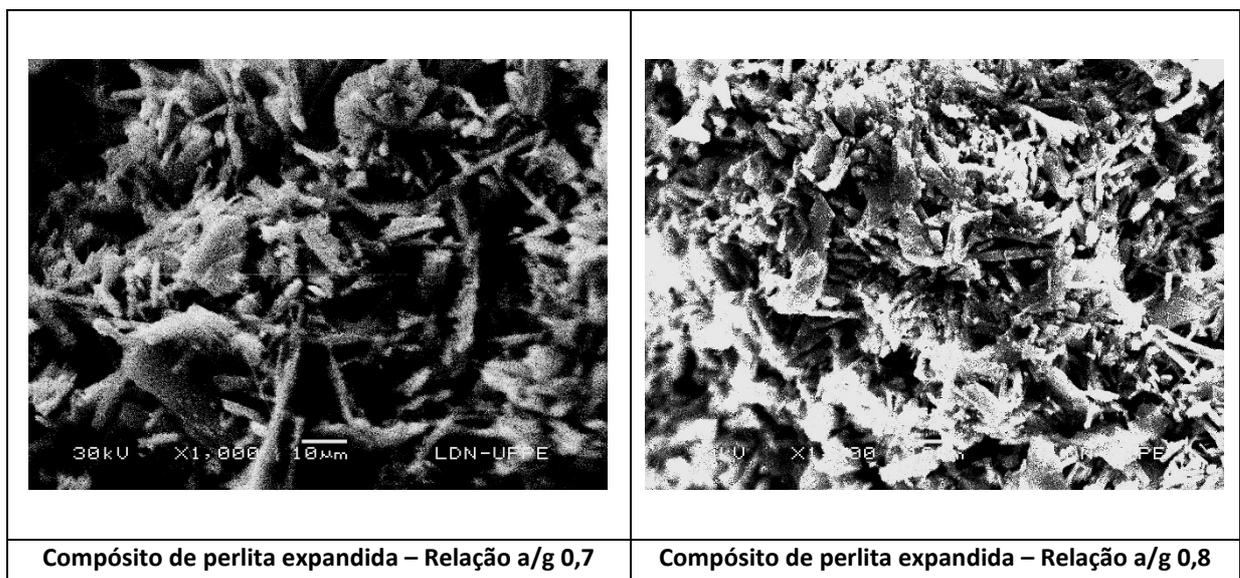
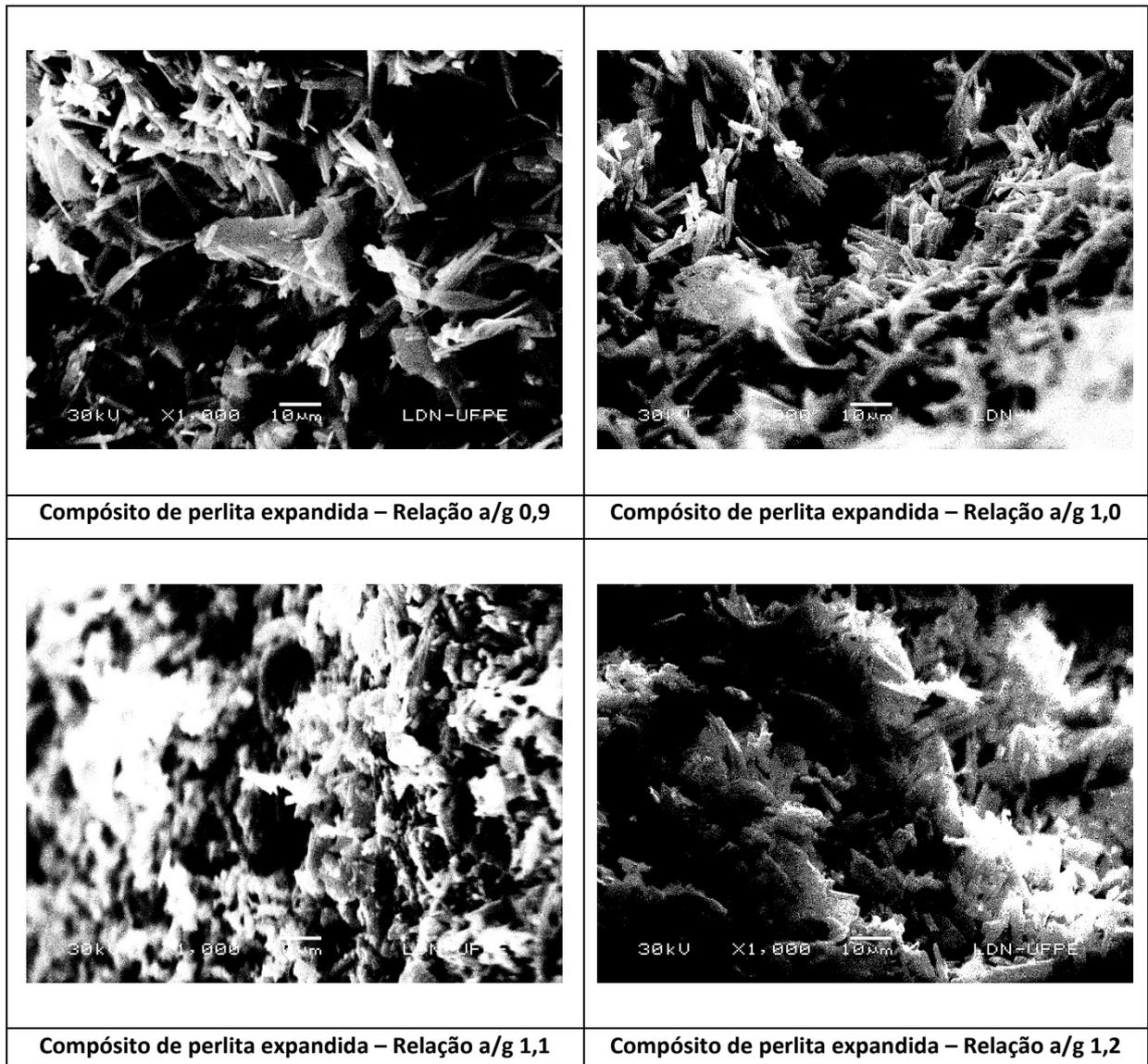


Figura 55 – Imagens de MEV das amostras do compósito de perlita expandida





As imagens de MEV obtidas do compósito de perlita expandida, ilustradas na Figura 55, mostram que todas as relações água/gesso analisadas possuem cristais com formato bem diferente da pasta de gesso padrão. As agulhas neste compósito não são alongadas e uniformes, o que sugere uma má formação, com estruturas curtas e sem homogeneidade. Essa característica tem como consequência a redução na densidade e na resistência do compósito.

A Figura 56 mostra a significativa diferença entre a pasta de gesso padrão e o compósito com perlita expandida, especialmente a formação dos cristais finos e alongados (agulhas).

Figura 56 – Imagens de MEV das amostras de pasta de gesso padrão e composto de perlita expandida na relação água/gesso de 1,1

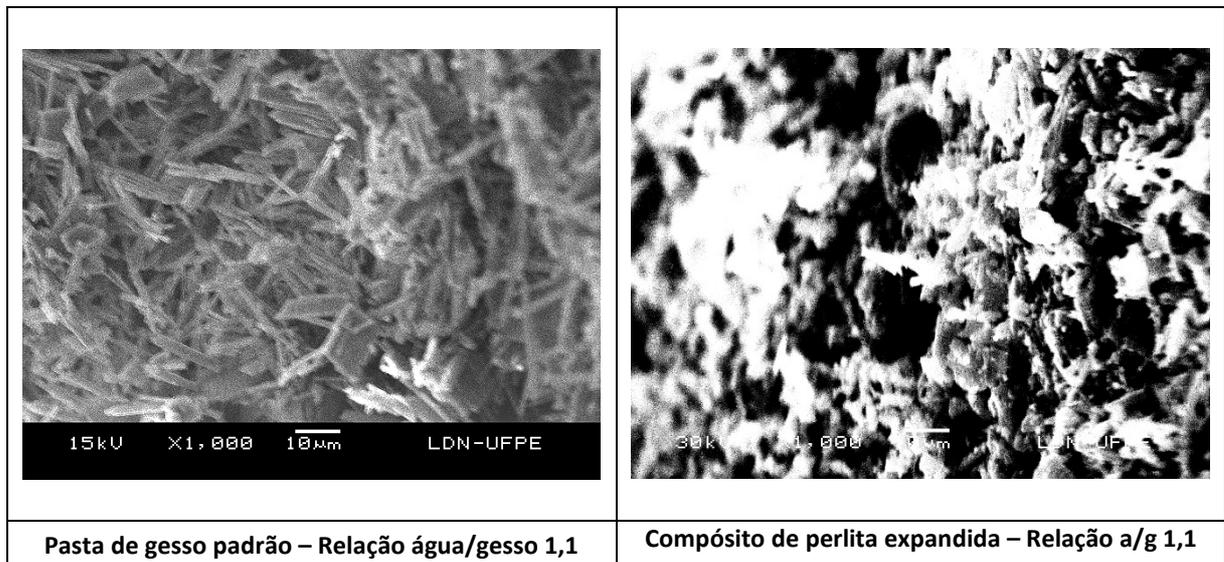
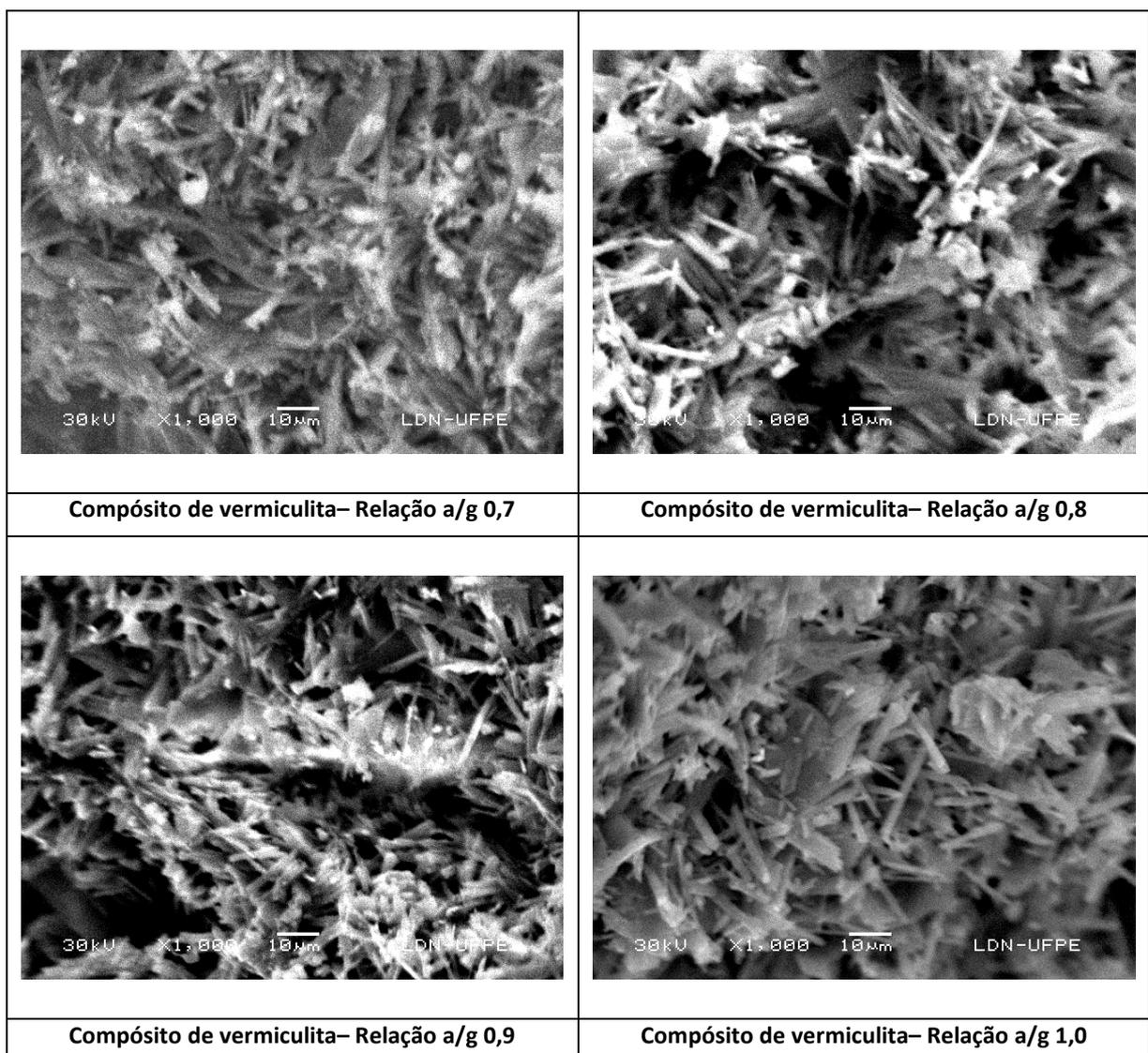
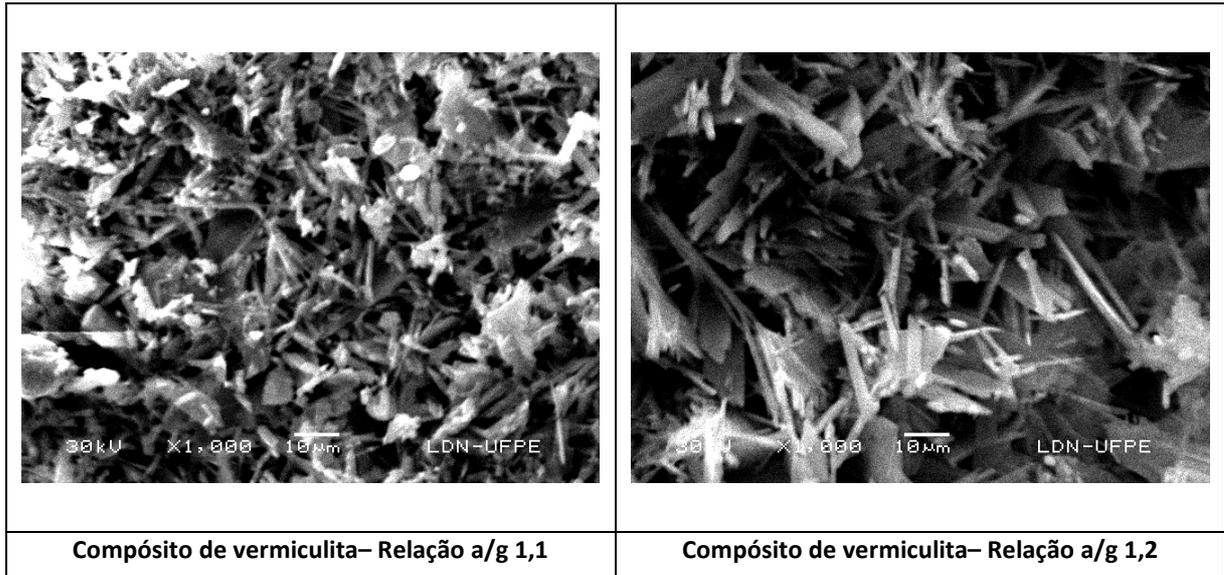


Figura 57 – Imagens de MEV das amostras do composto de vermiculita





Assim como no compósito de perlita expandida, observa-se que os cristais formados no compósito de vermiculita (Figura 57) possuem formato irregular, não sendo alongados e uniformes, gerando conseqüentemente uma má formação.

Comparando as imagens de MEV (Figura 58), observa-se uma total diferença na formação dos cristais: alongados na pasta de gesso padrão e desordenados no compósito de vermiculita.

Figura 58 – Imagens de MEV das amostras de pasta de gesso padrão e compósito de vermiculita na relação água/gesso de 1,1

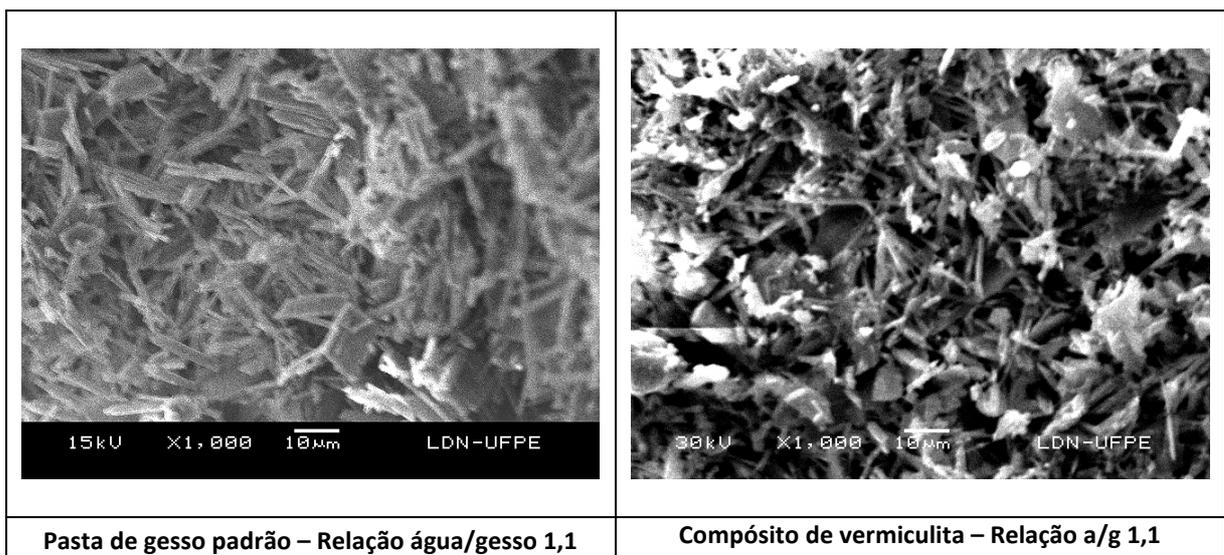
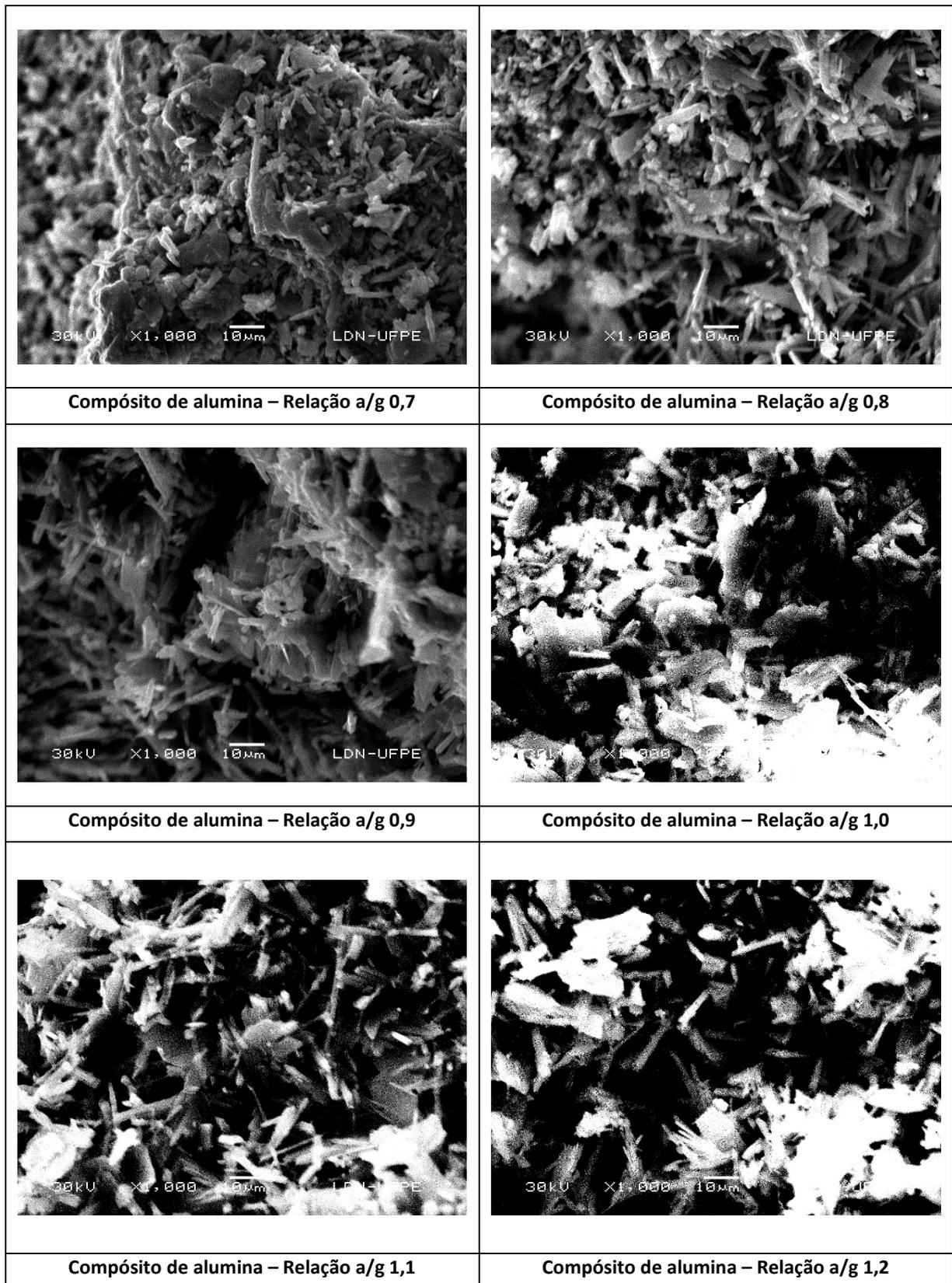
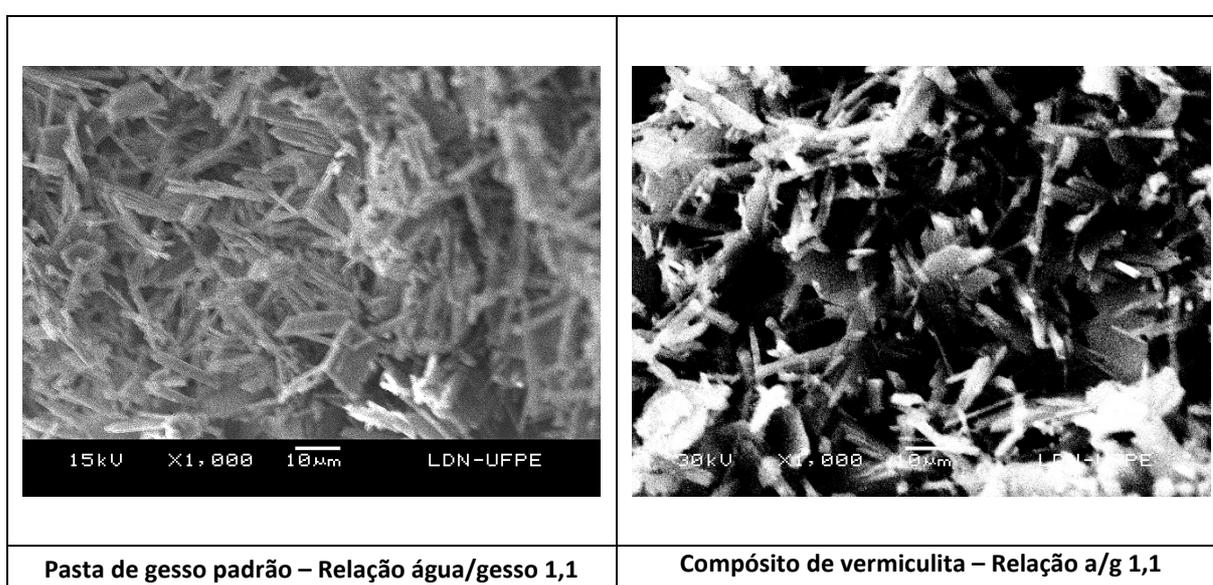


Figura 59 – Imagens de MEV das amostras do compósito de alumina



Os compósitos de alumina, ilustrados na Figura 59, apresentaram-se extremamente diferentes da pasta de gesso padrão e dos demais compósitos, pois os cristais formados não possuem o formato de agulha (finos a alongados), mas de pequenas placas lamelares e heterogêneas. A Figura 60 mostra a significativa diferença entre as estruturas, destacando-se o afastamento entre os cristais e a significativa área de vazios, o que justifica a redução na resistência mesmo sem alteração na densidade da pasta.

Figura 60 – Imagens de MEV das amostras de pasta de gesso padrão e compósito de alumina na relação água/gesso de 1,1



4.1.9. Caracterização dos blocos de gesso

Os blocos de gesso, produzidos em laboratório, tiveram suas características, físicas e mecânicas analisadas conforme procedimentos de ensaio descritos na norma ABNT NBR 16494 (ABNT, 2017) e os resultados comparados com os critérios preconizados na norma ABNT NBR 16495 (ABNT, 2016).

