

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Guilherme Führ

**ARGAMASSAS DE CONTRAPISO COM PROPRIEDADES DE
ISOLAMENTO ACÚSTICO: ATENUAÇÃO DE RUÍDOS DE
IMPACTO EM EDIFICAÇÕES**

Porto Alegre
julho 2016

GUILHERME FÜHR

**ARGAMASSAS DE CONTRAPISO COM PROPRIEDADES DE
ISOLAMENTO ACÚSTICO: ATENUAÇÃO DE RUÍDOS DE
IMPACTO EM EDIFICAÇÕES**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientadora: Angela Borges Masuero
Coorientador: Daniel Tregnago Pagnussat

Porto Alegre

julho 2016

GUILHERME FÜHR

**ARGAMASSAS DE CONTRAPISO COM PROPRIEDADES DE
ISOLAMENTO ACÚSTICO: ATENUAÇÃO DE RUÍDOS DE
IMPACTO EM EDIFICAÇÕES**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 24 de junho 2016

Profa. Angela Borges Masuero
Dra. pela UFRGS
Orientadora

Prof. Daniel Tregnago Pagnussat
Dr. pela UFRGS
Coorientador

Profa. Luciani Somensi Lorenzi
Dra. pela UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Angela Borges Masuero
(UFRGS)
Dra. pela UFRGS

Prof. Daniel Tregnago Pagnussat
(UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Prof. Luis Carlos Bonin
(UFRGS)
MSc. pela UFRGS

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas
(UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Gilmar e Susane, a meus irmãos, Bruna, Cristian e Gustavo, e a minha namorada, Lauren, por todo amor, incentivo e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora e amiga Angela por quem tenho um carinho especial e sou eternamente grato, agradeço muito por todos os ensinamentos, pelas longas conversas, pelo apoio, pela confiança e principalmente pela amizade verdadeira que levarei comigo.

Agradeço ao Daniel por toda amizade e por ter aberto os caminhos que tornaram este trabalho possível, agradeço também pelo companheirismo em me apresentar o laboratório da UCS e pelo dia em Caxias que realmente ficou marcado na lembrança.

Ao Juan Pablo, agradeço em especial pelo interesse e por todo apoio dado durante esta pesquisa, pelas inúmeras horas disponibilizadas para entender os fundamentos para a realização dos ensaios acústicos, agradeço e muito pela referência e dedicação para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Tiago Becker, por ter me acompanhado durante toda a fase de testes dos ensaios de rigidez dinâmica e pelas longas conversas para entender os princípios do ensaio, agradeço todo apoio e dedicação.

À professora Carin, agradeço pelos ensinamentos que possibilitaram a estruturação deste trabalho de conclusão.

Agradeço ao professor Bonin pelas contribuições para a conclusão desta pesquisa e por encorpar a banca deste trabalho com toda a sua experiência na área da construção civil e em relação à norma desempenho.

Ao professor Bernardo Tutikian e ao coordenador Edilar Predabon por abrirem as portas dos laboratórios do itt Performance e itt FUSE, respectivamente, para a realização dos ensaios de rigidez dinâmica, agradeço e muito pela confiança e por possibilitar a conclusão deste trabalho.

Agradeço em especial a Letícia Zuchetto, por me acompanhar durante os ensaios de rigidez dinâmica, agradeço pela paciência, dedicação e pela amizade, além da referência que foi para este trabalho.

Agradeço e muito aos meus amigos Anderson, Mauro, Caroline e Carina pelo companheirismo durante toda a faculdade e por todas as contribuições para a conclusão deste trabalho.

Agradeço a todo o pessoal do Norie e Lamtac, Ana Paula, Denise, Laís, Márlon, Eugênio, Fernanda, Vanessa, Maurício, além de todos os amigos que trabalharam comigo durante o período de bolsa e também durante a realização deste trabalho.

Ao Airton, Sr. Gilmar e Demétrius agradeço pela ajuda no laboratório e pela companhia durante a realização desta pesquisa.

Ao engenheiro Pedro por disponibilizar a argamassa industrializada e incentivar esta pesquisa, além de ceder todas as informações possíveis a respeito do produto.

Ao Adolfo, Roberto, Eloísa e Paulo, agradeço por disponibilizarem tanto informações quanto a coleta do resíduo de serragem cromada, muito obrigado.

Agradeço com muito carinho meus amigos da faculdade, cujos nomes prevalecem em silêncio mas a amizade é evidente e permanecerá entre nós.

Agradeço também a todos meus amigos de infância e que a vida me proporcionou, agradeço e muito todo o apoio e as poucas mas especiais horas de descontração, obrigado pelo companheirismo.

Agradeço a meus pais, Gilmar e Susane, pelo apoio e confiança depositados em mim durante a faculdade, além de todo o amor existente entre nós. Agradeço a meus incríveis irmãos, Bruna, Gustavo e Cristian, pelo amor e por fazerem parte da minha história. Enfim, agradeço a minha família, amo vocês.

Agradeço aos meus avós e familiares, além dos meus cunhados por todo o carinho.

Agradeço a minha apaixonante namorada, Lauren, por todo o amor e apoio sem fim durante esta etapa, te agradeço com muito amor.

Por fim agradeço a todos que fizeram parte deste trabalho e parte da minha vida durante estes cinco anos e meio, agradeço do fundo do meu coração.

Uma vez que você tenha experimentado voar, você andará pela terra com seus olhos voltados para o céu, pois lá você esteve e para lá você desejará voltar.

Leonardo da Vinci

RESUMO

A exigibilidade da Norma de Desempenho NBR 15.575/2013 implicou na readequação dos produtos e sistemas da construção civil em busca do atendimento a certos requisitos e critérios, a fim de promover a segurança, habitabilidade e sustentabilidade aos usuários das edificações. Neste contexto, surge a questão do conforto acústico nas construções brasileiras, cujo atendimento exige o desenvolvimento de soluções acústicas capazes de isolar os ruídos existentes nas edificações. Neste trabalho, foi proposto o desenvolvimento de argamassas de contrapiso com propriedades acústicas capazes de atenuar o ruído de impacto através do sistema de piso flutuante. No programa experimental, além da argamassa referência e da argamassa industrializada, foram propostas argamassas leves com substituição, em volume, do agregado miúdo natural pelos seguintes agregados leves: vermiculita expandida, nos teores de substituição de 10%, 30%, 50%, 70%, e serragem cromada, nos teores de 10%, 30%, 50%, 70%, 90%. Em relação às propriedades físico-mecânicas, observou-se que os teores de substituição elevaram o índice de vazios e reduziram a densidade de massa das argamassas, implicando na redução do módulo de elasticidade dinâmico e na resistência mecânica das argamassas, principalmente para teores acima de 30%. Por parte dos ensaios de rigidez dinâmica, para amostras com maiores teores de substituição, menores foram os valores desta propriedade acústica, resultando nas maiores estimativas de redução do nível de pressão sonora de ruídos de impacto e, conseqüente, melhores potenciais acústicos. Do ponto de vista acústico, as argamassas com maiores potenciais de isolamento acústico, em comparação com a argamassa industrializada e também com certas soluções acústicas de mercado, foram as argamassas com vermiculita expandida com teor de substituição de 70% e, principalmente, as argamassas com serragem cromada com teores a partir de 50%, mas apresentaram reduções bruscas nas propriedades mecânicas. Já por parte da viabilidade técnica, a compatibilidade entre as propriedades físico-mecânicas e acústicas foi mais favorável para as argamassas com teores de substituição de 30%, principalmente com a serragem cromada, cujo desempenho acústico desta foi próximo da argamassa industrializada. Em geral, estas argamassas descritas tiveram desempenho acústico superior à argamassa de referência, além da viabilidade econômica em relação à argamassa industrializada, caracterizando o potencial de utilização das mesmas no sistema de piso flutuante a fim de atenuar ruídos de impacto nas edificações.

Palavras-chave: Argamassa de Contrapiso. Rigidez Dinâmica. Acústica. Serragem Cromada. Vermiculita Expandida.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa	22
Figura 2 – Equivalência entre pressão sonora e nível de pressão sonora	28
Figura 3 – Sensação auditiva em função das grandezas físicas do som	30
Figura 4 – Transmissão de ruídos de impacto	34
Figura 5 – Representação do sistema massa-mola	38
Figura 6 – Exemplo de um sistema de pisos	45
Figura 7 – Comparativo dos níveis de desempenho de ruídos de impacto entre diferentes países	51
Figura 8 – Áreas de intervenção das normas relativas à caracterização do isolamento acústico de ruídos de impacto	53
Figura 9 – Estimativa de cálculo para redução sonora	55
Figura 10 – Matriz experimental do estudo	58
Figura 11 – Nomenclatura adotada no estudo	58
Figura 12 – Esquema dos ensaios realizados no estudo	59
Figura 13 – Curva granulométrica da areia natural	62
Figura 14 – Aspecto da vermiculita natural – microscopia eletrônica de varredura – ampliação de 2000x	64
Figura 15 – Aspecto da vermiculita expandida – microscopia eletrônica de varredura – ampliação de 2000x	64
Figura 16 – Aspecto visual da vermiculita expandida	65
Figura 17 – Procedimento adotado para a determinação da massa específica do agregado leve: (1) pesagem da vermiculita expandida; (2) pesagem do conjunto inicial; (3) retirada do ar aprisionado; (4) e (5) vedação do conjunto; (6) pesagem do conjunto final	67
Figura 18 – Curva granulométrica da vermiculita expandida	68
Figura 19 – Máquina de rebaixar	71
Figura 20 – Aspecto da serragem cromada	71
Figura 21 – Aspecto original da serragem cromada coletada	73
Figura 22 – Aspecto da serragem cromada após o processo, em laboratório, para redução das dimensões do material	73
Figura 23 – Aspecto visual da serragem cromada	73
Figura 24 – Curva granulométrica da serragem cromada	75
Figura 25 – Consistência qualitativa das argamassas secas deste estudo	78

Figura 26 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova de 4 x 4 x 16 cm: (1) introdução do molde na mesa de adensamento; (2) preenchimento e nivelamento da primeira camada; (3) adensamento da primeira camada; (4) preenchimento e nivelamento da segunda camada; (5) adensamento da segunda camada e rasamento da superfície; (6) aspecto final dos corpos de prova no molde	81
Figura 27 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova de 20 x 20 x 3 cm: (1) introdução do molde na mesa de adensamento; (2) preenchimento e nivelamento da primeira camada; (3) preenchimento e nivelamento da segunda camada; (4) adensamento na mesa de adensamento; (5) adensamento com o rolo metálico; (6) rasamento da superfície; (7) adensamento superficial com o soquete; (8) aspecto final do corpo de prova no molde	83
Figura 28 – Procedimento para a determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica das argamassas: (1) secagem dos corpos de prova em estufa; (2) pesagem dos corpos de prova secos; (3) imersão dos corpos de prova em água em temperatura controlada; (4) imersão dos corpos de prova em água em ebulição; (5) pesagem dos corpos de prova imersos em água em temperatura controlada; (6) pesagem dos corpos de prova com a superfície enxugada	85
Figura 29 – Determinação das dimensões do corpo de prova	86
Figura 30 – Determinação da massa do corpo de prova	86
Figura 31 – Vista do equipamento de ultrassom e dos corpos de prova	87
Figura 32 – Ensaio de resistência à tração na flexão	88
Figura 33 – Ensaio de resistência à compressão	88
Figura 34 – Aspecto da amostra com o gesso	89
Figura 35 – Amostra pronta para o ensaio de rigidez dinâmica	89
Figura 36 – Vista dos equipamentos para o ensaio de rigidez dinâmica	90
Figura 37 – Exemplo de gráfico resultante do ensaio de rigidez dinâmica	90
Figura 38 – Comportamento da absorção de água, índice de vazios e massa específica seca das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material ...	92
Figura 39 – Influência do tipo de material no índice de vazios das argamassas	94
Figura 40 – Influência do teor de substituição no índice de vazios das argamassas	94
Figura 41 – Influência do tipo de material e do teor de substituição no índice de vazios das argamassas	95
Figura 42 – Comportamento da densidade de massa aparente das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material	96
Figura 43 – Influência do teor de substituição na densidade de massa aparente das argamassas	98
Figura 44 – Influência do tipo de material e do teor de substituição na densidade de massa aparente das argamassas	99
Figura 45 – Comportamento do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material	100

Figura 46 – Influência do tipo de material no módulo de elasticidade dinâmica das argamassas	101
Figura 47 – Influência do teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmica das argamassas	102
Figura 48 – Influência do tipo de material e do teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas	103
Figura 49 – Comportamento da resistência à tração na flexão das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material	104
Figura 50 – Influência do tipo de material na resistência à tração na flexão das argamassas	106
Figura 51 – Influência do teor de substituição na resistência à tração na flexão das argamassas	107
Figura 52 – Comportamento da resistência à compressão das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material	108
Figura 53 – Influência do tipo de material na resistência à compressão das argamassas	110
Figura 54 – Influência do teor de substituição na resistência à compressão das argamassas	111
Figura 55 – Influência do tipo de material e do teor de substituição na resistência à compressão das argamassas	111
Figura 56 – Comportamento da frequência de ressonância e da rigidez dinâmica das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material	115
Figura 57 – Relação entre a rigidez dinâmica, o índice de vazios e a densidade de massa aparente das argamassas	115
Figura 58 – Relação entre a rigidez dinâmica e as resistências mecânicas das argamassas	117
Figura 59 – Influência do tipo de material na rigidez dinâmica das argamassas	119
Figura 60 – Influência do teor de substituição na rigidez dinâmica das argamassas	120
Figura 61 – Comportamento da estimativa da redução do ruído de impacto em função da frequência central	121
Figura 62 – Representação do sistema massa-mola considerado nesta pesquisa, dimensões em milímetros	122
Figura 63 – Estimativa da redução do nível de pressão sonora	123
Figura 64 – Comparação do desempenho acústico entre materiais resilientes	125
Figura 65 – Custo por m ² das argamassas	128
Figura 66 – Custo por m ² e por dB das argamassas	129

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Métodos de avaliação do isolamento acústico de ruídos aéreos da NBR 15.575/2013	48
Quadro 2 – Métodos de avaliação do isolamento acústico de ruídos de impacto da NBR 15.575/2013	49
Quadro 3 – Procedimento adotado para o preparo das argamassas	80
Quadro 4 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova de 4 x 4 x 16 cm	81
Quadro 5 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova de 20 x 20 x 3 cm	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Velocidade de propagação da onda sonora em função do meio	32
Tabela 2 – Níveis de pressão sonora toleráveis pela NBR 10.151, em dB	43
Tabela 3 – Critérios de desempenho acústico de ruídos aéreos da NBR 15.575	50
Tabela 4 – Critérios de desempenho acústico de ruídos de impacto da NBR 15.575	50
Tabela 5 – Caracterização física, química e mecânica do cimento	60
Tabela 6 – Caracterização física da areia natural	61
Tabela 7 – Classificação da areia em função do módulo de finura	61
Tabela 8 – Caracterização física da vermiculita expandida	67
Tabela 9 – Caracterização física da serragem cromada	74
Tabela 10 – Características da argamassa industrializada	76
Tabela 11 – Caracterização do produto ensacado	76
Tabela 12 – Proporcionamento das argamassas deste estudo	79
Tabela 13 – Média da absorção de água, índice de vazios e massa específica das argamassas	92
Tabela 14 – ANOVA: resultados do índice de vazios das argamassas	93
Tabela 15 – Densidade de massa aparente média das argamassas	96
Tabela 16 – ANOVA: resultados da densidade de massa aparente das argamassas	97
Tabela 17 – Módulo de elasticidade dinâmico médio das argamassas	99
Tabela 18 – ANOVA: resultados do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas .	101
Tabela 19 – Resistência à tração na flexão média das argamassas	103
Tabela 20 – ANOVA: resultados da resistência à tração na flexão das argamassas	105
Tabela 21 – Resistência à compressão média das argamassas	107
Tabela 22 – ANOVA: resultados da resistência à compressão das argamassas	109
Tabela 23 – Variação das resistências mecânicas das argamassas, em relação à argamassa de referência	112
Tabela 24 – Média da frequência de ressonância e rigidez dinâmica das argamassas	114
Tabela 25 – ANOVA: resultados da rigidez dinâmica das argamassas	118
Tabela 26 – Estimativa da redução do nível de pressão sonora	122
Tabela 27 – Consumo de material de cada argamassa	126
Tabela 28 – Custos unitários dos materiais	127
Tabela 29 – Custos das argamassas	127
Tabela 30 – Custo por m ² e por dB das argamassas	129

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de Variância

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção

Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto

EN – *European Standard*

Fepam – Fundação Estadual de Proteção Ambiental

ISO – *International Organization for Standardization*

itt FUSE – Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional

itt Performance – Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil

LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

MERCOSUL – Mercado Comum do Sul

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma MERCOSUL

NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

ProAcústica – Associação Brasileira para a Qualidade Acústica

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LISTA DE SÍMBOLOS

NIS – nível de intensidade sonora (dB)

NPS – nível de pressão sonora (dB)

PT – perda na transmissão (dB)

NR – redução de ruído (dB)

DnT,w – diferença padronizada de nível ponderada (dB)

L'nT,w – nível de pressão sonora de impacto-padrão ponderado (dB).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	20
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	20
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	20
2.2.1 Objetivo Principal	20
2.2.2 Objetivos Secundários	20
2.3 HIPÓTESE	21
2.4 PRESSUPOSTO	21
2.5 DELIMITAÇÕES	21
2.6 LIMITAÇÕES	21
2.7 DELINEAMENTO	21
3 FUNDAMENTOS DA ACÚSTICA	25
3.1 SOM E RUÍDO	25
3.1.1 Medição Sonora	27
3.1.1.1 Bel e Decibel	27
3.1.1.2 Pressão Sonora e Nível de Pressão Sonora	27
3.1.1.3 Medição e Escalas de Ponderação	28
3.1.2 Sensação Auditiva	29
3.1.2.1 Efeitos dos Ruídos no Homem	30
3.1.3 Propagação do Ruído de Impacto	31
3.1.4 Fundamentos e Soluções para o Controle do Ruído de Impacto	34
4 NORMALIZAÇÃO RELATIVA À ACÚSTICA	42
4.1 NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA	42
4.1.1 Desempenho Acústico para o Sistema de Pisos Objetivo segundo a NBR 15.575/2013	46
4.1.1.1 Métodos de Avaliação	46
4.1.1.2 Critérios	49
4.1.1.3 Comentários	50
4.2 NORMALIZAÇÃO INTERNACIONAL	52
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	57
5.1 METODOLOGIA	57
5.2 MATERIAIS UTILIZADOS	59
5.2.1 Cimento	59

5.2.2 Agregados	60
5.2.2.1 Agregado Miúdo Natural	60
5.2.2.2 Agregados Leves	62
5.2.2.2.1 <i>Vermiculita Expandida</i>	63
5.2.2.2.1.1 Contextualização da Vermiculita Expandida	63
5.2.2.2.1.2 Caracterização da Vermiculita Expandida	65
5.2.2.2.2 <i>Serragem Cromada</i>	69
5.2.2.2.2.1 Contextualização da Serragem Cromada	69
5.2.2.2.2.2 Caracterização da Serragem Cromada	72
5.2.3 Argamassa Industrializada	75
5.2.4 Água	76
5.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	76
5.3.1 Dosagem das Argamassas	77
5.3.2 Moldagem dos Corpos de Prova	80
5.3.3 Cura	83
5.4 ENSAIOS	84
5.4.1 Ensaio de Caracterização das Argamassas	84
5.4.1.1 Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica	84
5.4.1.2 Densidade de Massa Aparente	85
5.4.1.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico	86
5.4.1.4 Resistência à Tração na Flexão e à Compressão	87
5.4.2 Ensaio de Rigidez Dinâmica	88
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	91
6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS	91
6.1.1 Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica	92
6.1.2 Densidade de Massa Aparente	95
6.1.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico	99
6.1.4 Resistência à Tração na Flexão	103
6.1.5 Resistência à Compressão	107
6.2 ENSAIOS DE RIGIDEZ DINÂMICA	113
6.3 ANÁLISE DE CUSTO	126
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
7.1 CONCLUSÕES	132
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	136

REFERÊNCIAS	137
APÊNDICE A	145
APÊNDICE B	147
APÊNDICE C	149
APÊNDICE D	151
APÊNDICE E	153
APÊNDICE F	156

1 INTRODUÇÃO

A crescente modernização produtiva e o incremento de inovações tecnológicas, em materiais e sistemas construtivos, permitiram a racionalização construtiva na indústria da construção civil. Essa é descrita por Sabbatini¹ (1989 apud MARQUES, 2013, p. 10) como “[...] um processo composto pelo conjunto de todas as ações, que tenham por objetivo otimizar o uso de recursos materiais, humanos, organizacionais, energéticos, tecnológicos, temporais e financeiros disponíveis na construção em todas as suas fases.”. Frente à tendência do setor da construção civil em buscar a otimização de recursos, tornou-se comumente perceptível certas implicações na qualidade do produto final, interferindo conseqüentemente na satisfação do usuário da edificação.

No Brasil, uma das conseqüências do movimento da racionalização da construção civil, iniciado em meados de 1970, foi permitir, ao longo dos anos, a redução gradativa do peso das estruturas de concreto armado (AKKERMAN, 2012). Percebe-se isso, graças ao crescente desenvolvimento tecnológico na área de estruturas, materiais de construção e informática, implicando em estruturas, por exemplo, mais esbeltas e finas. Segundo o mesmo autor, aliado à racionalização estrutural das construções, o surgimento da laje zero na década de 1990, caracterizada pela baixa espessura e isenção de contrapiso, comprometeu o conforto acústico entre unidades superpostas, intervindo no sossego dos moradores, visto a propagação acentuada de ruídos. Complementando, Souza (2012) esclarece que para garantir o conforto acústico, cada recinto requer critérios para eliminar situações nocivas à saúde ou, em caso de recinto com baixos níveis de pressão sonora, reduzir o estímulo dos usuários a condições de inatividade e sonolência.

Em meio aos elevados índices de reclamações a respeito da geração de ruídos por parte de usuários das edificações, geralmente em habitações de múltiplos pavimentos, entra em vigor, em 19 de julho de 2013, a Norma de Desempenho NBR 15.575/2013, disposta em seis partes, cada uma composta por requisitos, critérios e métodos de avaliação. A NBR 15.575/2013 tem por finalidade garantir segurança, habitabilidade e sustentabilidade ao usuário da edificação,

¹ SABBATINI, F. H. **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos – formulação e aplicação de uma metodologia**. 1989. [336 p]. [Tese (Doutorado em Engenharia)] – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

através da estipulação de requisitos obrigatórios. A terceira parte da NBR 15.575 aborda os requisitos para o sistema de pisos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013c), dentre eles o desempenho acústico, considerando que o “[...] nível de pressão sonora de impacto no recinto em análise (unidade abaixo do ambiente em que está sendo gerado o ruído de impacto) não poderá exceder os limites estabelecidos [...] para os níveis de desempenho Mínimo (M), Intermediário (I) e Superior (S).” (PEINADO, 2014, p. 72).

Em entrevista, o presidente da Associação Brasileira para a Qualidade Acústica, Davi Akkerman, avalia que a exigibilidade da NBR 15.575/2013 foi decisiva para implementar a questão do conforto acústico nas construções brasileiras. Além disso, o presidente afirma que para possibilitar a aplicação de fato do conforto acústico às edificações e assegurar os direitos dos usuários, é indispensável à comprovação, por parte das fornecedoras da construção civil, do desempenho individual de seus produtos e sistemas, juntamente com a incorporação das soluções acústicas pelas construtoras, através do detalhamento de isolamentos sonoros em projetos e da garantia do desempenho acústico dos sistemas executados em obra (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA, 2014).

Visto a recente exigibilidade da NBR 15.575/2013, a adequação aos requisitos de desempenho ainda é um processo lento e gradativo, graças à busca de soluções mais adequadas para satisfazer as exigências desta Norma e, conseqüentemente, os direitos dos usuários das edificações. No mercado atual brasileiro, as soluções acústicas comumente empregadas para o isolamento de ruídos de impacto se restringem a utilização de mantas acústicas sob uma camada de contrapiso armado. Estas soluções, além de exigirem mão de obra especializada para execução, ainda carecem de pesquisas quanto à avaliação do desempenho acústico ao longo do tempo, visto a fluência à compressão das mantas.