Os blocos foram confeccionados para construção das paredes testadas nos ensaios de tempo de reverberação estrutural e perda de transmissão sonora, sendo produzido e separado, aleatoriamente, 12 blocos para os ensaios de caracterização.

4.1.9.1. Determinação da espessura, comprimento e altura

Os blocos de gesso tiveram sua espessura, comprimento e altura obtidos por medição com trena e paquímetro. Os resultados dos 12 corpos de prova foram submetidos à análise de valores outliers, sendo obtidas as dimensões médias sem interferência de resultados considerados atípicos, exibidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Dimensões dos blocos de gesso

Amostra/ Compósito	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
Critério NBR 16495 (ABNT, 2016)	50,0±0,5	666,0±3,0	500,0±2,0
Padrão	51,4	671,0	500,3
Perlita natural	52,0	671,7	501,0
Perlita expandida	51,7	672,0	501,5
Vermiculita	51,5	671,6	500,3
Alumina	51,4	670,6	501,1
Média (mm)	51,6	671,4	500,9
Desvio padrão (mm)	0,23	0,56	0,51
Coefficiente de variação (%)	0,45	0,08	0,10

Fonte: O autor (2020).

Os resultados apresentados na Tabela 10 mostram que a espessura e o comprimento, em todas as amostras, estão acima dos limites estabelecidos na norma de blocos de gesso. Contudo, o baixo desvio padrão e o coeficiente de variação menor que 1% mostram que não houve variação na fabricação dos blocos. Isso demonstra que a causa dos blocos de gesso não possuírem as dimensões dentro dos limites normativos é a fabricação da fôrma, fora das dimensões padrão.

Contudo, o fato da espessura e comprimento dos blocos não estarem dentro dos limites normativos não interfere nas demais características e no desempenho acústico.

4.1.9.2. Determinação da densidade

A densidade dos blocos de gesso foi obtida pela relação entre a massa e volume, sendo os resultados dos 12 corpos de prova, de cada uma das amostras, submetidos à análise de valores outliers, obtendo-se a densidade média sem interferência de resultados considerados atípicos.

A Tabela 11 apresenta a densidade média das amostras analisadas e sua classificação.

Tabela 11 – Densidade média dos blocos de gesso

Amostra/ Compósito	Densidade média (kg/m³)	Desvio padrão (kg/m³)	Coefficiente de variação (%)	Classificação
Padrão	843,5	12,1	1,4	Média densidade
Perlita natural	848,7	21,0	2,5	Média densidade
Perlita expandida	804,8	8,3	1,0	Média densidade
Vermiculita	822,2	7,5	0,9	Média densidade
Alumina	882,7	14,0	1,6	Média densidade

Fonte: O autor (2020).

Os blocos de gesso, produzidos em laboratório com a relação água/gesso de 1.0, apresentaram baixo desvio padrão e coeficiente de variação, indicando resultados com baixa variação e possíveis de serem comparados.

Os blocos compósitos de perlita natural praticamente não alteraram a densidade da pasta de gesso, em comparação com o bloco de gesso padrão a diferença foi menor que 1%. Já os blocos compósitos de alumina apresentaram o maior aumento na densidade, chegando a 4,7%.

Os blocos compósitos de perlita expandida e vermiculita, que possuem massa específica menor que o gesso, apresentaram redução na densidade de 4,7% e 2,5%, respectivamente.

Como esperado, as adição mais leves que o gesso reduziram sua densidade, enquanto que as adições de maior massa específica aumentaram a densidade dos compósitos, sendo os compósitos de alumina e perlita expandida os que apresentaram as maiores alterações na densidade.

4.1.9.3. Determinação da dureza

A dureza dos blocos gesso foi determinada pelo procedimento da esfera, sendo os resultados dos 12 corpos de prova, de cada uma das amostras, submetidos à análise de valores outliers, obtendo-se a dureza média sem interferência de resultados considerados atípicos.

A Tabela 12 apresenta a dureza média das amostras analisadas e sua classificação.

Tabela 12 – Dureza média dos blocos de gesso

Amostra/ Compósito	Dureza média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)	Classificação
Padrão	7,1	0,5	7,2	Baixa dureza
Perlita natural	6,5	0,9	13,2	Baixa dureza
Perlita expandida	5,5	0,5	8,9	Baixa dureza
Vermiculita	8,4	0,6	7,3	Média dureza
Alumina	6,8	1,6	24,1	Baixa dureza

Fonte: O autor (2020).

Assim como na pasta de gesso, o ensaio de dureza utilizando o método da esfera apresentou elevada variação de resultados nos bloco, chegando a quase 25% no compósito de alumina e superando 10% na amostra de perlita natural.

Os blocos compósitos de perlita natural, perlita expandida e alumina tiveram sua dureza reduzida, em comparação com o gesso padrão. No entanto, o bloco de gesso com adição de vermiculita, material granular e leve, apresentou aumento de 18% na dureza.

4.1.9.4. Determinação da carga de flexão

A carga de flexão foi analisada para o bloco de gesso inteiro, conforme procedimento descrito na norma BS EN 12859 (2011). Os resultados dos 12 corpos de prova, de cada uma das amostras, foram submetidos à análise de valores outliers, obtendo-se a carga de flexão média sem interferência de resultados considerados atípicos.

A Tabela 13 apresenta a carga de flexão média das amostras analisadas e seus respectivos desvios padrão e coeficiente de variação.

Tabela 13 – Carga de flexão média dos blocos de gesso

Amostra/ Compósito	Critério BS EN 12859 (2011) (KN)	Carga de flexão média (KN)	Desvio padrão (KN)	Coeficiente de variação (%)
Padrão		1,7	0,1	8,8
Perlita natural		1,8	0,2	12,3
Perlita expandida	1,7	1,5	0,2	14,4
Vermiculita		1,4	0,2	14,9
Alumina		1,4	0,4	25,6

Fonte: O autor (2020).

O critério estabelecido na norma EN BS 12859 (2011) foi atendido apenas para os blocos de gesso padrão e compósito de perlita natural, com valores muito próximos, o que também ocorreu com a dureza e a densidade. Isso mostra que a adição de 5% de perlita natural na produção dos blocos de gesso em nada modifica seu comportamento físico e mecânico.

As adições mais leves, perlita expandida e vermiculita, reduziram a carga de flexão dos blocos de gesso compósitos, em relação ao bloco de gesso padrão, o que acarretou em resultados que não atendem ao critério preconizado na norma EN BS 12859 (2011).

Os blocos compósitos de alumina, apesar de possuírem a maior densidade, apresentaram o menor resultados de dureza e carga de flexão. Contudo, o coeficiente de variação dos resultados foi maior que 25%, mostrando uma variabilidade significativamente alta, o que compromete a confiabilidade do resultado médio.

O desvio padrão das amostras com bloco de gesso padrão pode ser considerado aceitável, uma vez que o coeficiente de variação foi menor que 10%, diferentemente dos blocos de gesso compósitos.

O bloco compósito de alumina apresentou o maior e mais discrepante coeficiente de variação, tanto no ensaio de dureza quando na carga de flexão, superando 25%, fato que pode ser atribuído às significativas mudanças microestruturais deste compósito, comprometendo tanto as propriedades mecânicas quanto a homogeneidade dos blocos.

O teste que determina a carga de flexão não pôde ser realizado no bloco de gesso acústico, dado sua baixa resistência, que pode ser atribuída ao fato da lã de rocha ocupar boa parte do volume do bloco. Como mostrado por Cunha (2012), que utilizou placas de fibra de coco seco na execução de placas de gesso, a resistência máxima à flexão dos compósitos é extremamente inferior à da matriz, mas proporciona ganhos na ductilidade e tenacidade.

4.2. Análise acústica

A análise das propriedades acústicas dos blocos de gesso, padrão e compósitos, foco principal desta pesquisa, foi dividida em duas características bem específicas dos materiais: o tempo de reverberação estrutural (T_s) e o índice de redução sonora (R).

O tempo de reverberação estrutural da parede foi utilizado para caracterizar o amortecimento das vedações analisadas, visando estabelecer uma correlação deste parâmetro com as modificações físicas, mecânicas e microestruturais provocadas pela adição dos compósitos de perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina.

Já a perda de transmissão sonora, caracterizada pela determinação do índice de redução sonora (R), principal parâmetro utilizado para análise de desempenho acústico das vedações verticais na fase de projeto, foi obtido seguindo os procedimentos normativos estabelecidos na ISO 10140-2 (2021) para bandas de terços de oitava, numa faixa frequências entre 50Hz e 10.000Hz.

Além do bloco de gesso padrão e dos blocos de gesso compósitos, foi avaliado a influência de material elástico (emulsão elástica) entre duas vedações de mesma espessura (50mm), sendo uma a própria parede com os blocos de gesso padrão e a outra com blocos de gesso comercial, ambos com média densidade (800Kg/m^3 a 1.100Kg/m^3).

Visando o desenvolvimento de blocos acústicos, foram caracterizados os parâmetros acústicos dos blocos produzidos com enchimento de lã de rocha,

descritos no item 3.1.1.1. A espessura do bloco foi mantida (50mm) e, após os testes, a vedação foi revestida com 50mm de pasta de gesso, ficando com espessura total de 100mm.

4.2.1. Tempo de reverberação estrutural

O Tempo de Reverberação Estrutural (T_s) das vedações foi obtido experimentalmente pelo decaimento da energia sonora da parede, quando extinta uma excitação estrutural (impacto com martelo), conforme descrito no item 3.6.1.

Os testes foram realizados nas seguintes amostras:

- Padrão: vedação com blocos de gesso padrão (sem adição);
- Perlita natural: vedação com blocos de gesso compósitos de perlita natural;
- Perlita expandida: vedação com blocos de gesso compósitos de perlita expandida;
- Vermiculita: vedação com blocos de gesso compósitos de vermiculita;
- Alumina: vedação com blocos de gesso compósitos de alumina;
- Dupla com emulsão: vedação formada por parede dupla com bloco de gesso padrão e emulsão elástica entre elas;
- Bloco acústico: vedação executada com bloco de gesso sem adição mineral, mas com placa de lã de rocha (15mm) incorporada.

Os resultados das 24 medições, 12 em cada face da amostra, foram submetidos à análise de valores outliers, não sendo encontrado valores atípico, o que mostra uma boa confiabilidade no procedimento de medição. Assim, foi possível a obtenção do tempo de reverberação estrutural médio sem interferência de resultados considerados atípicos.

A Tabela 13 apresenta o tempo de reverberação médio das vedações analisadas e seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação.

Tabela 14 – Tempo de reverberação estrutural

Vedação	Tempo de reverberação estrutural médio (s)	Desvio padrão (s)	Coefficiente de variação (%)
Padrão	0,26	0,04	16,1
Perlita natural	0,25	0,03	12,1
Perlita expandida	0,25	0,01	4,8
Vermiculita	0,26	0,03	11,2
Alumina	0,27	0,03	10,2
Dupla com emulsão	0,12	0,02	18,3
Bloco acústico	0,18	0,02	10,0

Fonte: O autor (2020).

Os resultados apresentados na Tabela 14, mostram que as vedações em bloco de gesso maciço apresentam tempo de reverberação estrutural (T_s) dentro da margem esperada para as placas de gesso acartonado apresentadas por Bies e Hansen, (2009), que está entre 0,97s e 0,12s. Contudo, todos os resultados estão mais próximos da margem inferior, ficando dentro do quartil inferior, ou seja, valores 75% mais baixos que a margem superior.

O menor tempo de reverberação estrutural das vedações demonstra uma maior capacidade de amortecimento acústico, influenciando positivamente na perda de transmissão sonora, como mostrou Dias (2017).

Não há uma diferença significativa entre o T_s do bloco de gesso padrão e os blocos de gesso compósitos, mostrando que a diferença na perda de transmissão entre esses elementos não é função de seus amortecimentos.

Já o bloco acústico, que possui em sua composição interna uma camada de lã de rocha, apresentou uma leve redução no T_s , indicando que a lã de rocha é capaz de absorver parte da vibração mecânica que atinge a parede.

A parede dupla separada por emulsão elástica, apresentou o menor T_s , 0,12 segundos, 58,3% menor que o bloco de gesso padrão. Com essa significativa redução no T_s , espera-se um impacto expressivo no índice de redução sonora, especialmente na região entre a frequência de ressonância e a frequência de coincidência, como indicado numericamente no trabalho desenvolvido por Dijkmans, Vermeir e Lauriks (2010).

4.2.2. Perda de transmissão sonora

Visando caracterizar a isolamento sonora dos blocos de gesso comerciais, os testes para determinação do índice de redução sonora (R) foram realizados em vedações executadas com blocos de gesso maciços, espessuras de 100mm, 70mm e 50mm, e blocos de gesso vazados com espessuras de 100mm e 80mm.

Os resultados mostram que os blocos de gesso maciços possuem uma frequência crítica bem definida, elemento importante nessa pesquisa. Quanto às espessuras, observou-se que os blocos de 100mm, 70mm e 50mm possuem um comportamento semelhante ao longo das frequências. Essas observações permitiram a escolha do bloco de gesso maciço com 50mm de espessura, mais leve e com menor consumo de material, sem comprometimento das análises.

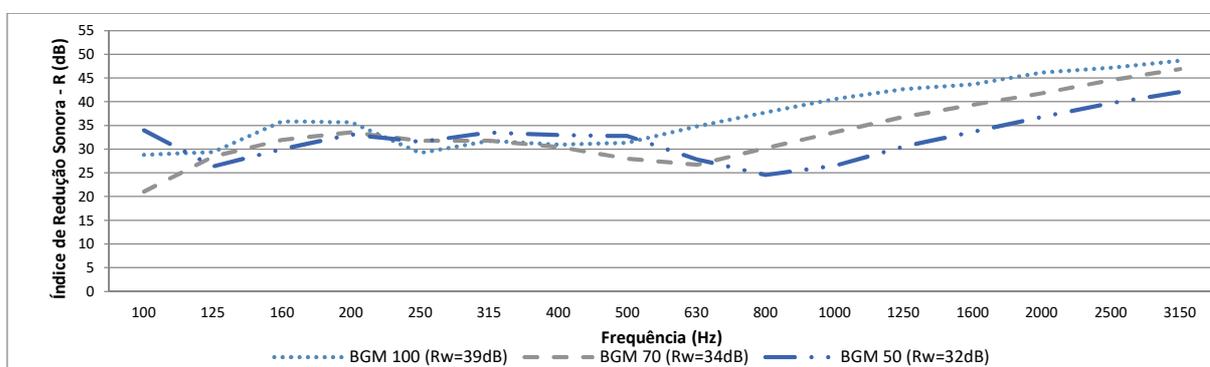
Os blocos produzidos em laboratório foram testados inicialmente com os blocos de gesso padrão, sem adições, os quais serviram de referência para análise comparativa com os blocos de gesso compósitos, a parede dupla com emulsão e a parede com bloco de gesso acústico.

O índice de redução sonora (R) foi utilizado como parâmetro para caracterização da isolação sonora, sendo determinado pela média de três medições, realizadas na mesma vedação e sob as mesmas condições. Os resultados, por faixa de frequência, foram submetidos à análise de valores outliers, não sendo encontrado valores atípico, o que mostra uma boa confiabilidade no procedimento de medição.

4.2.2.1. Blocos de gesso comerciais

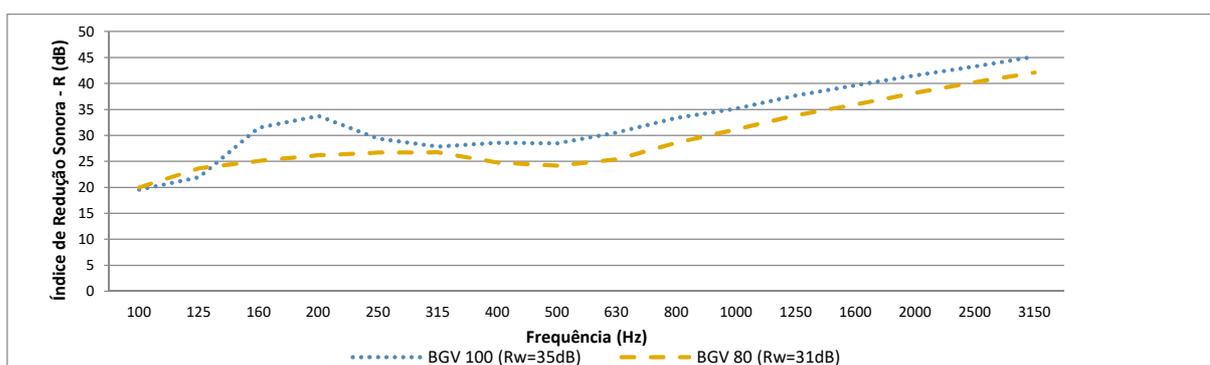
Os resultados dos blocos de gesso maciços comerciais, espessuras de 100mm, 70mm e 50mm, são apresentados na Figura 61. Já os resultados dos blocos de gesso vazado, espessuras de 100mm e 80mm, são apresentados na Figura 62.

Figura 61 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso maciço comerciais



Fonte: (Autor, 2022)

Figura 62 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso vazado comerciais



Fonte: (Autor, 2022)

Observa-se na faixa de baixa frequência, entre 100Hz e 200Hz, uma significativa variação no índice de redução sonora (R), tanto nos blocos de gesso maciço quanto vazado, não permitindo que se estabeleça uma correlação. Pesquisas realizadas por Osipov, Mees e Vermeir (1997) mostraram que a análise do índice de redução sonora nas baixas frequências é prejudicada pela significativa variação dos resultados.

A frequência crítica nos blocos de gesso maciço desloca-se com a redução de espessura, ficando entre 400Hz e 500Hz no bloco de gesso com 100mm, entre 630Hz e 800Hz no bloco de 70mm e entre 800Hz e 1000Hz no bloco de 50mm. A partir da frequência crítica, o isolamento acústico dos blocos sólidos de gesso aumenta a uma taxa (linear) de cerca de 8 dB por oitava.

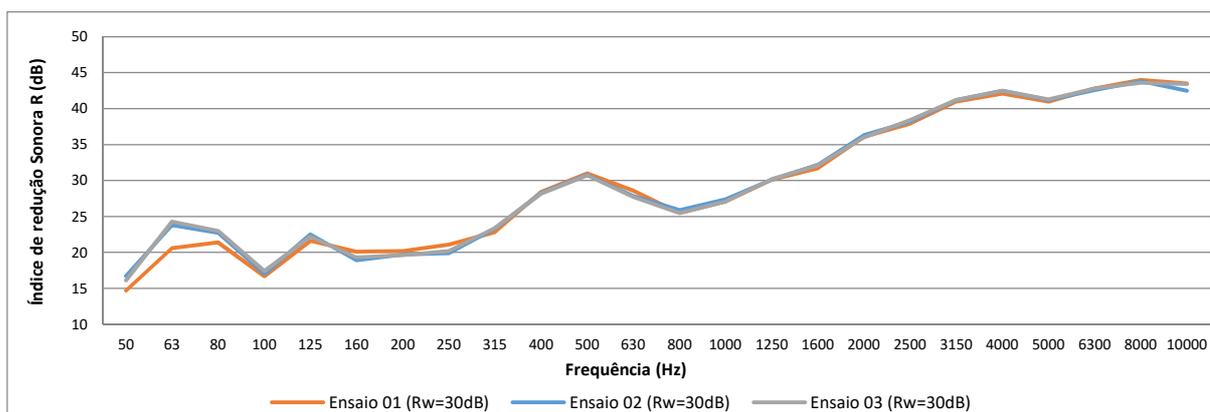
Já nos blocos de gesso vazado a frequência crítica não variou com a espessura, estando nas duas espessuras entre 500Hz e 630Hz. Outra diferença relevante é o fato de não haver uma queda no índice de redução sonora antes da frequência crítica, como ocorre nos blocos de gesso maciço. Esse comportamento da frequência crítica dos blocos de gesso vazado pode indicar uma influência das cavidades, que possivelmente geraram valores de frequências naturais semelhantes.

A partir da frequência crítica, a isolação sonora dos blocos de gesso vazado aumenta a uma taxa de 6dB por oitava, menor que os blocos de gesso maciço.

4.2.2.2. *Vedação com blocos de gesso padrão*

A Figura 63 apresenta os resultados do índice de redução sonora das três medições realizadas na vedação com bloco de gesso padrão, mostrando uma boa concordância dos valores. A diferença entre as medições foi mais significativa nas frequências entre 50Hz e 80Hz, mas não chegou a 4dB.

Figura 63 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso padrão



Fonte: (Autor, 2022)

A Tabela 15 apresenta o índice de redução sonora (R) médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação das três medições realizadas. Os resultados mostram uma boa repetibilidade das medições, uma vez que o coeficiente de variação foi inferior a 10% em todas as frequências e ficou abaixo de 2% nas frequências acima de 315Hz.

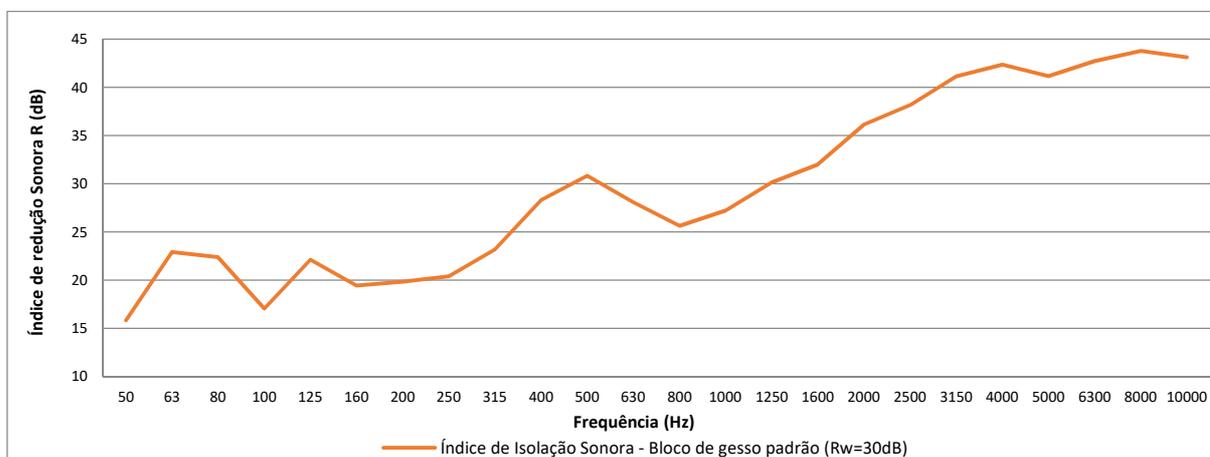
Tabela 15 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso padrão

Frequência (Hz)	Índice de redução sonora médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Coeficiente de variação (%)
50	15,8	1,03	6,48
63	22,9	2,01	8,77
80	22,4	0,85	3,82
100	17,0	0,35	2,06
125	22,1	0,46	2,07
160	19,4	0,61	3,14
200	19,8	0,32	1,62
250	20,4	0,62	3,06
315	23,2	0,32	1,39
400	28,3	0,10	0,35
500	30,8	0,15	0,50
630	28,1	0,47	1,68
800	25,6	0,23	0,90
1000	27,2	0,17	0,64
1250	30,1	0,06	0,19
1600	32,0	0,26	0,83
2000	36,1	0,15	0,42
2500	38,2	0,25	0,66
3150	41,1	0,12	0,28
4000	42,4	0,23	0,55
5000	41,2	0,15	0,37
6300	42,7	0,12	0,27
8000	43,8	0,20	0,46
10000	43,1	0,55	1,28

Fonte: O autor (2020).

A Figura 64 apresenta os resultados do índice de redução sonora médio da vedação executada com os blocos de gesso padrão.

Figura 64 – Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso padrão



Fonte: (Autor, 2022)

Os resultados apresentados na Figura 64 mostram que a região controlada pela rigidez vai até a frequência de ressonância, em 100Hz. Entre as frequências de 100Hz e 250Hz tem-se uma região controlada pela ressonância, e entre 250Hz e 500Hz um crescimento linear médio de 11dB por oitava, resultado bem acima dos 6dB esperados para esta região, controlada pela lei da massa.

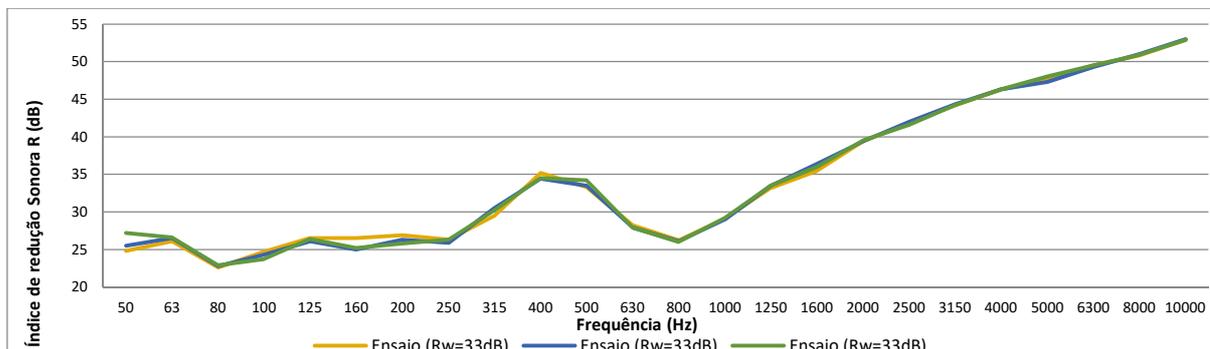
A frequência crítica aparece bem definida em 800Hz, a partir da qual a isolamento sonora cresce linearmente, em média 7dB por oitava, resultado abaixo dos 9dB esperados para esta região, controlada pelo amortecimento (Bies e Hansen, 2009).

4.2.2.3. Vedação com blocos de gesso compósito de perlita natural

Os blocos de gesso compósitos de perlita natural foram produzidos manualmente em laboratório com relação água/gesso de 1.0 e adição de 5% da perlita natural em relação à massa de gesso. A vedação foi executada da mesma forma que a vedação com bloco de gesso padrão.

A Figura 65 apresenta os resultados do índice de redução sonora das três medições realizadas na vedação com bloco compósito de perlita natural, mostrando uma boa concordância dos valores. A diferença entre as medições foi mais significativa na frequência de 50Hz, mas não chegou a 3dB.

Figura 65 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso compósito de perlita natural



Fonte: (Autor, 2022)

A Tabela 16 apresenta o índice de redução sonora (R) médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação das três medições realizadas. Os resultados mostram uma boa repetibilidade das medições, uma vez que o coeficiente de variação foi inferior a 5% em todas as frequências e ficou abaixo de 2% nas frequências acima de 250Hz.

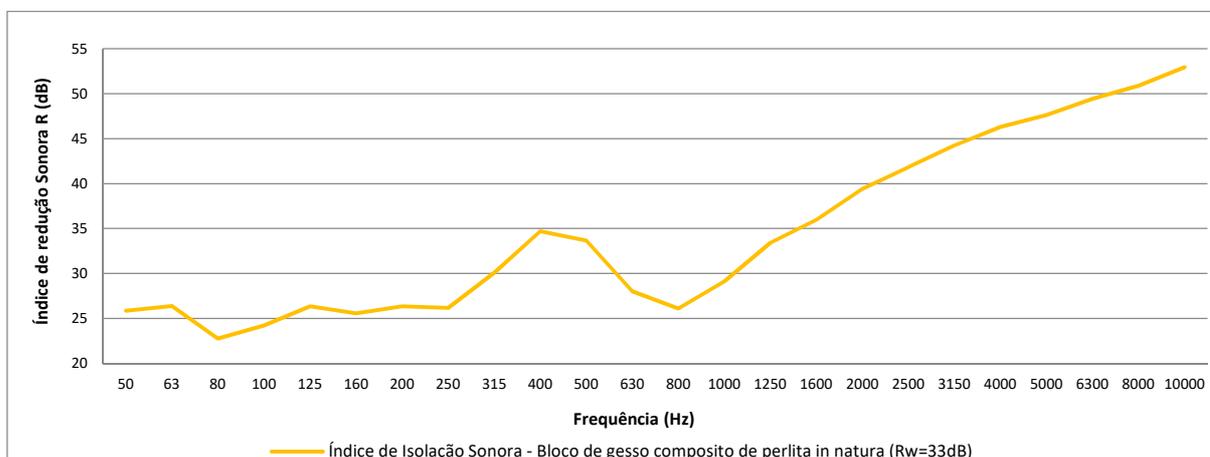
Tabela 16 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso compósito de perlita natural

Frequência (Hz)	Índice de redução sonora médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Coeficiente de variação (%)
50	25,8	1,23	4,78
63	26,4	0,26	1,00
80	22,8	0,15	0,67
100	24,2	0,50	2,08
125	26,3	0,21	0,79
160	25,6	0,81	3,19
200	26,3	0,55	2,09
250	26,2	0,23	0,88
315	30,1	0,51	1,71
400	34,7	0,44	1,26
500	33,7	0,47	1,40
630	28,0	0,17	0,62
800	26,1	0,10	0,38
1000	29,1	0,10	0,34
1250	33,4	0,17	0,52
1600	36,0	0,45	1,25
2000	39,4	0,06	0,15
2500	41,8	0,21	0,50
3150	44,2	0,06	0,13
4000	46,3	0,00	0,00
5000	47,6	0,35	0,74
6300	49,4	0,12	0,23
8000	50,9	0,10	0,20
10000	52,9	0,06	0,11

Fonte: O autor (2020).

A Figura 66 apresenta os resultados do índice de redução sonora médio da vedação executada com os blocos de gesso compósitos de perlita natural.

Figura 66 – Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso compósitos de perlita natural



Fonte: (Autor, 2022)

Os resultados apresentados na Figura 66 mostram que a região controlada pela rigidez vai até a frequência de ressonância, em 80Hz. Entre as frequências de 80Hz e 250Hz tem-se uma região controlada pela ressonância, e entre 250Hz e 400Hz um crescimento linear médio de 13dB por oitava, resultado bem acima dos 6dB esperados para esta região, controlada pela lei da massa.

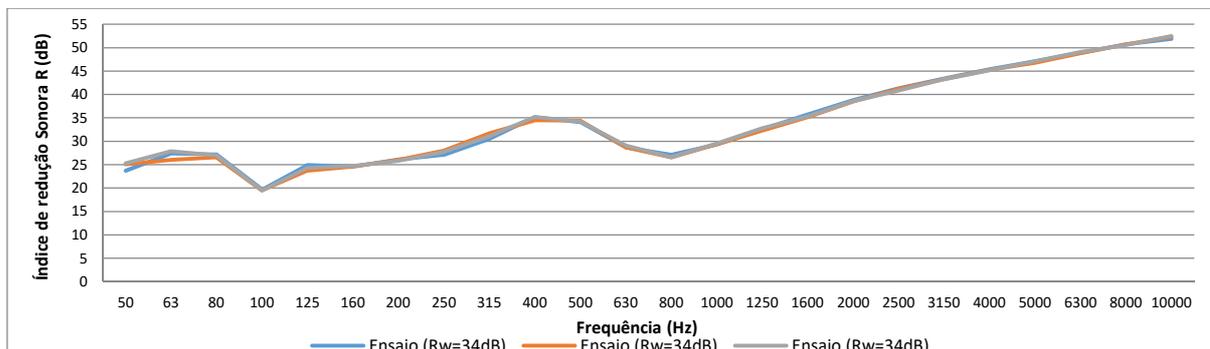
A frequência crítica aparece bem definida em 800Hz, a partir da qual a isolamento sonora cresce linearmente, em média 9dB por oitava, região controlada pelo amortecimento.

4.2.2.4. Vedação com blocos de gesso compósito de perlita expandida

Os blocos de gesso compósitos de perlita expandida, os mais leves avaliados, foram produzidos manualmente em laboratório com relação água/gesso de 1,0 e adição de 5% da perlita expandida em relação à massa de gesso. A vedação foi executada da mesma forma que a vedação com bloco de gesso padrão.

A Figura 67 apresenta os resultados do índice de redução sonora das três medições realizadas na vedação com bloco compósito de perlita expandida, mostrando uma boa concordância dos valores. A diferença entre as medições foi menor que 2dB em todas as frequências analisadas.

Figura 67 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso compósito de perlita expandida



Fonte: (Autor, 2022)

A Tabela 17 apresenta o índice de redução sonora (R) médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação das três medições realizadas. Os resultados mostram uma boa repetibilidade das medições, uma vez que o coeficiente de variação foi inferior a 4% em todas as frequências e ficou abaixo de 2% nas frequências acima de 160Hz.

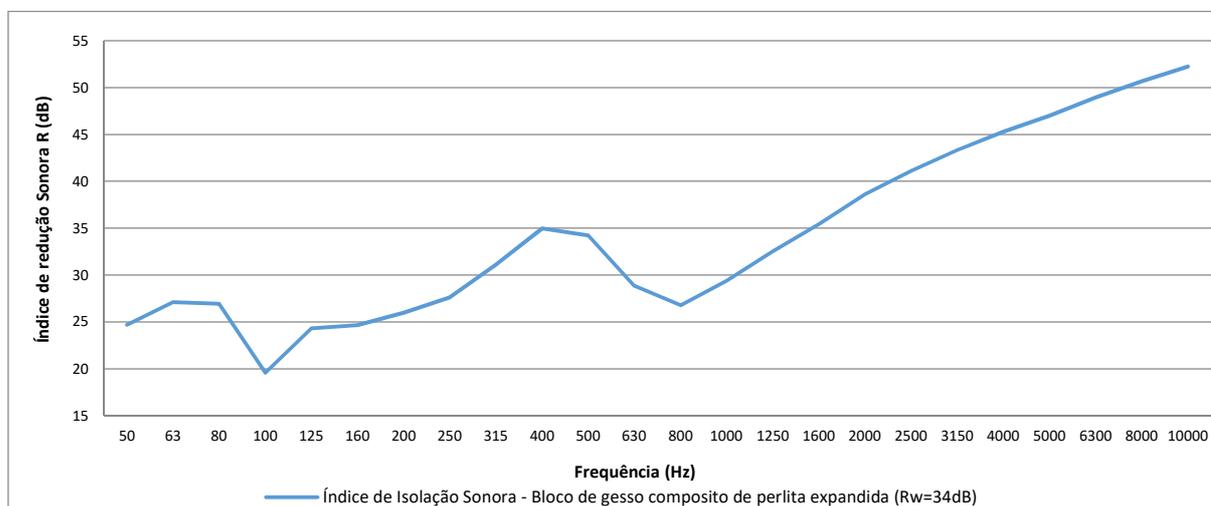
Tabela 17 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso compósito de perlita expandida

Frequência (Hz)	Índice de redução sonora médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Coeficiente de variação (%)
50	24,7	0,87	3,53
63	27,1	0,98	3,63
80	26,9	0,31	1,13
100	19,6	0,12	0,59
125	24,3	0,60	2,47
160	24,6	0,06	0,23
200	26,0	0,15	0,59
250	27,6	0,46	1,66
315	31,1	0,60	1,93
400	35,0	0,40	1,16
500	34,2	0,15	0,45
630	28,8	0,23	0,80
800	26,8	0,29	1,08
1000	29,4	0,10	0,34
1250	32,5	0,25	0,77
1600	35,4	0,26	0,75
2000	38,6	0,15	0,40
2500	41,1	0,26	0,64
3150	43,3	0,06	0,13
4000	45,3	0,10	0,22
5000	47,0	0,17	0,37
6300	48,9	0,15	0,31
8000	50,7	0,06	0,11
10000	52,2	0,31	0,58

Fonte: O autor (2020).

A Figura 68 apresenta os resultados do índice de redução sonora médio da vedação executada com os blocos de gesso compósitos de perlita expandida.

Figura 68 – Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso compósitos de perlita expandida



Fonte: (Autor, 2022)

Os resultados apresentados na Figura 68 mostram que a região controlada pela rigidez vai até a frequência de ressonância, em 100Hz. Entre as frequências de 100Hz e 250Hz tem-se uma região controlada pela ressonância, e entre 250Hz e 400Hz um crescimento linear médio de 11dB por oitava, resultado bem acima dos 6dB esperados para esta região, controlada pela lei da massa.

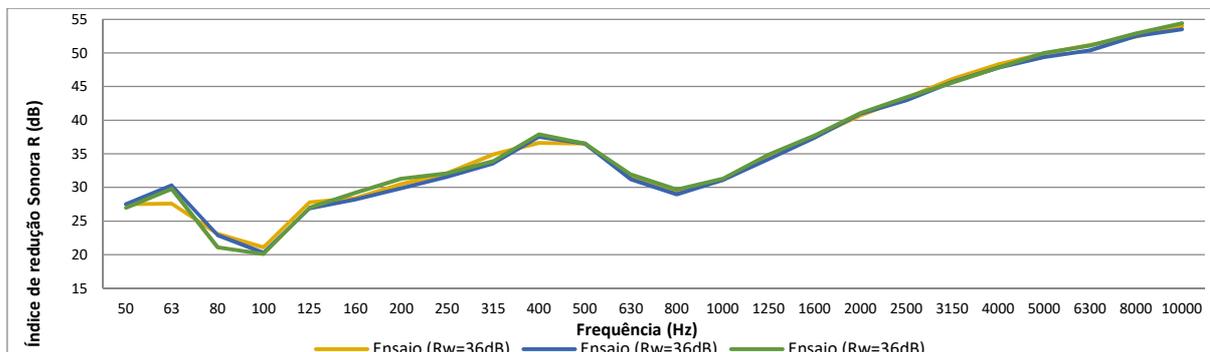
A frequência crítica aparece bem definida em 800Hz, a partir da qual a isolamento sonora cresce linearmente, em média 8dB por oitava, resultado abaixo dos 9dB esperados para esta região, controlada pelo amortecimento.

4.2.2.5. Vedação com blocos de gesso compósito de vermiculita

Os blocos de gesso compósitos de vermiculita foram produzidos manualmente em laboratório com relação água/gesso de 1.0 e adição de 5% da vermiculita em relação à massa de gesso. A vedação foi executada da mesma forma que a vedação com bloco de gesso padrão.

A Figura 69 apresenta os resultados do índice de redução sonora das três medições realizadas na vedação com bloco compósito de vermiculita, mostrando uma boa concordância dos valores. A diferença entre as medições foi menor que 3dB em todas as frequências analisadas.

Figura 69 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso compósito de vermiculita



Fonte: (Autor, 2022)

A Tabela 18 apresenta o índice de redução sonora (R) médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação das três medições realizadas. Os resultados mostram uma boa repetibilidade das medições, uma vez que o coeficiente de variação foi inferior a 5% em todas as frequências e ficou abaixo de 2% nas frequências acima de 250Hz.

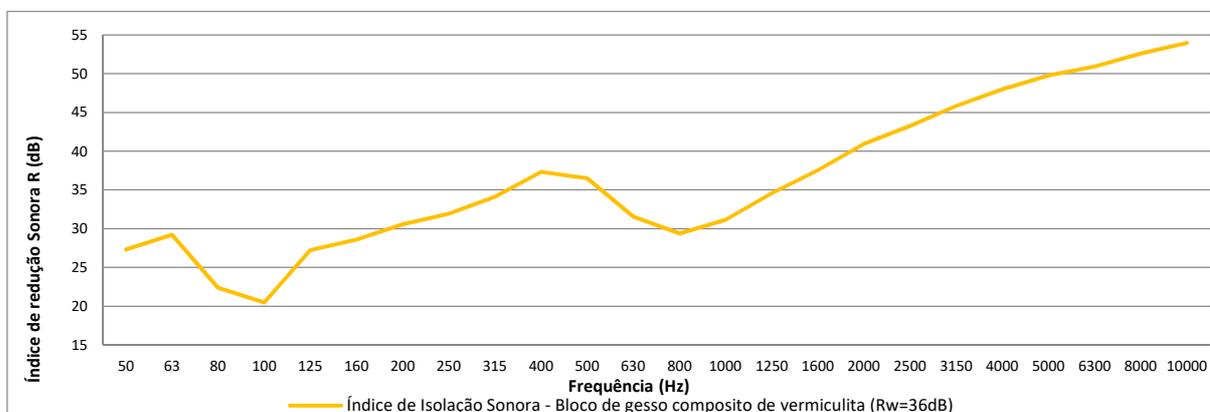
Tabela 18 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso compósito de vermiculita

Frequência (Hz)	Índice de redução sonora médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Coeficiente de variação (%)
50	27,3	0,29	1,06
63	29,2	1,44	4,91
80	22,4	1,10	4,92
100	20,5	0,53	2,58
125	27,2	0,49	1,81
160	28,6	0,53	1,85
200	30,6	0,70	2,30
250	31,9	0,29	0,90
315	34,1	0,68	1,99
400	37,3	0,67	1,78
500	36,5	0,00	0,00
630	31,6	0,35	1,11
800	29,4	0,35	1,20
1000	31,2	0,12	0,37
1250	34,6	0,35	1,02
1600	37,5	0,15	0,41
2000	40,9	0,21	0,51
2500	43,2	0,21	0,48
3150	45,8	0,26	0,58
4000	48,0	0,29	0,60
5000	49,8	0,32	0,65
6300	50,9	0,44	0,86
8000	52,6	0,26	0,50
10000	54,0	0,45	0,84

Fonte: O autor (2020).

A Figura 70 apresenta os resultados do índice de redução sonora médio da vedação executada com os blocos de gesso compósitos de vermiculita.

Figura 70 – Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso compósitos de vermiculita



Fonte: (Autor, 2022)

Os resultados apresentados na Figura 70 mostram que a região controlada pela rigidez vai até a frequência de ressonância, em 100Hz. Entre as frequências de 100Hz e 160Hz tem-se uma pequena região controlada pela ressonância, e entre 160Hz e 400Hz um crescimento linear médio de 6dB por oitava, controlada pela lei da massa.

A frequência crítica aparece bem definida em 800Hz, a partir da qual a isolamento sonora cresce linearmente, em média 7dB por oitava, resultado abaixo dos 9dB esperados para esta região, controlada pelo amortecimento.

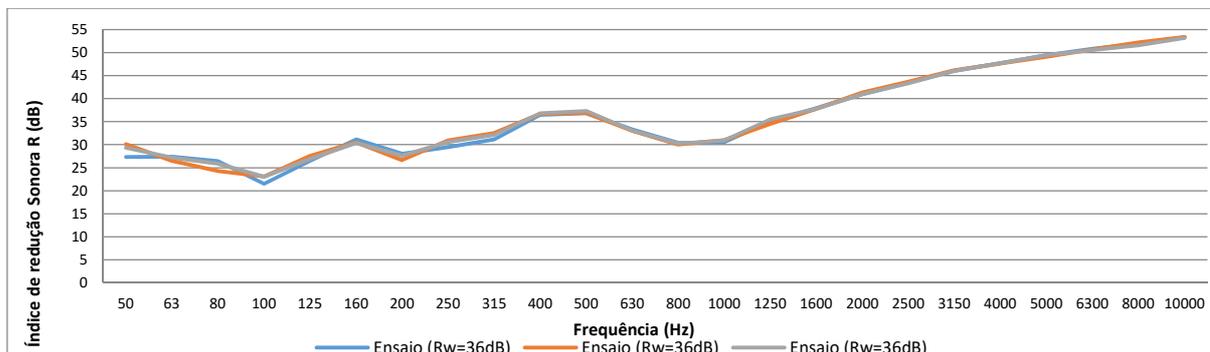
Destaca-se nos resultados do bloco de gesso composto de vermiculita, o fato da isolamento sonora aumentar já a partir da frequência de ressonância (100Hz), não havendo um “patamar” na região controlada pela ressonância, como observado nas demais vedações analisadas.

4.2.2.6. Vedação com blocos de gesso composto de alumina

Os blocos de gesso compósitos de alumina foram produzidos manualmente em laboratório com relação água/gesso de 1,0 e adição de 5% da alumina em relação à massa de gesso. A vedação foi executada da mesma forma que a vedação com bloco de gesso padrão.

A Figura 71 apresenta os resultados do índice de redução sonora das três medições realizadas na vedação com bloco composto de alumina, mostrando uma boa concordância dos valores. A diferença entre as medições foi menor que 3dB em todas as frequências analisadas.

Figura 71 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso compósito de alumina



Fonte: (Autor, 2022)

A Tabela 19 apresenta o índice de redução sonora (R) médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação das três medições realizadas. Os resultados mostram uma boa repetibilidade das medições, uma vez que o coeficiente de variação foi inferior a 5% em todas as frequências e ficou abaixo de 2% nas frequências acima de 400Hz.

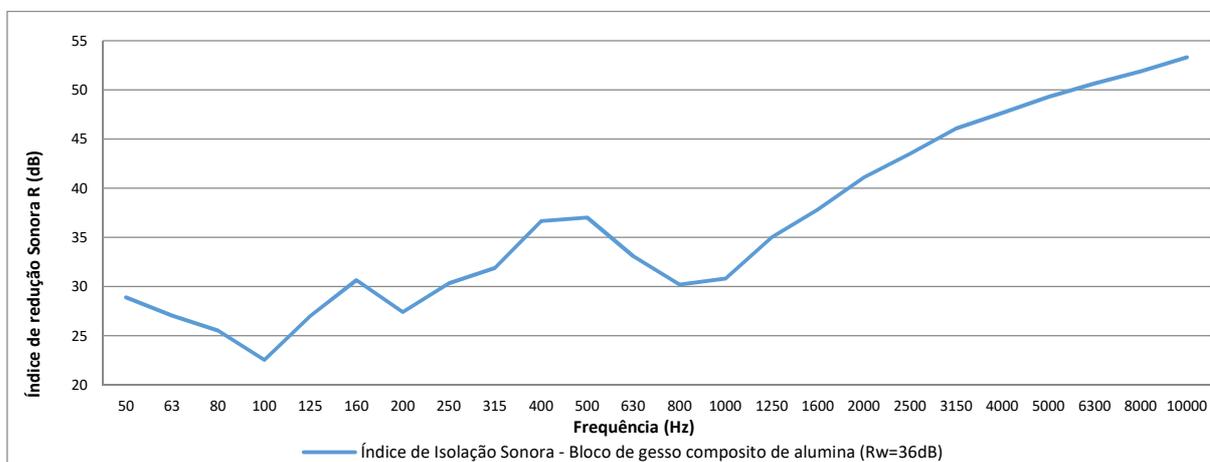
Tabela 19 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso compósito de alumina

Frequência (Hz)	Índice de redução sonora médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Coeficiente de variação (%)
50	28,9	1,44	4,99
63	27,0	0,47	1,75
80	25,5	1,10	4,30
100	22,5	0,90	3,98
125	27,0	0,56	2,06
160	30,7	0,38	1,23
200	27,4	0,72	2,63
250	30,3	0,74	2,43
315	31,9	0,72	2,26
400	36,7	0,15	0,42
500	37,0	0,26	0,72
630	33,1	0,17	0,52
800	30,2	0,20	0,66
1000	30,8	0,26	0,86
1250	35,0	0,50	1,43
1600	37,8	0,06	0,15
2000	41,1	0,17	0,42
2500	43,5	0,20	0,46
3150	46,1	0,12	0,25
4000	47,7	0,06	0,12
5000	49,3	0,17	0,35
6300	50,7	0,15	0,30
8000	51,9	0,30	0,58
10000	53,3	0,10	0,19

Fonte: O autor (2020).

A Figura 72 apresenta os resultados do índice de redução sonora médio da vedação executada com os blocos de gesso compósitos de alumina.

Figura 72 – Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso compósitos de alumina



Fonte: (Autor, 2022)

Os resultados apresentados na Figura 72 mostram que a região controlada pela rigidez vai até a frequência de ressonância, em 100Hz. Entre as frequências de 100Hz e 200Hz tem-se a região controlada pela ressonância, e entre 200Hz e 400Hz um crescimento linear médio de 9dB por oitava, resultado acima dos 6dB esperados para esta região, controlada pela lei da massa.

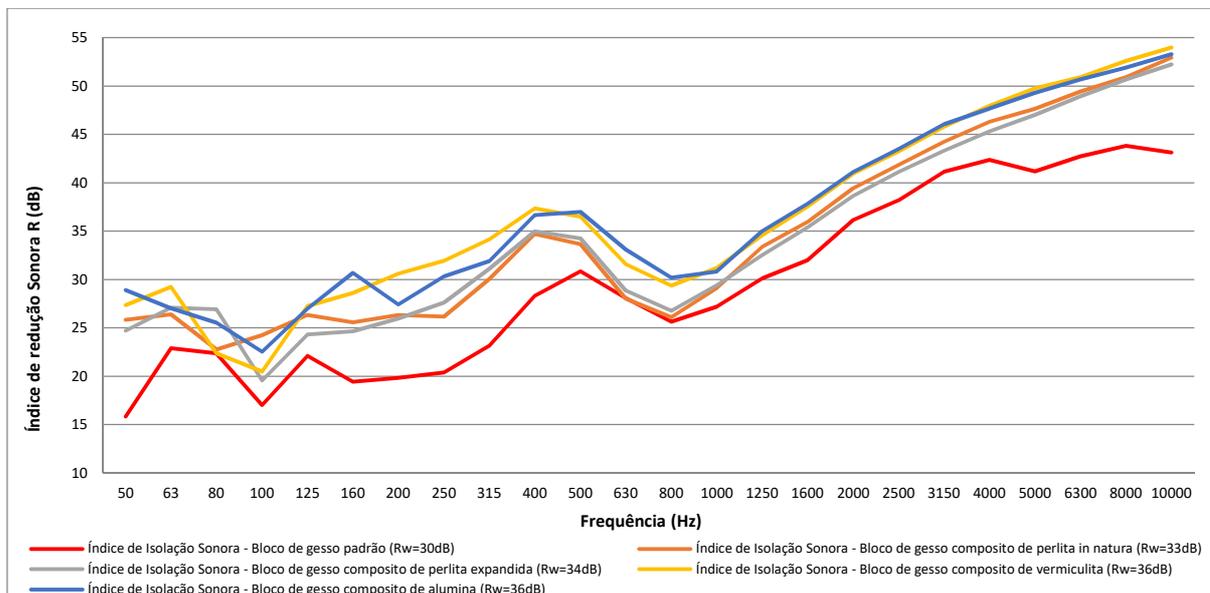
A frequência crítica aparece bem definida em 800Hz, a partir da qual a isolamento sonora cresce linearmente, em média 7dB por oitava, resultado abaixo dos 9dB esperados para esta região, controlada pelo amortecimento.