Nos últimos anos, é observada uma tendência de pesquisas focadas no desenvolvimento de argamassas leves, com o objetivo de oferecer ao mercado uma solução alternativa, através da substituição das mantas acústicas por estes materiais cimentícios. Com base nesta tendência, este trabalho propõe o desenvolvimento de argamassas de contrapiso com propriedades de isolamento acústico a fim de atenuar a propagação de ruídos de impacto, buscando materiais de construção e resíduos leves que possibilitem tornar estas argamassas uma parte do sistema isolamento.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: é possível o desenvolvimento de argamassas de contrapiso com propriedades para atenuar ruídos de impacto?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é o desenvolvimento de argamassas de contrapiso com propriedades de isolamento acústico que permitam atenuar ruídos de impacto.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) identificação de agregados leves para a composição das argamassas que possam contribuir para melhorar a atenuação de ruídos de impacto em pisos;
- b) determinar a influência do teor de substituição e do tipo de material dos agregados leves no índice de vazios, densidade de massa aparente, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e rigidez dinâmica das argamassas;
- c) estimar a redução do nível de pressão sonora para ruído de impacto das argamassas.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que é possível o desenvolvimento de argamassas de contrapiso com propriedades de isolamento acústico a fim de reduzir os ruídos de impacto.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os ensaios acústicos em laboratório empregados neste trabalho são representativos para a determinação das propriedades de isolamento acústico das argamassas.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao desenvolvimento de argamassas de contrapiso com capacidade de atenuar ruídos de impacto.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

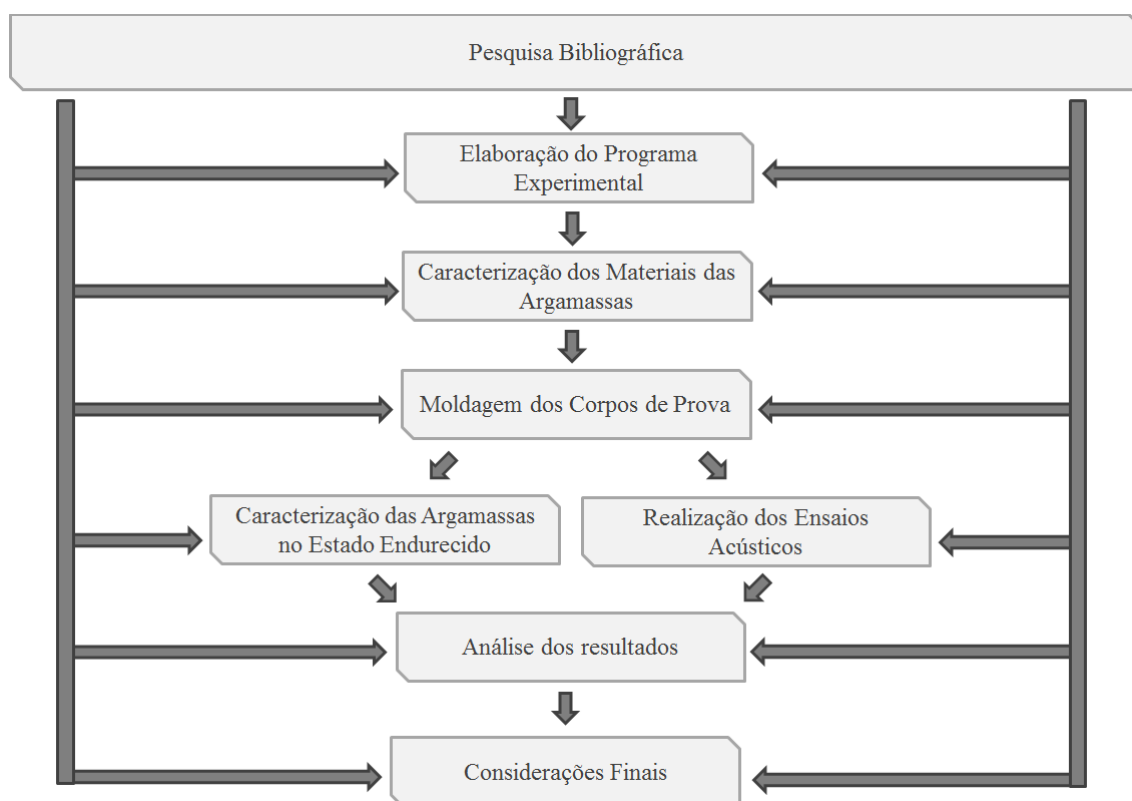
- a) utilização de uma argamassa de referência, além de uma argamassa industrializada;
- b) incorporação de dois tipos de materiais leves na argamassa de referência: vermiculita expandida e serragem cromada;
- c) incorporação de quatro teores de substituição do agregado miúdo natural pela vermiculita expandida na argamassa de referência: 10%, 30%, 50% e 70%;
- d) incorporação de cinco teores de substituição do agregado miúdo natural pela serragem cromada na argamassa de referência: 10%, 30%, 50%, 70% e 90%.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) realização de pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do programa experimental;
- d) caracterização dos materiais das argamassas;
- e) moldagem dos corpos de prova;
- f) caracterização das argamassas no estado endurecido;
- g) realização dos ensaios acústicos;
- h) análise dos resultados;
- i) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

O trabalho teve início na etapa de **pesquisa bibliográfica**, através da busca de referências técnicas e científicas relacionadas com os temas propostos, para sustentar teoricamente o projeto durante todas as etapas previstas. A pesquisa bibliográfica incluiu os aspectos relacionados com os fundamentos da acústica, juntamente com a normalização relativa à acústica das edificações, além de amparar teoricamente as etapas desde o programa experimental até as considerações finais.

Paralelamente a pesquisa bibliográfica, ocorreu à **elaboração do programa experimental**, responsável por estabelecer as diretrizes e planejar os procedimentos necessários para responder a questão de pesquisa do projeto, através do cumprimento dos objetivos. Nesta etapa, além da definição dos ensaios e dos tipos de argamassas, foi realizada a escolha dos materiais leves incorporados às argamassas, juntamente com a definição dos teores de substituição. Como base para a elaboração do programa experimental, foram utilizados tanto os fundamentos da acústica quanto a normalização relativa à acústica, além de referências bibliográficas que pesquisaram o comportamento dos materiais e seus proporcionamentos no isolamento aos ruídos de impacto de argamassas de contrapiso.

A prática em laboratório deste trabalho teve início com a **caracterização dos materiais das argamassas**, através de ensaios normativos previamente definidos no plano experimental. Em continuidade, foi realizada a **moldagem dos corpos de prova** tanto com as argamassas dosadas em laboratório, cujos materiais leves incorporados e os teores de substituição foram definidos no programa experimental, quanto com a argamassa industrializada. Nessa etapa, foram moldados os corpos de prova para a realização dos ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido e dos ensaios acústicos. Em relação à **caracterização das argamassas no estado endurecido**, foram executados os ensaios descritos em normas técnicas devidamente escolhidos no programa experimental.

A última etapa prática em laboratório do trabalho foi à **realização de ensaios acústicos** pertinentes à determinação das propriedades dinâmicas das argamassas de contrapiso, cujos resultados foram utilizados para a determinação da redução do nível de pressão sonora para ruídos de impacto de cada argamassa. Esta etapa do trabalho foi fundamental importância visto que os resultados obtidos estão diretamente ligados com o objetivo principal, sendo fundamentais para responder a questão de pesquisa.

Por fim, partindo dos dados obtidos em todos os ensaios, foram **analisados os resultados** a fim de interpretar qualitativamente e quantitativamente o comportamento das argamassas de contrapiso, avaliando a influência do tipo de material e dos teores de substituição nas propriedades físico-mecânicas e na rigidez dinâmica das argamassas dosadas em laboratório, além de traçar um comparativo com o desempenho da argamassa industrializada. Nesta etapa também foram determinados às estimativas da redução sonora destas argamassas, cujos resultados foram comparados com soluções tradicionais de mercados. Por fim foi realizada a

análise de custos a fim de verificar a viabilidade econômica das argamassas dosadas em laboratório em comparação com a argamassa industrializada. Nas **considerações finais**, pretendeu-se apresentar as conclusões desta pesquisa e responder à questão de pesquisa, além de destacar algumas recomendações para os trabalhos futuros.

3 FUNDAMENTOS DA ACÚSTICA

Bistafa (c2011, p. 6) define a acústica como “[...] a ciência do som, incluindo sua geração, transmissão e efeitos. Na realidade, o termo **som** [...] se refere não somente ao fenômeno do ar responsável pela sensação de audição, mas também a tudo aquilo que é governado por princípio físico análogo.”. De forma a esclarecer os fenômenos relacionados ao som, esse capítulo tem por intuito abordar os fundamentos da acústica com foco nos ruídos de impacto, apresentando desde definições básicas até fundamentos do controle do ruído.

3.1 SOM E RUÍDO

Simplificadamente, Carvalho (c2006) descreve o som como toda vibração ou onda mecânica passível de ser captada pelo ouvido humano, cuja propagação ocorre em um meio qualquer (sólido, líquido ou gasoso). Complementarmente, Souza et al. ([2006]) afirmam que o som tem origem na vibração de um objeto, responsável por transmitir essas excitações para o meio de propagação através de “[...] uma alteração da pressão ou um deslocamento das partículas do material [...]” (MÉNDEZ et al., 1994, p. 17, tradução nossa).

Em uma abordagem mais técnica, Gerges (c2000, p. 1) acrescenta:

O som se caracteriza por flutuações de pressão em um meio compressível. No entanto, não são todas as flutuações de pressão que produzem a sensação de audição quando atingem o ouvido humano. A sensação de som só ocorrerá quando a amplitude destas flutuações e a frequência com que elas se repetem estiver dentro de determinada faixa de valores.

Para Costa (c2003), através da análise harmônica dos sons é possível estabelecer distinções entre sons e ruídos. Segundo Méndez et al. (1994, tradução nossa), todo sinal acústico que causa sensação agradável ao ouvido humano e apresenta composição harmônica definida é considerado som. Aqueles sinais acústicos desagradáveis e com composição harmônica não definida, são denominados de ruídos pelos autores. Paralelamente, Bistafa (c2011) complementa que ruídos são sons indesejáveis, geralmente de conotação negativa. Todavia, o autor afirma que em alguns casos o ruído transmite informações úteis para os indivíduos,

como por exemplo: o ruído do motor de um veículo parado indica ao ouvinte que o mesmo está funcionando.

Frente à definição de ruído como som indesejável, Pedroso (2007, p. 23) avalia que o “[...] ruído é uma sensação totalmente subjetiva, visto que sensações auditivas agradáveis, ou pelo menos suportáveis para algumas pessoas podem ser extremamente desagradáveis para outros.”. No entanto, o mesmo autor confirma que percepção de incômodo de uma onda sonora a define como ruído, com a ressalva que o grau de incômodo pode ser maior ou menor dependendo do ouvinte.

Os ruídos são classificados de acordo com a fonte de geração. Segundo Carvalho (c2006, p. 33), a classificação usual é a seguinte:

- a) ruídos aéreos;
- b) ruídos de impacto.

Conforme Ferraz (2008, p. 5), “Os sons gerados pela conversa humana ou por instrumentos musicais são exemplos de ruído aéreo [...]. Ventiladores, motores, maquinários, aviões e automóveis são outras fontes que também produzem o ruído aéreo [...]”. Em relação aos ruídos de impacto, Carvalho (c2006) cita que a origem se dá pela percussão sobre um sólido visto, por exemplo, a queda de objetos, marteladas e passos.

De acordo com Méndez et al. (1994, tradução nossa), a existência do ruído é parcialmente satisfeita se houver o cumprimento dos seguintes requisitos:

- a) fonte geradora de ruído;
- b) meio de propagação;
- c) receptor que ouça o ruído.

Dessa forma, afirma-se que a inexistência do cumprimento de qualquer um dos requisitos expostos acima, implica na não percepção do ruído. Ressalva-se que essa classificação se refere à audição humana. Contudo, mesmo com a presença de uma fonte geradora e um meio de propagação, o ruído somente será perceptível entre a faixa de audição dos receptores.

A fim de abordar os fundamentos da acústica relacionados com o som e o ruído, os itens a seguir apresentam informações a respeito da medição sonora, sensação auditiva, propagação do ruído e fundamentos do controle do ruído.

3.1.1 Medição Sonora

Para clarear aspectos relacionados com a medição sonora, abaixo serão abordados os itens: bel e decibel, pressão sonora e nível de pressão sonora e, por fim, medição e escalas de ponderação.

3.1.1.1 Bel e Decibel

Em 1923, para facilitar a comparação entre potências de sistemas de telefonia, criou-se uma unidade de medida em escala logarítmica, batiza posteriormente de bel (B), de modo a comprimir uma extensa escala linear de potências. No entanto, em 1929, frente a maior necessidade de apresentar mais claramente pequenas variações de pressões, adaptou-se a escala através de um submúltiplo do bel, conhecido como decibel (dB) (BISTAFA, c2011).

Em relação à acústica, Carvalho (c2006) menciona que o bel é basicamente uma unidade de intensidade física relativa ao som. Além disso, o mesmo autor afirma que para medir os níveis de ruídos é indicado o emprego da unidade decibel, caracterizado por ser a décima parte do bel.

3.1.1.2 Pressão Sonora e Nível de Pressão Sonora

Sabe-se que a onda sonora é caracterizada por variações de pressões conhecidas como pressão sonora (MÉNDEZ et al., 1994, tradução nossa). Segundo Bistafa (c2011, p. 26), a pressão sonora é descrita como:

[...] uma grandeza física fortemente correlacionada com a sensação subjetiva de intensidade do som; ou seja, o quão intenso é determinado som que escutamos. Quando o objetivo é avaliar o perigo e a perturbação causada por fontes de ruído, a pressão sonora é a grandeza mais pertinente.

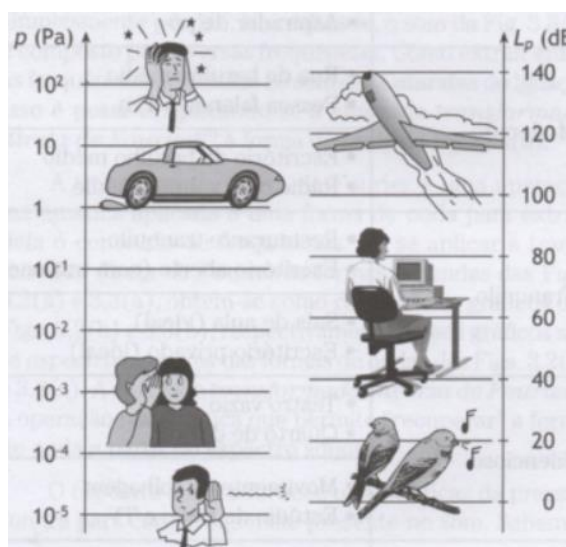
A unidade básica de medida de pressão sonora é o Pascal (Pa), todavia, Méndez et al. (1994, tradução nossa) avaliam que expressar a intensidade do som através desta unidade é complicado por se tratar de uma escala ampla, dessa maneira como visto anteriormente se

utiliza a unidade de medida conhecida como decibel (dB). Destaca-se que a intensidade sonora e a pressão sonora são grandezas físicas correlacionadas, assim sendo, usualmente “[...] utiliza-se o decibel para medir o nível de intensidade sonora (NIS) e o nível de pressão sonora (NPS) [...]” (SOUZA et al., [2006], p. 30).

Em geral, “O **nível de pressão de pressão sonora** é a medida preferencial para caracterizar a **sensação subjetiva da intensidade dos sons** [...], sendo sempre calculado com o valor eficaz da pressão sonora.” (BISTAFA, c2011, p. 30). O valor considerado eficaz é definido como o valor limiar da audição.

A figura 2, baseando-se no intervalo entre o limiar da audição e o limiar da dor, demonstra a equivalência entre a unidade de pressão sonora e a unidade de nível de pressão sonora, Pascal e decibel, respectivamente. Ressalta-se a diferença entre o tamanho dos intervalos das escalas.

Figura 2 – Equivalência entre pressão sonora e nível de pressão sonora



(fonte: BISTAFA, c2011, p. 37)

3.1.1.3 Medição e Escalas de Ponderação

Visto que o grau de incômodo de um ruído é variável em função das características fisiológicas dos indivíduos, utilizam-se medições sonoras como um meio objetivo de comparação de incômodos, independente das condições de exposição (GERGES, c2000). Nessa mesma linha, Méndez et al. (1994, tradução nossa) acrescentam que as medições são realizadas através de um instrumento denominado de medidor de nível sonoro, geralmente equipado com filtros de compensação que buscam reproduzir a sensação auditiva humana.

Costa (c2003) explica que as compensações usuais são definidas como escalas ponderadas, classificadas em A, B, C e D. Segundo o mesmo autor, as medições sonoras na prática atual consideram amplamente o procedimento de ponderação A, visto a ineficiência das demais escalas em retornar respostas equivalente com a percepção do ouvido humano.

Simplificadamente, Carvalho (c2006, p. 38) resume a medição sonora da seguinte maneira:

É difícil obter com um só valor a medida de um nível acústico, ou seja, um valor objetivo que se aproxime o máximo possível da percepção do ouvido humano (que é diferente de pessoas para pessoa).

O sistema empregado universalmente para definir como um só valor de nível de pressão acústica é do dB (A). Essa medida está baseada nas curvas isofônicas [...] sobre a sensibilidade do ouvindo humano em função da frequência. É obtida mediante a média ponderada entre o espectro do ruído e a curva seguinte, que se conhece como curva de ponderação “A”. Esta curva é utilizada para compensar as diferenças de sensibilidade que o ouvido humano tem para a gama de frequências dentro do campo auditivo.

A aferição em dB (A) é aceita internacionalmente como o valor que mais se aproxima da sensação de audibilidade humana (ouvido padrão) [...]

3.1.2 Sensação Auditiva

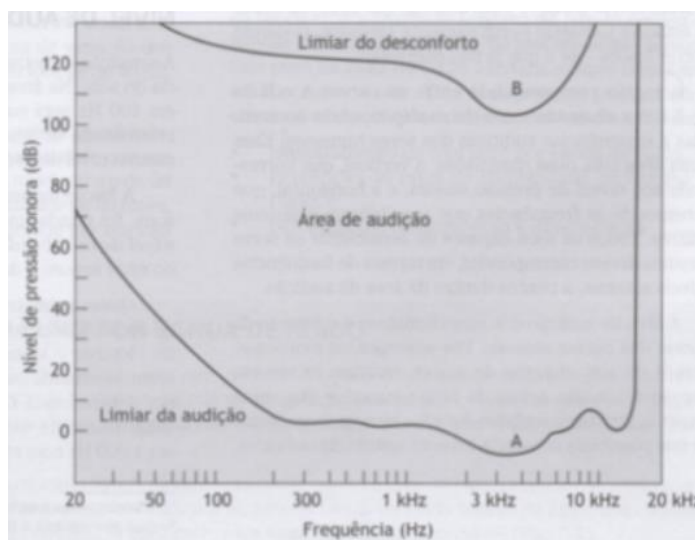
Os limites da audibilidade dos seres humanos são expressos em um intervalo de frequências. Conforme Carvalho (c2006, p. 16), quando é “Exercida uma pressão em um meio elástico ocorrem oscilações cíclicas de pressão/depressão, em intervalos de tempo (período) maiores ou menores. A frequência é então o número de oscilações (ou ciclos) por unidade de tempo (período)”. Méndez et al. (1994, tradução nossa) acrescentam que a unidade de medida da frequência é o Hertz (Hz).

Partindo da definição de frequência, Souza et al. ([2006]) afirmam que o som é audível ao ser humano para o intervalo de frequências delimitado entre 20 Hz a 20.000 Hz. Os mesmos autores complementam que, dentro desse intervalo, as frequências mais elevadas correspondem aos sons agudos, enquanto as frequências mais baixas aos sons graves. De acordo com Bistafa (c2011, p. 19), “Sons com frequência abaixo de 20 Hz chamam-se **infrassons**, e sons com frequência acima de 20 kHz são os **ultrassons**.”.

Em relação à faixa de audição, Méndez et al. (1994, tradução nossa) salientam que a sensibilidade do ouvido humano não é igual para todas as frequências desse intervalo. A explicação dada por Bistafa (c2011), é que o sistema auditivo é o responsável por transformar

o som em sensações, dessa maneira, tanto as grandezas físicas características do som como as grandezas psicoacústicas do receptor influenciam na forma de percepção som. Baseando-se nisso, Costa (c2003) afirma que é comprovado que para cada frequência, o aumento do nível de pressão sonora implica no crescimento da sensação auditiva, partindo do limite da audição até o limite da dor. Verificam-se então, através da figura 3, as curvas que “[...] representam os extremos de percepção de níveis sonoros em função da frequência para ouvintes ‘normais’.” (BISTAFA, c2011, p. 66).

Figura 3 – Sensação auditiva em função das grandezas físicas do som: (A) limite entre a área de audição e o limiar da audição; (B) limite entre a área de audição e o limiar do desconforto



(fonte: EVEREST², 1994 apud BISTAFA, c2011, p. 67)

3.1.2.1 Efeitos dos Ruídos no Homem

Sabe-se que o ruído tende a causar malefícios à saúde, visto a comprovação dos estudos realizados sobre os possíveis efeitos dos ruídos no homem, incentivados pela Organização Mundial da Saúde (CARVALHO, c2006). Contudo, Bistafa (c2011, p. 7) destaca:

O ruído permeia as atividades humanas 24 horas por dia, e vem sendo apontado como uma das principais causas de deterioração da qualidade de vida, principalmente em grandes cidades. Mais pessoas são afetadas pela exposição ao ruído do que qualquer outro poluente. Infelizmente, como os problemas de saúde associados ao ruído não ameaçam tanto a vida como os poluentes do ar, das águas e o lixo químico e atômico, o ruído está em último lugar na lista das prioridades ambientais.

² EVEREST, F. A. **The master handbook of acoustics**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1994.

Tratando-se dos efeitos na audição do homem, sabe-se qualquer modificação causada por ruídos na sensibilidade da audição é considerada perda de audição (GERGES, c2000). Partindo disso, Gerges (c2000, p. 56) ressalva que "O potencial de danos à audição de um dado ruído depende não somente de seu nível, mas também de sua duração.". Bistafa (c2011) acrescenta que a indicação de perda de audição é dada pela sensação de zumbido por parte do receptor, mesmo quando inexistente uma fonte sonora.

No entanto, conforme Souza et al. ([2006]), os efeitos do ruído no ser humano abrangem muito mais do que apenas as lesões no aparelho auditivo, podendo causar efeitos tanto físicos quanto psicológicos ao sujeito exposto ao ruído. O mesmo autor exemplifica:

Quanto aos aspectos físicos, podem ser citados: perda auditiva até a surdez permanente em casos limites, dores de cabeça, fadiga, distúrbios cardiovasculares, distúrbios hormonais, gastrites, disfunções digestivas, alergias, entre outros. Quanto aos aspectos psicológicos, a exposição ao ruído pode levar à perda de concentração e de reflexos, à irritação permanente, a perturbações do sono, à sensação de insegurança, entre outros.

De acordo com Bistafa (c2011), o ser humano pode ser considerado um agente ativo no momento em que é o gerador e receptor do ruído. Porém, a situação geralmente mais problemática em relação aos efeitos dos ruídos é quando o receptor é um agente passivo, visto o impacto negativo da inserção de uma fonte sonora em um ambiente sem o consentimento do próximo.

Para Gerges (c2000), a suspeita de um ruído maléfico ao homem deve sempre estar associada diretamente com medidas para controlar o mesmo. Contudo, antes de aplicar formas de controlar ruídos, é imprescindível entender de que forma ocorre a propagação dos ruídos nos meios de propagação. Com isso, justifica-se a abordagem dos próximos itens.

3.1.3 Propagação do Ruído de Impacto

A propagação da onda sonora é caracterizada pelo movimento interativo de vibração das partículas do meio provocado por modificações na pressão atmosférica (SOUZA et al., [2006]). Costa (c2003, p. 11) resume a propagação como uma “[...] vibração elástica (mecânica) dos meios ponderáveis ou corpos de uma maneira geral, sejam aeriformes, líquidos ou sólidos.”. Com isso, verifica-se que as características do meio tendem a interferir na velocidade de propagação da onda sonora. Baseando-se nessa afirmativa, Méndez et al.

(1994, p. 19, tradução nossa) completam que “Em meios sólidos e líquidos, as velocidades de propagação são maiores.”, conforme é verificado na tabela 1.

Tabela 1 – Velocidade de propagação da onda sonora em função do meio

Meio	Velocidade (m/s)
Ar	344
Água Salgada	1500
Alumínio	5200
Ferro	3400
Aço	5000
Madeira	3700
Concreto	3100
Vidro	6000

(fonte: adaptada de MÉNDEZ et al., 1994, p. 19, tradução nossa)

A velocidade de propagação de uma onda sonora é diretamente proporcional à densidade do meio de transmissão (CARVALHO, c2006). O mesmo autor acrescenta que essa velocidade:

- a) é diretamente proporcional à temperatura;
- b) é diretamente proporcional à umidade;
- c) não sofre influência da pressão atmosférica;
- d) não varia com a frequência.

A elevada velocidade de propagação em meios densos não garante diretamente uma alta quantidade de transmissão do som, visto que as características dos materiais presentes no meio, por exemplo, no concreto, podem vir a ter elevada capacidade de dissipação da energia sonora incidente (PEDROSO, 2007).

Ruídos gerados por impacto são caracterizados por uma excitação mecânica de curta duração (MÉNDEZ et al., 1994, tradução nossa), cuja força imposta diretamente sobre os elementos da edificação, de acordo com Ferraz (2008), geralmente não é periódica. Para Carvalho (c2006, p. 35), “Tecnicamente, entende-se por ruído de impacto aquele que apresenta picos de energia acústica de duração inferior a 1 (um) segundo, a intervalos superiores a 1 (um) segundo.”.

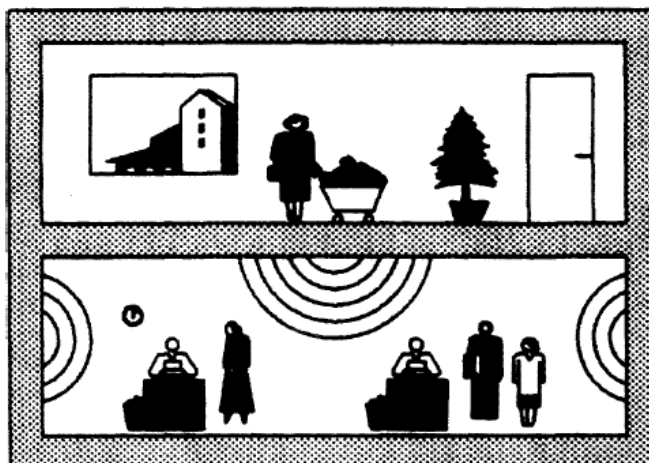
Apesar da comumente diferenciação de ruídos gerados por vibração de sólidos ou por impacto, Souza et al. ([2006], p. 96) afirmam que os “Impactos também são vibrações que se propagam pelas estruturas, mas apresentam como característica uma rápida queda em sua intensidade, são vibrações com grande quantidade de energia, apresentando picos e se propagando sobre sólidos com pouca atenuação.”. Dessa forma, as formas de propagação das ondas sonoras geradas por ambas as fontes de ruído são semelhantes, ressaltando que o tratamento para o controle do ruído não é necessariamente idêntico para os dois casos.

A propagação de ruídos de impacto ou vibração é mais frequentemente observada em elementos como pisos e tetos, visto que as paredes são mais expostas aos ruídos aéreos (SOUZA et al., [2006]). Conforme Gerges (c2000), a propagação das ondas sonoras em sólidos pode ocorrer através dos seguintes tipos de ondas:

- a) onda longitudinal;
- b) onda de cisalhamento;
- c) onda torcional;
- d) onda de flexão.

Independente do tipo de onda acústica responsável pela propagação em sólidos, a transmissão de ruídos de impacto em elementos de edificação é caracterizada pela transmissão direta e secundária (BISTAFA, c2011). Carvalho (c2006) explica que a força de impacto sobre uma laje implica tanto na vibração da mesma (transmissão direta) quanto na excitação de diferentes partições do edifício vinculadas a laje, gerando ruídos por transmissão secundária. De acordo com Souza et al. ([2006], p. 96), de forma análoga a interação entre ruídos aéreos e superfícies, “As vibrações de sólidos e impactos são transmitidos diretamente sobre uma estrutura e provocam posteriormente a vibração do ar.”. A figura 4 ilustra os processos de transmissão de ruídos de impacto.

Figura 4 – Transmissão de ruídos de impacto



(fonte: MÉNDEZ et al., 1994, p. 130)

De acordo com Gerges (c2000), as elevadas distâncias percorridas pelas ondas de impacto são frutos das propriedades dos meios sólidos, visto a alta densidade e velocidade de propagação do som características desses meios. Nesse quesito, os autores Méndez et al. (1994, p. 130-131, tradução nossa) acrescentam a discussão das consequências da propagação dos ruídos de impacto aliada ao complemento de outras possíveis causas, conforme a citação abaixo:

Os ruídos de impacto são fonte de grande incômodo, já que produzem diminuição do conforto, ainda quando os níveis de pressão sonora gerados não são elevados, Além disso, como as vibrações geradas se transmitem pela estrutura, podem se propagar a grandes distâncias, prejudicando muitas pessoas simultaneamente.

Outro motivo que faz com que os ruídos de impacto sejam tão incômodos é a natureza de sua geração, a qual excita a estrutura em todas as frequências, inclusive as críticas. ([...] a frequência crítica é aquela para qual a velocidade de propagação da onda em que o meio sólido coincide com a velocidade de propagação do som no ar, produzindo uma radiação importante do som).

O conhecimento do fenômeno de propagação do ruído de impacto em sólidos, principalmente em pisos, é essencial para entendimento do item seguinte, cujo objetivo é a determinação dos fundamentos e das soluções para o controle deste ruído, tendo em vista o conforto acústico das edificações.

3.1.4 Fundamentos e Soluções para o Controle do Ruído de Impacto

Carvalho (c2006, p. 33) relata que “Os primeiros esforços realizados para se controlar o nível de ruído tinham por objetivo basicamente a contenção de sons de tráfego aéreo e de atividade

industrial.”. No entanto, conforme Bistafa (c2011), a pressão por parte dos consumidores e usuários, para controlar o ruído em ambientes como residências e escritórios, exigiu do mercado da construção civil adequações para a garantia do conforto acústico e da saúde do usuário nas edificações.

Toda e qualquer forma de controle do ruído visa à atenuação dos ruídos em níveis aceitáveis, levando em conta “[...] aspectos econômicos, operacionais, legais, médicos, psicológicos e culturais.” (BISTAFA, c2011, p. 315). O mesmo autor completa que os níveis aceitáveis são previamente estipulados por normas e legislações. Dessa forma, Ferraz (2008) afirma que a convivência dos usuários com níveis aceitáveis de ruídos é uma realidade, frente que a atenuação completa eleva os custos consideravelmente e tende a promover sensações de privatização contraindicadas aos usuários.

O atendimento aos níveis de ruídos aceitáveis recomendados por normas e legislações exige o controle de ruídos excessivos e/ou indesejáveis. Para isso, deve-se lembrar que a existência do ruído está condicionada a uma fonte sonora, a uma trajetória de transmissão e a um receptor. Baseando-se nisso, Costa (c2003, p. 81) apresenta formas de controlar os ruídos, através da:

- a) redução dos ruídos na fonte;
- b) redução dos ruídos no ambiente fechado onde a fonte se situa;
- c) redução dos ruídos entre o ambiente fechado, em que são produzidos, e outro ambiente fechado ou mesmo o exterior;
- d) redução do ruído no próprio órgão auditivo.

Apesar da possibilidade de controlar diretamente a fonte sonora ou proteger, com equipamentos de proteção individual, o receptor, ambas geralmente não se aplicam a edificações durante a sua utilização, visto que certas fontes são inevitáveis e que a proteção de um morador, por exemplo, é desconsiderada por motivos óbvios. Com isso, levando em consideração que “[...] normalmente problemas de ruído não são antecipados na fase de projeto, resta ao responsável pelo controle do ruído atuar na trajetória de transmissão.” (BISTAFA, c2011, p. 327).

Em busca da redução do nível sonoro transmitido entre ambientes, opta-se por estruturas que possibilitam à isolamento sonora, cuja unidade de medida é a perda na transmissão (PT)

(BISTAFA, c2011). A perda na transmissão pode ser vir a ser simplificada, através da desconsideração das correções relativas às condições acústicas do recinto receptor, resultando na determinação da redução de ruído (NR), cuja medida retorna apenas o “[...] nível de redução na propagação sonora entre a fonte e o receptor. Consiste simplesmente na diferença dos níveis sonoros no recinto da fonte e no recinto do receptor [...]. É uma medida útil, pois fornece a atenuação de determinada estrutura em condições normais de operação.” (BISTAFA, c2011, p. 327).

A capacidade de isolamento de uma estrutura é variável com a frequência de excitação (SOUZA et al., [2006]). De acordo com Méndez et al. (1994, p. 137, tradução nossa), “[...] é observada uma redução do isolamento nas proximidades da frequência de ressonância, de modo que deve ser tão baixa quanto possível, visto que a maior atenuação é conseguida para altas frequências.”. Tendo em vista essa condicionante de isolamento, Gerges (c2000) ressalta que na prática a frequência de propagação de ruídos geralmente está acima da frequência de ressonância, garantindo assim as propriedades de isolamento acústico da estrutura.

Sabe-se que a isolamento de ruídos aéreos entre ambientes está condicionada a espessura da superfície sólida capaz de impedir a propagação dos mesmos, juntamente com a densidade superficial do meio sólido (CARVALHO, c2006). Por esse motivo, os sistemas de pisos tendem a apresentar isolamento satisfatória em relação aos ruídos aéreos, visto a espessura e a densidade características, em geral, destes sistemas. Já em relação à isolamento de ruídos de impacto, Ferraz (2008, p. 14) declara que “O isolamento do ruído de impacto em pisos de edificações é de grande importância para o conforto acústico, principalmente em ambientes residenciais.”. Tal importância se sobressalta ainda mais graças a frequente ocorrência de ruídos de impacto nos pisos das edificações.

A comparação entre isolamento de ruídos aéreos e ruídos de impacto é praticamente inevitável, graças à comumente necessidade de utilização de ambas as soluções nas edificações. Os fundamentos para atenuar esses tipos de ruídos geralmente são divergentes, frente às diferentes características do som produzido pelos mesmos. Todavia, Méndez et al. (1994, p. 125, tradução nossa) atribuem que “Geralmente é verdadeiro que uma estrutura que isola satisfatoriamente os ruídos de impacto, também isola os aéreos, não sendo verdadeiro a condição de reciprocidade.”. Partindo disso, os fundamentos aplicados para o controle de

ruídos aéreos não devem ser associados à atenuação de ruídos de impacto, exigindo uma avaliação restrita dos fundamentos de isolamento desses últimos ruídos.

Com base nas citações anteriores, verifica-se que os ruídos de impacto são praticamente inevitáveis e disparadamente mais frequentes em pisos, apresentando-se como um ruído crítico para o conforto acústico dos usuários das edificações. Parte-se então para a análise dos fundamentos de isolamento desses ruídos através de estruturas horizontais. Nesse contexto, Costa (c2003) menciona que as estruturas de concreto armado aumentam a atenuação de ruídos de impacto através do acréscimo na espessura das lajes, mas a busca pela redução do peso dessas estruturas dificulta a aplicação da respectiva solução, implicando na utilização de outras formas de isolamento.

Pedroso (2007, p. 35) apresenta as soluções acústicas aplicadas para isolar os ruídos de impacto em lajes estruturais, são elas:

- a) isolamento pela utilização de forro falso no recinto de recepção do ruído;
- b) isolamento do piso na origem do impacto, através de forrações com materiais macios como tapetes espessos e carpetes;
- c) isolamento pela interposição de material flexível – resiliente – entre o revestimento e a laje, método este denominado de piso flutuante.

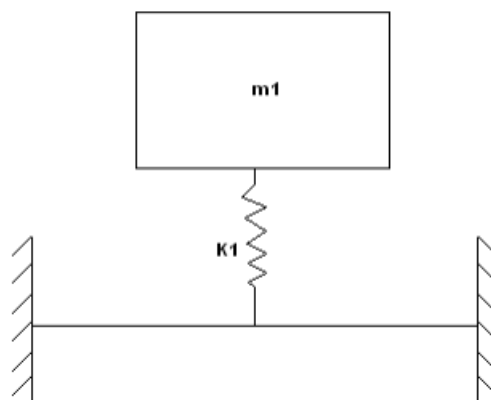
Apesar da possibilidade de utilização de forro falso, Pedroso (2007, p. 37) afirma que “É um método caro que pode atender aspectos estéticos, caso haja espaço suficiente para sua execução, mas não tem uma eficácia que justifique sua utilização para redução do ruído de impacto.”. Em relação aos materiais macios, Carvalho (c2006) considera que o emprego desses materiais é a melhor forma de isolar ruídos de impacto em lajes, mas essa solução não é aplicável em locais como banheiros e cozinhas. Parte-se então para o entendimento dos fundamentos associados com a isolamento dada por pisos flutuantes.

Conforme Bistafa (c2011, p. 300), a utilização de pisos flutuantes é:

[...] a solução normalmente utilizada para redução de sons de impacto consiste em colocar material resiliente isolador entre a laje estrutural e o contrapiso (piso flutuante), de menor espessura do que a laje. Os isoladores poderão ser coxins de borracha, cortiça etc., uniformemente distribuídos, ou placas contínuas de lã de vidro, lã de rocha, poliestireno expandido elastizado (isopor elastizado) e outros materiais.

Um sistema de piso flutuante pode ser representado simplificadaamente como um sistema massa-mola, em que o contrapiso representa a massa e a camada de material resiliente corresponde à mola (NEVES et al., 2008). A figura 5 ilustra a representação do piso flutuante como um sistema massa-mola.

Figura 5 – Representação do sistema massa-mola



(fonte: SOUSA, 2008, p. 29)

Complementarmente, Sousa (2008, p. 29) salienta que “[...] o sistema é composto por um corpo de massa m_1 que corresponde ao contrapiso, ligado a um outro corpo, a laje estrutural, por uma mola de rigidez K_1 que caracteriza a rigidez da camada resiliente.”. Tendo em vista que os ruídos gerados por impacto se propagam em sólidos por vibrações, o sistema se baseia no princípio do isolamento das vibrações do restante da edificação (MÉNDEZ et al., 1994, tradução nossa).

De acordo com Baron et al. (2004, p. 1, tradução nossa), “O desempenho do piso flutuante depende diretamente das propriedades mecânicas da camada de isolamento, em conjunto com a sua massa por unidade de área.”. Para tanto, reitera-se que para ter eficácia quanto ao isolamento de ruídos de percussão, o material resiliente empregado deve permitir que a frequência de ressonância do sistema seja a mais baixa possível (SOUSA, 2008). Complementarmente, Rocha (2012, p. 32) afirma que:

[...] quando a frequência de excitação do pavimento é próxima da frequência própria do sistema, o mesmo entra em ressonância, provocando uma ampliação da resposta dinâmica [...] e conseqüentemente um aumento do ruído de percussão. No entanto, se a frequência própria do sistema for menor que a frequência de excitação, a resposta do sistema aumenta a sua eficácia de amortecimento para frequências acima da sua frequência crítica.

De acordo com a Associação Brasileira para a Qualidade Acústica (2015, p. 13), “Os materiais resilientes apresentam propriedades dinâmicas que estão relacionadas com a sua capacidade de amortecer impactos.”. Portanto, torna-se necessário avaliar as propriedades dinâmicas dos materiais resilientes a fim de possibilitar a avaliação e o entendimento do desempenho do sistema de piso flutuante, em relação à redução do ruído de impacto, que incorpora o respectivo material como camada resiliente.

Baron et al. (2004, tradução nossa) cita que uma das principais propriedades dinâmicas de um material resiliente é a rigidez dinâmica. A determinação dessa propriedade tem elevada aplicabilidade em comparativos de desempenho acústico entre materiais resilientes. Segundo a Associação Brasileira para a Qualidade Acústica (2015, p. 14), se tratando de pisos flutuantes, “[...] quanto menor o valor da Rigidez Dinâmica aparente de um material, maior é a sua capacidade de absorver as vibrações produzidas por impactos e, por consequência, maior será a Redução Sonora (dB) resultante.”.

O ensaio para a determinação da rigidez dinâmica de materiais resilientes usados no sistema de piso flutuante é especificado pela ISO 9.052-1/1989. Basicamente, a rigidez dinâmica é dada pela relação da força dinâmica aplicada diretamente na amostra com o deslocamento dinâmico sofrido pelo material resiliente (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1989, tradução nossa). De acordo com Neves et al. (2008, p. 3), “Esta propriedade pode ser expressa em termos do módulo de elasticidade do material [...] e da sua espessura [...]”, conforme apresentado na equação 1.

$$s' = (E) / (d) \quad \text{(equação 1)}$$

Sendo:

s' = rigidez dinâmica (MN/m³);

E = módulo de elasticidade (N/m²);

d = espessura (m).

O princípio da Norma ISO 9.052-1/1989 é baseado na determinação da rigidez dinâmica aparente através de um método na qual a frequência de ressonância de um sistema é determinada. Conforme Neves et al. (2008, p. 3), o “[...] método consiste na medição da

frequência fundamental de ressonância da vibração vertical do sistema massa-mola.”. Como forma de equivalência com o sistema de piso flutuante, a massa é representada pela placa de carga padrão e a mola pelo material resiliente. Com isso, a rigidez dinâmica aparente pode ser calculada pela equação 2.

$$s't = 4 \times \pi^2 \times m't \times fr^2 \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

$s't$ = rigidez dinâmica aparente por unidade de área da amostra teste (MN/m³);

$m't$ = massa total por unidade de área usada durante o teste (kg/m²);

fr = frequência de ressonância extrapolada (Hz).

Segundo Kim et al.³ (2009 apud BORGES, 2015), a rigidez dinâmica e a frequência de ressonância são propriedades diretamente dependentes. Os mesmos autores reiteram que com o decréscimo da rigidez dinâmica, juntamente com a frequência de ressonância, implica no crescimento da redução do ruído de impacto no sistema de piso flutuante. De forma complementar, Ferraz (2008, p. 27) menciona que:

Nas aplicações de controle de ruído, é interessantes utilizar pequenos valores de s' [rigidez dinâmica], ou seja, materiais com características mais elásticas possíveis. Do ponto de vista estrutural, é desejável que seja um material capaz de resistir às cargas e à instalação do contrapiso sem fissurar.

Sabendo a importância das propriedades dinâmicas dos materiais resilientes na determinação do desempenho acústico e no princípio do sistema massa-mola de pisos flutuantes. Certos estudos experimentais avaliaram o desempenho acústico de materiais alternativos compostos de resíduos leves quando aplicado na forma de manta ou aglomerado, similar as tradicionais soluções disponíveis no mercado. Nesses estudos, observou-se a utilização de resíduos como, por exemplo, aglomerado de cortiça negra e fibra de coco (MORAIS et al., 2009), cortiça expandida (MOREIRA et al., 2010), poliuretano skin (RIBEIRO, W. et al., c2014), poliuretano (NUNES el al., 2010), etileno acetato de vinila (HAX, 2002; NUNES et al., 2010) e borracha (MADERUELO-SANZ et al., c2011) proporcionam um isolamento acústico

³ KIM, K.; JEONG, G.; YANG, K.; SOHN, J. **Correlation between dynamics stiffness of resilient materials and heavyweight impact sound reduction level**. Building and Environment, v. 44, 2009, p. 1589-1600.

competitivo com as soluções disponível no mercado para atenuação de ruídos de impacto em pisos.

Já o outro segmento de pesquisas buscou avaliar o efeito da incorporação dos resíduos em matrizes cimentícias frente às propriedades de isolamento sonoro de ruídos de impacto. Moreira et al. (2010, tradução nossa) afirmam que a aplicação de camadas leves de compostos de cimento, areia, água e agregados leves em substituição da areia é uma alternativa em relação as atuais soluções de mercado. Parte-se do mesmo princípio do sistema flutuante, onde, neste caso, a camada resultante da mistura dos resíduos com a matriz cimentícia representa a camada resiliente do sistema, visto que a densidade do resíduo tende a proporcionar propriedades leves para a mistura (ZUCHETTO et al., 2015a, tradução nossa).

Pesquisas demonstram que a incorporação de resíduos leves em matrizes cimentícias, como, por exemplo, etileno acetato de vinila (BORGES, 2015, HAX, 2002; SANTOS, F. et al., 2013; ZUCHETTO et al., 2015a), etileno acetato de vinila micronizado (BRANCHER et al., 2016), casca de arroz e serragem de madeira (BORGES, 2015), cortiça expandida (MOREIRA et al., 2010), isolante de fios elétricos (ASDRUBALI et al., 2009), tereftalato de etileno e pneu (CARVALHO, 2009) e fibra de carpete (RUSHFORTH et al., 2005) produziram uma camada resiliente capaz de atenuar ruídos de impacto em pisos e com potencial de se tornar um material alternativo de isolamento acústico.

Conclui-se então que a isolação de ruídos de impacto em prol do conforto acústico pode ser controlada pelo acréscimo na espessura da laje de concreto armado, aliado ao emprego de materiais resilientes com baixa rigidez dinâmica, em busca de uma camada com capacidade de minimizar as vibrações causadas por impactos acidentais e inevitáveis, através do sistema massa-mola. Ressalva-se que para a análise da isolação de ruídos de impacto, consideraram-se apenas os elementos horizontais e houve a desconsideração de técnicas de isolação como: forros falsos e adição de materiais macios acima do revestimento do piso.

4 NORMALIZAÇÃO RELATIVA À ACÚSTICA

Com o intuito de descrever a normalização relativa à acústica, este capítulo tem como foco a apresentação e o detalhamento da normalização brasileira vigente em relação à acústica e a apresentação da normalização internacional referente à caracterização do isolamento sonoro de ruídos de impacto.

4.1 NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA

A fim de padronizar termos e definições aplicados nas normalizações brasileiras relativas à acústica foi elaborada a NBR 16.313 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Essa Norma, ao expor as definições de terminologias acústicas, facilita a interpretação das normas brasileiras de acústica.

A questão do conforto acústico nas edificações é abordada nas normalizações brasileiras através da NBR 10.151/2003 – Acústica – Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas, visando o Conforto da Comunidade – Procedimento, juntamente com a NBR 10.152/1992 – Níveis de Ruído para Conforto Acústico – Procedimento. Essas Normas servem de diretrizes para a Resolução n. 001⁴ do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), responsável por estabelecer “[...] padrões para emissão de ruídos no território brasileiro. Trata-se de uma resolução que visa limitar a emissão de ruídos em decorrência de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, no interesse da saúde e do sossego público.” (BISTAFA, c2011, p. 129).

A NBR 10.151 abrange a questão de ruídos externos a edificação (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013). Tem-se como objetivo da NBR 10.151 a fixação de “[...] condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidade, independente da existência de reclamações.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 1). Para isso, especifica os procedimentos para a medição de ruídos em ambientes externos e internos, possibilitando então uma avaliação

⁴ CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO n. 001**, de 8 de março de 1990. Dispõe sobre critérios de padrões de emissão de ruídos decorrentes de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política. Brasília, 1990.

padronizada dos mesmos. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003), a avaliação consiste na comparação das medições dos níveis de pressão sonora, obtidas na escala de ponderação A, meramente corrigidos com os níveis toleráveis para ambientes externos, considerando duas situações temporais: a diurna e a noturna. A tabela 2 apresenta os valores dos níveis toleráveis pela Norma.

Tabela 2 – Níveis de pressão sonora toleráveis pela NBR 10.151, em dB

Tipos de áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 3)

Já em relação à NBR 10.152, tem-se a abordagem da questão de ruídos internos à edificação (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013). A NBR 10.152 “[...] fixa os níveis de ruído compatíveis com o conforto acústico em ambientes diversos.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992a, p. 1). Para a medição dos ruídos, a NBR 10.152 prevê a utilização dos procedimentos prescritos na NBR 10.151/2003, incluindo a ponderação em A. Considerando que a NBR 10.152 fixa um intervalo de níveis aceitáveis, interpreta-se o valor inferior do intervalo como o nível correspondente ao conforto acústico, já o valor superior representa o maior nível aceitável para o ambiente em análise (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992a).

De forma a atender a NBR 10.152, a NBR 12.179 “[...] fixa os critérios fundamentais para execução de tratamentos acústicos em recintos fechados.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992b, p. 1). Essa Norma parte de condicionantes que devem ser cumpridas nos projetos de tratamento acústico e apresenta informações a respeito das propriedades acústicas de inúmeros materiais, a fim de garantir o isolamento e o condicionamento acústico do recinto em estudo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992b).

Apesar do vigor das Normas NBR 10.151/2003 e NBR 10.152/1992, a Associação Brasileira para a Qualidade Acústica (2013, p. 4) esclarece que o “[...] nosso mercado da construção civil nunca buscou atendê-la com soluções que pudessem alcançar [...] níveis lá estabelecidos.”. Esse panorama se estendeu até a entrada em vigência da NBR 15.575/2013, a Norma de Desempenho, visto que até então as normas acústicas não abordavam a questão de requisitos acústicos para os sistemas construtivos. Dessa forma, “A NBR 15.575 veio definir [...] os níveis de desempenho que os sistemas construtivos devem ter para atenuar a transmissão dos ruídos gerados externa e internamente nas edificações habitacionais.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA, 2013, p. 4).

Em relação à Norma de Desempenho, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção – CBIC (2013, p. 20) declara que:

A norma NBR 15575 foi redigida segundo modelos internacionais de normalização de desempenho. Ou seja, para cada necessidade do usuário e condição de exposição, aparece a sequência de Requisitos de Desempenho, Critérios de Desempenho e respectivos Métodos de Avaliação.