4.2.2.7. Análise acústica dos blocos de gesso padrão e compósitos

Uma análise comparativa entre as vedações executadas com o bloco de gesso padrão e os blocos compósitos é apresentada neste subitem, avaliando as relações do bloco de gesso padrão com os blocos compósitos e suas influências no índice de redução sonora.

Os resultados médios de isolamento sonora do bloco de gesso padrão e dos compósitos são apresentados na Figura 73.

Figura 73 – Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso padrão e compósitos



Fonte: (Autor, 2022)

Diante dos resultados apresentados na Figura 73, pode-se fazer algumas considerações:

- Os blocos de gesso compósitos, com exceção do compósito de perlita natural, possuem a mesma frequência de ressonância e frequência crítica do bloco de gesso padrão, permitindo afirmar que as alterações físicas e mecânicas causadas por 5% de adição não modificam a frequência natural do bloco de gesso.
- Os compósitos de perlita, natural e expandida, possuem comportamento similar, especialmente a partir da frequência de ressonância. Podendo-se atribuir a diferença de 1dB no índice de redução sonora ponderado (R_w) à variabilidade dos resultados na região controlada pela rigidez (baixa frequência).
- A adição de perlita, natural e expandida, proporcionou à pasta de gesso um ganho médio de 5dB nas regiões controladas pela ressonância e pela lei da massa. Na frequência de ressonância o índice de redução sonora praticamente não foi alterado, voltando a apresentar uma maior eficiência na região controlada pelo amortecimento.

- O compósito de alumina, que proporcionou aos blocos de gesso um aumento de apenas 4,7% na densidade com 5% de adição, elevou o índice de redução sonora de todas as frequências em média 6dB, com comportamento similar aos blocos de gesso padrão.
- O compósito de vermiculita, que proporcionou uma leve redução na densidade dos blocos de gesso, apenas 2,5% com adição de 5%, elevou significativamente o índice de redução sonora nas regiões controladas pelo amortecimento e pela lei da massa, em média 10dB. Na região controlada pelo amortecimento o acréscimo na isolação sonora foi em média 6dB.

De forma geral, os compósitos utilizados nesta pesquisa, com adição de 5%, contribuíram para o aumento na isolação sonora, sendo esse aumento mais expressivo nos compósitos de vermiculita e alumina.

O aumento na capacidade de isolação sonora do bloco de gesso compósito de alumina pode ser atribuído ao aumento de densidade, aproximadamente 4,7%, e também à redução do módulo de elasticidade, em torno de 12,6%. Essa afirmação é reiterada quando analisado a isolação sonora por faixa de frequência, visto que o bloco de gesso compósito de alumina apresenta um comportamento semelhante ao bloco de gesso padrão, estando apenas deslocado.

Já o ganho de isolação sonora obtido com a utilização do compósito de vermiculita não pôde ser correlacionado com a densidade dos blocos de gesso, pois a vermiculita influenciou reduzindo levemente essa densidade e aumentando o módulo de elasticidade. Logo, atribui-se o aumento na isolação sonora do bloco de gesso compósito de vermiculita à sua composição mineralógica, e conseqüentemente, às suas propriedades microestruturais.

4.2.3. Influência de material resiliente entre vedações em bloco de gesso

A eficiência proporcionada pela aplicação de uma membrana elástica, a base de asfalto e composto de cargas de borracha reciclada, entre duas vedações em bloco de gesso (sistema de parede dupla) foi avaliado pela correlação entre três sistemas construtivos:

- Vedação em bloco de gesso maciço de 50mm (bloco padrão);
- Vedação em bloco de gesso maciço de 50mm (bloco padrão) com aplicação da membrana elástica em uma das faces;

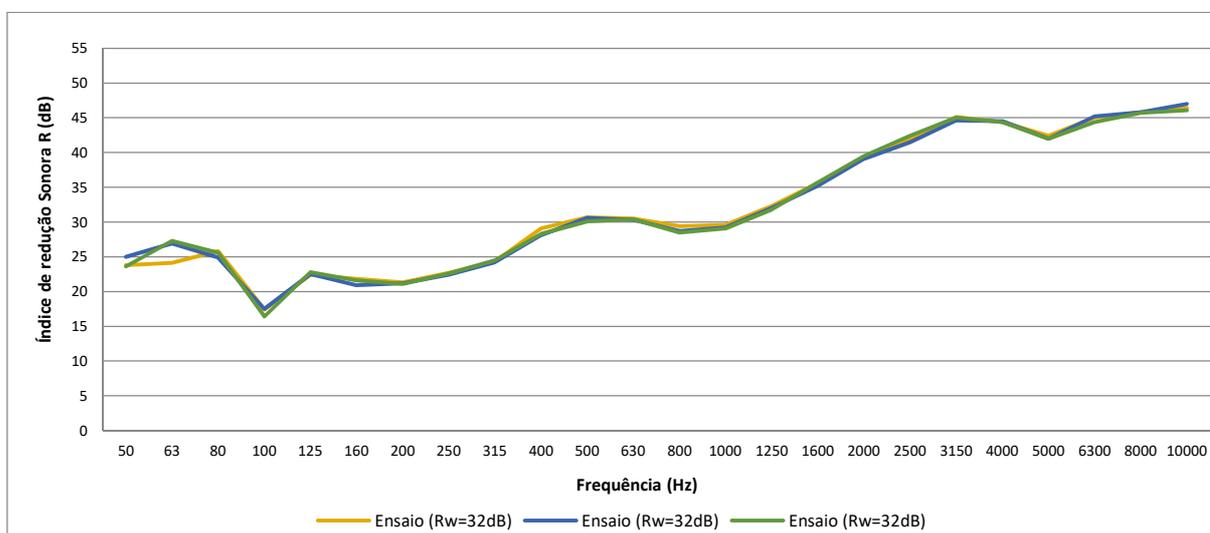
- Parede dupla com bloco de gesso maciço de 50mm conectadas por membrana elástica.

Os ensaios realizados nas vedações com bloco de gesso padrão, bloco de gesso com membrana elástica e parede dupla com membrana elástica foram realizados três vezes na mesma amostra. Sendo os resultados, por faixa de frequência, submetidos à análise de valores outliers, nenhum valor foi considerado atípico, mostrando uma boa confiabilidade no procedimento de medição. Assim, o Índice de redução Sonora (R) da amostra foi obtido pela média das três medições.

Os resultados de isolamento sonora da vedação em bloco de gesso padrão são apresentados no subitem 4.2.2.2 deste capítulo.

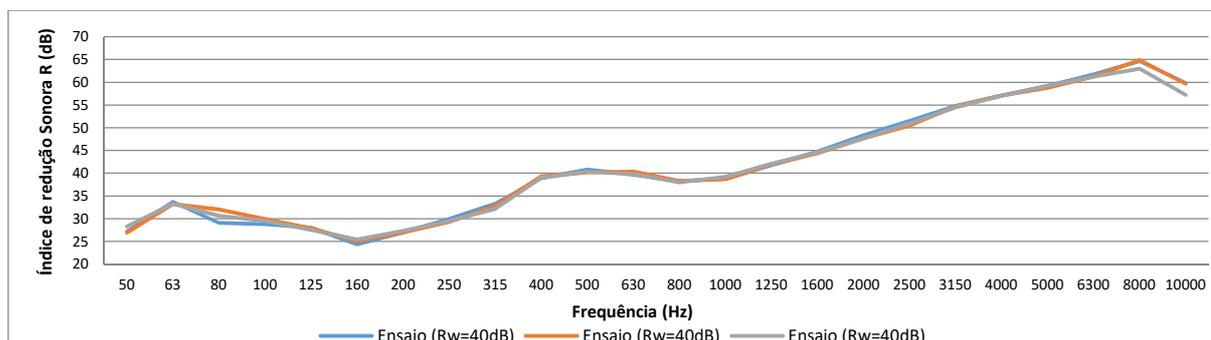
A Figura 74 e a Figura 75 apresentam, respectivamente, os resultados do índice de redução sonora das três medições realizadas na vedação em bloco de gesso com membrana elástica e parede dupla com membrana elástica. A diferença entre as medições foi menor que 3dB, em todas as frequências analisadas, mostrando uma boa concordância dos valores nas duas vedações.

Figura 74 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso padrão e membrana elástica



Fonte: (Autor, 2022)

Figura 75 – Índice de redução sonora (R) da parede dupla com bloco de gesso maciço de 50mm e membrana elástica



Fonte: (Autor, 2022)

A Tabela 20 e a Tabela 21 apresentam, respectivamente, o índice de redução sonora (R) médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação das três medições realizadas nas vedações em bloco de gesso com membrana elástica e parede dupla com membrana elástica. Os resultados mostram uma boa repetibilidade das medições, uma vez que o coeficiente de variação foi inferior a 5% em todas as frequências e ficou abaixo de 2% nas frequências acima de 200Hz.

Tabela 20 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso padrão e aplicação de emulsão elástica

Frequência (Hz)	Índice de redução sonora médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Coeficiente de variação (%)
50	24,1	0,76	3,14
63	26,4	1,29	4,88
80	25,4	0,47	1,86
100	17,1	0,61	3,56
125	22,6	0,21	0,92
160	21,4	0,47	2,20
200	21,2	0,10	0,47
250	22,6	0,15	0,68
315	24,3	0,15	0,63
400	28,5	0,53	1,86
500	30,5	0,32	1,06
630	30,4	0,10	0,33
800	28,9	0,47	1,64
1000	29,3	0,26	0,90
1250	32,0	0,25	0,79
1600	35,5	0,26	0,75
2000	39,3	0,20	0,51
2500	41,9	0,45	1,08
3150	44,9	0,26	0,59
4000	44,4	0,06	0,13
5000	42,1	0,23	0,55
6300	44,9	0,42	0,93
8000	45,8	0,06	0,13
10000	46,5	0,46	0,99

Fonte: O autor (2020).

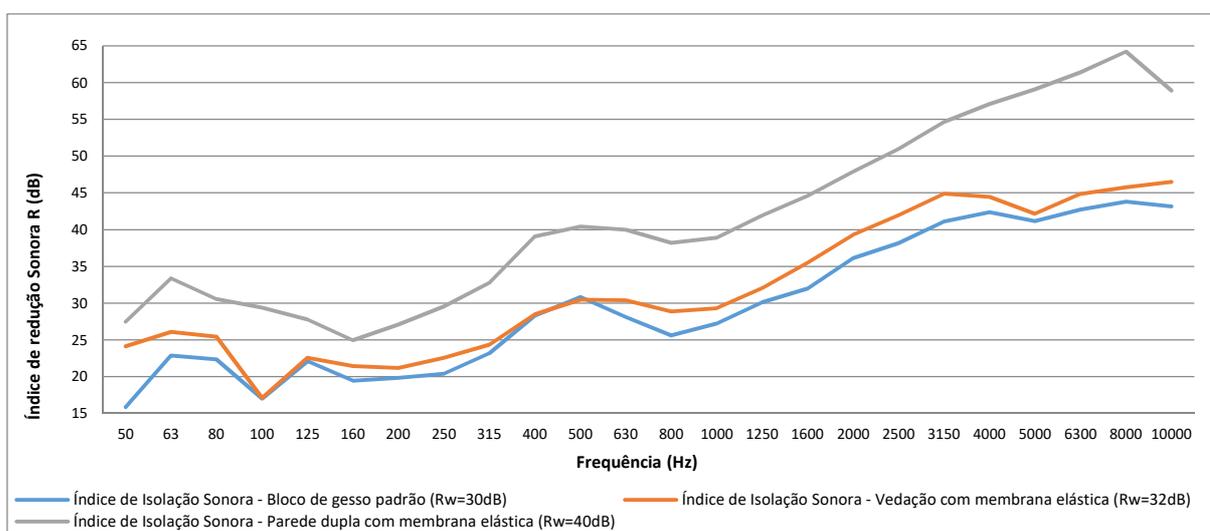
Tabela 21 – Índice de redução sonora médio da parede dupla executada com blocos de gesso e aplicação de emulsão elástica

Frequência (Hz)	Índice de redução sonora médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Coefficiente de variação (%)
50	27,5	0,74	2,68
63	33,4	0,26	0,79
80	30,6	1,45	4,74
100	29,4	0,56	1,89
125	27,8	0,26	0,95
160	25,0	0,51	2,06
200	27,1	0,17	0,64
250	29,6	0,31	1,03
315	32,8	0,55	1,68
400	39,1	0,21	0,53
500	40,4	0,32	0,80
630	40,0	0,38	0,95
800	38,2	0,17	0,45
1000	38,9	0,26	0,68
1250	41,9	0,15	0,36
1600	44,6	0,15	0,34
2000	47,9	0,35	0,72
2500	51,0	0,50	0,99
3150	54,7	0,15	0,28
4000	57,1	0,06	0,10
5000	59,1	0,23	0,39
6300	61,4	0,29	0,47
8000	64,2	1,04	1,63
10000	59,1	1,13	1,91

Fonte: O autor (2020).

Os resultados médios do índice de redução sonora das três vedações analisadas é apresentado na Figura 76.

Figura 76 – Índice de redução sonora (R) – Influência de membrana elástica entre paredes



Fonte: (Autor, 2022)

Os dados apresentados na Figura 76 mostram que a vedação em bloco de gesso padrão e com aplicação de membrana elásticas, possuem um comportamento semelhante, deslocado em média 2dB, exceto na ressonância e na região controlada pela lei da massa.

Destaca-se nesta primeira correlação, o fato do índice de redução sonora não ser modificado na frequência de ressonância (100Hz), indicando que a membrana elástica não altera a frequência natural do bloco, e na região controlada pela lei da massa, o que é esperado pois a massa da membrana elástica é irrelevante em relação a massa do bloco.

Na parede dupla com membrana elástica, a frequência de ressonância é deslocada de 100Hz para 160Hz, seguido de um crescimento linear médio de 6dB por oitava na região controlada pela ressonância.

O deslocamento da frequência de ressonância e o crescimento da isolamento na região controlada pela ressonância, fatos não observados na parede simples, podem ser atribuídos à desconexão rígida entre os blocos. A desconexão das paredes acarretou na redução do tempo de reverberação estrutural, que passou de 0,26s no bloco de gesso padrão para 0,12s na parede dupla com membrana elástica, uma redução média de 54%, o que contribuiu significativamente para o aumento no índice de redução sonora ponderado (R_w).

Isto posto, pode-se afirmar que a utilização de uma camada elástica entre duas paredes promove uma maior isolamento sonora, especialmente na região controlada pela ressonância.

Bravo *et al.* (2002) obtiveram resultados semelhantes em paredes executadas com o sistema drywall, sendo aplicado a camada elástica entre duas placas de gesso acartonado.

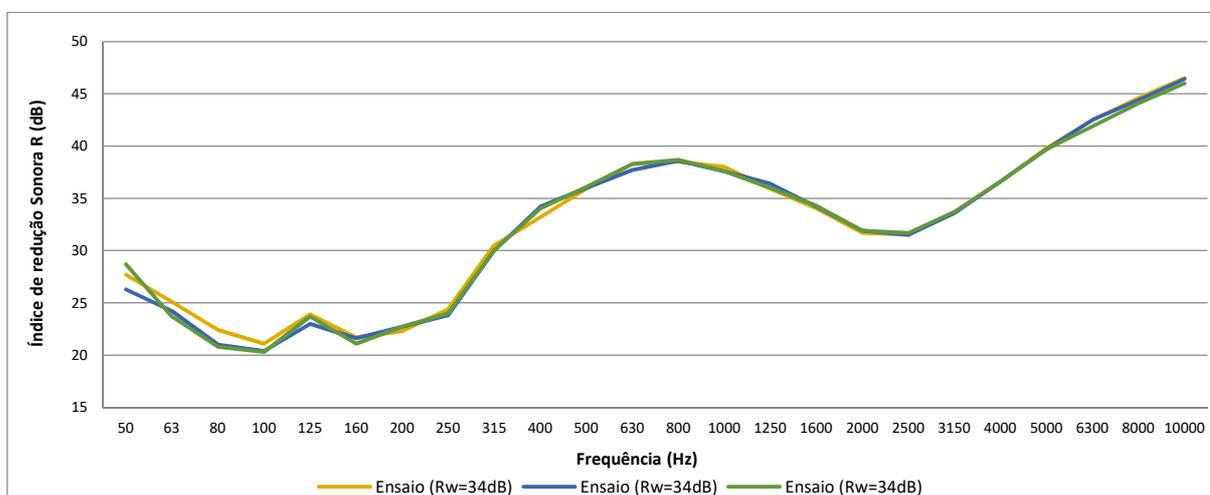
A queda no índice de redução sonora a partir de 8.000Hz, observado na parede dupla com membrana elástica, mas não nas paredes com bloco de gesso padrão e compósitos, foi analisada por Paixão (2002), afirmando que estes “vales” tendem a surgir em frequências mais baixas quando a espessura da parede é aumentada. Logo, em paredes com pequena espessura, caso dos blocos padrão e compósitos que possuem 50mm, esses vales não aparecem em frequências abaixo de 10.000Hz.

4.2.4. Vedações com blocos de gesso acústico

Os blocos de gesso acústico foram produzidos manualmente em laboratório, utilizando-se a relação água/gesso de 1,0 e uma placa de lã de rocha de 15mm incorporada, conforme descrito no item 3.1.1.1. A vedação foi executada da mesma forma que a vedação com bloco de gesso padrão.

A Figura 77 apresenta os resultados do índice de redução sonora das três medições realizadas na vedação com bloco de gesso acústico, mostrando uma boa concordância dos valores. A diferença entre as medições foi menor que 3dB em todas as frequências analisadas.

Figura 77 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso acústico



Fonte: (Autor, 2022)

A Tabela 22 apresenta o índice de redução sonora (R) médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação das três medições realizadas. Os resultados mostram uma boa repetibilidade das medições, uma vez que o coeficiente de variação foi inferior a 5% em todas as frequências e ficou abaixo de 2% nas frequências acima de 160Hz.

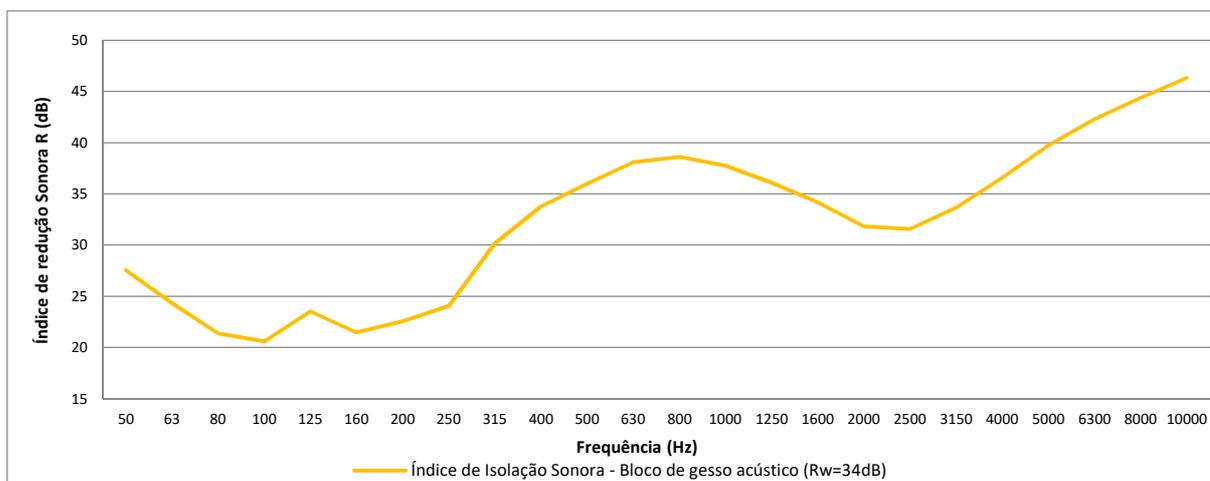
Tabela 22 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso acústico

Frequência (Hz)	Índice de redução sonora médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Coefficiente de variação (%)
50	27,6	1,21	4,37
63	24,3	0,71	2,92
80	21,4	0,87	4,07
100	20,6	0,44	2,12
125	23,5	0,47	2,01
160	21,5	0,32	1,50
200	22,6	0,23	1,02
250	24,1	0,31	1,27
315	30,2	0,29	0,96
400	33,8	0,53	1,57
500	36,0	0,10	0,28
630	38,1	0,35	0,91
800	38,6	0,10	0,26
1000	37,7	0,23	0,61
1250	36,1	0,26	0,73
1600	34,2	0,15	0,45
2000	31,8	0,12	0,36
2500	31,6	0,12	0,37
3150	33,7	0,06	0,17
4000	36,6	0,00	0,00
5000	39,7	0,06	0,15
6300	42,3	0,35	0,82
8000	44,4	0,25	0,57
10000	46,3	0,26	0,57

Fonte: O autor (2020).

A Figura 78 apresenta os resultados do índice de redução sonora médio da vedação executada com os blocos de gesso acústico.

Figura 78 – Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso acústico



Fonte: (Autor, 2022)

Os resultados apresentados na Figura 78 mostram que a região controlada pela rigidez decresce em média 5dB por oitava, até a frequência de ressonância em 100Hz. Entre as frequências de 100Hz e 250Hz tem-se uma região bem variável, controlada pela ressonância.

Diferentemente do comportamento observado nos blocos de gesso padrão e compósitos, o aumento do índice de redução na região controlada pela massa, entre 250Hz e 800Hz, segue o padrão de uma curva logarítmica, e não linear como esperado.

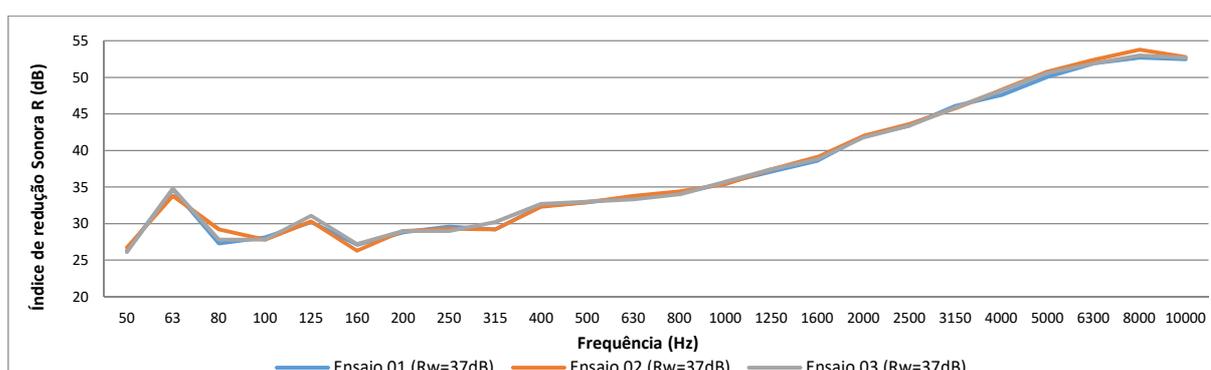
A frequência crítica, que estava em 800Hz no bloco de gesso padrão, passou para 2500Hz no bloco acústico, o que contribuiu para aumento na capacidade de isolamento sonora nas frequências mais baixas. A partir da frequência crítica, a isolamento sonora cresce linearmente, em média 7dB por oitava, como no bloco de gesso padrão.

Em comparação com os blocos de gesso padrão, os blocos de gesso acústico promoveram um aumento de 4dB no índice de redução sonora ponderado (R_w), com densidade 22% mais baixa.

Visando aumentar o ganho de isolamento sonora dos blocos acústico por aumento de massa, foi aplicado revestimento em pasta de gesso nas duas faces da parede, numa espessura total de 50mm, permitindo a avaliação de uma vedação com espessura total de 100mm.

A Figura 79 apresenta os resultados do índice de redução sonora das três medições realizadas na vedação com bloco de gesso acústico revestido, mostrando uma boa concordância dos valores. A diferença entre as medições foi menor que 2dB em todas as frequências analisadas.

Figura 79 – Índice de redução sonora (R) da vedação executada com blocos de gesso acústico revestida com pasta de gesso



Fonte: (Autor, 2022)

A Tabela 23 apresenta o índice de redução sonora (R) médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação das três medições realizadas. Os resultados mostram uma boa repetibilidade das medições, uma vez que o coeficiente de variação foi inferior a 4% em todas as frequências e ficou abaixo de 2% nas frequências acima de 200Hz.

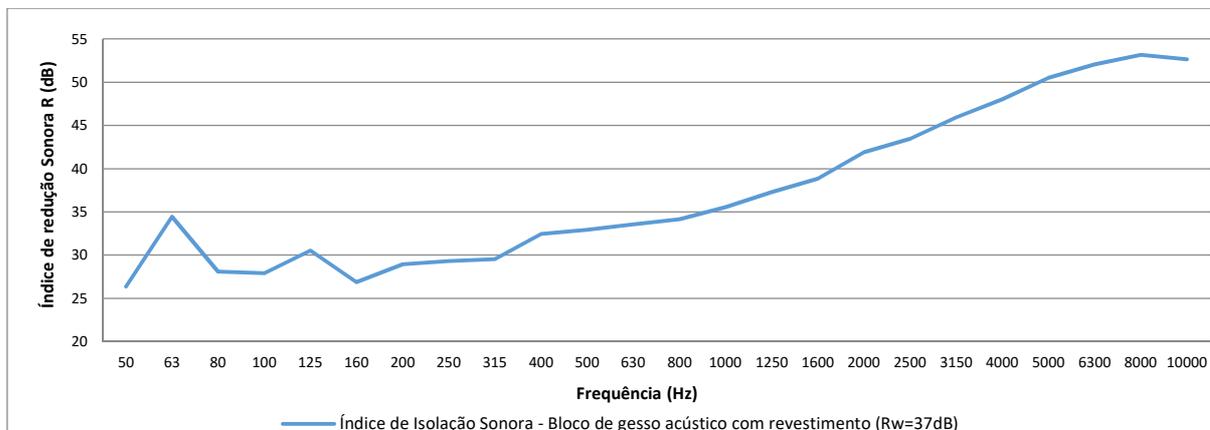
Tabela 23 – Índice de redução sonora médio da vedação executada com blocos de gesso acústico revestido

Frequência (Hz)	Índice de redução sonora médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Coeficiente de variação (%)
50	26,4	0,31	1,16
63	34,4	0,55	1,60
80	28,1	0,98	3,50
100	27,9	0,17	0,62
125	30,5	0,49	1,62
160	26,9	0,49	1,84
200	28,9	0,12	0,40
250	29,3	0,30	1,02
315	29,5	0,58	1,95
400	32,5	0,21	0,64
500	32,9	0,06	0,18
630	33,6	0,25	0,75
800	34,2	0,21	0,61
1000	35,6	0,15	0,43
1250	37,3	0,17	0,46
1600	38,8	0,25	0,65
2000	41,9	0,10	0,24
2500	43,5	0,12	0,27
3150	45,9	0,15	0,33
4000	48,0	0,38	0,79
5000	50,5	0,36	0,71
6300	52,1	0,29	0,55
8000	53,2	0,57	1,07
10000	52,7	0,15	0,29

Fonte: O autor (2020).

A Figura 80 apresenta os resultados do índice de redução sonora médio da vedação executada com os blocos de gesso acústico revestidos.

Figura 80 – Índice de redução sonora (R) médio da vedação executada com blocos de gesso acústico revestidos



Fonte: (Autor, 2022)

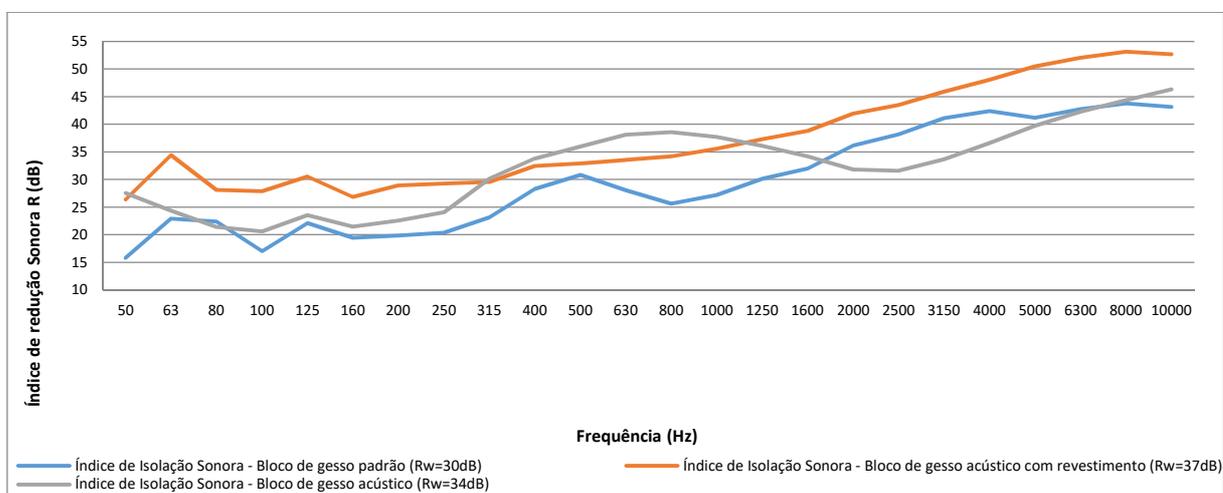
Os resultados apresentados na Figura 80 indicam que a região controlada pela rigidez vai até a frequência de 100Hz, a partir da qual a isolamento sonora passa a ser controlada pela ressonância, mostrando uma baixa variação até 315Hz.

A partir de 315Hz a isolamento sonora apresenta um crescimento linear médio de 6dB por oitava, resultado abaixo dos 9dB esperados para esta região, controlada pelo amortecimento.

Destaca-se nos resultados o fato do bloco de gesso acústico revestido não apresentar uma frequência crítica nas altas frequências, como ocorreu no bloco de gesso padrão e no bloco acústico.

Os resultados médios do índice de redução sonora do bloco de gesso padrão, bloco acústico e bloco acústico revestido são apresentados na Figura 81.

Figura 81 – Índice de redução sonora (R) – Análise do bloco acústico



Fonte: (Autor, 2022)

O deslocamento da frequência crítica para valores mais altos, alongando o crescimento na região controlada pela lei da massa, entre 250Hz e 800Hz, proporcionou ao bloco acústico uma maior isolação sonora. No entanto, o vale proporcionado pela frequência crítica também foi alongado, contribuindo para uma redução no índice de redução sonora.

O índice de redução sonora da vedação executada com o bloco de gesso acústico revestido possui um comportamento similar ao bloco de gesso padrão, deslocado em média 8dB, o que pode ser atribuído ao aumento da massa da parede. A exceção ocorre na região controlada pela lei da massa, que apresentou um leve crescimento apenas nas frequências entre 315Hz e 400Hz, e na frequência crítica, que não constituiu um vale, crescendo linearmente a partir de 800Hz a uma taxa de 6dB por oitava.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal desta tese foi propor alternativas para aumento na capacidade de isolamento sonora de vedações executadas em bloco de gesso, sendo para isso avaliada a influência das propriedades física e mecânicas em compósitos de gesso. As mudanças provocadas pela adição de minerais na composição dos blocos de gesso, modificando suas propriedades físicas e mecânicas, foram analisadas e correlacionadas com o comportamento da perda de transmissão sonora de paredes.

Garantir uma isolamento sonora compatível com a utilização dos ambientes é um objetivo trivial no projeto de isolamento acústico, no entanto, indicar os materiais com a capacidade de isolamento sonora necessária não é uma tarefa tão simples, pois a perda de transmissão sonora segue basicamente a lei da massa, onde o aumento na perda de transmissão sonora é diretamente proporcional à densidade superficial (kg/m^2) da vedação. Uma outra forma utilizada para se obter um ganho na perda de transmissão é a utilização de paredes dupla e materiais absorventes acústico, como lã de vidro e lã de rocha.

Mas as propriedades internas dos materiais podem ser alteradas para potencializar o isolamento acústico, e neste estudo adicionou-se à mistura de gesso 4 diferentes minerais: perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina. As propriedades físicas e mecânicas destes compósitos foi caracterizada, e suas propriedades acústicas correlacionadas com as mudanças microestruturais e de amortecimento.

- A perlita natural e a alumina, que possuem maior massa unitária que o gesso, proporcionaram ao compósito uma maior densidade, aumentada em média 2%. Já a perlita expandida e a vermiculita, que apresentaram menor massa unitária que o gesso, reduziram a densidade do compósito em média 8% e 3%, respectivamente.
- Os compósitos influenciaram no tempo de pega da pasta de gesso, modificando seu tempo de trabalhabilidade. O tempo de início de pega, que caracteriza o intervalo de tempo que a pasta de gesso pode ser trabalhada, foi aumentado nos compósitos com adição de perlita natural e alumina, os quais possuem baixa granulometria. Já o tempo de fim de pega, que caracteriza o endurecimento da pasta de gesso, foi reduzido nos compósitos de perlita expandida e vermiculita, minerais

granulares e que, conseqüentemente, possuem uma maior capacidade de absorção de água da mistura. Diante dos resultados apresentados, as adições de perlita expandida e vermiculita mostram-se interessantes na fabricação de elementos pré-moldados, pois não alteram o tempo de moldagem, mas reduzem o tempo de endurecimento, o que permite um ganho na produtividade.

- Como esperado, a redução na relação água/gesso provocou também uma redução na densidade dos compósitos. Contudo, a taxa de redução não foi expressiva, sendo de aproximadamente 6,5% a cada 0,1 unidade que é reduzida na relação água/gesso, o que provocou uma redução máxima de 31% entre as relações de 0,7 e 1,2. A proporcionalidade na redução de densidade, em função da relação água/gesso, não foi alterada pelas adições minerais utilizadas, mostrando que os compósitos estudados não influenciam na taxa de redução da densidade.
- Na análise de dureza da pasta de gesso, padrão e compósitos, foi constatado que as adições de perlita natural e alumina contribuem positivamente, gerando aumentos acima de 20%. Já os compósitos granulares, perlita expandida e vermiculita, não apresentam resultados homogêneos que permitam estabelecer uma correlação entre as relações água/gesso, o que pode ser atribuído à heterogeneidade do compósito. Quando correlacionada com a densidade, a dureza da pasta de gesso apresenta um crescimento linear com taxa média de 3,35MPa a cada 100kg/m³, independente da composição.
- O estudo da resistência à compressão da pasta de gesso foi realizado para avaliar o impacto das adições, sendo percebido redução da resistência em todos os compósitos. Os compósitos granulares, perlita expandida e vermiculita, apresentaram a maior redução de resistência, variando entre 30% e 50%. Correlacionando a densidade (função da relação água/gesso) com a resistência a compressão, observou-se que a resistência cresce exponencialmente com a redução na densidade. Pode-se então afirmar que a relação água/gesso é a responsável direta pela resistência à compressão.

- Assim como na resistência à compressão, todos os compósitos analisados reduziram a resistência à tração na flexão. A maior redução percentual foi observada nos compósitos granulares, perlita expandida e vermiculita, variando entre 20% e 45%. Quanto à relação entre a resistência à tração na flexão e a densidade, foi verificado que a resistência cresce linearmente com a redução na densidade. Nos compósitos de perlita natural e alumina a taxa de crescimento foi semelhante ao gesso padrão, mostrando que essas adições reduzem a resistência mas não modificam as proporcionalidades do gesso padrão, diferentemente dos compósitos de perlita expandida e vermiculita, que não apresentaram resultados correlacionáveis.

- O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido por testes não destrutivos, e os resultados mostraram que todos os compósitos reduziram o módulo da pasta de gesso. A redução mostrou-se mais eficiente no compósito de alumina, com reduções de até 21% em relação à pasta de gesso padrão. O aumento na relação água/gesso também contribuiu para redução do módulo de elasticidade, chegando a reduções de até 50% entre as relações 0,7 e 1,2. Com o aumento de densidade o módulo de elasticidade dinâmico da pasta de gesso cresceu exponencialmente, tanto na pasta de gesso padrão como nos compósitos.

- Na análise por microscopia eletrônica de varredura observou-se que o aumento na relação água/gesso provoca o afastamento entre os cristais e torna-os mais finos e alongados, conseqüentemente mais frágeis e susceptíveis à ruptura. Observou-se no compósito de perlita natural que os cristais de gesso ficaram ainda mais afastados, finos e alongados, sendo essa a possível causa da redução na resistência deste compósito. Os compósitos de perlita expandida e vermiculita, materiais granulares, apresentaram uma microestrutura bem diferente da pasta de gesso padrão, pois as agulhas não são alongadas e uniformes, o que sugere uma má formação, com estruturas curtas e sem homogeneidade. Já os compósitos de alumina apresentaram uma microestrutura totalmente diferente da pasta de gesso padrão e dos demais compósitos, pois os

crystalinos formados não possuem o formato de agulha (finos a alongados), mas de pequenas placas lamelares e heterogêneas.

- A caracterização mecânica dos blocos de gesso, utilizados na determinação do Tempo de reverberação estrutural (T_s) e do Índice de Redução Sonora (R), foi realizada a partir dos ensaios indicados na norma ABNT NBR 16494 (ABNT, 2017), sendo realizado testes dimensionais (comprimento, largura e altura), determinação da densidade, dureza e carga de flexão. Os blocos apresentaram baixa variação dimensional, mostrando uma boa homogeneidade na fabricação. Quanto à densidade, o bloco de gesso padrão e os compósitos foram classificados com média densidade, também com uma baixa variação de resultados. A dureza do bloco gesso padrão foi reduzida em até 22%, se comparado com os compósitos analisados. No entanto, o método da esfera apresenta alta variabilidade de resultados, com coeficientes de variação chegando à 24%, não permitindo assim uma análise conclusiva sobre a influência dos compósitos na dureza dos blocos de gesso. A carga de flexão foi analisada para o bloco de gesso inteiro, conforme procedimento descrito na norma BS EN 12859 (2011), sendo observado reduções de até 18% no compósito de vermiculita e alumina.
- As adições de perlita natural, perlita expandida, vermiculita e alumina não apresentaram alteração significativa no tempo de reverberação estrutural da pasta de gesso. Quando utilizado lã de rocha na composição do bloco de gesso, o tempo de reverberação estrutural foi levemente reduzido, caindo de 0,26s para 0,18s, uma redução de 30,7%. A utilização de emulsão elástica entre as paredes de bloco de gesso apresentou a maior redução no tempo de reverberação estrutural, chegando a 0,12s, uma redução de 58,3%. A redução no tempo de reverberação estrutural impactou diretamente na isolação sonora, deslocando as frequências críticas e contribuindo para um aumento no índice de redução sonora ponderado (R_w).
- Os resultados do índice de redução sonora (R), em todos os testes, apresentaram boa repetibilidade, sendo o coeficiente de variação inferior a 10% em todas as frequências.

- A frequência natural ou frequência de ressonância dos blocos de gesso não foi modificada por nenhuma das adições utilizadas.
- As adições de perlita natural e perlita expandida, apesar de modificarem a densidade, a dureza e a resistência da pasta de gesso, em nada modificam sua capacidade de isolamento sonora. Logo, a redução de 5% na densidade do bloco de gesso, por adição de perlita expandida, não compromete a isolamento sonora do bloco de gesso.
- O bloco de gesso compósito de alumina elevou o índice de redução sonora em média 6dB para todas as frequências, tendo um comportamento similar aos blocos de gesso padrão. A adição de alumina mostra-se extremamente eficiente na capacidade de isolamento sonora, pois com adição de apenas 5% promoveu um aumento médio de 4,7% na densidade e uma redução de 12,6% no módulo de elasticidade, mudanças que proporcionaram à vedação um ganho de 20% na isolamento sonora.
- A adição de vermiculita, diferentemente da alumina, reduziu a densidade do bloco de gesso em média 2,5%, mas proporcionou também um ganho de 6dB no índice de redução sonora ponderado (R_w). Nas regiões controladas pelo amortecimento e pela lei da massa, o compósito mostrou-se extremamente eficiente, promovendo ganhos de até 10dB no índice de redução sonora. Esse ganho de isolamento sonora pode ser atribuído às alterações microestruturais, promovidas pela composição mineralógica da vermiculita.
- A aplicação de membrana elástica ao bloco de gesso mostrou-se eficiente quando aplicada diretamente ao bloco, promovendo um aumento de 2dB no R_w , com ganhos de isolamento sonora especialmente nas altas frequências, acima de 500Hz.
- Já a utilização de parede dupla com membrana elástica entre as alvenarias, aumenta a capacidade de isolamento sonora do sistema em 10dB, em comparação com a parede simples. Com a desconexão elástica entre as paredes, o que gerou uma redução no tempo de reverberação estrutural, a frequência de ressonância é deslocada, passando de 100Hz para 160Hz, e a isolamento sonora é aumentada na

região controlada pela ressonância. Diante dos resultados apresentados, a utilização de membrana elástica mostra-se eficiente no aumento da isolamento sonora de paredes duplas em bloco de gesso.

- Os blocos de gesso acústico, com lã de rocha em sua composição e mais leves que os blocos padrão, mostraram-se mais eficientes, promovendo aumento de 4dB no índice de redução sonora ponderado (R_w), com ganhos de isolamento sonora especialmente nas frequências abaixo da frequência crítica, que foi deslocada de 800Hz para 2500Hz.
- Com aplicação de revestimento no bloco de gesso acústico, aumentando a espessura e a massa da parede, o índice de redução sonora apresentou um comportamento semelhante ao bloco de gesso padrão, deslocado em média 8dB. Destaca-se na parede revestida o fato da frequência crítica não constituir um vale, mas crescendo linearmente a partir de 800Hz a uma taxa de 6dB por oitava.

Os blocos compósitos de vermiculita e alumina apresentaram a maior capacidade de isolamento sonora em todas as frequências, mas destaca-se a região controlada pela ressonância, onde a isolamento sonora cresce linearmente, diferentemente do bloco de gesso padrão e demais compósitos que possuem um patamar nesta região.

Esta pesquisa mostrou que os blocos compósitos de vermiculita e alumina possuem grande eficiência na capacidade de isolamento sonora, promovendo aumentos de até 6dB no índice de redução sonora ponderado (R_w), sem aumento de espessura. Estes blocos compósitos foram até mais eficientes que os blocos acústicos, produzidos com mantas de lã de rocha.

Neste estudo foram analisados compósitos que, com apenas 5% de adição, promoveram ótimos ganhos na isolamento sonora dos blocos de gesso. Pesquisas com percentuais maiores de adição podem ser realizadas na intenção de potencializar ainda mais essa isolamento. A utilização de material elásticos entre as alvenarias de bloco de gesso também se mostrou eficiente no aumento da isolamento sonora, e novos trabalhos podem ser realizados correlacionando estes resultados com a aplicação de paredes duplas em outras condições, como espaço de ar e aplicação de materiais absorventes.

REFERÊNCIAS

Abidi, S.; Joliff, Y.; Favotto, C. **Impact of perlite, vermiculite and cement on the Young modulus of a plaster composite material: Experimental, analytical and numerical approaches**. Composites Part B 92 (2016) 28-36.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho**, 2021.

___ **NBR 12128: Gesso para construção civil — Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso**, 2019.

___ **NBR 12129: Gesso para construção civil — Determinação das propriedades mecânicas**, 2019.

___ **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**, 2005.

___ **NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica**, 2008.

___ **NBR ISO 16283-1: Acústica – Medição de campo do isolamento acústico nas edificações e nos elementos de edificações – Parte 1: isolamento a ruído aéreo**, 2018.

___ **NBR 16494: Bloco de gesso para vedação vertical — requisitos**, 2017.

___ **NBR 16495: Bloco de gesso para vedação vertical – método de ensaio**, 2016.

___ **NBR ISO 717-1: Acústica – Classificação de isolamento acústico em edificações e elementos de edificações – Parte 1: isolamento a ruído aéreo**, 2021.

Agulló, Luis; Aguado, Antonio; Garcia, Tomás. **Study of the use of paper manufacturing waste in plaster composite mixtures**. Building and Environment 41 (2006) 821–827.

Alonso, M. López; Echevarria, M. J. Martinez; Garach, L.; Galán, A.; Ordoñez, J.; Agrela, F. **Feasible use of recycled alumina combined with recycled aggregates in road construction**. Construction and Building Materials 195 (2019) 249–257.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **E2611-19: Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method**, 2019.

___ **E756-04: Standard test method for measuring vibration-damping properties of materials**, 2004.

Avalos, J. C. Rubio; Ramírez, A. Manzano; Bárcenas, J. G. Luna; Robles, J. F. Pérez; Guzmán, E. M. Alonso; García, M. E. Contreras; Hernández, J. González.

Flexural behavior and microstructure analysis of a gypsum-SBR composite material. *Materials Letters* 59 (2005) 230– 233.

Barakat, F. I.; Salam, N. F. Abdel. **Effect of addition of polypropylene fibers on the properties of gypsum blocks.** *Journal Advanced chemical sciences* Vol. 5 Issue 2 (2019) 629–631.

Barbosa, A. A.; Ferraz, A. V.; Santos, G. A. **Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso β obtido do polo do Araripe.** *Cerâmica* 60 (2014) 501-508.

Barriguete, Alejandra Vidales; Sánchez, Evangelina Atanes; Merino, Mercedes del Río; Ramírez, Carolina Piña. **Analysis of the improved water-resistant properties of plaster compounds with the addition of plastic waste.** *Construction and Building Materials* 230 (2020), 116956.

Bíblia Sagrada. Esdras. In: A Bíblia sagrada. Tradução Nova Versão Internacional. Sociedade Bíblica do Brasil, 2000. Cap. 3, vers.13.

Bies, David A.; Hansen, Colin H. **Engineering Noise Control: Theory and Practice.** 2ª edição. Spon Press, 2009.

Binici, Hanifi; Aksogan, Orhan. **Insulation material production from onion skin and peanut shell fibres, fly ash, pumice, perlite, barite, cement and gypsum.** *Materials Today Communications* 10 (2017) 14–24.

Binici, Hanifi; Aksogan, Orhan; Bakbak, Derya; Kaplan, Hasan; Isik, Bilge. **Sound insulation of fiber reinforced mud brick walls.** *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1035–1041.

Binici, Hanifi; Gemci, Remzi; Kucukonder, Adnan; Solak, H. Hale. **Investigating sound insulation, thermal conductivity and radioactivity of chipboards produced with cotton waste, fly ash and barite.** *Construction and Building Materials* 30 (2012) 826–832.

Bolmsvik, Asa; Brandt, Anders. **Damping assessment of light wooden assembly with and without damping material.** *Engineering Structures* 49 (2013) 434–447.

Brandão, Catharine Pereira. **Compósito com matriz de gesso e reforço de manta de sisal.** Dissertação, Universidade Federal da Bahia, 2015.

Brandão, Catharine; Carvalho, Ricardo. **Métodos dinâmicos aplicados na avaliação de compósito de gesso e manta de sisal.** *Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão* v.4, n.4 (2019) 185-1/185-14.

Bravo, Jose Maria; Sinisterra, Jaime; Uris, Antonio; Llinares, Jaime; Estelles, Hermelando. **Influence of air layers and damping layers between gypsum boards on sound transmission.** *Applied Acoustics* 63 (2002) 1051–1059.

BS EN, European Standard. **EN 12859: Gypsum blocks. Definitions, requirements and test methods,** 2011.

Caballol, David; Raposo, Álvaro P. **Analysis of the measurement of transmission loss in rigid building materials with a standing wave tube.** *Construction and Building Materials* 182 (2018) 242–248.

Cunha, Paulo Waldemiro Soares. **Estudo sobre as potencialidades de compósitos à base de gesso e fibras de coco seco para aplicação na construção civil.** Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

Czaderna, Anna; Kocemba, Aleksandra; Kozanecki, Marcin; Mucha, Maria; Mróz, Patrycja. **The influence of cellulose derivatives on water structure in gypsum.** *Construction and Building Materials* 160 (2018), 628–638.

Davy, J. L. **The measurement of the damping loss factor of gypsum plasterboard.** *Proceedings of the 10^o Asia-Pacific Vibration Conference* (2003) 93–98.

Dias, José António Lopes. **Acústica transmissões marginais no edifício do porto burguês.** Dissertação, Universidade do Porto, 2017.

Díaz, J. J. Del Coz; Rabanal, F. P. Álvarez; Nieto, P. J. García; López, M. A. Serrano. **Sound transmission loss analysis through a multilayer lightweight concrete hollow brick wall by FEM and experimental validation.** *Building and Environment* 45 (2010) 2373-2386.