Frente ao abrangente número de sistemas construtivos encontrados na indústria da construção civil, a NBR 15.575/2013 é dividida em um conjunto normativo, composto por seis partes, são elas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013c, p. ix):

- a) parte 1 – requisitos gerais;
- b) parte 2 – requisitos para os sistemas estruturais;
- c) parte 3 – requisitos para os sistemas de pisos;
- d) parte 4 – requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE;
- e) parte 5 – requisitos para os sistemas de coberturas;
- f) parte 6 – requisitos para os sistemas hidrossanitários.

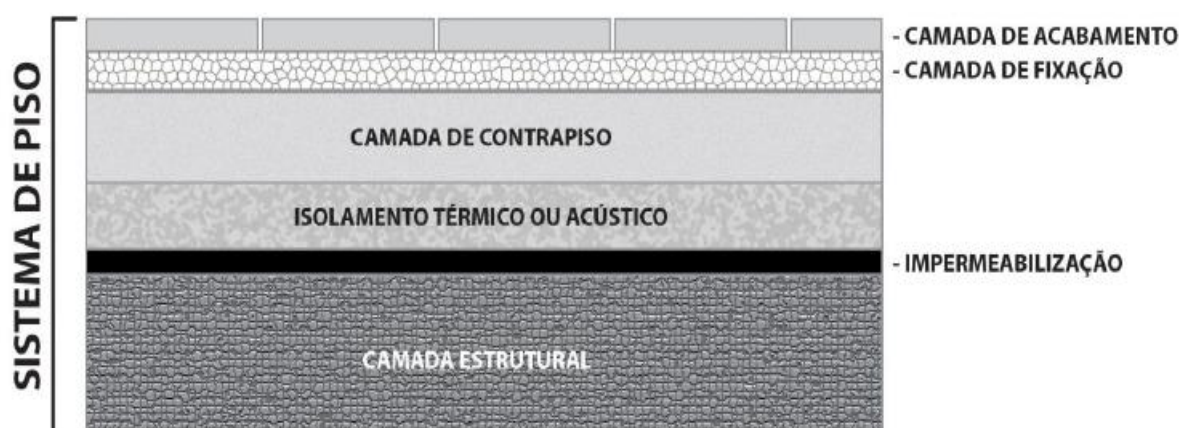
De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2013, p. 20), o desempenho dos sistemas é avaliado de acordo com o cumprimento das:

[...] exigências relativas à segurança (desempenho mecânico, segurança contra incêndio, segurança no uso e operação), habitabilidade (estanqueidade, desempenho térmico e acústico, desempenho lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil) e sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade e adequação ambiental).

O desempenho acústico dos sistemas construtivos é abordado na NBR 15.575 nas partes 1, 3, 4, 5 e 6, sendo que a parte 1 destaca meramente os requisitos gerais sobre desempenho acústico e menciona que as partes 3, 4 e 5 da Norma são destinadas a especificar requisitos, critérios e métodos de avaliação para cada sistema construtivo em questão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013c). Além disso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013b) informa no Anexo E, em caráter não obrigatório, os níveis de desempenho acústico para os ruídos gerados por equipamentos prediais, e menciona que os ruídos dos equipamentos hidrossanitários são tratados na parte 6 da Norma. Em relação à parte 2, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013d) apenas indica que as exigências de desempenho acústico estão condicionadas aos requisitos da parte 1 da Norma.

Já a parte 3 da NBR 15.575 “[...] apresenta os requisitos e critérios para a verificação do isolamento acústico do sistema de piso entre unidades autônomas.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013e, p. 19). Visto que o desempenho acústico do sistema de pisos, exemplificado na figura 6, está diretamente vinculado com a concepção deste trabalho, optou-se por detalhar, em relação a esse sistema, a abordagem normatizada a respeito dos critérios e métodos de avaliação em um item específico logo adiante.

Figura 6 – Exemplo de um sistema de pisos



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013e, p. 4)

Na parte 4 da Norma em questão, é apresentado “[...] os requisitos e critérios para a verificação do isolamento acústico entre os meios externo e o interno, entre unidades autônomas e entre dependências de uma unidade e áreas comuns.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013f, p. 28). Por conseguinte, a parte 5 dessa

Norma “[...] apresenta os requisitos e critérios para a verificação do isolamento acústico entre o meio externo e o interno de coberturas.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013g, p. 27).

Por sua vez, a parte 6 da NBR 15.575 aborda os sistemas hidrossanitários e, aliada a primeira parte da Norma, “[...] estabelece um método de medição dos ruídos gerados por equipamentos prediais. Também apresenta valores de níveis de desempenho de caráter não obrigatório.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013h, p. 15).

Por fim, em relação às simplificações da NBR 15.575/2013 quanto ao desempenho acústico dos sistemas construtivos, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2013, p. 156) constata que:

As ondas sonoras podem reproduzir-se por diferentes meios e há fenômenos acústicos bastante complexos que interferem no desempenho dos elementos e dos recintos, como difração, ressonância, reverberação e absorção. Tais fenômenos não são tratados individualmente na NBR 15575, recaindo o interesse na propagação dos sons aéreos e dos ruídos de impacto transmitidos por corpos sólidos, como no caso dos entrepisos.

4.1.1 Desempenho Acústico para o Sistema de Pisos segundo a NBR 15.575/2013

Esse item tem por intuito apresentar os métodos de avaliação e os critérios estabelecidos na NBR 15.575/2013 pertinentes ao desempenho acústico do sistema de pisos, além de destacar um breve comentário em relação à respectiva Norma.

4.1.1.1 Métodos de Avaliação

A metodologia aplicada para avaliar o desempenho acústico do sistema de pisos quanto ao isolamento de ruídos aéreos e ruídos de impactos consiste em medições acústicas por dois métodos de campo especificados em normas internacionais, são eles: engenharia e controle (simplificado) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA, 2013). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013e, p. 20) adverte o leitor que “Entre os métodos de medição de campo, o método de engenharia é o mais preciso.”.

Apesar de ambos os métodos de campo apresentarem procedimentos de medição idênticos, a advertência dada pela NBR 15.575 é justificada a partir da constatação que o método

simplificado é caracterizado por apresentar uma situação em que não é possível a determinação do tempo de reverberação do recinto, resultando apenas uma estimativa do isolamento do ruído aéreo ou de impacto, visto a desconsideração de correções nas medições realizadas, frente às condições acústicas do recinto receptor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013e).

Os métodos de campo descritos na NBR 15.575/2013 para a medição do isolamento de ruídos aéreos em sistema de pisos são os seguintes (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013):

- a) método de engenharia, descrito na ISO 140-4⁵;
- b) método simplificado, descrito na ISO 10052⁶.

O procedimento de ambos os métodos consiste na emissão de ruído por parte de uma fonte sonora omnidirecional, sendo que a medição do nível de pressão sonora deve ser realizada tanto no recinto emissor quanto no recinto receptor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA, 2013). De acordo com a mesma associação, a resultante da diferença entre os níveis medidos, considerando as correções para as condições acústicas do recinto receptor, é denominada de diferença de nível padronizada, cuja conversão baseada na ISO 717-1⁷ retorna um número padrão, obtendo então a diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$). A avaliação final do desempenho quanto ao isolamento de ruídos aéreos do sistema é dada pela comparação da diferença padronizada ponderada com os níveis de desempenho descritos na NBR 15.575/2013.

Por sua vez, os métodos de campo descritos na NBR 15.575/2013 para a medição do isolamento de ruídos de impacto em sistema de pisos estão listados abaixo (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013):

⁵ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140-4**: acoustics – measurement of sound insulation in buildings and of building elements – part 4: field measurements of airborne sound insulation between rooms. Geneva, 1998.

⁶ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10052**: acoustics – field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound – survey method. Geneva, 2004.

⁷ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 717-1**: acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – part 1: airborne sound insulation. Geneva, 2013.

- a) método de engenharia, descrito na ISO 140-7⁸;
- b) método simplificado, descrito na ISO 10052⁹.

A metodologia de ambos os métodos é baseada na emissão de ruído de impacto por parte de uma fonte sonora de impacto padronizada em um recinto emissor, já a medição do ruído deve ser realizada apenas no recinto receptor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA, 2013). Conforme a mesma associação, o nível de pressão sonora registrado deve ser corrigido de acordo com as condições acústicas do recinto receptor, resultando no nível de pressão sonora de impacto-padrão, cuja conversão baseada na ISO 717-2¹⁰ retorna um número padrão, obtendo então o nível de pressão sonora de impacto-padrão ponderado ($L'_{nT,w}$). Da mesma maneira, a avaliação do desempenho acústico relacionado com o isolamento de ruído de impacto do sistema é feita pela comparação do nível de pressão sonora de impacto-padrão ponderado com os níveis de desempenho descritos na NBR 15.575/2013.

A fim de tornar visual a abordagem da NBR 15.575 a respeito dos métodos de avaliação do isolamento de ruídos aéreos e ruídos de impacto, os quadros 1 e 2 apresentam, respectivamente, o resumo da vinculação do isolamento acústico de ambos os ruídos com o parâmetro e a descrição do mesmo, juntamente com a associação dos métodos de campo com as correspondentes normalizações internacionais.

Quadro 1 – Métodos de avaliação do isolamento acústico de ruídos aéreos da NBR 15.575/2013

Parâmetro	Descrição do Parâmetro	Método de Campo	Norma
DnT,w	Diferença padronizada de nível ponderada	Engenharia	ISO-140-4 ISO-717-1
		Simplificado	ISO-10052 ISO-717-1

(fonte: elaborada pelo autor)

⁸ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140-7**: acoustics – measurement of sound insulation in buildings and of building elements – part 7: field measurements of impact sound insulation of floors. Geneva, 1998.

⁹ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10052**: acoustics – field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound – survey method. Geneva, 2004.

¹⁰ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 717-2**: acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – part 2: impact sound insulation. Geneva, 2013.

Quadro 2 – Métodos de avaliação do isolamento acústico de ruídos de impacto da NBR 15.575/2013

Parâmetro	Descrição do Parâmetro	Método de Campo	Norma
L'nT,w	Nível de pressão sonora de impacto-padrão ponderado	Engenharia	ISO-140-7 ISO-717-2
		Simplificado	ISO-10052 ISO-717-2

(fonte: elaborada pelo autor)

4.1.1.2 Critérios

Os critérios estabelecidos pela NBR 15.575/2013 têm por objetivo a definição de níveis mínimos obrigatórios para atender um determinado requisito (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA, 2013). A Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2013, p. 21) reitera essa afirmação e acrescenta:

Para todos os critérios incluídos na norma NBR 15575, foi estabelecido um patamar mínimo (**M**) de desempenho, que deve ser obrigatoriamente atingido pelo diferentes elementos e sistemas da construção. Para alguns critérios são indicados outros dois níveis de desempenho, intermediário (**I**) e superior (**S**), sem caráter obrigatório [...]

Os requisitos mínimos de desempenho são estabelecidos para atender as exigências de segurança, habitabilidade e sustentabilidade das habitações. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013e), ao indicar a possibilidade de melhoria da qualidade da edificação, recomenda a informação do nível de desempenho atendido quando um determinado sistema da edificação exceder o nível mínimo descrito em Norma.

A NBR 15.575 estabelece os níveis de desempenho mínimo, intermediário e superior para o isolamento acústico de ruídos aéreos e ruídos de impacto. Para os ruídos aéreos, sabe-se que a relação de dependência entre a diferença padronizada de nível ponderada (D_nT,w) e a capacidade de isolamento do sistema de pisos é direta, já para os ruído de impacto, a relação de dependência entre o nível de pressão sonora de impacto-padrão ponderado ($L'nT,w$) e o isolamento acústico é inversa. Partindo disso, as tabelas 3 e 4 apresentam os critérios de desempenho acústico de ruídos aéreos e ruídos de impacto, respectivamente, em função do uso e localização do sistema de piso.

Tabela 3 – Critérios de desempenho acústico de ruídos aéreos da NBR 15.575

Elemento	DnT,w dB	Nível de desempenho
Sistema de piso entre unidades habitacionais autônomas, no caso de pelo menos um dos ambientes ser dormitório	45 a 49	M
	50 a 54	I
	≥ 55	S
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadarias nos pavimentos, bem como em pavimentos distintos Sistema de piso entre unidades habitacionais autônomas, nas situações onde não haja ambiente dormitório	40 a 44	M
	45 a 49	I
	≥ 50	S
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de uso coletivo, para atividades de lazer e esportivas, tais como <i>home theater</i> , salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas	45 a 49	M
	50 a 54	I
	≥ 55	S

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013e, p. 41)

Tabela 4 – Critérios de desempenho acústico de ruídos de impacto da NBR 15.575

Elemento	L'nT,w dB	Nível de desempenho
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos	66 a 80	M
	56 a 65	I
	≤ 55	S
Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como <i>home theater</i> , salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas	51 a 55	M
	46 a 50	I
	≤ 45	S

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013e, p. 40)

4.1.1.3 Comentários

Em relação ao atendimento dos níveis de desempenho para o isolamento acústico de ruídos aéreos, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2013, p. 166) cita uma tendência que:

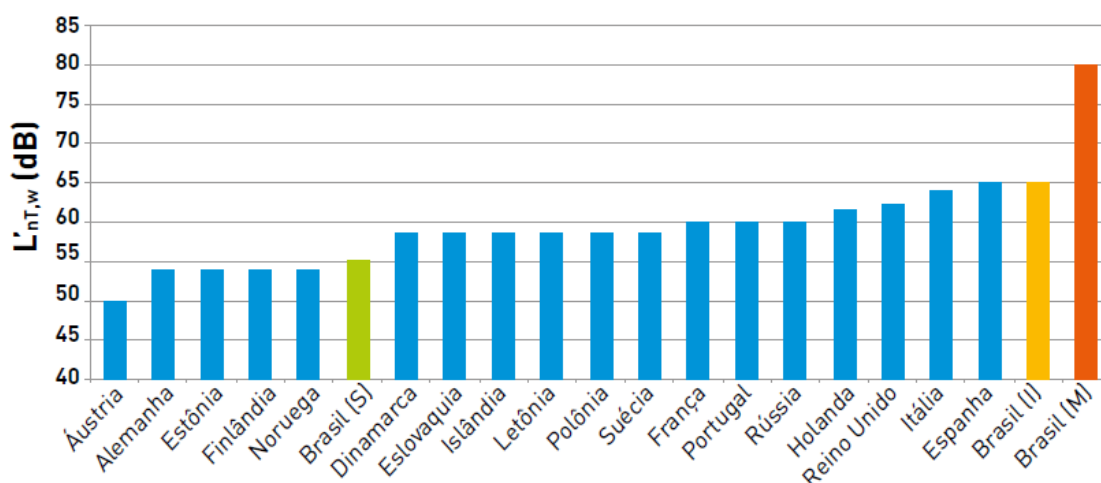
Para lajes de concreto armado com espessura de 10cm em osso, a isolamento acústica corresponde a cerca de 45dB [Nível Mínimo]. O Nível Superior de desempenho (diferença padronizada de nível ponderada) começa a ser atendido para lajes com espessura de 15cm, não se considerando em nenhum dos casos (10 ou 15cm) elementos que colaboram para a atenuação acústica, como forros suspensos, revestimentos de piso, tapetes e outros.

Já para o cumprimento dos níveis de desempenho para o isolamento acústico de ruídos de impacto, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2013, p. 168) menciona que “O limiar do atendimento ao Nível Mínimo [...] corresponde a lajes de concreto armado com

espessura de 10 ou 12 cm, não repercutindo em melhoria muito significativa o acréscimo de espessuras a partir de 12 cm.”. No entanto, a Associação Brasileira para a Qualidade Acústica (2015, p. 23) ressalva que “Mesmo soluções típicas, como uma laje maciça e contrapiso comum, podem não atender ao critério dependendo do projeto.”.

A Associação Brasileira para a Qualidade Acústica (2015) compara o nível de desempenho mínimo de ruídos de impacto da NBR 15.575/2013 com os níveis toleráveis em outros países, de acordo com a figura 7, e menciona que a disparidade elevada entre os valores pressupõe em uma passível redução no limite em futuras revisões da Norma brasileira. Relembrando que níveis de desempenho mais elevados de ruídos de impacto representam ruídos com maiores níveis de pressão sonora (dB), implicando em um pior desempenho de isolamento acústico.

Figura 7 – Comparativo dos níveis de desempenho de ruídos de impacto entre diferentes países



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA, 2015, p. 23)

Considerando o atendimento do nível de desempenho intermediário, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2013, p. 168) indica que “[...] pode-se tentar recorrer a concretos leves, forros acústicos, forros suspensos (com ligações elásticas na laje de teto), etc.”. Além disso, o cumprimento do respectivo nível “Pode ser obtido com a utilização de contrapisos flutuantes sobre lajes de concreto com materiais acústicos de desempenho médio, ou com soluções especiais de revestimento a serem indicados por especialistas.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA, 2015, p. 23).

Finalmente, para o cumprimento do nível superior da Norma é imprescindível o emprego do sistema de piso flutuante através da utilização de mantas de desempenho adequado e comprovado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA, 2015). A Associação Brasileira para a Qualidade Acústica (2015, p. 47) adverte que “Não é recomendada a aplicação de qualquer tipo de material resiliente sob o contrapiso. É necessário que haja alguma comprovação idônea de ensaio normalizado do material a ser aplicado.”

É importante alertar que as citações presentes neste respectivo item são apenas recomendações. Partindo disso, “Para a avaliação acústica dos sistemas construtivos, os critérios de desempenho devem ser verificados com a realização de ensaios de campo.” (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013, p. 157). De forma conclusiva, os autores NUNES et al. (2014, p. 18) apontam que:

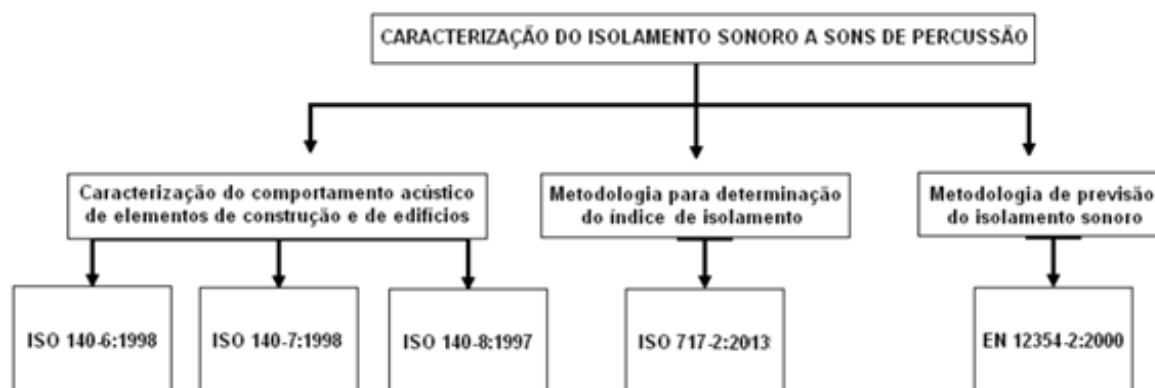
Sistemas de piso são compostos por um conjunto de camadas que se destinam a atender diversas funções como, por exemplo, estruturais, de vedação, de segurança ao tráfego e de isolamento acústico; sendo que, os materiais que compõem essas camadas apresentam características diversificadas, com inúmeras possibilidades de combinações. São essas combinações, juntamente com a execução, que irão definir sua qualidade frente ao isolamento acústico.

4.2 NORMALIZAÇÃO INTERNACIONAL

Em relação à normalização internacional relativa à acústica, serão apresentadas apenas as normas referentes à caracterização do isolamento acústico ao ruído de impacto.

A normalização aplicada para caracterizar o isolamento acústico de sistemas ou produtos, no que se refere ao controle de ruídos de impacto, pode ser dividida “[...] segundo três áreas distintas de intervenção: a caracterização do comportamento acústico de elementos de construção e edifícios; a metodologia para determinação do índice de isolamento e a metodologia de previsão de isolamento sonoro.” (SOUSA, 2008, p. 45). A figura 8 ilustra de forma esquemática as áreas de intervenção e as respectivas normas.

Figura 8 – Áreas de intervenção das normas relativas à caracterização do isolamento acústico de ruídos de impacto



(fonte: adaptado de SOUSA, 2008, p. 45)

Para a caracterização do comportamento acústico de elementos de construção e de edifícios, Sousa (2008, p. 45) cita que “[...] os ensaios definidos pelas normas podem ocorrer em laboratório ou ‘in situ’, existindo para cada tipo uma norma específica, vindo os resultados das medições expressos em curvas de frequência através de bandas de uma ou de um terço de oitava.”.

Os métodos para a realização de ensaios de medição do nível de pressão sonora em laboratório e em campo são descritos, respectivamente, pela ISO 140-6¹¹ e pela ISO 140-7¹². Além dessas Normas, Sousa (2008, p. 46) menciona que:

Uma outra norma frequentemente utilizada no que respeita à caracterização do comportamento acústico a sons de percussão é a ISO 140-8:1997¹³, a qual regula as condições de medição em laboratório da redução de transmissão sonora fornecida pelos revestimentos de piso em pavimento e no caso de lajes flutuantes, permitindo, desta forma, conhecer não só o isolamento provido pelos elementos construtivos como também pelos diferentes revestimentos e camadas resilientes utilizadas.

Como já citado anteriormente, os níveis de pressão sonora medidos nos ensaios destinados para a caracterização do isolamento acústico de sistemas e produtos quanto ao ruído de

¹¹ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140-6**: acoustics – measurement of sound insulation in buildings and of building elements – part 6: laboratory measurements of impact sound insulation of floors. Geneva, 1998.

¹² INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140-7**: acoustics – measurement of sound insulation in buildings and of building elements – part 7: field measurements of impact sound insulation of floors. Geneva, 1998.

¹³ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140-8**: acoustics – measurement of sound insulation in buildings and of building elements – part 8: laboratory measurements of the reduction of transmitted impact noise by floor covering on a heavyweight standard floor. Geneva, 1997.

impacto devem ser convertidos em um número padrão (índice), cuja conversão é descrita pela a ISO 717-2¹⁴. Simplificadamente, “Esta [Norma] permite uniformizar a medição do isolamento sonoro a sons de percussão de edifícios e de elementos de construção.” (SOUSA, 2008, p. 46).

Por fim, a Norma EN 12.354-2/2000 permite estimar o desempenho de isolamento acústico ao ruído impacto em edifícios através de modelos de cálculo baseados em dados de medição e em métodos teóricos fundamentados na propagação do som em elementos estruturais (EUROPEAN COMMITE FOR STANDARDIZATION, 2000, tradução nossa). Com isso, é possível estimar o isolamento acústico “[...] a partir das propriedades dos diferentes elementos e sistemas construtivos envolvidos, suas uniões e geometrias, avaliando as diferentes vias de transmissão.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA, 2015, p. 21).

Além de métodos detalhados de cálculo que exigem mais informações a respeito das propriedades e características dos elementos e sistemas construtivos envolvidos, a EN 12.354-2/2000 menciona que é possível estimar preliminarmente a redução do nível de sonora por banda de frequência para ruídos de impacto em pisos flutuantes, por meio da equação 3 (EUROPEAN COMMITE FOR STANDARDIZATION, 2000, tradução nossa).

$$\Delta L = 30 \times \log (f/f_0) \quad (\text{equação 3})$$

Sendo:

ΔL = redução do nível de pressão sonora para ruídos de impacto (dB);

f = frequência central na banda de oitava ou um terço de oitava (Hz);

f_0 = frequência de ressonância do sistema (Hz).

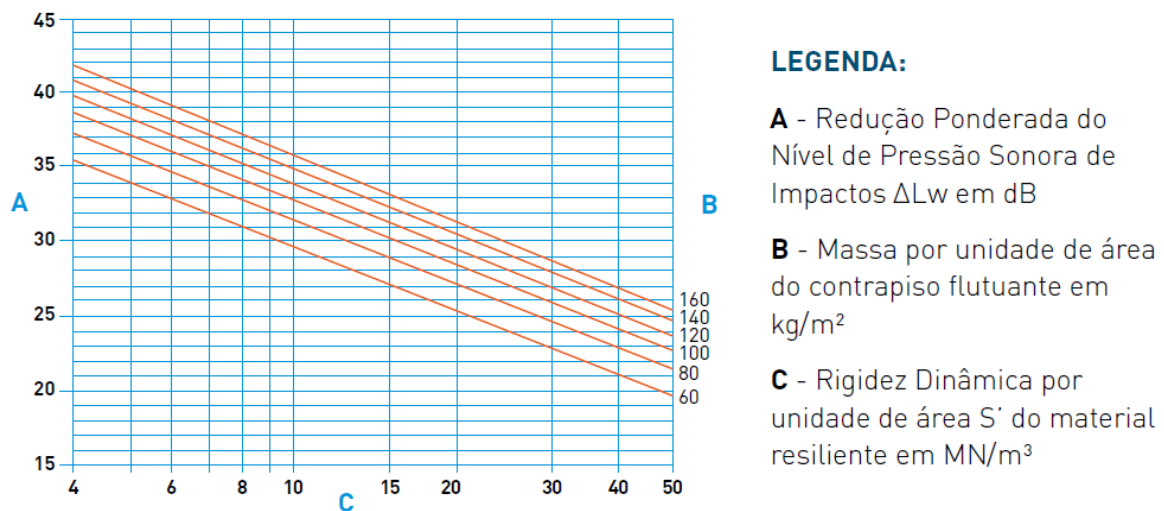
A partir da equação 3 é possível avaliar o comportamento de isolamento acústico ao ruído de impacto do sistema de piso flutuante para um intervalo de frequências centrais. No entanto, para estimar qual a redução do nível pressão sonora por frequência central, torna-se

¹⁴ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 717-2**: acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – part 2: impact sound insulation. Geneva, 2013.

necessário determinar a frequência de ressonância da camada resiliente do sistema de piso flutuante, através da já descrita ISO 9.052-1/1989.