Dijckmans, A.; Vermeir, G.; Lauriks, W. **Sound transmission through finite lightweight multilayered structures with thin air layers.** *The Journal of the Acoustical Society of America* 128 (2010) 3513–3524.

Dolezelová, Magdaléna; Scheinherrová, Lenka; Krejsová, Jitka; Keppert, Martin; Cerny, Robert. **Investigation of gypsum composites with different lightweight fillers.** *Construction and Building Materials* 297 (2021) 123791.

Elkhessaimi, Yassine; Doyen, Nicolas Tessier; Smith, Agnès. **Effects of microstructure on acoustical insulation of gypsum boards.** *Journal of Building Engineering* 14 (2017) 24–31.

Erbs, A.; Nagalli, A.; Mymrine, V.; Carvalho, K. Q. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado.** *Cerâmica* 61 (2015) 482-487.

Erdem, T. K.; Meral, Ç; Tokyay, M.; Erdogan, T. Y. **Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements.** *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 13–21.

Eve, S.; Gomina, M; Ozouf, J. C; Orange, G. **Microstructure of latex-filled plaster composites.** *Journal of the European Ceramic Society* 27 (2007) 1395–1398.
Fernandes, Carlos Alberto Hermann. **Reciclagem de resíduos de gesso de construção para uso em revestimentos, placas de forro e molduras de acabamento.** Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

Ferreira, Maria de Fátima Neto; Bertoli, Stelamaris Rolla. **Desempenho acústico de paredes de blocos e tijolos cerâmico: uma comparação entre Brasil e Portugal.** *Ambiente Construído*, v. 10, n. 4, 169-180, 2010.

Fodil, Dif; Mohamed, Mouli. **Compressive strength and corrosion evaluation of concretes containing pozzolana and perlite immersed in aggressive environments.** *Construction and Building Materials* 179 (2018) 25–34.

Gencil, Osman; Diaz, Juan Jose Del Coz; Sutcu, Mucahit; Koksall, Fuat; Rabanal, Felipe Pedro Álvarez; Barrera, Gonzalo Martínez. **A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers.** *Construction and Building Materials* 113 (2016) 732–740.

Gencil, Osman; Diaz, Juan Jose del Coz; Sutcu, Mucahit; Koksall, Fuat; Rabanal, F. P. Alvarez; Martinez-Barrera, Gonzalo; Brostow, Witold. **Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results.** *Energy and Buildings* 70 (2014) 135–144.

Gerges, Samir N.Y. **Ruído: fundamentos e controle.** 2ª edição. Florianópolis/SC: LVA, 2000.

Ghassabzadeha, Hamid; Mohadespour, Ahmad; Mostaedi, Meisam Torab; Zaheri, Parisa; Maragheh, Mohammad Ghannadi; Taheri, Hossein. **Adsorption of Ag, Cu and Hg from aqueous solutions using expanded perlite.** *Journal of Hazardous Materials* 177 (2010) 950–955.

Gopalakrishnan, R.; Chinnaraju, K. **Durability of ambient cured alumina silicate concrete based on slag/fly ash blends against sulfate environment.** *Construction and Building Materials* 204 (2019) 70-83.

Guenanou, Farida; Khelafi, Hamid; Aattache, Amel. **Behavior of perlite-based mortars on physicochemical characteristics, mechanical and carbonation: Case of perlite of Hammam Boughrara.** *Journal of Building Engineering* 24 (2019).

Guo, Rong; Wang, Li-ting; Tang, Wen-bo; Han, Shuai. **A two-dimensional approach for sound attenuation of multi-chamber perforated resonator and its optimal design.** *Applied Acoustics* 127 (2017) 105–117.

Herrero, Tamara; Vegas, Iñigo J.; Santamaría, Amaia; San-José, José T.; Skaf, Marta. **Effect of high-alumina ladle furnace slag as cement substitution in masonry mortars.** *Construction and Building Materials* 123 (2016) 404–413.

Hirata, Yoshihiro; Takehara, Kousuke; Shimonosono, Taro. **Analyses of Young's modulus and thermal expansion coefficient of sintered porous alumina compacts.** *Ceramics International* 43 (2017) 12321–12327.

Huq, Mohammad Mahmudul; Chen, Pei-Qi; Hsieh, Chien-Te; Yang, Hsi-Chi. **Sound transmission loss from polyvinyl acetate polymer mixed with different porous carbons.** *Microporous and Mesoporous Materials* 232 (2016) 184e188.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 12354-1: Building Acoustics – Estimation of Acoustic Performance of Building from the Performance of Elements. Part 1: Airborne Sound Insulation between rooms**, 2017.

___ **ISO 10848-1: Acoustics — Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms — part 1: Frame document**, 2017.

___ **ISO 10140-2: Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — part 2: Measurement of airborne sound insulation**, 2021.

lucolano, Fabio; Boccarusso, Luca; Langella, Antonio. **Hemp as eco-friendly substitute of glass fibres for gypsum reinforcement: Impact and flexural behaviour**. Composites Part B 175 (2019) 107073.

Jaouen, Luc; Renault, Amélie; Deverge, Mickael. **Elastic and damping characterizations of acoustical porous materials: Available experimental methods and applications to a melamine foam**. Applied Acoustics 69 (2008) 1129–1140.

Jiang, Jun; Lu, Zhongyuan; Li, Jun; Fan, Yong; Niu, Yunhui. **Preparation and hardened properties of lightweight gypsum plaster based on pre-swelled bentonite**. Journal Advanced chemical sciences Vol. 5 Issue 2 (2019) 629–631.

Kanno, Wellington Massayuki. **Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho**. Tese, Universidade de São Paulo, 2009.

Karein, S. Mahmoud Motahari; Joshaghani, Alireza; Ramezani pour, A.A.; Isapour, Soroush; Karakou zian, Moses. **Effects of the mechanical milling method on transport properties of self-compacting concrete containing perlite powder as a supplementary cementitious material**. Construction and Building Materials 172 (2018) 677–684.

Koksal, Fuat; Gencil, Osman; Kaya, Mehmet. **Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures**. Construction and Building Materials 88 (2015) 175–187.

Krzyzaka, Aneta; Kucharczyk, Wojciech; Gaska, Jacek; Szczepaniak, Robert. **Ablative test of composites with epoxy resin and expanded perlite**. Composite Structures 202 (2018) 978–987.

Li, Laibo; Zhou, Xiangming; Li, Yanlin; Gong, Chenchen; Lu, Lingchao; Fu, Xinghua; Tao, Wenhong. **Water absorption and water/fertilizer retention performance of vermiculite modified sulphoaluminate cementitious materials**. Construction and Building Materials 137 (2017) 224–233.

Li, Ye; Zhu, Lingling; Liu, Kun; Ding, Dafei; Zhang, Ju; Ye, Guotian. **Effect of curing temperature on volume stability of CAC-bonded alumina-based castables**. Ceramics International 45 (2019) 12066–12071.

Liang, Ji-Zhao; Jiang, Xing-Hua. **Sound Insulation in Polymer/Inorganic Particle Composites. I. Theoretical Model.** Journal of Applied Polymer Science, Vol. 125, 676–681 (2012)

Long, Marshall. **Architectural acoustics.** 2ª edição. Academic Press is an imprint of Elsevier. p.377-379. 2014.

Luca, C.R. **Desempenho acústico em sistemas drywall.** Associação Brasileira de Drywall (2015) 9.

Martias, C.; Joliff, Y.; Favotto, C. **Effects of the addition of glass fibers, mica and vermiculite on the mechanical properties of a gypsum-based composite at room temperature and during a fire test.** Composites Part B 62 (2014) 37-53.

Martins, João Tomás Puga. **Acústica de edifícios - validação experimental do cálculo de transmissões marginais a sons aéreos em edifícios.** Dissertação, Universidade do Porto, 2008.

Martins, João Tomás Puga. **Acústica de edifícios – validação experimental do cálculo de transmissões marginais a sons aéreos em edifícios.** Dissertação, Universidade do Porto, 2008.

Mekaddem, Najoua; Ben Ali, Samia; Fois, Magali; Hannachi, Ahmed. **Paraffin / expanded perlite / plaster as thermal energy storage composite.** Energy Procedia 157 (2019) 1118–1129.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA 307, de 05/07/2002.**

Mo, Kim Hung; Lee, Hong Jie; Liu, Michael Yong Jing; Ling, Tung-Chai. **Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar.** Construction and Building Materials 179 (2018) 302-306.

Morales-Conde, M. J.; Rodríguez-Liñán, C.; Pedreño-Rojas, M.A. **Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works.** Construction and Building Materials 114 (2016) 6–14.

Möser, M. **Engineering Acoustics: An Introduction to Noise Control.** 1ª edição. Springer, 2009.

Munhoz, Fabiana Costa. **Utilização do gesso para fabricação de artefatos alternativos, no contexto de produção mais limpa.** Dissertação, Universidade Estadual Paulista, 2008.

Ngah, Shamsiah Awang; Dams, Barrie; Ansell, Martin P.; Stewart, John; Hempstead, Russell; Ball, Richard J. **Structural performance of fibrous plaster. Part 1: Physical and mechanical properties of hessian and glass fibre reinforced gypsum composites.** Construction and Building Materials 259 (2020) 120396.

Oliveira, Marília P.; Barbosa, Normando P.; Torres, Sandro M.; Leal, Antonio F.; Silva, Cibelle G. **Compósitos à base de gesso com resíduos de EVA e**

vermiculita. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.16, n.6 (2012) 684-689.

Osipov, A.; Mees, P.; Vermeir G. **Low-Frequency Airborne Sound Transmission through Single Partitions in Buildings**. Applied Acoustics v.52, n.3/4 (1997) 273-288.

Padevět, P.; Tesárek, P.; Plachý, T. **Evolution of mechanical properties of gypsum in time**. International Journal of Mechanics, vol. 5, (2011) 01-09.

Paixão, Dinara Xavier. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando análise estatística de energia (SEA)**. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

Pedreño-Rojas, M. A.; Morales-Conde, M. J.; Pérez-Gálvez, F.; Rubio-de-Hita, P. **Influence of polycarbonate waste on gypsum composites: Mechanical and environmental study**. Journal of Cleaner Production 218 (2019) 21– 37.

Pereira, Roberto; Arenas, Jorge P.; Zumelzu, Ernesto. **Comparison of four test methods to measure damping properties of materials by using piezoelectric transducers**. Materials and Design 32 (2011) 2423–2428.

Peres, Luciano; Benachour, Mohand; Santos, Valdemir A. **Gesso: produção e utilização na construção civil**. Sebrae, 2008.

Pervyshin, G. N.; Yakovlev, G. I.; Gordina, A. F.; Keriene, J.; Polyanskikh, I. S.; Fischer, H. B.; Rachimova, N. R.; Buryanov, A. F. **Water-resistant gypsum compositions with man-made modifiers**. Procedia Engineering 172 (2017), 867–874.

Piñeiro, Sonia Romaniega; Merino, Mercedes del Río; García, Cristina Pérez. **New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling**. Advances in Building Technologies and Construction Materials Volume 2015, Article ID 854192.

Plachy, Tomas; Tesarek, Pavel; Padevet, Pavel; Polak, Michal. **Determination of Young's Modulus of Gypsum Blocks Using Two Different Experimental Methods**. Recent Advances in Applied and Theoretical Mechanics (2009) 109–113.

Raji, Marya; Nekhlaoui, Souad; Hassani, Iz-Eddine El Amrani; Essassi, El Mokhtar; Essabir, Hamid; Rodrigue, Denis; Bouhfid, Rachid; Qaiss, Abou el kacem. **Utilization of volcanic amorphous aluminosilicate rocks (perlite) as alternative materials in lightweight composites**. Composites Part B 165 (2019) 47–54.

Rashad, Alaa M. **A synopsis about perlite as building material – A best practice guide for Civil Engineer**. Construction and Building Materials 121 (2016) 338–353.

Rashad, Alaa M. **Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview**. Construction and Building Materials 170 (2018) 757–775.

Rasmussen, Birgit. **Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe**. *Applied Acoustics* 71 (2010) 373–385.

Rasmussen, Birgit; Rindel, Jens Holger. **Sound insulation between dwellings – Descriptors applied in building regulations in Europe**. *Applied Acoustics* 71 (2010) 171–180.

Rojas-Ramirez, Roberto Antonio; Maciel, Marcel Hark; Romano, Roberto Cesar de Oliveira; Pileggi, Rafael Giuliano; Coelho, Antonio Carlos Vieira. **The impact of vermiculite residual fines in the rheological properties of cement pastes formulated with different waste contents**. *Applied Clay Science* 170 (2019) 97–105.

Romero-Gómez, M. I.; Pedreno-Rojas, M. A.; Pérez Gálvez, F.; Rubio-de-Hita, P. **Characterization of gypsum composites with polypropylene fibers from non-degradable wet wipes**. *Journal of Building Engineering* 34 (2021) 1–11.

Shi, Xuejun; Wu, Jingyi; Wang, Xiaoen; Zhou, Xingping; Xie, Xiaolin; Xue, Zhigang. **Novel sound insulation materials based on epoxy/hollow silica nanotubes composites**. *Composites Part B* 131 (2017) 125–133.

Silva, Otávio Joaquim Júnior; Rego, José Jeferson Silva; Pinheiro, Marco Antônio Silva. **Desempenho acústico de divisórias verticais em blocos de gesso: uma avaliação a partir de medições de campo e em laboratório**. *Parc vol5 n2* (2014) 15–21.

Silva, Otávio Joaquim Júnior; Rego, José Jeferson Silva; Pinheiro, Marco Antônio Silva. **Isolação sonora de elementos pré-moldados de gesso**. *Anais XXVIII Encontro da SOBRAC* 747–756, 2017.

Silva, Renata Costa. **Avaliação de ferramenta de simulação da transmissão sonora para projetos de isolamento acústico em edificações habitacionais**. *Dissertação, Universidade Federal de Santa Maria*, 2014.

Takahashi, Vanessa Fátima de Medeiros. **Desempenho acústico de edificações: ferramenta computacional para avaliação**. *Tese, Universidade Estadual de Campinas*, 2016.

Urzulin, Thaís Acunha; Akasaki, Jorge Luis; Pinto, Nayra Alberici. **Estudo de compósitos de gesso incorporados com duas diferentes granulometrias de borracha de pneus**. *Revista Científica ANAP Brasil*, V.9, N.16 (2016) 30–45.

Uygunoglu, Tayfun; Özgüven, Sevcan; Çalis, Metehan. **Effect of plaster thickness on performance of external thermal insulation cladding systems (ETICS) in buildings**. *Construction and Building Materials* 122 (2016) 496–504.

Wang, Liang; Liu, Peng; Jing, Qiangshan; Liu, Yuanzhen; Wang, Wenjing; Zhang, Yu; Li, Zhu. **Strength properties and thermal conductivity of concrete with the addition of expanded perlite filled with aerogel**. *Construction and Building Materials* 188 (2018) 747–757.

Wareing, Robin R.; Davy, John L.; Pearse, John R. **Variations in measured sound transmission loss due to sample size and construction parameters.** Applied Acoustics 89 (2015) 166–177.

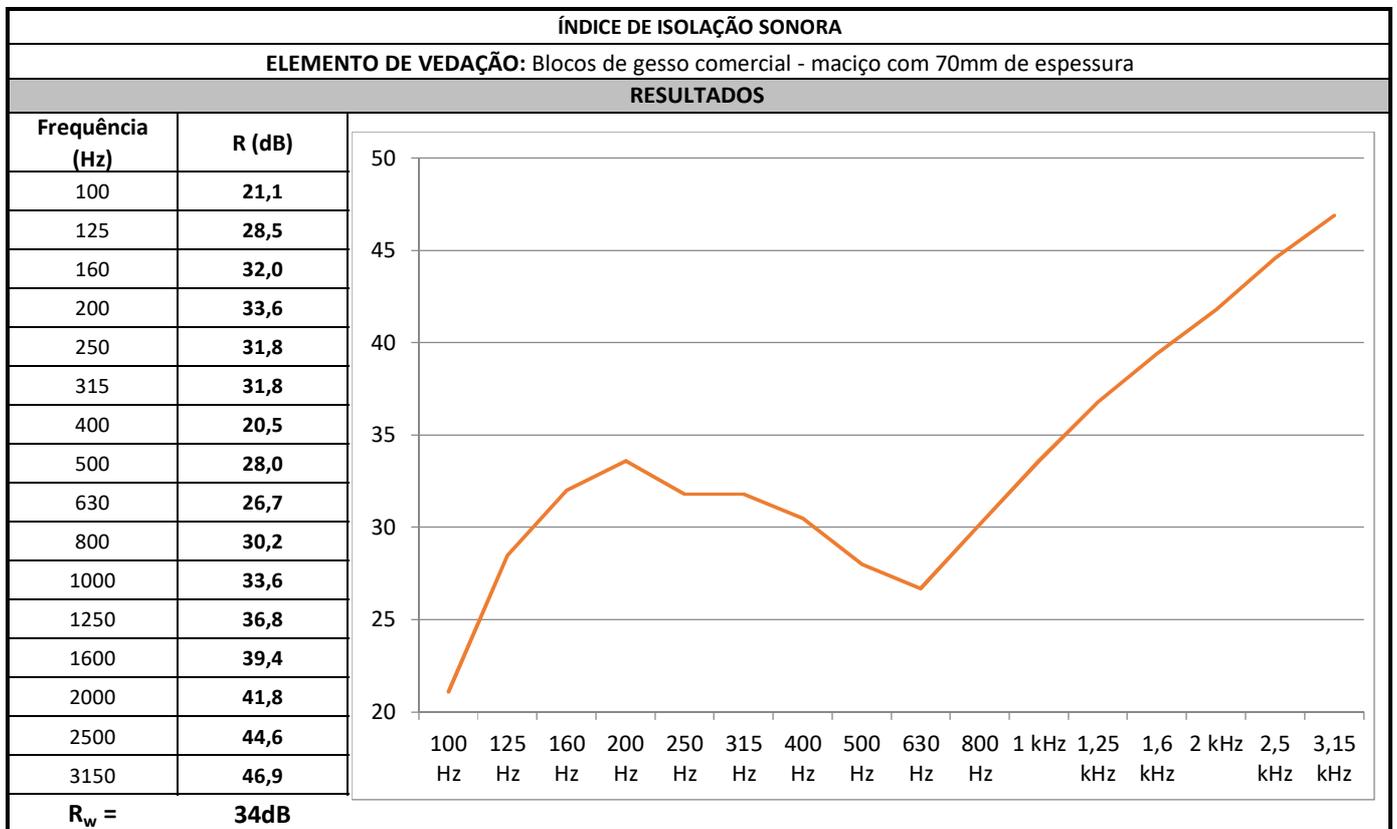
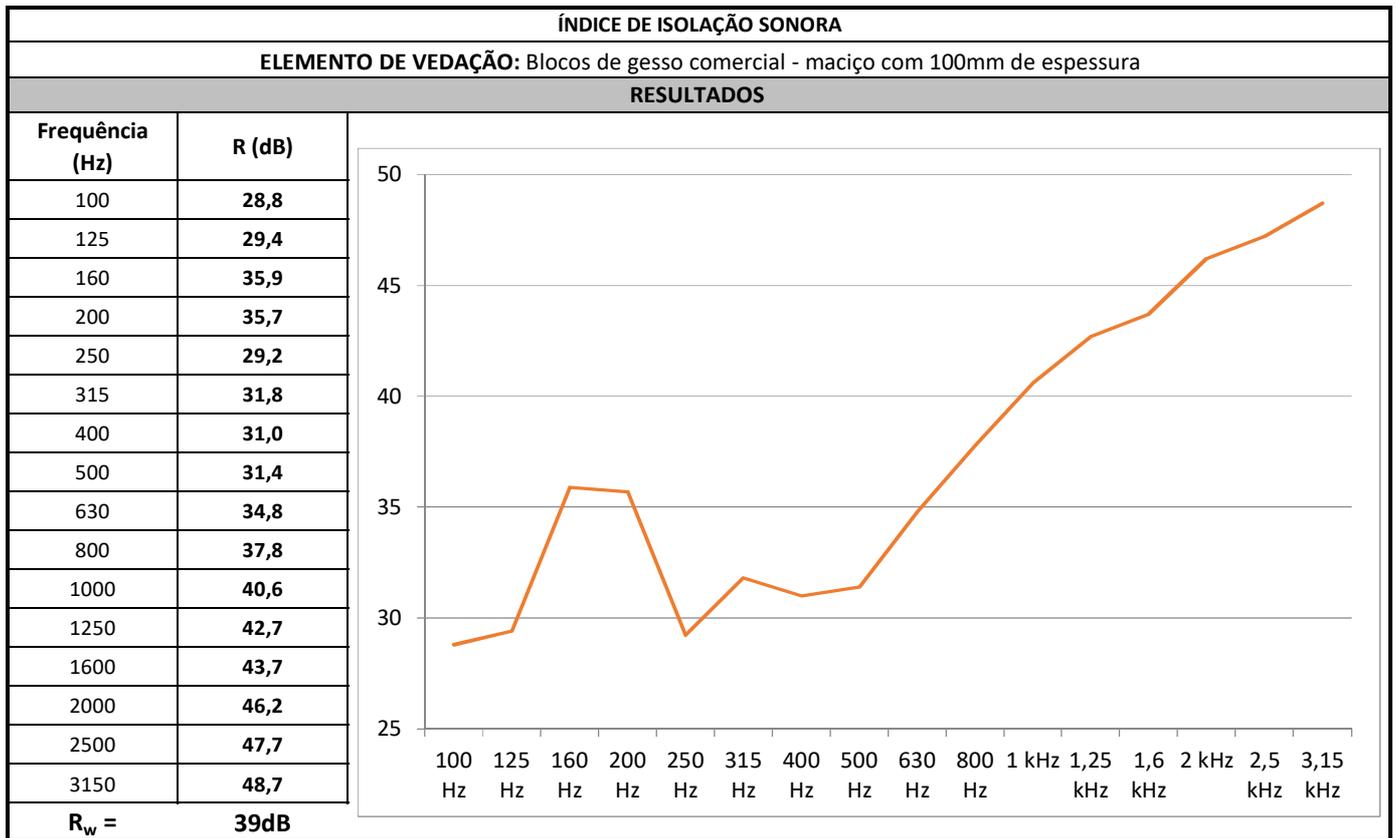
Wei, C.Y.; Kukureka, S. N. **Evaluation of damping and elastic properties of composites and composite structures by the resonance technique.** Journal of Materials Science 35 (2000) 3785–3792.