Além disso, segundo a Associação Brasileira para a Qualidade Acústica (2015, p. 16), “É possível estimar a Redução Sonora de um material conhecendo a sua Rigidez Dinâmica aparente e a respectiva carga de contrapiso flutuante (kg/m^2) que será aplicada sobre o material acústico.”. A Norma EN 12.354-2/2000 permite estimar a redução do nível de pressão sonora para ruídos de impacto em pisos flutuantes feitos de areia e cimento, a partir da figura 9.

Figura 9 – Estimativa de cálculo para redução sonora



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA, 2015, p. 17)

Tendo como base as retas previstas na figura 9, Zucheto et al. (2015a, p. 3, tradução nossa) apresentam uma equação que permite estimar diretamente a redução sonora para ruído de impacto em pisos flutuantes, de acordo com a equação 4.

$$\Delta L_w = 18 + 15 \times \log (m'/s') \quad (\text{equação 4})$$

Sendo:

ΔL_w = redução ponderada do nível do nível de pressão sonora para ruído de impacto (dB);

m' = massa por unidade de área do piso flutuante (kg/m^2);

s' = rigidez dinâmica por unidade de área da camada resiliente (MN/m^3).

Novamente, como mencionado logo acima, para estimar qual a redução do nível pressão sonora para ruído de impacto a partir da equação 4, torna-se necessário determinar qual a rigidez dinâmica, através da já mencionado ISO 9.052-1/1989, além de estipular a massa por unidade de área do piso flutuante que será aplicado sobre a camada resiliente do sistema.

Conclui-se então que além dos métodos para a realização de ensaios de medição do nível de pressão sonora de produtos e sistemas construtivos ao ruído de impacto, é possível estimar o desempenho de isolamento acústico em edifícios através de modelos de cálculo. Todavia, reitera-se a importância da avaliação acústica dos sistemas propostos através de ensaios de campo, visto que “[...] ensaios de laboratório em componentes, elementos e sistemas construtivos, [indicam] valores de referência que poderão se traduzir no potencial atendimento das implantações reais.” (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013, p. 157).

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrito o programa experimental deste trabalho, através da apresentação da metodologia de pesquisa e da caracterização dos materiais utilizados, além da descrição detalhada dos ensaios executados. A maior parte dos ensaios foi realizada no LAMTAC/NORIE/UFRGS, além de ensaios realizados em parcerias com o it FUSE/UNISINOS e it Performance/UNISINOS.

5.1 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa, proposta neste trabalho para o desenvolvimento de argamassas secas de contrapiso, tipo “farofa”, com propriedades que permitam atenuar ruídos de impacto através da incorporação de agregados leves, foi desenvolvida com base na pesquisa de Zuchetto et al. (2015a) e Borges (2015), as quais estudaram a incorporação de resíduos de etileno acetato de vinil (BORGES, 2015; ZUCHETTO et al., 2015a), além da casca de arroz e da serragem de madeira (BORGES, 2015) em matrizes cimentícias e avaliaram o desempenho acústico dos contrapisos moldados com base nas propriedades dinâmicas do material.

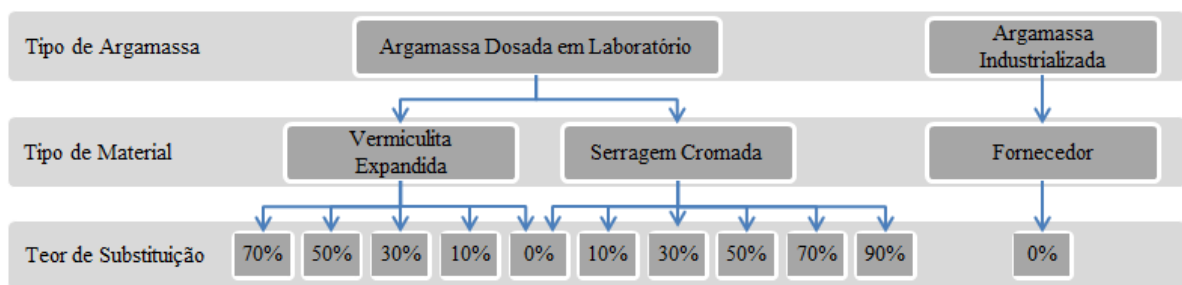
Por motivos de possibilitar o comparativo entre as propriedades dinâmicas, optou-se por incorporar na pesquisa, além das argamassas dosadas em laboratório, uma argamassa industrializada de contrapiso com propriedades de isolamento acústico ao ruído de impacto. Para as argamassas dosadas em laboratório, houve a incorporação separadamente de dois tipos de materiais leves na matriz cimentícia, são eles: a vermiculita expandida e a serragem cromada. Adotaram-se os seguintes teores de substituição do agregado miúdo natural pela vermiculita expandida: 0%, 10%, 30%, 50%, 70%. Já para a serragem cromada, os teores adotados foram os seguintes: 0%, 10%, 30%, 50%, 70%, 90%. As substituições foram calculadas em volume, utilizando sempre a massa unitária dos materiais como base para o cálculo. Ressalva-se que teores maiores de substituição foram testados para ambos os agregados leves, mas foram desconsiderados por estarem desconformes com a exigência de

que “O revestimento endurecido não pode desagregar-se pela pressão das mãos [...]” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b, p. 8).

A referência das argamassas dosadas em laboratório para contrapiso é representada pelo teor de substituição de 0% (constituído apenas de agregado miúdo natural) e o traço utilizado nesta pesquisa está apresentado de forma detalhada no item relativo à produção das argamassas de contrapiso. A divisão do teor de substituição de 0% de acordo com o tipo de material foi necessária para facilitar a apresentação, a discussão e o tratamento estatístico dos dados. No entanto, ambas representam a argamassa de referência deste trabalho.

Partindo das definições anteriores, foi elaborada a matriz experimental empregada durante a toda a pesquisa. A matriz experimental, apresentada na figura 10, identifica as variáveis do estudo e suas respectivas combinações.

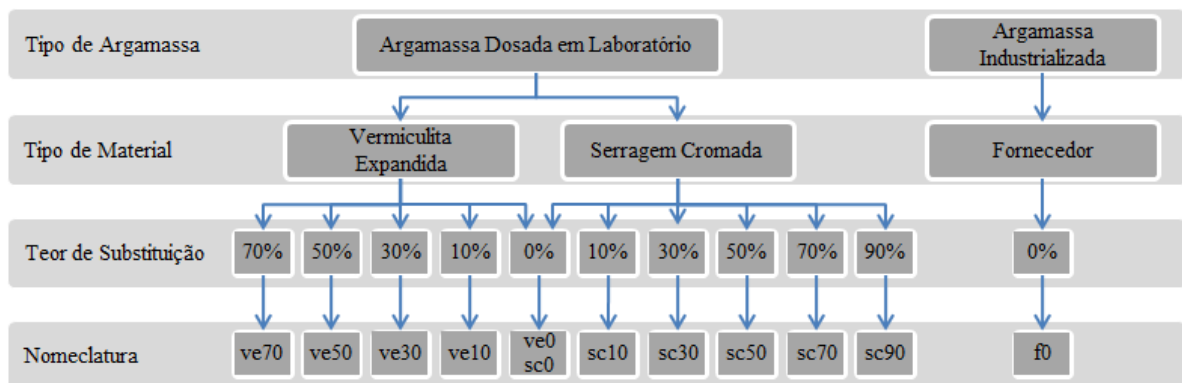
Figura 10 – Matriz experimental do estudo



(fonte: elaborado pelo autor)

Para facilitar a apresentação e interpretação dos dados da pesquisa, adotou-se a nomenclatura apresentada na figura 11.

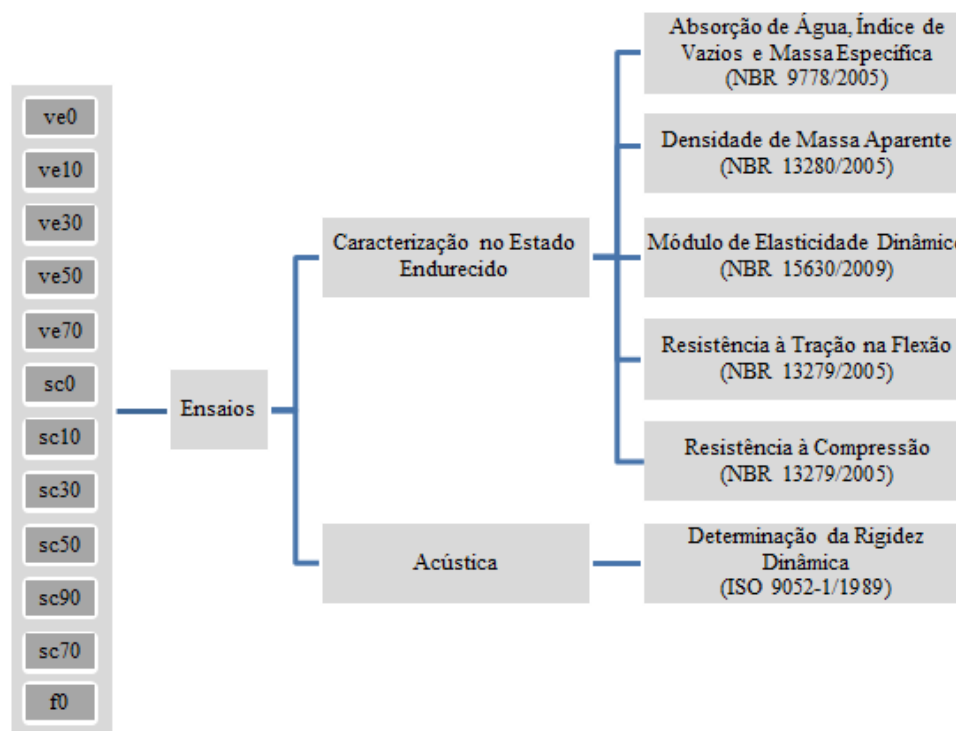
Figura 11 – Nomenclatura adotada no estudo



(fonte: elaborado pelo autor)

De forma a facilitar o entendimento do programa experimental, a figura 12 demonstra de forma esquemática a relação entre os tipos de argamassas utilizadas, de acordo com a nomenclatura da figura 11, com os ensaios realizados neste estudo, destacando as respectivas normas adotadas.

Figura 12 – Esquema dos ensaios realizados no estudo



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir estão especificados todos os materiais utilizados na realização desta pesquisa, juntamente com os ensaios de caracterização dos mesmos.

5.2.1 Cimento

O cimento utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa foi o cimento Portland pozolânico (CP IV), com resistência à compressão aos 28 dias maior ou igual a 32 MPa. O cimento ensacado foi adquirido de um único lote, a fim de evitar a variabilidade do aglomerante. A massa específica do cimento foi determinada em laboratório de acordo com a NBR NM 23 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001), resultando em um valor

de 2,69 g/cm³. Além disso, estimou-se a massa unitária do cimento com base na NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), obtendo o valor de 0,77 g/cm³. Já as características físicas, mecânicas e químicas do cimento foram obtidas diretamente com o fabricante e estão apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização física, química e mecânica do cimento

Cimento CPIV - 32				
Exigências	Ensaio		Resultados	Exigências da NBR 5.736/1999
Físicas e Mecânicas	Finura	# 200 (%)	0,20	≤ 8,00
		# 325 (%)	2,20	-
		Blaine (cm ² /g)	4570,00	-
	Tempo de Pega	Início da Pega (Min)	390	≥ 60
		Fim da Pega (Min)	495	≤ 720
	Resistência à Compressão	03 Dias (MPa)	15,70	≥ 10,00
		07 Dias (MPa)	20,70	≥ 20,00
28 Dias (MPa)		35,10	≥ 32,00	
Químicas	Resíduo Insolúvel (%)		41,00	-
	Perda ao Fogo (%)		2,47	≤ 4,50
	Teor MgO (%)		5,21	≤ 6,50
	Teor SO ₃ (%)		1,61	≤ 4,00

(fonte: FABRICANTE, 2015)

5.2.2 Agregados

Os agregados empregados nesta pesquisa podem ser divididos em agregado miúdo natural e agregados leves. Estes agregados são especificados nos itens a seguir.

5.2.2.1 Agregado Miúdo Natural

O agregado miúdo utilizado neste trabalho é uma areia de origem quartosa natural, proveniente do Rio Jacuí, na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS. O agregado ensacado foi adquirido de um único lote, com o intuito de evitar a variabilidade do agregado miúdo natural. Todo o material foi previamente seco em estufa até constância de massas e, posteriormente, foi armazenado em recipientes plásticos para evitar o umedecimento do mesmo.

Para a realização dos ensaios de caracterização da areia, submeteu-se o material ao processo de quarteamo a fim de se obter amostras representativas. Os resultados dos ensaios de

caracterização estão devidamente indicados na tabela 6, juntamente com as normas que prescrevem o procedimento dos mesmos.

Tabela 6 – Caracterização física da areia natural

Agregado Miúdo - Areia Natural		
Composição Granulométrica - NBR NM 248/2003		
Peneira com abertura de malha (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	0	0
2,36	6	6
1,18	18	24
0,60	23	47
0,30	35	82
0,15	17	99
Fundo	1	100
Dimensão Máxima (mm) - NBR NM 248/2003		4,75
Módulo de Finura - NBR NM 248/2003		2,58
Massa Unitária (g/cm ³) - NBR NM 45/2006		1,55
Massa Específica (g/cm ³) - NBR 52/2009		2,64

(fonte: elaborado pelo autor)

Considerando a classificação dos agregados em função do módulo de finura, apresentada na tabela 7, é possível classificar a areia natural utilizada no trabalho como areia média, estando de acordo com a descrição de Barros (1994, p. 51) de que os agregados mais comumente empregados em contrapiso “[...] são as areias de rio ou quartzosas, de granulometria média [...]”.

Tabela 7 – Classificação da areia em função do módulo de finura

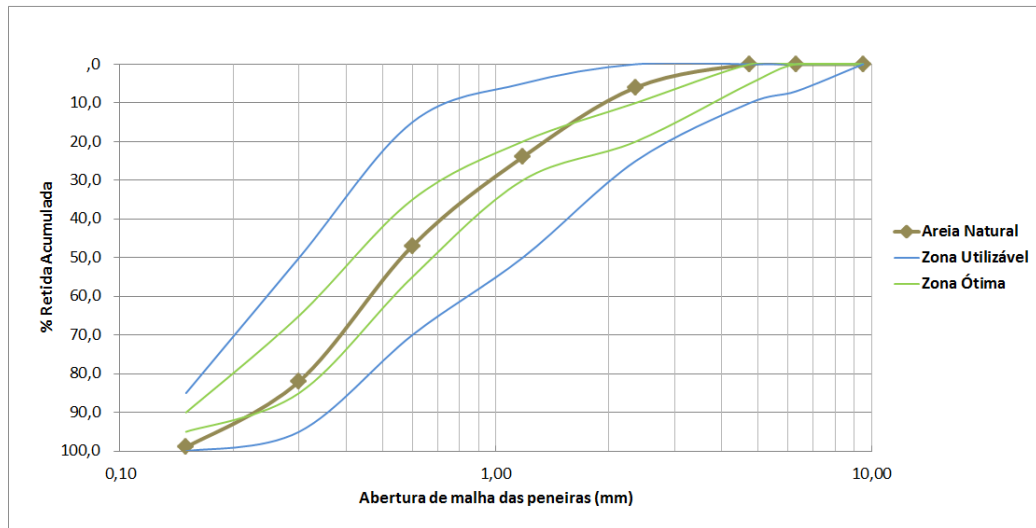
Módulo de Finura (MF)	Classificação da Areia
MF < 2,0	Areia Fina
2,0 < MF < 3,0	Areia Média
MF > 3,0	Areia Grossa

(fonte: BAUER, 2005, p. 21)

A NBR 7.211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a) especifica limites de composição granulométrica que agregados miúdos devem respeitar para serem utilizados em concreto. Apenas de forma comparativa, os limites foram plotados na curva granulométrica da areia natural utilizada nesta pesquisa, obtida conforme a NBR NM 248

(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). É possível verificar através da curva granulométrica apresentada na figura 13 que a areia respeita os intervalos definidos para ser utilizada na composição de concretos.

Figura 13 – Curva granulométrica da areia natural



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.2.2 Agregados Leves

Apenas como forma de conceituação, apresenta-se a citação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013a, p. 1) de que os agregados leves “[...] são compostos predominantemente de material inorgânico leve, celular e granulado.”. Além disso, para agregados leves com graduação entre 0 a 4,75 mm a massa específica aparente (massa unitária) deve ser menor do que 1,12 g/cm³, tendo em vista o emprego em concreto isolante térmico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a) e concreto estrutural (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008). Mehta e Monteiro (2008) indicam que materiais com massa unitária abaixo de 1,12 g/cm³ são definidos como agregados leves. Por último, a autora Barros (1994) afirma que é possível empregar materiais leves, como a argila expandida e vermiculita, em argamassas de contrapisos.

Foram utilizados dois agregados leves nesta pesquisa, sendo um deles a vermiculita expandida e o outro um resíduo gerado no processamento do couro conhecido como serragem cromada.

5.2.2.2.1 Vermiculita Expandida

Neste item, é apresentada a contextualização da vermiculita expandida empregada neste estudo, além dos ensaios de caracterização realizados e seus respectivos resultados.

5.2.2.2.1.1 Contextualização da Vermiculita Expandida

A vermiculita em seu estado natural é um mineral hidratado pertencente ao grupo das micas e composto de silicato de alumínio, magnésio e ferro (CARVALHAES, c2016). Segundo Ugarte et al. (2008, p. 868), “Os minerais comumente associados a vermiculita são: a biotita, hidrobiotita, piroxenita, apatita, anfíbólio, sienito, serpentinito, flogopita, diopsídio, clorita, amianto, talco e minerais argilosos.”.

Em relação às características da vermiculita pura, os autores Ugarte et al. (2008, p. 867) citam que:

Suas características físicas são as mesmas das micas, no que se refere à clivagem típica, separando-se em finas lamelas flexíveis, porém sem elasticidade. Suas cores variam do bronze ao amarelo-amarronzado, com brilho perolado típico. A dureza do mineral pode variar de 2,1 a 2,8, na escala Mohs, com massa específica de 2,5 g/cm³.

De acordo com os dados de 2014, Carvalhaes (c2016, p. 116) afirma que “O Brasil detém a 10% das reservas mundiais de vermiculita, ocupando a terceira posição no cenário mundial.”. A principal reserva nacional está situada no estado de Goiás, que corresponde a 66,7% do total, seguido do estado da Paraíba (19,1%), Bahia (13,3%), Piauí (0,9%) e Pernambuco (0,05%) (CARVALHAES, c2016).

Considerando à produção de vermiculita no cenário mundial, o Brasil ocupa a terceira posição com 13,9% da produção mundial, sendo superado apenas pela África do Sul (32%) e pelos Estados Unidos da América (13,9%) (CARVALHAES, c2016). No território brasileiro, além de deter as maiores reservas brasileiras de vermiculita, o estado de Goiás também é o maior produtor do minério beneficiado no Brasil. Carvalhaes (c2016, p. 116) destaca que “No ano de 2014, os Estados de Goiás (92,1%), Pernambuco (5,7%), Paraíba (2%) e Bahia (0,2%) foram responsáveis pela produção de 56.444 toneladas de vermiculita beneficiada.”.

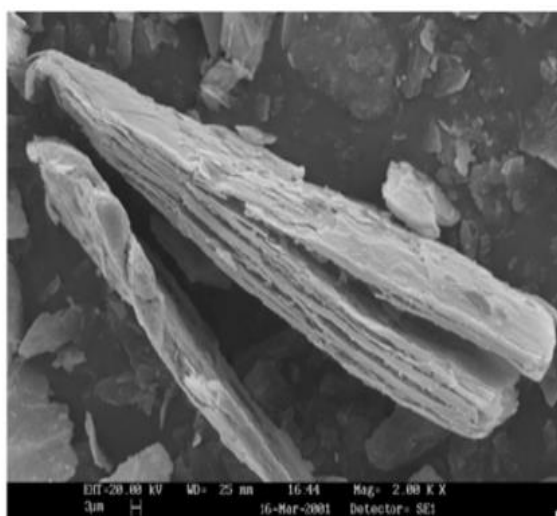
Para Ugarte et al. (2008, p. 865) a valorização econômica da vermiculita está justamente:

[...] na camada de moléculas de água que intercala as camadas de alumínio e silício na estrutura do mineral, a qual responde pelo seu elevado índice de expansão. Essas

moléculas de água, quando aquecidas de forma rápida, a temperaturas elevadas, transformam-se em correntes de ar quente e causam aumento no volume do mineral. Esse processo, chamado de expansão térmica, confere ao produto final múltiplas aplicações industriais. Na forma expandida, a vermiculita é quimicamente ativa, biologicamente inerte, além de possuir baixa densidade.

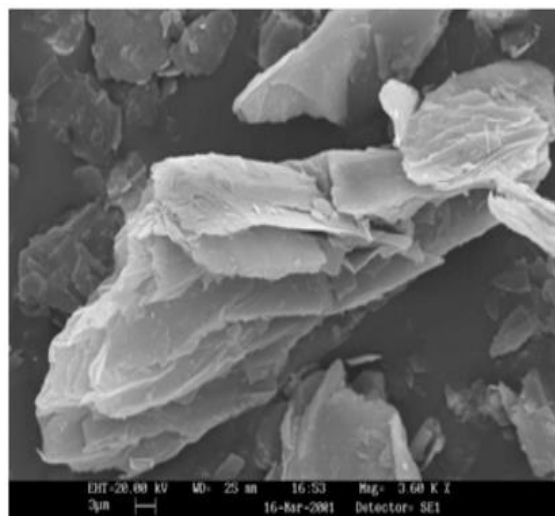
Ugarte et al. (2008, p. 878) complementam que “Esse processo confere aos produtos resistência ao fogo, propriedades isolantes térmicas e acústicas, adesão, resistência à formação de rachaduras e enrugamentos, esterilidade e também elevada absorção de líquidos, devido à sua porosidade também elevada.”. O material resultante do processo de expansão por choque térmico sobre a vermiculita natural recebe a denominação de vermiculita expandida (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Nas figuras 14 e 15 estão apresentados os aspectos da vermiculita no estado natural e a vermiculita expandida, respectivamente, através de um microscópio eletrônico de varredura.

Figura 14 – Aspecto da vermiculita natural –
microscopia eletrônica de varredura –
ampliação de 2000x



(fonte: FRANÇA; LUZ, 2002, p. 551)

Figura 15 – Aspecto da vermiculita expandida –
microscopia eletrônica de varredura –
ampliação de 2000x



(fonte: FRANÇA; LUZ, 2002, p. 551)

Motivado por estas propriedades particulares, a vermiculita expandida está acondicionada tanto para a utilização como “[...] isolante térmico, condicionador acústico ou agregado na construção civil [...]” (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 1992a) quanto para a utilização na “[...] agricultura, como condicionar de solos, veículo para nutrientes, inseticidas, entre outros [...]” (INSTITUTO

NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 1992b).

Por fim, Cintra et al. (2014, p. 70) acrescentam que:

Devido às suas características químicas, mineralógicas e micro-estruturais, é bastante disseminado o uso de vermiculita expandida em argamassas leves, uma vez que confere propriedades interessantes tais como: diminuição de peso estrutural, ausência de toxidez, incombustibilidade, capacidade de absorção de líquidos e isolamento térmico e acústico.

5.2.2.2.1.2 Caracterização da Vermiculita Expandida

A vermiculita expandida utilizada nesta pesquisa foi adquirida ensacada e de um único lote, para evitar a variabilidade do minério. O agregado foi seco em estufa até que toda a umidade intrínseca fosse evaporada e em seguida o material foi armazenado em sacos plásticos devidamente lacrados até o dia da moldagem. A figura 16 demonstra o aspecto visual da vermiculita expandida empregada neste estudo.