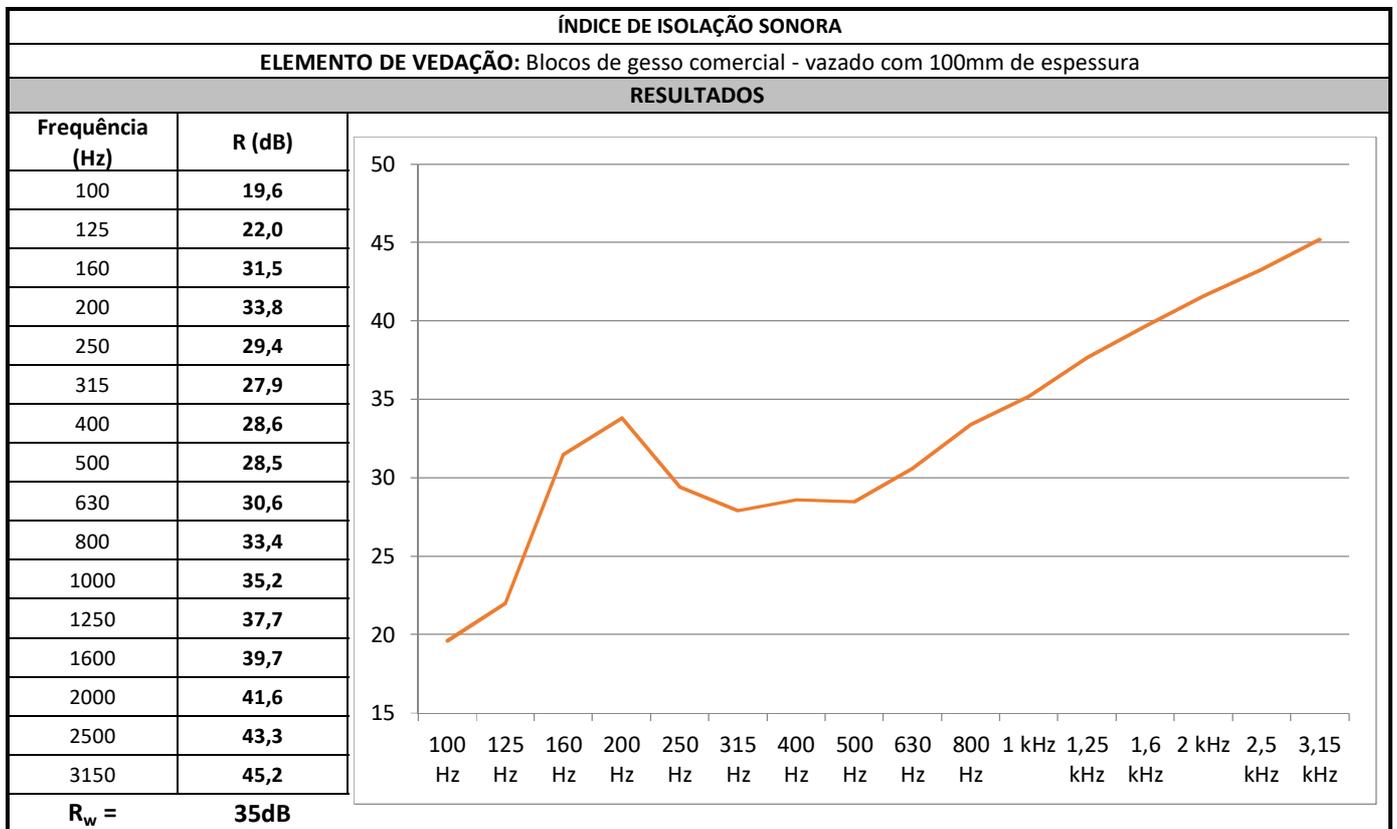
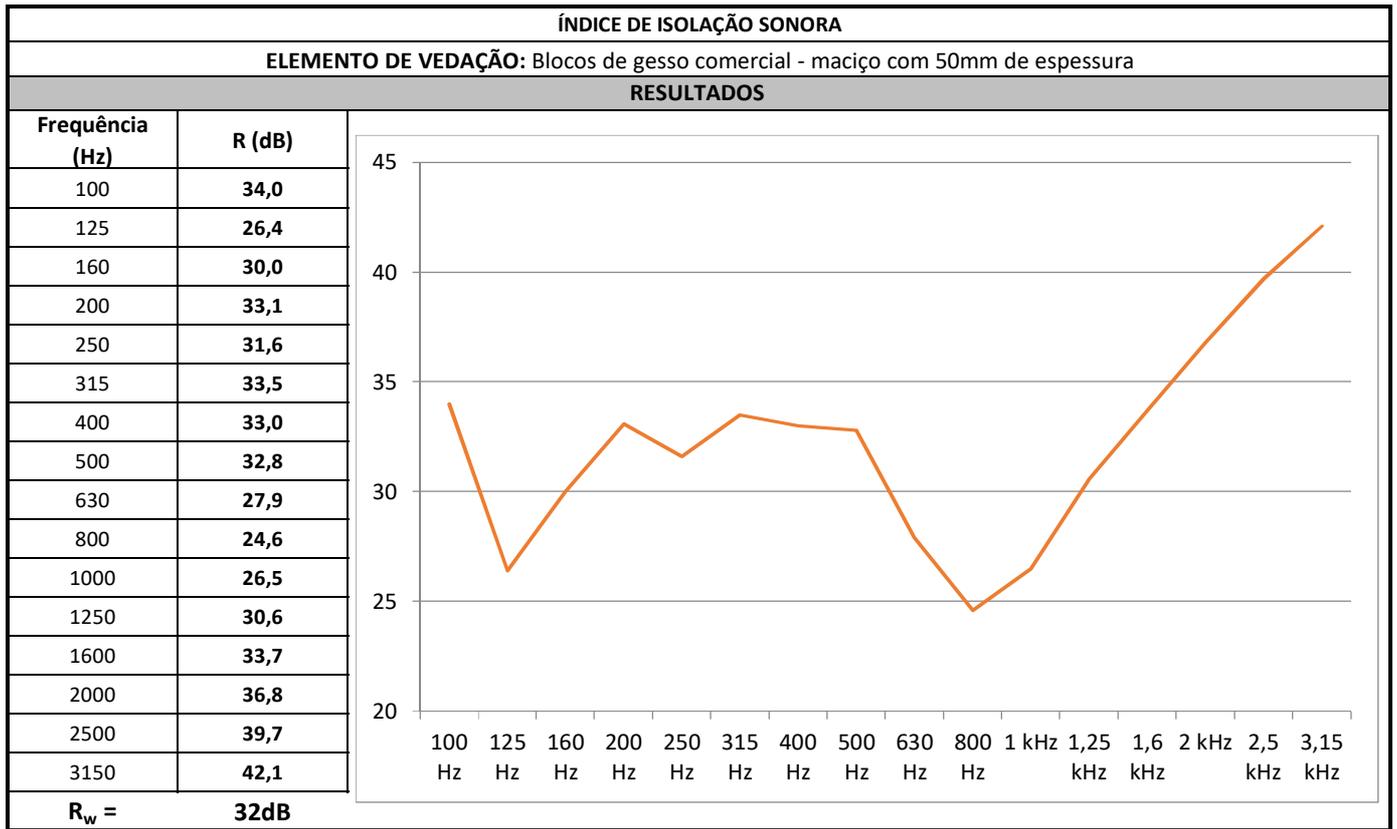
Xu, Lifu; Han, Teng; Li, Jiang; Xiong, Ying; Guo, Shaoyun. **The cell growth-induced orientation of mica in lightweight flexible poly (vinyl chloride) foams and its enhancement on sound insulation.** Composites Science and Technology 145 (2017) 78-88.

Zhang, Binyu; Poon, Chi Sun. **Sound insulation properties of rubberized lightweight aggregate concrete.** Journal of Cleaner Production 172 (2018) 3176-3185.

Zhao C; Wang, P.; Wang, L.; Liu, D. **Reducing railway noise with porous sound-absorbing concrete slabs.** Advances in Materials Science and Engineering, 2014.

**APÊNDICE A – ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA (R) DAS VEDAÇÕES
ANALISADAS**



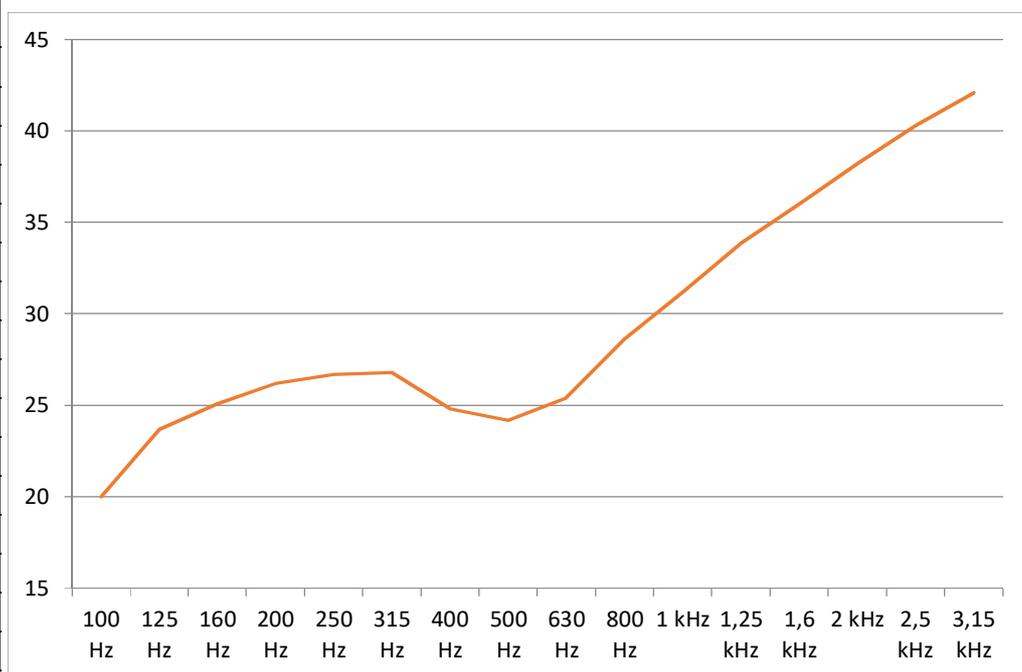


ÍNDICE DE ISOLAÇÃO SONORA

ELEMENTO DE VEDAÇÃO: Blocos de gesso comercial - vazado com 80mm de espessura

RESULTADOS

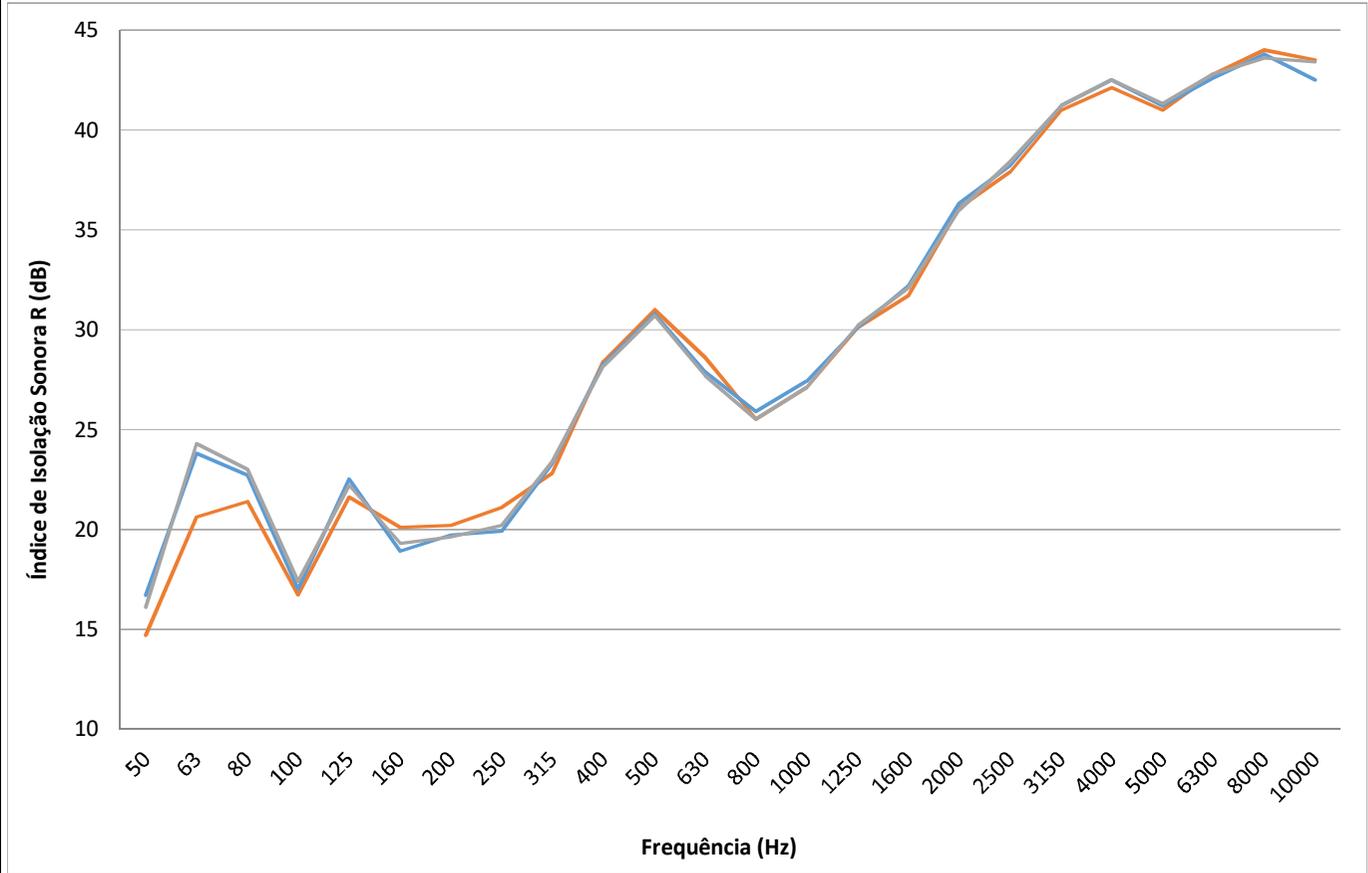
Frequência (Hz)	R (dB)
100	20,0
125	23,7
160	25,1
200	26,2
250	26,7
315	26,8
400	24,8
500	24,2
630	25,4
800	28,6
1000	31,2
1250	33,9
1600	36,0
2000	38,2
2500	40,3
3150	42,1



R_w = 31dB

ÍNDICE DE ISOLAÇÃO SONORA
ELEMENTOS DE VEDAÇÃO: Blocos de gesso padrão (50mm)
RESULTADOS

Frequência (Hz)	MEDIÇÃO 01 R (dB)	MEDIÇÃO 02 R (dB)	MEDIÇÃO 03 R (dB)
50	14,7	16,7	16,1
63	20,6	23,8	24,3
80	21,4	22,7	23,0
100	16,7	17,0	17,4
125	21,6	22,5	22,2
160	20,1	18,9	19,3
200	20,2	19,7	19,6
250	21,1	19,9	20,2
315	22,8	23,3	23,4
400	28,4	28,3	28,2
500	31,0	30,8	30,7
630	28,6	27,9	27,7
800	25,5	25,9	25,5
1000	27,1	27,4	27,1
1250	30,1	30,1	30,2
1600	31,7	32,2	32,1
2000	36,1	36,3	36,0
2500	37,9	38,2	38,4
3150	41,0	41,2	41,2
4000	42,1	42,5	42,5
5000	41,0	41,2	41,3
6300	42,8	42,6	42,8
8000	44,0	43,8	43,6
10000	43,5	42,5	43,4
R_w =	30dB	30dB	30dB

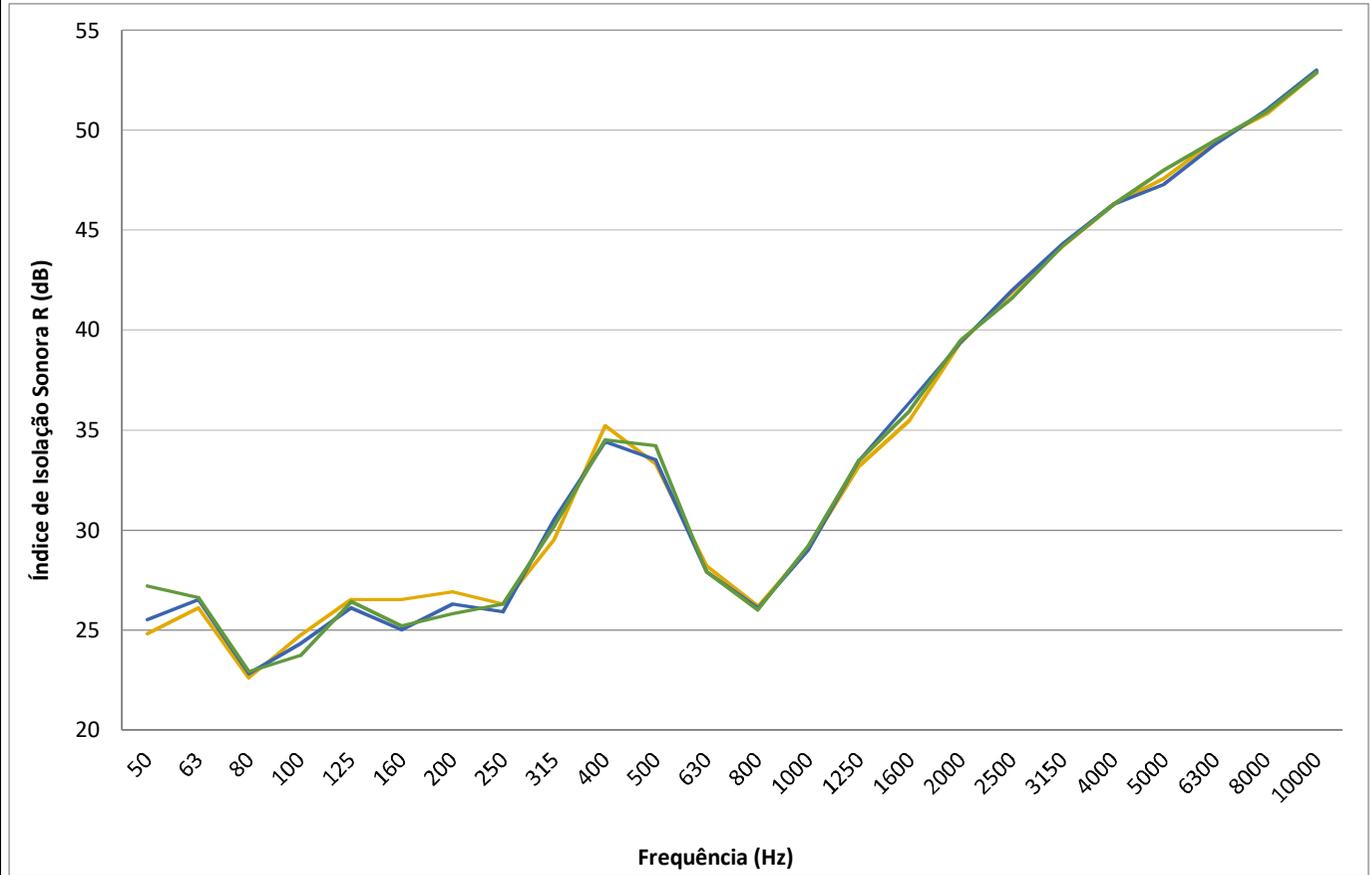


ÍNDICE DE ISOLAÇÃO SONORA

ELEMENTOS DE VEDAÇÃO: Blocos de gesso compósito de perlita natural (50mm)

RESULTADOS

Frequência (Hz)	MEDIÇÃO 01 R (dB)	MEDIÇÃO 02 R (dB)	MEDIÇÃO 03 R (dB)
50	24,8	25,5	27,2
63	26,1	26,5	26,6
80	22,6	22,8	22,9
100	24,7	24,3	23,7
125	26,5	26,1	26,4
160	26,5	25,0	25,2
200	26,9	26,3	25,8
250	26,3	25,9	26,3
315	29,5	30,5	30,2
400	35,2	34,4	34,5
500	33,3	33,5	34,2
630	28,2	27,9	27,9
800	26,2	26,1	26,0
1000	29,1	29,0	29,2
1250	33,2	33,5	33,5
1600	35,5	36,4	36,0
2000	39,4	39,4	39,5
2500	41,9	42,0	41,6
3150	44,2	44,3	44,2
4000	46,3	46,3	46,3
5000	47,6	47,3	48,0
6300	49,5	49,3	49,5
8000	50,8	51,0	50,9
10000	52,9	53,0	52,9
R_w =	33dB	33dB	33dB

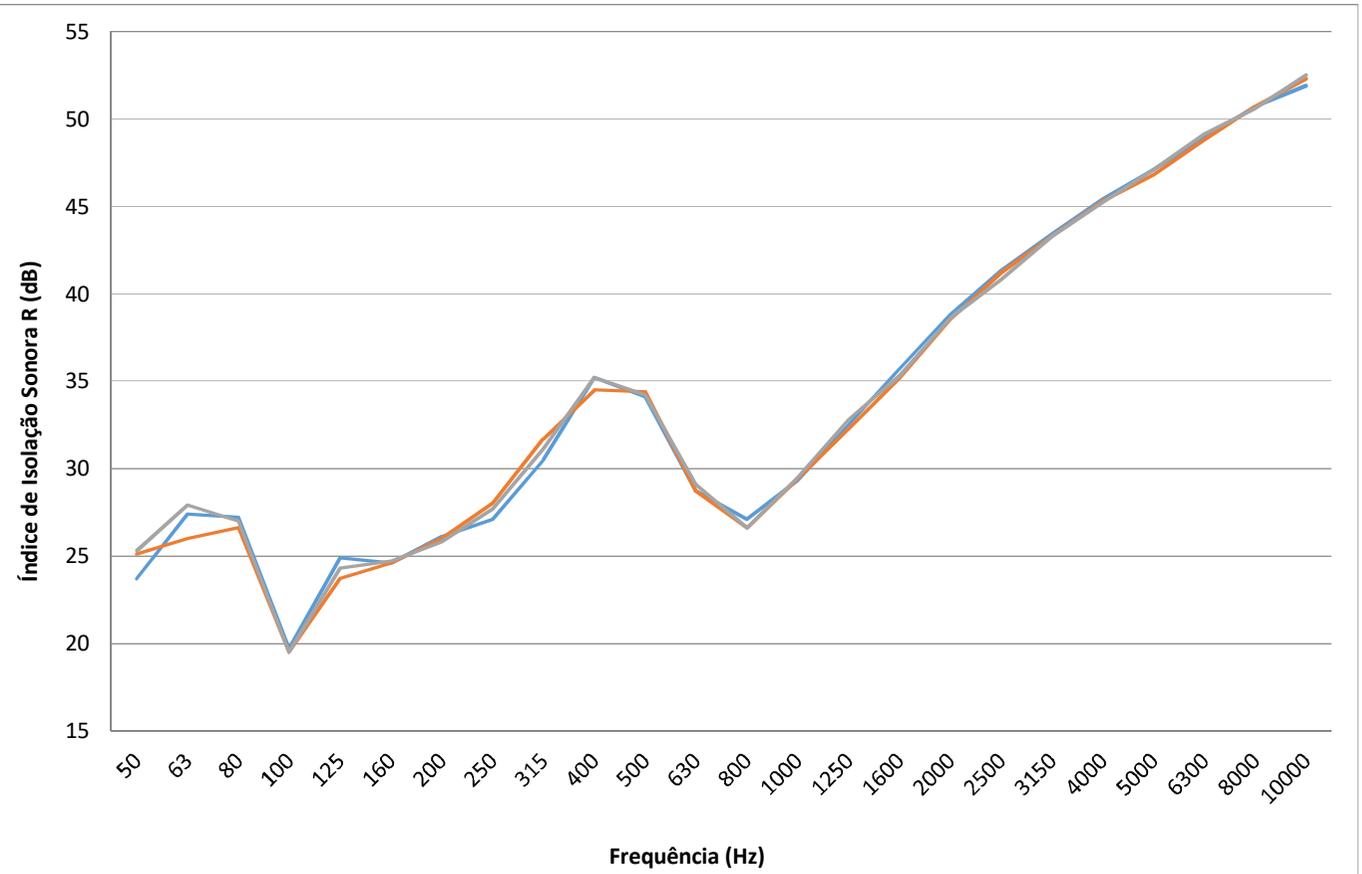


ÍNDICE DE ISOLAÇÃO SONORA

ELEMENTOS DE VEDAÇÃO: Blocos de gesso compósito de perlita expandida (50mm)

RESULTADOS

Frequência (Hz)	MEDIÇÃO 01 R (dB)	MEDIÇÃO 02 R (dB)	MEDIÇÃO 03 R (dB)
50	23,7	25,1	25,3
63	27,4	26,0	27,9
80	27,2	26,6	27,0
100	19,7	19,5	19,5
125	24,9	23,7	24,3
160	24,6	24,6	24,7
200	26,1	26,0	25,8
250	27,1	28,0	27,7
315	30,5	31,7	31,1
400	35,2	34,5	35,2
500	34,1	34,4	34,2
630	28,7	28,7	29,1
800	27,1	26,6	26,6
1000	29,3	29,4	29,5
1250	32,5	32,3	32,8
1600	35,7	35,2	35,3
2000	38,8	38,5	38,6
2500	41,3	41,2	40,8
3150	43,4	43,3	43,3
4000	45,4	45,3	45,2
5000	47,1	46,8	47,1
6300	48,9	48,8	49,1
8000	50,7	50,7	50,6
10000	51,9	52,3	52,5
R_w =	34dB	34dB	34dB