Figura 16 – Aspecto visual da vermiculita expandida



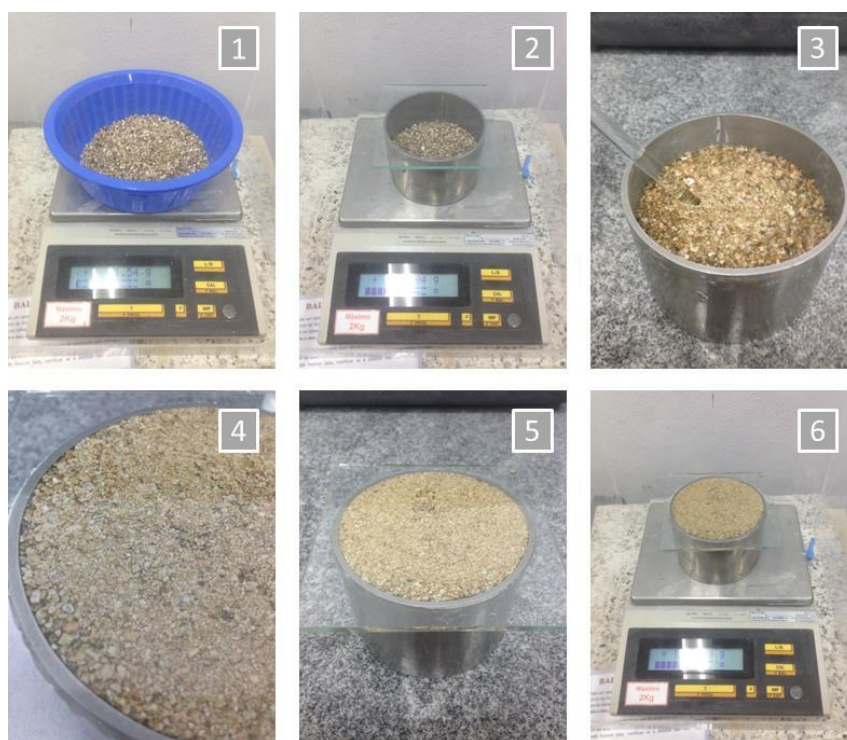
(fonte: foto do autor)

Antes da realização dos ensaios de caracterização da vermiculita expandida, foi realizado sobre o material o processo de quartejamento com a intenção de obter amostras mais representativas do minério.

Para possibilitar a determinação do consumo de cimento das argamassas, foi necessário realizar o ensaio de massa específica da vermiculita expandida. No entanto, por parte da normalização relativa a este minério não foi encontrada nenhuma recomendação para a realização do respectivo ensaio, já a normalização brasileira e do MERCOSUL que menciona os agregados leves cita apenas o ensaios de massa específica aparente, através de normas referentes à massa unitária de agregados. Como a vermiculita expandida é considerada um agregado leve, a tentativa de realizar o ensaio de massa específica de acordo com a NBR NM 52 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) utilizada para agregado miúdo não foi possível por causa da flutuação do minério quando em contato com água. Com isso, optou-se por propor um ensaio capaz de determinar de forma simplificada a massa específica da vermiculita expandida, cujo procedimento foi desenvolvido pelos autores deste trabalho.

O ensaio proposto consiste na determinação do volume de uma massa conhecida de agregado leve através de um recipiente metálico com volume calibrado. Resumidamente, o procedimento consistia em adicionar uma massa conhecida do agregado leve suficiente para ocupar a metade do volume do recipiente metálico, em seguida a massa do conjunto, incluindo uma placa de vidro plana, era registrada. Posteriormente, era acrescentado lentamente um volume de água, com temperatura conhecida, e ao mesmo tempo era feita a agitação circular da amostra através de uma haste de vidro, com o objetivo de ir liberando o ar aprisionado. Por fim, cuidadosamente a placa de vidro era colocada, evitando deixar vazios entre a água e o vidro. Após secar o conjunto, a massa final do mesmo era registrada. Com os dados em mãos, apenas por uma diferença das massas determinadas e conhecendo a massa específica da água na temperatura medida e volume do recipiente, era determinada a massa específica do agregado leve. A figura 17 demonstra o procedimento adotado.

Figura 17 – Procedimento adotado para a determinação da massa específica do agregado leve: (1) pesagem da vermiculita expandida; (2) pesagem do conjunto inicial; (3) retirada do ar aprisionado; (4) e (5) vedação do conjunto; (6) pesagem do conjunto final



(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados dos ensaios de caracterização da vermiculita expandida estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Caracterização física da vermiculita expandida

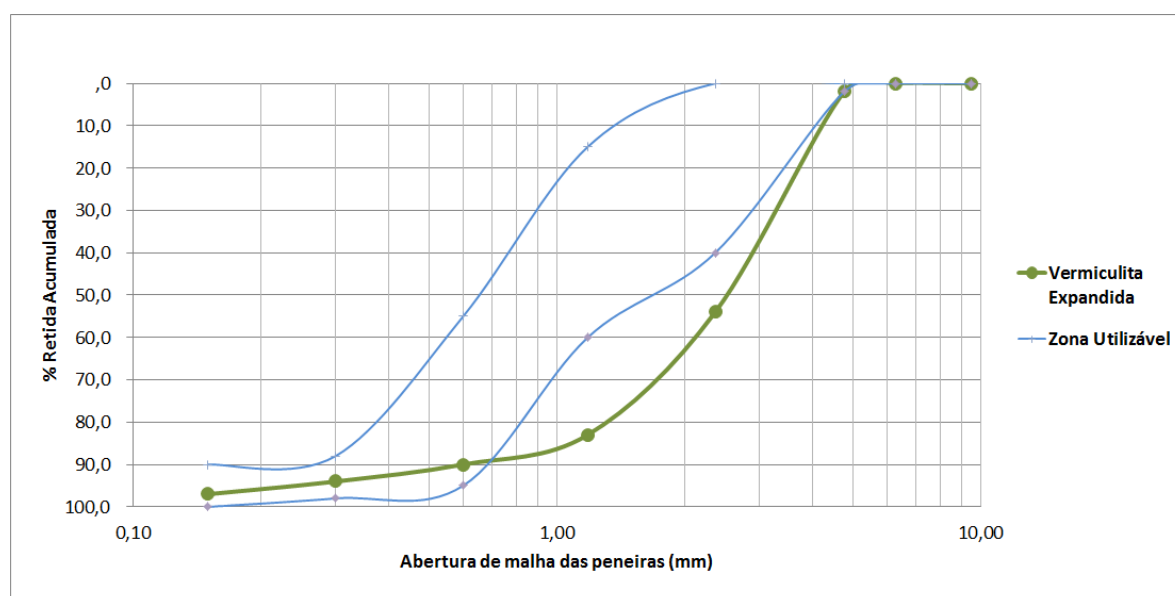
Vermiculita Expandida		
Composição Granulométrica - NBR NM 248/2003		
Peneira com abertura de malha (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	2	2
2,36	52	54
1,18	29	83
0,60	7	90
0,30	4	94
0,15	3	97
Fundo	3	100
Dimensão Máxima (mm) - NBR NM 248/2003		4,75
Módulo de Finura - NBR NM 248/2003		4,20
Massa Unitária (g/cm ³) - NBR NM 45/2006		0,17
Massa Específica (g/cm ³) - Ensaio Adaptado		0,64

(fonte: elaborado pelo autor)

A massa unitária da vermiculita expandida confirma que o minério empregado neste estudo pode ser considerado um agregado leve, já que respeita o limite de $1,12 \text{ g/cm}^3$ (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Além disso, observa-se a massa unitária e a massa específica da vermiculita expandida representam uma redução de aproximadamente 89% e 76%, respectivamente, dos resultados obtidos para a areia natural. Todavia, apesar da dimensão máxima ser igual, o módulo de finura da vermiculita expandida é aproximadamente 1,63 vezes maior do que o determinado para a areia, indicando que o minério tem maior quantidade de partículas retidas nas peneiras de maior abertura.

Considerando os limites de composição granulométrica que os agregados leves devem respeitar para serem utilizados em concreto isolante térmico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a) e concreto estrutural (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), verifica-se pela curva granulométrica que a vermiculita expandida utilizada extrapola a zona utilizável entre as peneiras de abertura 4,75 mm e 0,60 mm, mas posteriormente se mantém dentro dos limites estipulados, conforme a figura 18. No entanto, visto certa proximidade com a zona utilizável e principalmente pela inexistência de recomendações de limites específicos para argamassa ou até para concreto isolante acústico, optou-se por manter a vermiculita expandida em questão como agregado leve das argamassas moldadas nesta pesquisa.

Figura 18 – Curva granulométrica da vermiculita expandida



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.2.2.2 Serragem Cromada

Neste item é feita uma abordagem sobre a contextualização da serragem cromada utilizada nesta pesquisa, juntamente com os ensaios de caracterização empregados e seus respectivos resultados.

5.2.2.2.2.1 Contextualização da Serragem Cromada

A produção de couro nas indústrias brasileiras de curtume ocupa a quinta posição no cenário mundial, exportando geralmente produtos de pouco valor agregado (SANTOS, A. et al., 2002). Segundo Santos, A. et al. (2002, p. 63), “A produção brasileira de couro está concentrada nas regiões Sul e Sudeste que, juntas, são responsáveis por cerca de 72% da produção total e registram o maior número de curtumes.”. De acordo com o Centro das Indústrias de Curtumes no Brasil (2016), os principais exportadores de peles e couros no ano de 2015 foram os estados do Rio Grande do Sul (21,8%), São Paulo (21,7%), Goiás (14,4%), Paraná (8,5%) e Ceará (7,1%).

Apesar da importância do comércio de peles e couro na economia brasileira, o processo de transformação de peles em couros é responsável por produzir uma elevada quantidade de resíduos sólidos. O autor Pacheco (2005, p. 24) relata que:

[...] o processamento convencional de 1 t ou 1.000 kg de peles salgadas gera somente 200 a 250 kg de couros acabados, o que dá um rendimento médio do processo de 22,5 %, nestas bases. Por outro lado, além de outras emissões, o processo gera cerca de 600 kg de resíduos sólidos [...], o que denota um potencial de impacto ambiental significativo da geração de resíduos sólidos na produção de couros.

Além disso, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental – Fepam – (2002) cita que o setor industrial responsável pela maior geração de resíduos sólidos industriais perigosos no estado do Rio Grande do Sul é o da indústria de curtume. A Fepam menciona que das 244.000 toneladas/ano de resíduos sólidos gerados em curtumes, cerca de 120.000 toneladas/ano são resíduos perigosos, o que representa um percentual de aproximadamente 49%.

Durante o processo produtivo do couro, destaca-se a geração dos seguintes resíduos sólidos: “[...] aparas não caleadas e caleadas, carnaça, material curtido (farelo de rebaixadeira e aparas/tiras curtidas) e lodos dos sistemas de tratamento dos efluentes líquidos.” (PACHECO, 2005, p. 34). Conforme Silva, A. (2006), do ponto de vista ambiental, o lodo dos sistemas de

tratamento, as aparas e a serragem de couro curtido são os resíduos que mais impactam o ambiente.

Complementarmente, Fujikawa (2002) cita que a serragem cromada é considerada um dos resíduos mais problemáticos ambientalmente por causa do elevado volume gerado nos curtumes e por ser enquadrar como um resíduo perigoso. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), a serragem de couro proveniente de couros curtidos ao cromo é classificada como um resíduo perigoso por causa da possível presença do cromo hexavalente em sua composição. A autora Silva, A. (2006, p. 8) cita que a NBR 10.004/2004:

[...] apresenta a divisão dos resíduos em “perigosos” (Classe I) e “não perigosos”, subdivididos em “não-inertes” (II-A) e “inertes” (II-B). Para esta classificação, são propostos os ensaios de lixiviação e solubilização: caso o extrato lixiviado apresente concentração de elementos perigosos superior à determinada pela norma, o resíduo é classificado como classe I; do contrário, o resíduo é dito não perigoso, e a análise do extrato solubilizado determinará se ele será tido como não-inerte (concentração de elementos perigosos neste extrato superior à prescrita por norma) ou inerte (concentração dentro dos limites regulamentares).

O cromo impregnado na serragem cromada é proveniente do processo de curtimento ao cromo responsável por transformar as peles em materiais estáveis e imputrescíveis, ou seja, o couro (PACHECO, 2005). Apesar de ser possível realizar o curtimento com materiais vegetais e sintéticos, o autor Pacheco (2005, p. 21) afirma que “[...] o processo ao cromo ainda é o principal processo de curtimento, utilizado mundialmente, pelo tempo relativamente curto de processo e pela qualidade de confere aos couros em suas principais aplicações.”.

Após o processo de curtimento, ocorre à uniformização da espessura do couro curtido através da máquina de rebaixar (figura 19), o resíduo gerado pela uniformização (figura 20) é a conhecida serragem cromada (SILVA, A., 2006). Segundo Ribeiro, D. et al. (2011, p. 979), “A serragem cromada apresenta uma umidade de 40% e, em base seca, o teor de cromo pode chegar a 3%.”.

Figura 19 – Máquina de rebaixar



(fonte: SILVA, A., 2006, p. 14)

Figura 20 – Aspecto da serragem cromada



(fonte: SILVA, A., 2006, p. 14)

O teor de cromo presente na rede proteica da serragem cromada e a baixa densidade do resíduo, gerando grandes volumes, dificultam a disposição deste material em aterros industriais, tanto do ponto de vista econômico quanto do ambiental (BARRA et al., 2007). Paralelamente, Yuan (2009, p. 21) destaca que:

Embora o descarte de resíduos da indústria de curtume contenha o cromo trivalente, as condições de potencial de redox, pH do meio, umidade, oxigênio, entre outros fatores, podem favorecer a reação de oxidação para a formação do cromo hexavalente. Contudo, mesmo que a reação de oxidação do cromo não ocorra, o descarte do cromo trivalente no meio pode ser prejudicial, uma vez que a quantidade absorvida é acumulativa no organismo sendo, portanto, necessária alguma tecnologia para que este elemento possa ser reutilizado e não simplesmente descartado na natureza em forma de resíduo.

De acordo com Silva, A. (2006), presume-se que o cromo trivalente, estado de oxidação que prevalece na serragem cromada, não é nocivo a saúde. No entanto, já no estado de hexavalente, o cromo é reconhecido com um agente cancerígeno, graças à facilidade do componente de penetrar nas células humanas, alterando a expressão gênica, podendo levar ao câncer. A Agency for Toxic Substances and Disease Registry¹⁵ ([2006], apud SILVA, A., 2006, p. 24) complementa que:

¹⁵ AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. **Chromium toxicity**. Atlanta, [2006].

Outros efeitos tóxicos induzidos pelo cromo incluem: por exposição respiratória, perfuração do septo nasal; após a exposição oral, os efeitos mais prevalentes ocorrem em nível hepático e renal, onde há acúmulo preferencial do metal. Estudos sobre os efeitos após exposição por via dérmica são limitados, sendo a própria pele o local da ação tóxica.

Visto que a serragem cromada se trata de um resíduo perigoso e potencialmente cancerígeno dependendo do estado de oxidação do cromo presente no material, certas soluções estão sendo pesquisadas para encapsular o resíduo. Yuan (2009) menciona que o cimento Portland com adições de escórias de alto forno e cinzas volantes propiciam um ambiente redutor, favorecendo a imobilização do cromo no estado trivalente. Já para o cimento Portland comum, o autor afirma que a riscos maiores do cromo trivalente se converter em cromo hexavalente, mas ressalva que o cromo hexavalente é mais facilmente reduzido a cromo trivalente do que o inverso.

Para Fujikawa (2002), o encapsulamento da serragem cromada tem se mostrado eficaz em concretos e os ensaios de solubilização e lixiviação permitiram avaliar que o resíduo, quando incorporado ao concreto, passou da Classe I (perigoso) para a Classe II (não perigoso), de acordo com a NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). Segundo Silva, A. (2006), através dos ensaios de solubilização e lixiviação, verificou-se que a adição do resíduo tratado em argamassas permitiu a estabilização química do cromo na matriz cimentícia.

5.2.2.2.2 Caracterização da Serragem Cromada

A serragem cromada empregada neste estudo foi coletada, mediante autorização legal, de uma central licenciada de resíduos industriais situada na cidade de Novo Hamburgo/RS. Todo o resíduo não utilizado na pesquisa será devidamente encaminhado a central após a publicação deste estudo. A serragem cromada coletada foi seca em estufa e, em seguida, teve suas dimensões reduzidas através de um processo mecânico de corte realizado em laboratório. As figuras 21 e 22 demonstram o aspecto da serragem cromada coletada e o aspecto do material após o processo mecânico em questão, respectivamente.

Figura 21 – Aspecto original da serragem cromada coletada



(fonte: foto do autor)

Figura 22 – Aspecto da serragem cromada após o processo, em laboratório, para redução das dimensões do material



(fonte: foto do autor)

A presença de tiras maiores de serragem cromada dificultou a moldagem dos corpos de prova, o que implicou na necessidade de peneirar todo o resíduo para selecionar apenas o material passante na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Após o peneiramento, o resíduo foi novamente seco em estufa até constância de massa e, posteriormente, foi armazenado em recipientes plásticos até o dia da moldagem final. A figura 23 apresenta o aspecto visual da serragem cromada utilizada neste trabalho.

Figura 23 – Aspecto visual da serragem cromada



(fonte: foto do autor)

Para os ensaios de caracterização da serragem cromada, foi realizado previamente o processo de quarteamento sobre o material, a fim de obter amostras representativas do resíduo. Os resultados dos ensaios de caracterização da serragem cromada estão descritos na tabela 9. Ressalva-se que a determinação da massa específica do resíduo em questão seguiu o mesmo procedimento adotado para a vermiculita expandida.

Tabela 9 – Caracterização física da serragem cromada

Serragem Cromada		
Composição Granulométrica - NBR NM 248/2003		
Peneira com abertura de malha (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	0	0
2,36	43	43
1,18	24	67
0,60	15	82
0,30	13	95
0,15	4	99
Fundo	1	100
Dimensão Máxima (mm) - NBR NM 248/2003		4,75
Módulo de Finura - NBR NM 248/2003		3,86
Massa Unitária (g/cm ³) - NBR NM 45/2006		0,09
Massa Específica (g/cm ³) - Ensaio Adaptado		1,03

(fonte: elaborado pelo autor)

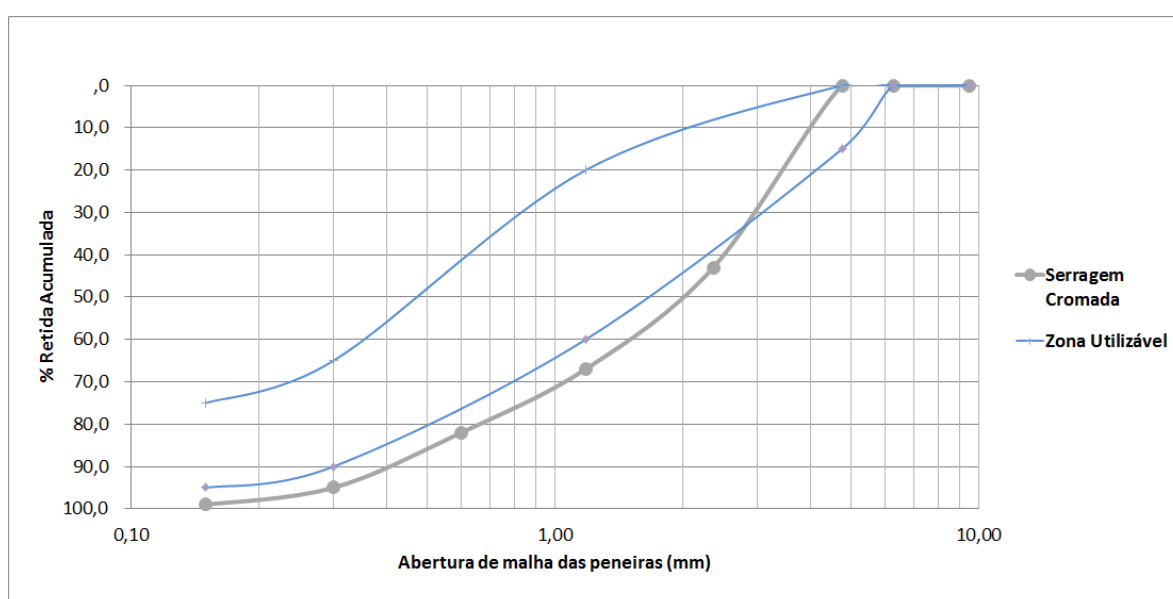
A massa unitária da serragem cromada empregada neste estudo indica que resíduo se enquadra como um agregado leve, já que respeita o limite de 1,12 g/cm³ (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Mas é importante salientar que a serragem cromada é composta predominantemente de material orgânico, sendo importante a encapsulamento do mesmo para evitar o processo de decomposição da matéria orgânica do resíduo. Em comparação com os resultados da areia natural, verifica-se que a massa unitária e a massa específica da serragem cromada representam uma redução próxima de 94% e 61%, respectivamente. Apesar da mesma dimensão máxima, o módulo de finura da serragem cromada é aproximadamente 1,50 vezes maior do que o obtido para a areia natural, graças a uma maior concentração de partículas retidas nas peneiras de maior abertura de malha.

Em relação à vermiculita expandida, observa-se que a massa unitária da serragem cromada é menor, mas a massa específica é maior, indicando que o resíduo quando em seu estado solto apresenta uma quantidade maior de vazios entre as partículas, já o material em si, desconsiderando os vazios, tem uma densidade maior do que a vermiculita expandida. Além

disso, verifica-se que o módulo de finura da serragem cromada é inferior do que o determinado para a vermiculita expandida. Com isso, para os teores de substituição adotados para as argamassas de dosadas em laboratório, são necessárias menores massas de serragem cromada para substituir a areia natural, em comparativo com a vermiculita expandida, mas o material incorporado tende a ter uma densidade maior quando incorporado a matriz cimentícia, desconsiderando os vazios.

Levando em conta os limites já mencionados para que os agregados leves se enquadrem nas exigências para utilização em concreto isolante térmico e concreto estrutural, a serragem empregada neste estudo se mantém dentro da zona utilizável entre as peneiras de abertura de 4,75 mm e 2,36 mm, mas na sequência extrapola os limites, conforme curva granulométrica apresentada na figura 24. Todavia, pelos mesmos motivos apontados para a vermiculita expandida, manteve-se a serragem cromada em questão como agregado leve das argamassas dosadas em laboratório.

Figura 24 – Curva granulométrica da serragem cromada



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.3 Argamassa Industrializada

A argamassa industrializada empregada neste estudo é proveniente da cidade de Guaíba/RS. O produto ensacado é composto por areia quartzosa natural, produtos poliméricos, fibras naturais e artificiais, sendo o cimento adicionado ao produto nas proporções indicadas pelo

fabricante. A argamassa é recomendada como revestimento final para contrapisos e capeamentos. De acordo com o fabricante, a argamassa é considerada ecológica, incomburente, além de possuir características térmicas e acústicas. As características da argamassa cedidas pelo fabricante estão apresentadas na tabela 10, com a ressalva que para esta pesquisa os dados em questão são apenas ilustrativos. Já na tabela 11, estão descritos os resultados da massa unitária e a massa específica (ensaio adaptado) do produto ensacado, a fim de possibilitar a determinação da relação água/materiais secos, considerando o volume dos materiais, e o consumo de cimento desta argamassa.

Tabela 10 – Características da argamassa industrializada

Argamassa Industrializada	
Classificação da Argamassa - NBR 13.281/2005	P6, M1, D1, U3, R6
Resistência ao Fogo - Categoria Corta-Fogo - NBR 10.636/1989	CF240
Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado L'nT,w (dB) - ISO 140-7/1998	58
Diferença Padronizada de Nível Ponderada DnT,w (dB) - ISO 140-4/1998	55

(fonte: FABRICANTE, 2016)

Tabela 11 – Caracterização do produto ensacado

Produto Ensacado	
Massa Unitária (g/cm ³) - NBR NM 45/2006	0,71
Massa Específica (g/cm ³) - Ensaio Adaptado	1,90

(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.4 Água

A água utilizada nesta pesquisa é proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Porto Alegre/RS, cuja distribuição é realizada pelo DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto.

5.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

Para a produção das argamassas empregadas nesta pesquisa foi aplicado o procedimento de dosagem dos materiais, a fim de obter o proporcionamento apropriado para as argamassas dosadas em laboratório, além da moldagem dos corpos de prova e a cura dos mesmos.

5.3.1 Dosagem das Argamassas

Primeiramente, a definição do traço de referência das argamassas dosadas em laboratório para contrapisos, representado pelo teor de substituição de 0% (constituído apenas de agregado miúdo natural), foi baseada principalmente em um levantamento de campo realizado em obras da cidade de Porto Alegre/RS. De acordo com Rubin (2015), a argamassa dosada em obra do tipo “farofa” representa 34% de todos os métodos utilizados para executar contrapisos na cidade de Porto Alegre/RS, seguido da argamassa industrializada (33%), laje zero (20%) e outros métodos (13%). Em relação ao traço da argamassa de contrapiso do tipo “farofa”, a mesma autora afirma que os traços 1:3 e 1:4 (cimento:agregado miúdo úmido, ambos em volume) são os mais usuais nas obras de Porto Alegre/RS.