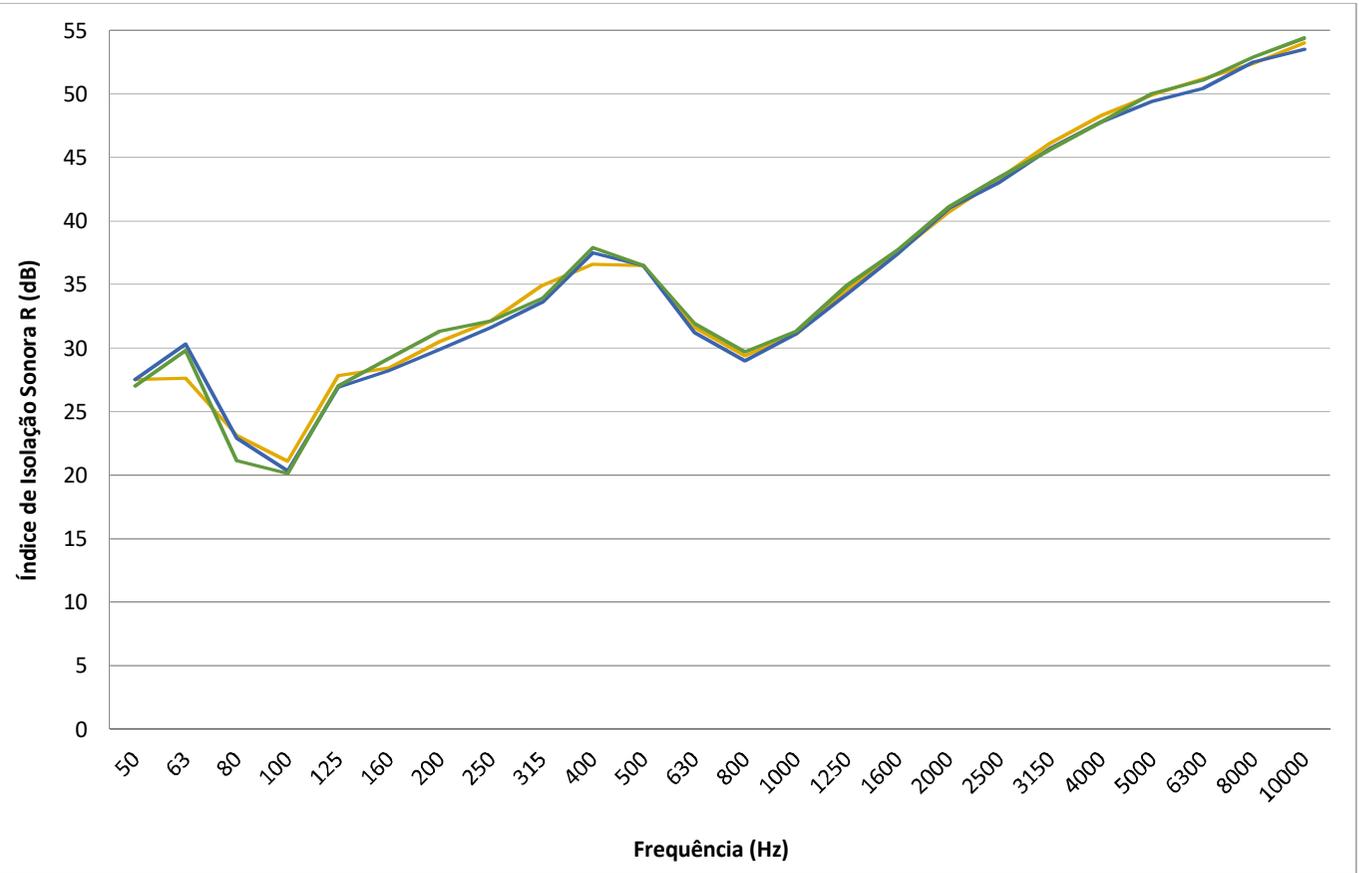


ÍNDICE DE ISOLAÇÃO SONORA

ELEMENTOS DE VEDAÇÃO: Blocos de gesso compósito de vermiculita (50mm)

RESULTADOS

Frequência (Hz)	MEDIÇÃO 01 R (dB)	MEDIÇÃO 02 R (dB)	MEDIÇÃO 03 R (dB)
50	27,5	27,5	27,0
63	27,6	30,3	29,8
80	23,1	22,9	21,1
100	21,1	20,3	20,1
125	27,8	26,9	27,0
160	28,4	28,2	29,2
200	30,5	29,9	31,3
250	32,1	31,6	32,1
315	34,9	33,6	33,9
400	36,6	37,5	37,9
500	36,5	36,5	36,5
630	31,6	31,2	31,9
800	29,4	29,0	29,7
1000	31,1	31,1	31,3
1250	34,6	34,2	34,9
1600	37,5	37,4	37,7
2000	40,7	41,0	41,1
2500	43,3	43,0	43,4
3150	46,1	45,7	45,6
4000	48,3	47,8	47,8
5000	49,9	49,4	50,0
6300	51,2	50,4	51,1
8000	52,4	52,5	52,9
10000	54,0	53,5	54,4
R_w =	36dB	36dB	36dB

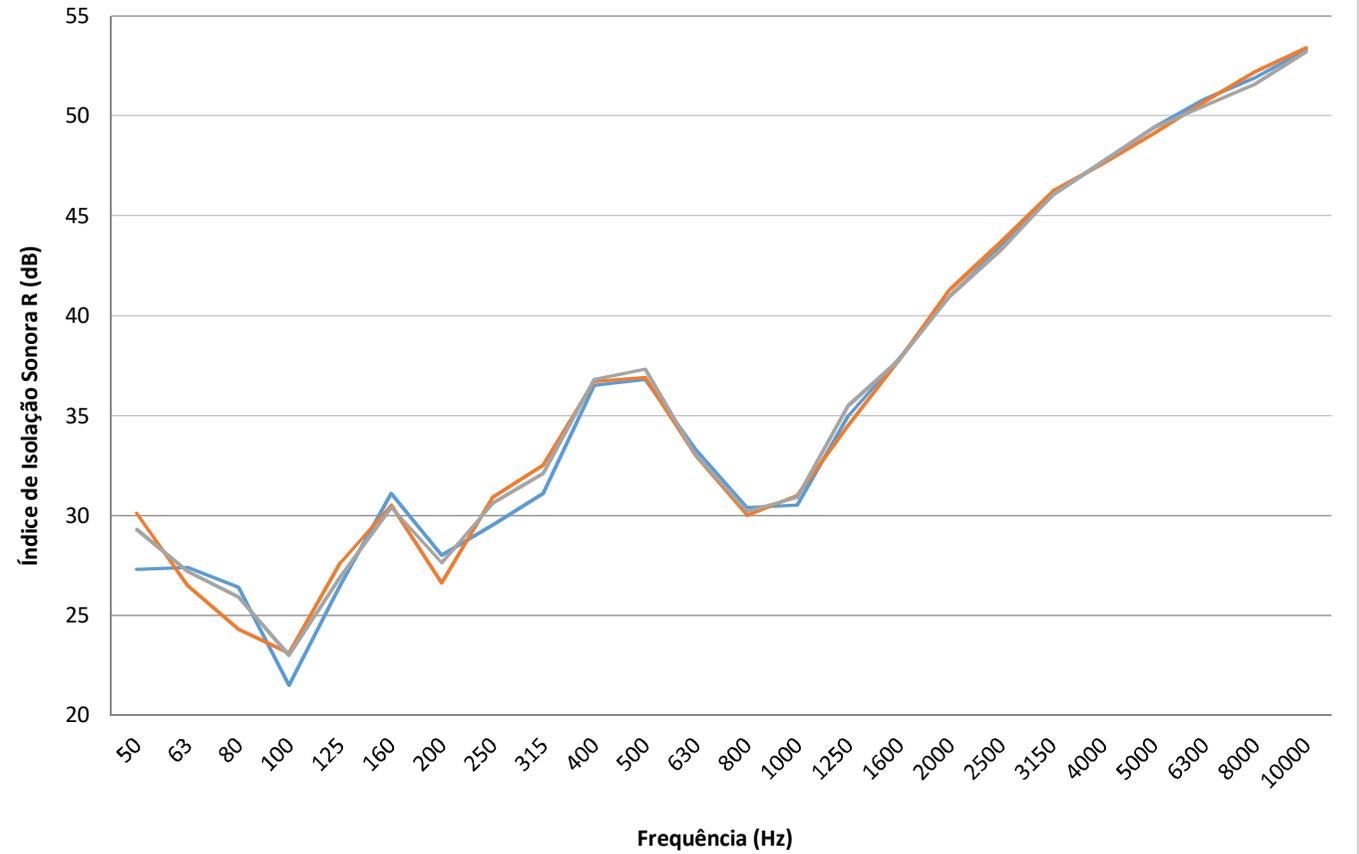


ÍNDICE DE ISOLAÇÃO SONORA

ELEMENTOS DE VEDAÇÃO: Blocos de gesso compósito de alumina (50mm)

RESULTADOS

Frequência (Hz)	MEDIÇÃO 01 R (dB)	MEDIÇÃO 02 R (dB)	MEDIÇÃO 03 R (dB)
50	27,3	30,1	29,3
63	27,4	26,5	27,2
80	26,4	24,3	25,9
100	21,5	23,1	23,0
125	26,5	27,6	26,9
160	31,1	30,5	30,4
200	28,0	26,6	27,6
250	29,5	30,9	30,6
315	31,1	32,5	32,1
400	36,5	36,7	36,8
500	36,8	36,9	37,3
630	33,3	33,0	33,0
800	30,4	30,0	30,2
1000	30,5	31,0	30,9
1250	35,0	34,5	35,5
1600	37,9	37,8	37,8
2000	41,0	41,3	41,0
2500	43,5	43,7	43,3
3150	46,0	46,2	46,0
4000	47,7	47,6	47,7
5000	49,4	49,1	49,4
6300	50,8	50,7	50,5
8000	51,9	52,2	51,6
10000	53,3	53,4	53,2
R_w =	36dB	36dB	36dB

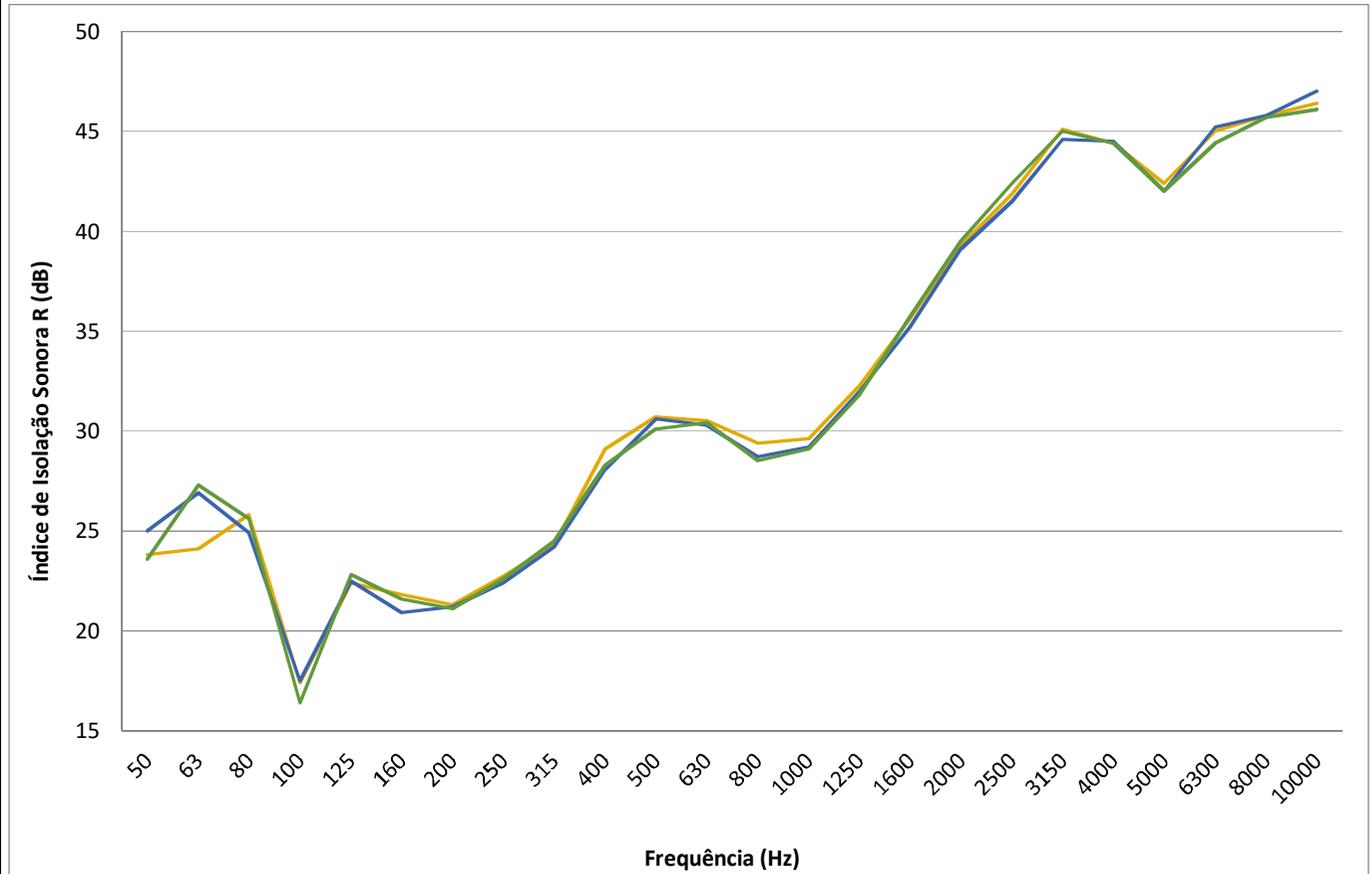


ÍNDICE DE ISOLAÇÃO SONORA

ELEMENTOS DE VEDAÇÃO: Blocos de gesso padrão com membrana elástica (50mm)

RESULTADOS

Frequência (Hz)	MEDIÇÃO 01 R (dB)	MEDIÇÃO 02 R (dB)	MEDIÇÃO 03 R (dB)
50	23,8	25,0	23,6
63	24,1	26,9	27,3
80	25,8	24,9	25,6
100	17,4	17,5	16,4
125	22,4	22,5	22,8
160	21,8	20,9	21,6
200	21,3	21,2	21,1
250	22,7	22,4	22,6
315	24,3	24,2	24,5
400	29,1	28,1	28,3
500	30,7	30,6	30,1
630	30,5	30,3	30,4
800	29,4	28,7	28,5
1000	29,6	29,2	29,1
1250	32,3	32,0	31,8
1600	35,6	35,2	35,7
2000	39,3	39,1	39,5
2500	41,9	41,5	42,4
3150	45,1	44,6	45,0
4000	44,4	44,5	44,4
5000	42,4	42,0	42,0
6300	45,0	45,2	44,4
8000	45,8	45,8	45,7
10000	46,4	47,0	46,1
R_w =	32dB	32dB	32dB

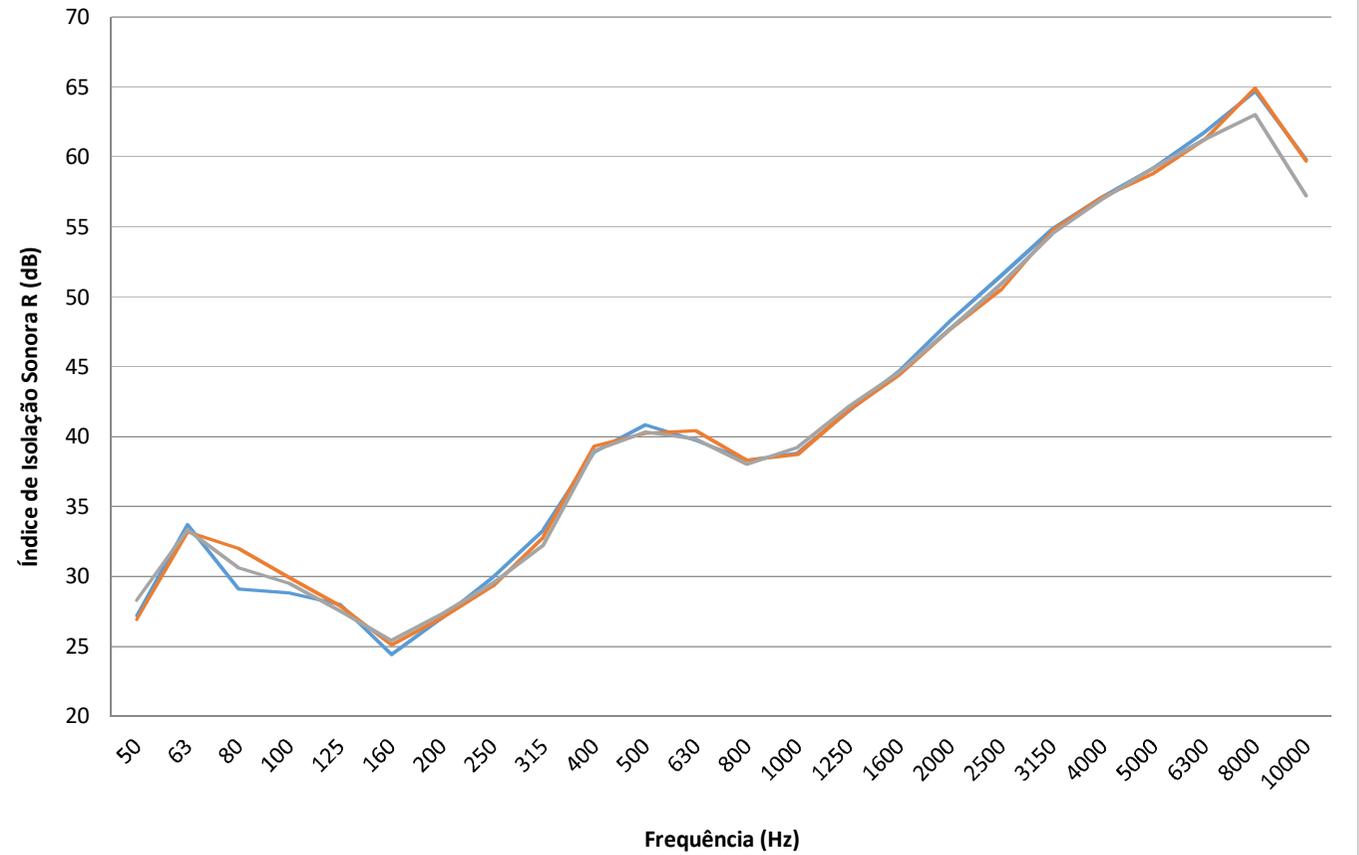


ÍNDICE DE ISOLAÇÃO SONORA

ELEMENTOS DE VEDAÇÃO: Parede dupla em bloco de gesso maciço (50mm) com membrana elástica entre elas

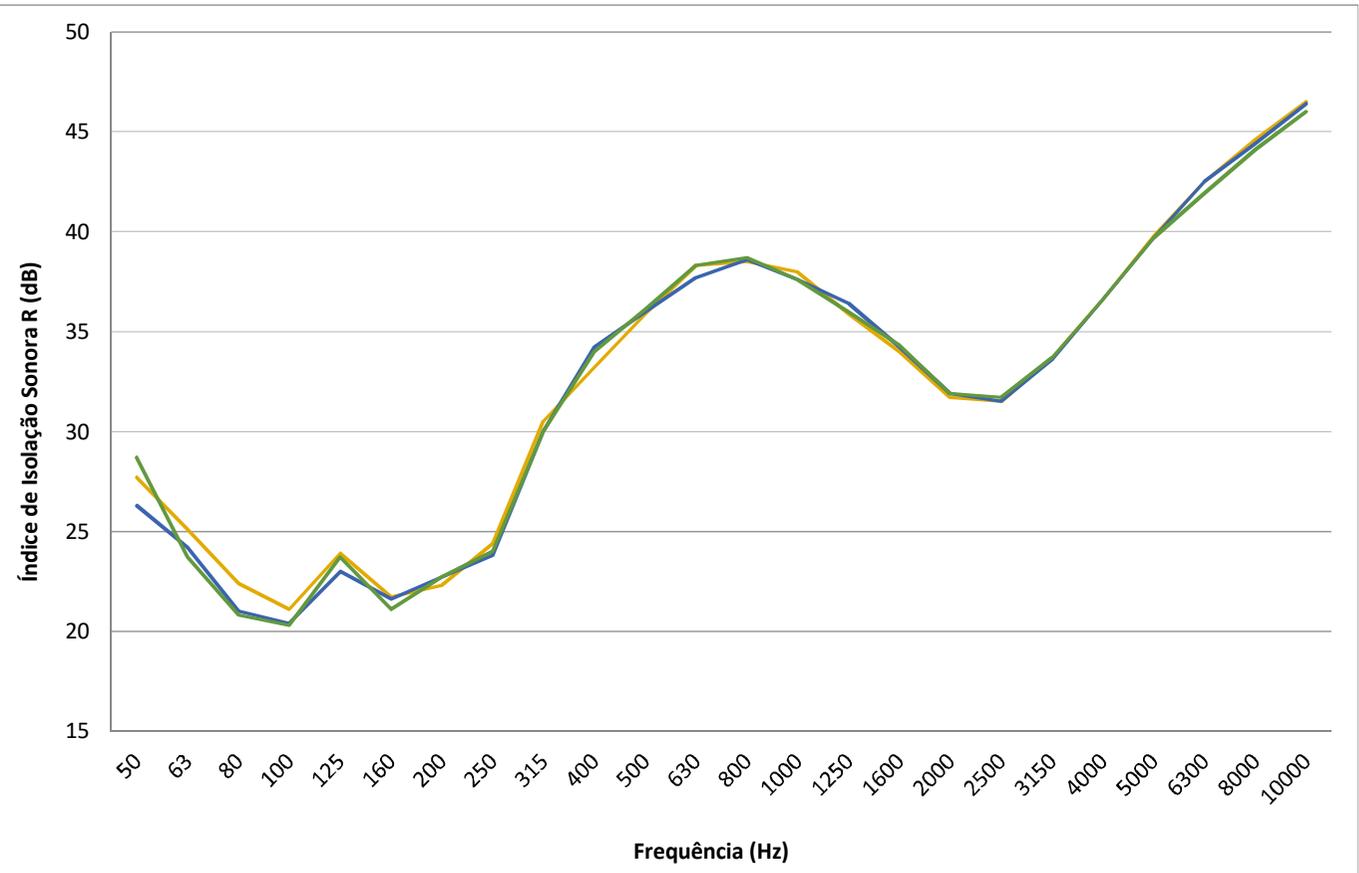
RESULTADOS

Frequência (Hz)	MEDIÇÃO 01 R (dB)	MEDIÇÃO 02 R (dB)	MEDIÇÃO 03 R (dB)
50	27,2	26,9	28,3
63	33,7	33,2	33,3
80	29,1	32,0	30,6
100	28,8	29,9	29,5
125	28,0	27,9	27,5
160	24,4	25,1	25,4
200	27,0	27,0	27,3
250	29,9	29,3	29,5
315	33,3	32,8	32,2
400	38,9	39,3	39,0
500	40,8	40,2	40,3
630	39,7	40,4	39,8
800	38,3	38,3	38,0
1000	38,8	38,7	39,2
1250	41,8	41,9	42,1
1600	44,7	44,4	44,6
2000	48,3	47,7	47,7
2500	51,5	50,5	50,9
3150	54,8	54,7	54,5
4000	57,1	57,1	57,0
5000	59,2	58,8	59,2
6300	61,7	61,2	61,2
8000	64,7	64,9	63,0
10000	59,8	59,7	57,2
R_w =	40dB	40dB	40dB



ÍNDICE DE ISOLAÇÃO SONORA
ELEMENTOS DE VEDAÇÃO: Blocos de gesso acústico (50mm)
RESULTADOS

Frequência (Hz)	MEDIÇÃO 01 R (dB)	MEDIÇÃO 02 R (dB)	MEDIÇÃO 03 R (dB)
50	27,7	26,3	28,7
63	25,1	24,2	23,7
80	22,4	21,0	20,8
100	21,1	20,4	20,3
125	23,9	23,0	23,7
160	21,7	21,6	21,1
200	22,3	22,7	22,7
250	24,4	23,8	24,0
315	30,5	30,0	30,0
400	33,2	34,2	34,0
500	35,9	36,0	36,1
630	38,3	37,7	38,3
800	38,5	38,6	38,7
1000	38,0	37,6	37,6
1250	35,9	36,4	36,0
1600	34,0	34,2	34,3
2000	31,7	31,9	31,9
2500	31,5	31,5	31,7
3150	33,7	33,6	33,7
4000	36,6	36,6	36,6
5000	39,8	39,7	39,7
6300	42,5	42,5	41,9
8000	44,6	44,4	44,1
10000	46,5	46,4	46,0
R_w =	34dB	34dB	34dB



ÍNDICE DE ISOLAÇÃO SONORA

ELEMENTOS DE VEDAÇÃO: Blocos de gesso acústico (50mm) revestido com pasta de gesso (50mm)

RESULTADOS

Frequência (Hz)	MEDIÇÃO 01 R (dB)	MEDIÇÃO 02 R (dB)	MEDIÇÃO 03 R (dB)
50	26,3	26,7	26,1
63	34,7	33,8	34,8
80	27,3	29,2	27,8
100	28,1	27,8	27,8
125	30,2	30,3	31,1
160	27,1	26,3	27,2
200	28,8	29,0	29,0
250	29,6	29,3	29,0
315	29,2	29,2	30,2
400	32,4	32,3	32,7
500	32,9	32,9	33,0
630	33,6	33,8	33,3
800	34,1	34,4	34,0
1000	35,6	35,4	35,7
1250	37,1	37,4	37,4
1600	38,6	39,1	38,8
2000	41,9	42,0	41,8
2500	43,4	43,6	43,4
3150	46,1	45,8	45,9
4000	47,6	48,3	48,2
5000	50,1	50,8	50,6
6300	51,9	52,4	51,9
8000	52,7	53,8	53,0
10000	52,5	52,8	52,7
R_w =	37dB	37dB	37dB