A pesquisa de traços usuais de contrapiso foi além da pesquisa relatada acima, buscaram-se referências normativas e outras referências bibliográficas. Em relação à normatização relativa à argamassas de contrapiso, A NBR 13.753 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996) relativa a revestimentos cerâmicos utilizando argamassa colante é a única norma brasileira que apresenta recomendações para a camada de contrapiso. De acordo com a respectiva Norma, “O contrapiso deve ser constituído por uma argamassa de cimento e areia média úmida, com traço recomendado em volume de uma parte de cimento para seis partes de areia [...]”.

Em relação às recomendações bibliográficas, Fiorito (c1994) sugere o seguinte traço, em volume, para argamassas de contrapiso: uma parte de cimento para seis partes de areia média úmida. Já a autora Barros (1994, p. 51) recomenda traços de acordo com o revestimento que será aplicado sobre o contrapiso, os traços em volume, considerando a areia úmida, estão descritos na sequência:

- a) Base para aplicação da impermeabilização: 1:3,0 a 1:4,0;
- b) Base para aplicação de revestimentos finos (têxteis, carpete de madeira, vinílico etc.): 1:4,0 a 1:5,0;
- c) Base para aplicação de revestimentos espessos (cerâmica, pedra, madeira, vinílico etc.): 1:5,0 a 1:6,0.

Por fim, com base nas recomendações citadas, optou-se por adotar um traço mais rico em cimento e que estivesse próximo aos traços usuais em Porto Alegre/RS apontados pela

pesquisadora Rubin (2015). Com isso, o traço de referência das argamassas dosadas em laboratório para contrapisos segue as seguintes proporções em massa: uma parte de cimento para quatro parte de areia média seca. Considerando um coeficiente médio de inchamento de 1,30 e a massa unitária conhecida do cimento e da areia média natural, é possível estimar que o traço referência, em volume, é 1:2,60 (cimento:areia média úmida), próximo ao traço 1:3 citado pela autora Rubin (2015).

Com o traço da argamassa de referência definido, foi dosada a água necessária para atingir a consistência que é requerida em obra para argamassas secas de contrapiso. Porém, pela dificuldade encontrada em realizar o ensaio de índice de consistência, devido à consistência seca das argamassas empregadas neste estudo, optou-se por dosar a argamassa de referência de acordo com a recomendação dos autores Barros e Sabbatini (1991) de que a relação água materiais/secos da argamassa seca, do tipo “farofa”, varia entre 9% a 11%. Com base na consistência qualitativa da argamassa de referência, buscou-se adotar a mesma consistência na dosagem das outras argamassas empregadas. Para tanto, o procedimento qualitativo adotado consistia na coleta manual de uma amostra misturada na argamassadeira e ao apertar a amostra na palma da mão, a consistência deveria ser próxima a da argamassa de referência. No caso, a amostra pressionada deveria manter a forma compactada, sendo a desintegração um indicativo de uma amostra demasiadamente seca, sem impregnar a mão de sujeira, indicativo de amostra muito úmida. A figura 25 apresenta a consistência adotada para todas as argamassas dosadas em laboratório empregadas nesta pesquisa.

Figura 25 – Consistência qualitativa das argamassas secas deste estudo



(fonte: foto do autor)

Partindo da argamassa de referência, foi necessária adicionar água à medida que os teores de substituição dos agregados leves empregados aumentavam. Rossignolo (c2009) justifica que a forma e a textura dos agregados leves influenciam diretamente a obtenção da trabalhabilidade desejada, além da elevada absorção de água dos mesmos, necessitando quantidades maiores quantidade de água.

A tabela 12 apresenta os traços em massa e a relação água/cimento (a/c) de todas as argamassas utilizadas nesta pesquisa, incluindo a argamassa industrializada, cuja proporção e relação água/cimento respeitaram as recomendações do fabricante. É apresentada também na tabela 12, a relação água/materiais secos considerando tanto massa (H-Massa) dos componentes e quanto o volume (H-Volume), verifica-se que para as argamassas dosadas em laboratório com teor de substituição de 0%, a relação água/materiais secos em massa de 8% está próxima dos limites de 9% a 11% estipulados pelos autores Barros e Sabbatini (1991). A relação água/materiais secos considerando como parâmetro o volume dos componentes foi calculada a fim de apresentar de forma mais visível a quantidade de água adicionada, visto que a consideração das massas dos agregados leves implica em elevados percentuais, graças à baixa massa unitária destes materiais.

Tabela 12 – Proporcionalamento das argamassas deste estudo

Traço em Massa das Argamassas								
Argamassa	Cimento	Areia Média Natural	Vermiculita Expandida	Serragem Cromada	Produto Ensacado	a/c	H - Massa	H - Volume
ve0	1,00	4,00				0,40	8,00%	10,31%
ve10	1,00	3,60	0,04			0,45	9,69%	11,60%
ve30	1,00	2,80	0,13			0,55	13,98%	14,18%
ve50	1,00	2,00	0,22			0,60	18,61%	15,47%
ve70	1,00	1,20	0,31			0,65	25,86%	16,76%
sc0	1,00	4,00				0,40	8,00%	10,31%
sc10	1,00	3,60		0,02		0,45	9,73%	11,60%
sc30	1,00	2,80		0,07		0,55	14,20%	14,18%
sc50	1,00	2,00		0,12		0,60	19,22%	15,47%
sc70	1,00	1,20		0,17		0,65	27,43%	16,76%
sc90	1,00	0,40		0,22		0,70	43,27%	18,05%
f0	1,00				2,00	1,00	33,33%	24,39%

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.2 Moldagem dos Corpos de Prova

Para o preparado de todas as argamassas deste estudo foi utilizada uma argamassadeira de eixo vertical com capacidade de 40 litros e rotação de 50 rotações por minuto. O procedimento para o preparo das argamassas foi adaptado segundo as recomendações da NBR 13.276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a). A adaptação foi necessária por causa da consistência seca das argamassas, dificultando a homogeneização da mesma no tempo previsto pela respectiva norma. No quadro 3 está indicado o procedimento adotado para a preparação das argamassas dosadas em laboratório e a argamassa industrializada, com a ressalva que o fabricante apenas indicava qual o aspecto final do produto e a ordem de mistura dos materiais, sendo que o produto ensacado e o cimento são homogeneizados antes do preparo da argamassa.

Quadro 3 – Procedimento adotado para o preparo das argamassas

Preparo das Argamassas				
Ordem	Argamassa Dosada em Laboratório		Argamassa Industrializada	
	Procedimento	Tempo	Procedimento	Tempo
1	Ligar a Argamassadeira	0 s	Homogeneizar Produto Ensacado + Cimento	-
2	Adicionar Cimento e Água	0-30 s	Ligar a Argamassadeira	0 s
3	Adicionar Areia e Agregado Leve	30-60 s	Adicionar Produto Homogeneizado + Água	0-30 s
4	Misturar	60-150 s	Misturar	30-120 s
5	Misturar com Colher de Pedreiro	150-180 s	Misturar com Colher de Pedreiro	120-150 s
6	Repousar com Pano Úmido	180-270 s	Repousar com Pano Úmido	150-240 s
7	Misturar	270-300 s	Misturar	240-270 s
8	Misturar com Colher de Pedreiro	300-360 s	Misturar com Colher de Pedreiro	270-300 s

(fonte: elaborado pelo autor)

Todos os corpos de prova referentes a cada argamassa foram moldados provenientes de um preparo único, a fim de evitar a variabilidade de preparo entre uma mesma argamassa. Para possibilitar a caracterização das argamassas no estado endurecido, foram moldados 6 corpos de prova prismáticos com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm para cada argamassa empregada nesta pesquisa. A moldagem dos corpos prismáticos seguiu o procedimento descrito na NBR 13.279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a), sendo o mesmo indicado no quadro 4 e ilustrado na figura 26.

Quadro 4 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova de 4 x 4 x 16 cm

Moldagem - NBR 13.279/2005	
Ordem	Procedimento
1	Aplicar uma Fina Camada de Óleo Mineral nos Moldes Metálicos
2	Introduzir uma Primeira Porção de Argamassa em cada Compartimento do Molde
3	Nivelar a Camada Introduzida
4	Aplicar 30 Quedas na Mesa de Adensamento
5	Introduzir uma Segunda Porção de Argamassa em cada Compartimento do Molde
6	Nivelar a Camada Introduzida
7	Aplicar 30 Quedas na Mesa de Adensamento
8	Rasar os Corpos de Prova com a Régua Metálica

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova de 4 x 4 x 16 cm: (1) introdução do molde na mesa de adensamento; (2) preenchimento e nivelamento da primeira camada; (3) adensamento da primeira camada; (4) preenchimento e nivelamento da segunda camada; (5) adensamento da segunda camada e rasamento da superfície; (6) aspecto final dos corpos de prova no molde



(fonte: elaborado pelo autor)

Os 3 corpos de prova de cada argamassa desta pesquisa para o ensaio de rigidez dinâmica, foram moldados em moldes de madeira, resultando em amostras com dimensão de 20 cm x 20

cm x 3 cm, estando de acordo com as exigências da ISO 9052-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1989). A espessura de 3 cm das amostras foi determinada com base nas recomendações encontradas em bibliografias. De acordo com Fiorito (c1994), a espessura da camada de contrapiso deve variar de 2 a 3 cm, mas se necessário espessuras maiores, cada camada deve espessura respeitar igualmente este intervalo. Já para Barros e Sabbatini (1991), a espessura de contrapisos aderidos pode variar de 2 a 4 cm. Além disso, nas pesquisas de Zuchetto et al. (2015a) e Borges (2015), o ensaio de rigidez dinâmica foi realizado em contrapisos leves com espessura de 3 cm.

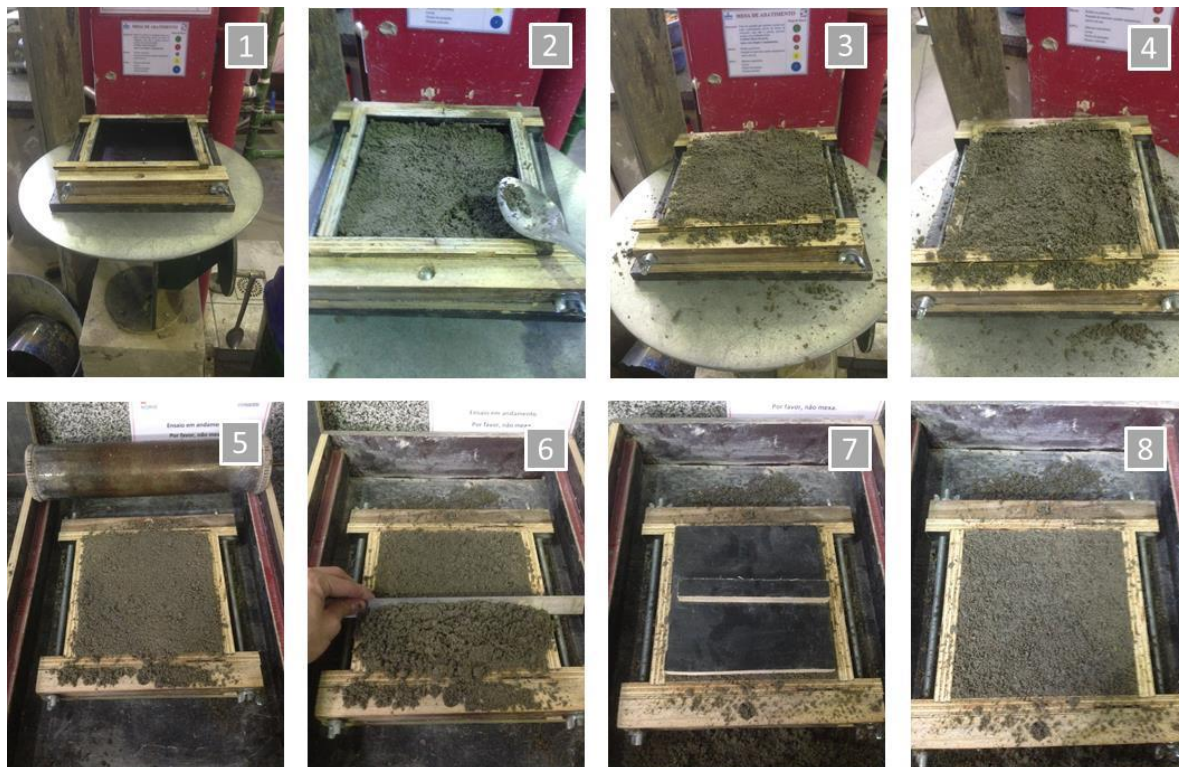
Os moldes utilizados para a moldagem das amostras de contrapiso para o ensaio de rigidez dinâmica, contavam com gabaritos removíveis com espessura de 1 cm no contorno, a fim de permitir a introdução da argamassa até o nível superior do molde. Com isso, após o adensamento, o nível da argamassa estava compreendido entre 3 a 4 cm, sendo a mesma novamente adensada por um rolo metálico. A etapa final de aplicar o soquete foi utilizada apenas para pressionar levemente os grãos soltos durante o arrasamento da superfície. O procedimento completo adotado para a moldagem dos corpos de prova para o ensaio de rigidez dinâmica está descrito no quadro 5 e ilustrado na figura 27.

Quadro 5 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova de 20 x 20 x 3 cm

Moldagem	
Ordem	Procedimento
1	Aplicar uma Fina Camada de Óleo Mineral nos Moldes de Madeira
2	Fixar os Gabaritos de Contorno
3	Introduzir uma Primeira Porção de Argamassa no Molde
4	Nivelar a Camada Introduzida
5	Introduzir uma Segunda Porção de Argamassa no Molde
6	Nivelar a Camada Introduzida
7	Aplicar 10 Quedas na Mesa de Adensamento
8	Retirar os Gabaritos de Contorno
9	Aplicar o Rolo Metálico
10	Rasar o Corpo de Prova com a Régua Metálica
11	Aplicar o Soquete de Forma Superficial

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova de 20 x 20 x 3 cm: (1) introdução do molde na mesa de adensamento; (2) preenchimento e nivelamento da primeira camada; (3) preenchimento e nivelamento da segunda camada; (4) adensamento na mesa de adensamento; (5) adensamento com o rolo metálico; (6) rasamento da superfície; (7) adensamento superficial com o soquete; (8) aspecto final do corpo de prova no molde



(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.3 Cura

Após a moldagem, os corpos permaneceram no ambiente de laboratório durante 48 horas, período necessário para adquirirem resistência suficiente para serem desmoldados, conforme descrito na NBR 13.279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a). Após desmoldados, os corpos de prova foram realocados para uma câmara reservada com temperatura e umidade controladas. Foram mantidos nessa condição por 28 dias, com exceção dos corpos de prova retirados aos 22 dias para dar início aos procedimentos do ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Por motivos de agendamento, os procedimentos para os ensaios de rigidez dinâmica, realizados no ITT FUSE/UNISINOS, iniciaram aos 34 dias e foram concluídos aos 36 dias.

5.4 ENSAIOS

A seguir são descritos os ensaios que foram realizados neste estudo para a caracterização das argamassas e para a determinação da rigidez dinâmica das amostras de contrapiso moldadas.

5.4.1 Ensaios de Caracterização das Argamassas

Os ensaios realizados para a caracterização das argamassas deste estudo foram destinados exclusivamente para a determinação das propriedades físico-mecânicas no estado endurecido das amostras, com base nas normalizações brasileiras. Estão descritos abaixo os ensaios selecionados pelos autores desta pesquisa para a caracterização das argamassas no estado endurecido. Os ensaios foram realizados aos 28 dias de idade, com exceção do ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica, cujo procedimento teve início antes dos 28 dias.

5.4.1.1 Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica

Para determinar a absorção de água, o índice de vazios e a massa específica das argamassas empregadas neste estudo, foi utilizado o procedimento descrito pela NBR 9.778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b). Para cada argamassa, três corpos de prova (4 x 4 x 16 cm) foram utilizados para a realização deste ensaio e foram retirados da câmara climatizada aos 22 dias. Na sequência, amostras permaneceram em uma estufa a 105 °C por um período de 72 horas. Após este procedimento, os corpos de provas foram pesados e na sequência permaneciam imersos em água durante 72 horas. Por fim, as amostras saturadas foram imersas em água em ebulição por um período de 5 horas. Quando a água retornava a temperatura ambiente, os corpos de prova foram pesados tanto imersos, com auxílio de balança hidrostática, quanto com a superfície enxugada. O procedimento adotado neste ensaio pode ser observado na figura 28.

O cálculo da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica de cada corpo de prova seguiu as formulações descritas na NBR 9.778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b).

Figura 28 – Procedimento para a determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica das argamassas: (1) secagem dos corpos de prova em estufa; (2) pesagem dos corpos de prova secos; (3) imersão dos corpos de prova em água em temperatura controlada; (4) imersão dos corpos de prova em água em ebulição; (5) pesagem dos corpos de prova imersos em água em temperatura controlada; (6) pesagem dos corpos de prova com a superfície enxugada



(fonte: elaborado pelo autor)

5.4.1.2 Densidade de Massa Aparente

Para determinar a densidade de massa aparente das argamassas desta pesquisa, foram utilizadas as prescrições da NBR 13.280 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c). Os três corpos de prova (4 x 4 x 16 cm) de cada argamassa tiveram suas dimensões medidas através de um paquímetro digital e suas massas determinadas por uma balança com resolução de 0,01 g. Com base nas medições, a formulação da NBR 13.280 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c) foi utilizada para calcular a densidade de massa aparente de cada corpo de prova. As figuras 29 e 30 ilustram a determinação das dimensões e das massas dos corpos de prova, respectivamente.

Figura 29 – Determinação das dimensões do corpo de prova



(fonte: foto do autor)

Figura 30 – Determinação da massa do corpo de prova



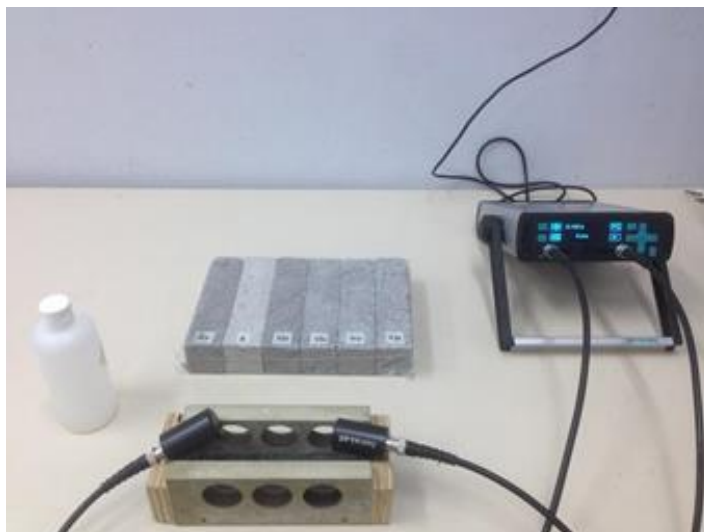
(fonte: foto do autor)

5.4.1.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O ensaio para determinar o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas no estado endurecido foi realizado de acordo com o procedimento da NBR 15.630 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009c), utilizando os mesmos corpos de prova moldados para o ensaio de densidade de massa aparente. Para medir a velocidade e o tempo de propagação da onda em cada corpo de prova, foi utilizado um aparelho específico para medições de ondas ultrassônicas (figura 31).

Para cada corpo de prova, foram registradas três leituras do tempo de propagação da onda pelo aparelho de ultrassom, sendo apenas o menor tempo utilizado nas formulações descritas pela NBR 15.630 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009c), para determinar a velocidade de propagação da onda e o módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 31 – Vista do equipamento de ultrassom e dos corpos de prova



(fonte: foto do autor)

5.4.1.4 Resistência à Tração na Flexão e à Compressão

Para determinar a resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas, foi utilizado o procedimento descrito na NBR 13.279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b), com os mesmos corpos de prova empregados nos ensaios de densidade de massa aparente e do módulo de elasticidade dinâmico. Primeiramente, o ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado sobre os corpos de prova (figura 32). Na sequência, com cada parte do corpo de prova rompido, foi executado o ensaio de resistência à compressão (figura 33).

Sobre os resultados calculados a partir dos dados destes ensaios, foi realizada uma análise a fim de selecionar apenas os resultados que respeitavam os limites de desvio padrão prescritos na NBR 13.279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b).

Figura 32 – Ensaio de resistência à tração na flexão



(fonte: foto do autor)

Figura 33 – Ensaio de resistência à compressão



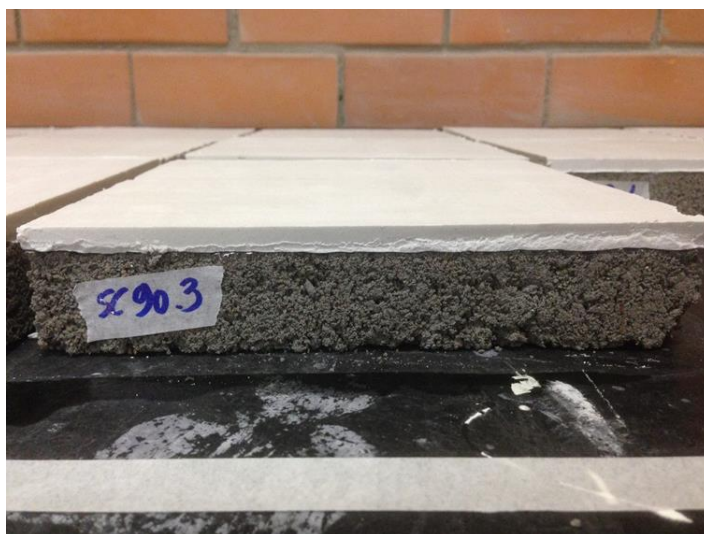
(fonte: foto do autor)

5.4.2 Ensaio de Rigidez Dinâmica

O ensaio para determinação da rigidez dinâmica das amostras de contrapiso moldadas foi realizado de acordo com o procedimento descrito na ISO 9052-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1989). Para cada argamassa, três amostras com dimensões de 20 x 20 x 3 cm foram moldadas para a realização deste ensaio. Aos 33 dias de idade, as amostras foram transportadas até o Instituto de Performance/UNISINOS no município de São Leopoldo/RS.

Por exigência da norma relativa ao ensaio de rigidez dinâmica, sobre as amostras foi colocado um filme plástico impermeável, sobre o qual foi aplicado uma fina camada de gesso de espessura mínima de 5 mm, a fim de cobrir as irregularidades superficiais das amostras. Antes de o gesso secar completamente, foi assentada uma placa de carga metálica de aproximadamente 8 kg, semelhante à utilizada durante o ensaio, para haver a acomodação da mesma no gesso. Em torno de 10 segundos após o assentamento, a placa era retirada e a amostra ficava em repouso por um período de 24 horas para a secagem completa do gesso. A figura 34 apresenta o aspecto da amostra com o gesso aplicado.

Figura 34 – Aspecto da amostra com o gesso



(fonte: foto do autor)

Os ensaios de rigidez dinâmica foram realizados no itt FUSE/UNISINOS. Primeiramente, cada amostra foi colocada sobre um dispositivo de fixação, ligado ao equipamento de vibração, com dimensões de 24 x 24 cm e massa de aproximadamente 40 kg. Sobre a amostra, foi colocada uma placa de carga metálica com dimensões idênticas a da amostra e com massa de aproximadamente 8 kg. A fim de vedar o vão formado entre a amostra e o dispositivo de fixação, foi aplicada uma fina camada de vaselina sólida no entorno da amostra. A figura 35 apresenta a amostra pronta para a realização do ensaio de rigidez dinâmica.

Figura 35 – Amostra pronta para o ensaio de rigidez dinâmica



(fonte: foto do autor)

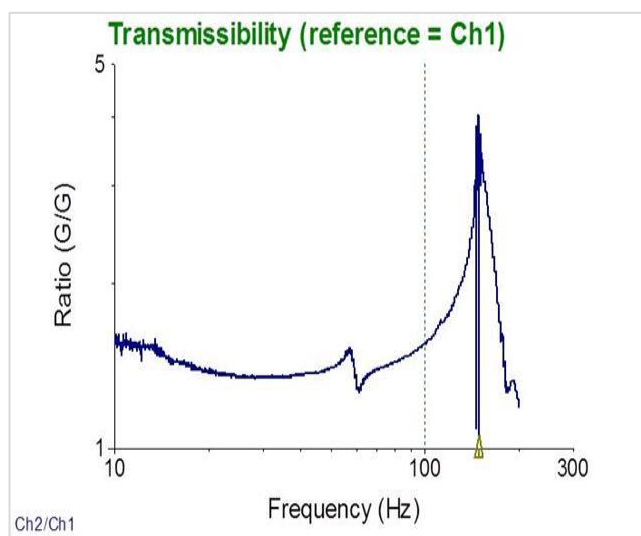
O equipamento de vibração vertical utilizado neste ensaio consiste em um Shaker, modelo L 315M, capaz de analisar a capacidade de produtos com massas com até 120 kg, além do dispositivo de fixação, de suportar excitações em diferentes faixas de frequência, velocidade e aceleração. Para permitir a leitura das acelerações provocadas pelas variações da frequência de vibração do Shaker, foram fixados acelerômetros no dispositivo de fixação e na placa da carga utilizada durante o ensaio. Todos os dados provenientes dos acelerômetros eram enviados para um computador, no qual um software instalado compatibilizava as respostas dos acelerômetros com a frequência de vibração do Shaker, resultando em um gráfico no qual a maior amplitude encontrada indicava a frequência de ressonância da amostra em análise. As figuras 36 e 37 apresentam, respectivamente, a vista geral dos equipamentos utilizados neste ensaio e um exemplo de gráfico resultante do ensaio de rigidez dinâmica.

Figura 36 – Vista dos equipamentos para o ensaio de rigidez dinâmica



(fonte: foto do autor)

Figura 37 – Exemplo de gráfico resultante do ensaio de rigidez dinâmica



(fonte: elaborado pelo autor)

Com base nas frequências de ressonância das amostras ensaiadas, foi calculada a rigidez dinâmica para cada amostra de acordo com a formulação descrita na ISO 9052-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1989). Além disso, tanto a frequência de ressonância quanto a rigidez dinâmica foram utilizadas para estimar a redução sonora para ruído de impacto em pisos flutuantes, de acordo com a EN 12.354-2 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2000).

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios propostos no programa experimental deste trabalho, além da análise de custo das argamassas.

A escassez de referências bibliográficas quanto às propriedades das argamassas de contrapiso, aliado, principalmente, a inexistência de normas brasileiras que abordem as propriedades físico-mecânicas por meio de requisitos e critérios para contrapisos, dificultou a análise dos resultados da caracterização das argamassas, sendo que os resultados foram apenas confrontados com o comportamento de argamassas semelhantes pesquisadas por outros autores.

A fim de analisar a significância das variáveis, individualmente ou combinadas, deste trabalho sobre parte dos dados de resposta obtidos pelos ensaios, foi realizado a Análise de Variância (ANOVA) através do software Statistica 8.0, considerando um intervalo de confiança de 95%. Para tanto, apenas sobre os resultados obtidos para as argamassas ve0, ve10, ve30, ve50, ve70, sc0, sc10, sc30, sc50, sc70 foi realizado a ANOVA, visto que este tipo de análise é comparativo apenas para dados com características semelhantes.

Os resultados dos ensaios apresentados neste capítulo para os ensaios de absorção de água, índice de vazios, massa específica, densidade de massa aparente, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e rigidez dinâmicas, foram calculados com base na média dos corpos de prova de cada argamassa, sendo desconsiderados valores espúrios.

6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas.

6.1.1 Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica

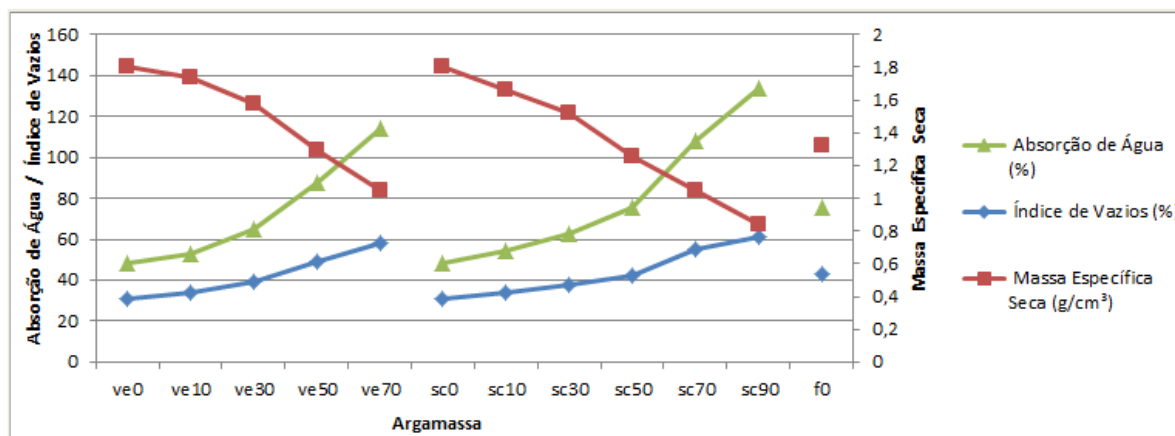
O valor médio da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica seca de cada argamassa desta pesquisa está indicado na tabela 13, já o comportamento destas propriedades em função do teor de substituição e do tipo de material está ilustrado na figura 38.

Tabela 13 – Média da absorção de água, índice de vazios e massa específica das argamassas

Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica (NBR 9.778/2009)						
Argamassa	Absorção de Água (%)		Índice de Vazios (%)		Massa Específica Seca (g/cm ³)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
ve0	17,38	0,33	31,29	0,31	1,80	0,02
ve10	19,42	0,46	33,71	0,47	1,74	0,02
ve30	25,13	0,41	39,60	0,39	1,58	0,01
ve50	38,02	1,09	49,34	0,65	1,30	0,02
ve70	55,65	1,37	58,14	0,67	1,04	0,01
sc0	17,38	0,33	31,29	0,31	1,80	0,02
sc10	20,48	0,84	34,12	0,86	1,67	0,03
sc30	24,71	0,25	37,60	0,32	1,52	0,01
sc50	33,51	0,55	42,04	0,85	1,25	0,01
sc70	52,72	1,25	55,43	0,58	1,05	0,01
sc90	72,83	1,11	60,90	0,30	0,84	0,01
f0	32,56	0,25	43,14	0,21	1,32	0,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 38 – Comportamento da absorção de água, índice de vazios e massa específica seca das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material



(fonte: elaborado pelo autor)

Com base na figura 38, a adição de agregados leves na matriz cimentícia implicou no aumento do índice de vazios em função da porosidade de ambos agregados. Com isso, tanto a absorção de água quanto a massa específica seca das argamassas sofreram alterações. Observa-se que o comportamento das argamassas com vermiculita expandida e serragem cromada é semelhante, ambas sofreram um acréscimo no índice de vazios com o aumento dos teores de substituição, resultando em argamassas com uma maior absorção de água e uma menor massa específica no estado seco. A argamassa industrializada obteve resultados próximos aos das argamassas com teores de substituição de 50%. Assim, para argamassas com maiores teores de substituição, maior foi o índice de vazios e, conseqüentemente, menor a massa específica seca, graças ao fato dos agregados leves aumentarem a porosidade da matriz e reduzir a densidade da mesma (SILVA, J., 2015).

Apenas os valores do índice de vazios foram avaliados através da ANOVA, já que a absorção de água foge um pouco do escopo deste trabalho e a parte relativa à densidade das argamassas será abordada na análise da densidade de massa aparente do material, evitando assim a redundância de informações. A tabela 14 apresenta o resultado da análise sobre o índice de vazios e indica que existe influência significativa do tipo de material, do teor de substituição e da interação entre estes dois fatores sobre o índice de vazios das argamassas.

Tabela 14 – ANOVA: resultados do índice de vazios das argamassas

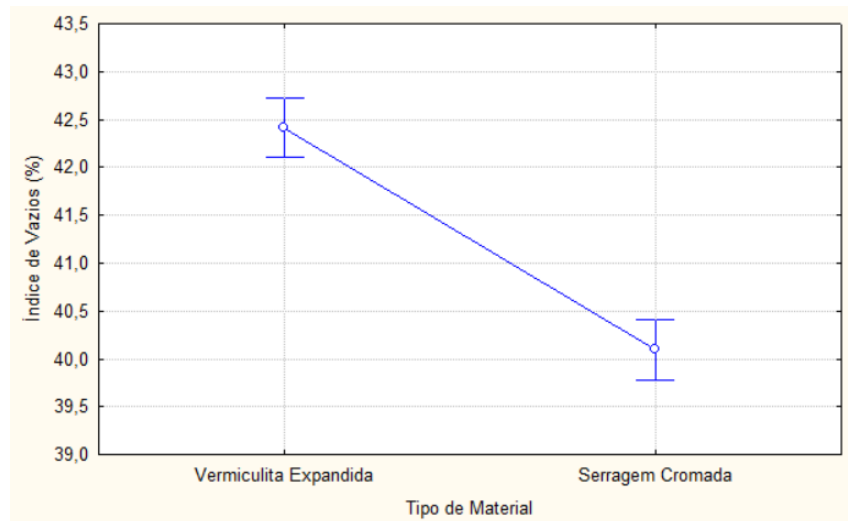
Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica (NBR 9.778/2009)						
Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias Quadradas	Teste F	p-nível	Significância
Tipo de Material	40,35	1	40,35	120,50	0,0000	Sim
Teor de Substituição (%)	2526,90	4	631,73	1886,70	0,0000	Sim
Teor de Substituição (%) / Tipo de Material	56,89	4	14,22	42,48	0,0000	Sim
Erro	6,70	20	0,33	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 39 indica que as argamassas que incorporaram a vermiculita expandida na matriz cimentícia tiveram maiores índices de vazios, em comparativo a incorporação da serragem cromada. Tal comportamento pode ser justificado pela diferente capacidade dos agregados em reter a água absorvida durante o período de cura de 28 dias. Já a figura 40 relaciona o teor de substituição com o índice de vazios e demonstra elevações consideráveis neste índice para teores maiores de agregados leves adicionados a matriz das argamassas. Esta tendência pode

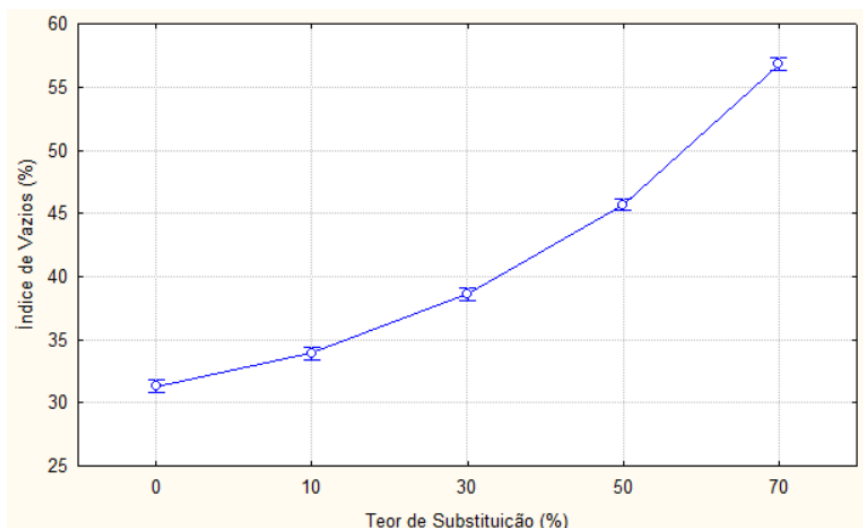
ser explicada tanto pela elevada porosidade e quanto pela absorção de água dos agregados leves (ROSSIGNOLO, c2009), sendo que perda da água em excesso ao longo da cura implica no aumento do índice de vazios do material. Lembrando que a relação água/materiais secos é diretamente dependente do teor de substituição dos agregados.

Figura 39 – Influência do tipo de material no índice de vazios das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 40 – Influência do teor de substituição no índice de vazios das argamassas

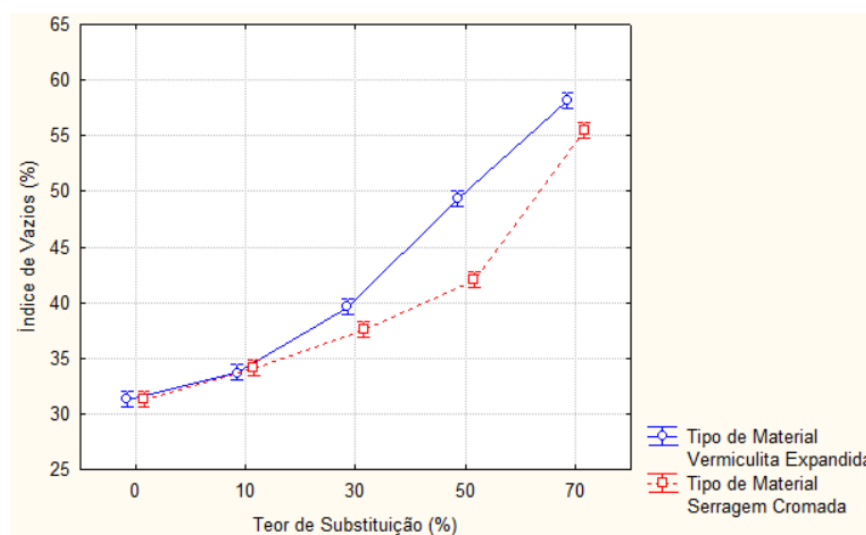


(fonte: elaborado pelo autor)

Por fim, a figura 41 revela a influência significativa da interação do tipo de material e do teor de substituição no índice de vazios das argamassas. Pode-se observar que ambos os materiais

tiveram um comportamento similar até o teor de substituição de 10%, na sequência, além do índice de vazios sofrer maiores acréscimos à medida que os teores aumentam, os índices de vazios para argamassas com serragem cromada foram inferiores aos obtidos para as matrizes cimentícias com vermiculita expandida.

Figura 41 – Influência do tipo de material e do teor de substituição no índice de vazios das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.2 Densidade de Massa Aparente

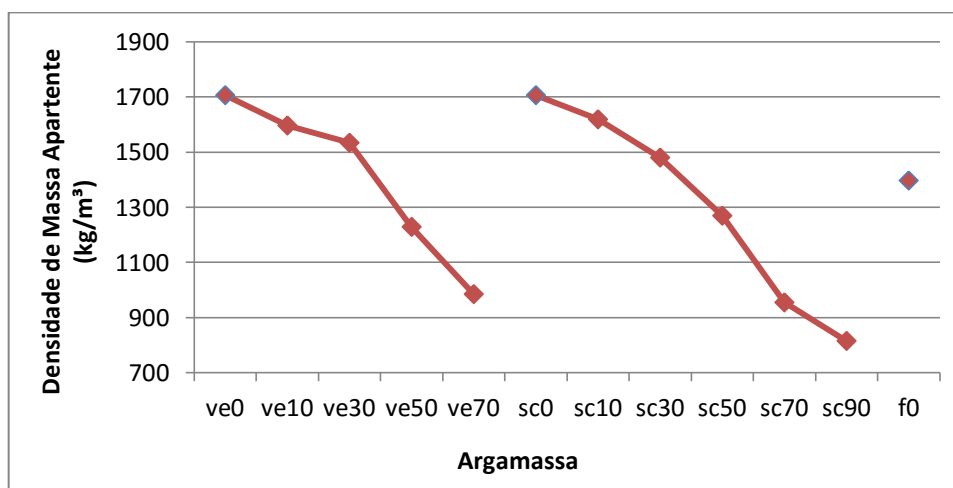
A densidade de massa aparente média de cada argamassa deste estudo está descrita na tabela 15, já o comportamento desta propriedade em função do teor de substituição e do tipo de material está apresentado na figura 42.

Tabela 15 – Densidade de massa aparente média das argamassas

Densidade de Massa Aparente (NBR 13.280/2005)		
Argamassa	Densidade de Massa Aparente (kg/m ³)	
	Média	Desvio Padrão
ve0	1706,87	14,09
ve10	1596,97	22,83
ve30	1534,21	4,67
ve50	1229,19	11,38
ve70	985,32	3,78
sc0	1706,87	14,09
sc10	1619,23	1,96
sc30	1480,52	20,44
sc50	1269,72	15,39
sc70	955,26	14,47
sc90	815,49	5,13
f0	1397,24	23,56

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 42 – Comportamento da densidade de massa aparente das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material



(fonte: elaborado pelo autor)

Pela figura 42, percebe-se que a incorporação dos agregados leves resultou na redução da densidade de massa aparente das argamassas. Este comportamento era esperado, graças à menor massa unitária e específica dos agregados leves em relação ao agregado miúdo natural, além do aumento índice de vazios das argamassas em função do aumento do teor de substituição, conforme a figura 38. Com isso, observa-se que quanto maior o teor de substituição da areia natural pelos agregados leves empregados neste estudo, menor foi o

valor da densidade de massa aparente das argamassas. Para a argamassa industrializada, verifica-se que a densidade obtida está situada entre os resultados obtidos para as argamassas com substituição de 30% e 50%.

A tabela 16 apresenta o resultado da ANOVA sobre a densidade de massa aparente, na qual se verifica que o tipo de material não influencia significativamente a densidade de massa aparente das argamassas, sendo esta influenciada apenas pelo teor de substituição e a interação entre estes dois fatores.

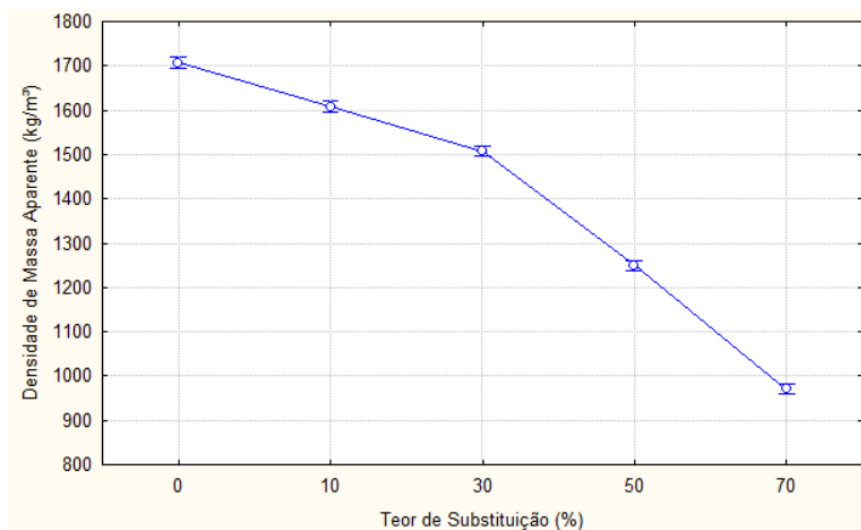
Tabela 16 – ANOVA: resultados da densidade de massa aparente das argamassas

Densidade de Massa Aparente (NBR 13.280/2005)						
Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias Quadradas	Teste F	p-nível	Significância
Tipo de Material	131,87	1	131,87	0,68	0,4207	Não
Teor de Substituição (%)	2135787,53	4	533946,88	2737,02	0,0000	Sim
Teor de Substituição (%) / Tipo de Material	8754,55	4	2188,64	11,22	0,0001	Sim
Erro	3901,66	20	195,08	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 43 relaciona o teor de substituição com a densidade de massa aparente e evidencia que a incorporação dos agregados leves desta pesquisa implicou na redução da densidade de massa aparente das argamassas. Partindo da argamassa de referência (0%), comprova-se claramente o comportamento de que quanto maior o teor de substituição empregado, menor foi a densidade de massa aparente das argamassas. Destaca-se que teores de substituição a partir de 30% acentuaram ainda mais a redução da densidade das argamassas, motivado tanto pela densidade dos agregados quanto pela faixa de valores com maiores índices de vazios, de acordo com a figura 40. Com isso, respeita-se a citação Ribeiro, R. et al. (2005) de que a redução da densidade das argamassas endurecidas é vinculada com o aumento das substituições por materiais leves e acompanhada pelo aumento da porosidade aberta.

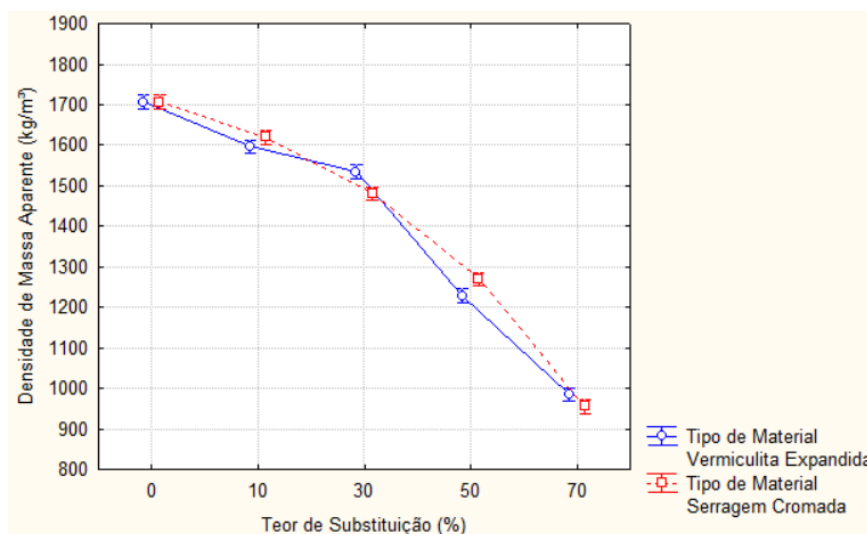
Figura 43 – Influência do teor de substituição na densidade de massa aparente das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

Enfim, a figura 44 indica a interação entre o tipo de material e teor de substituição na densidade de massa aparente das argamassas. Visualiza-se que para ambos os materiais o teor de substituição tem um comportamento definido em relação ao da densidade das argamassas, mas a interação entre as duas variáveis implica em um comportamento alternado, o que ressalva a constatação que a interação é significativa em relação à resposta. Observa-se que mesmo que o índice de vazios das argamassas com vermiculita expandida é maior para teores com substituição acima de 30% (figura 40), a densidade de massa aparente entre as argamassas com tipos de materiais diferentes não tem um comportamento definido, o que pode ser explicado pela interação variável entre a densidade de massa aparente e o índice de vazios e tipo de material de cada argamassa.

Figura 44 – Influência do tipo de material e do teor de substituição na densidade de massa aparente das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

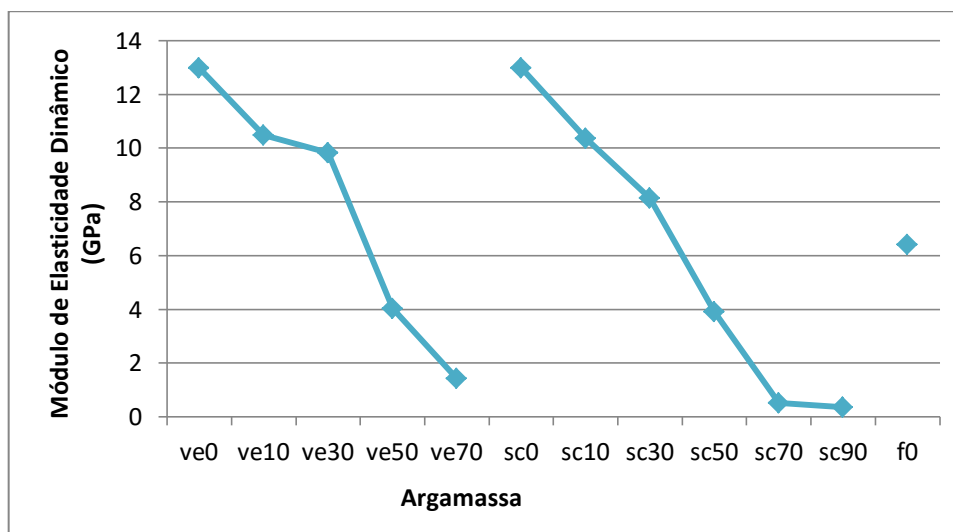
O resultado do módulo de elasticidade dinâmico médio de cada argamassa desta pesquisa está descrito na tabela 17, já a representação gráfica do comportamento desta propriedade em função do teor de substituição e do tipo de material está presente na figura 45.

Tabela 17 – Módulo de elasticidade dinâmico médio das argamassas

Módulo de Elasticidade Dinâmico (NBR 15.630/2009)		
Argamassa	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)	
	Média	Desvio Padrão
ve0	12,98	0,76
ve10	10,48	0,38
ve30	9,84	0,28
ve50	4,02	0,13
ve70	1,43	0,05
sc0	12,98	0,76
sc10	10,36	0,13
sc30	8,14	0,40
sc50	3,91	0,06
sc70	0,52	0,01
sc90	0,35	0,01
f0	6,42	0,15

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 45 – Comportamento do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material



(fonte: elaborado pelo autor)

Com base na figura 45, verifica-se a queda do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento nos teores de substituição do agregado miúdo natural pelos agregados leves empregados. Como o módulo de elasticidade dinâmico está diretamente vinculado com a densidade do meio, tanto a densidade de massa aparente quanto o índice de vazios das argamassas afetam estas propriedades. Partindo disso, observa-se que o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico é decrescente para valores crescentes de teores de substituição, o que implica, como já mencionado, também no aumento do índice de vazios (figura 38) e a redução da densidade de massa aparente (figura 43), indicando meios cada vez menos densos. Ressalva-se que a proximidade de resultados entre as argamassas sc70 e sc90, mesmo com diferenças no índice de vazios e na densidade, tem como hipótese que os efeitos dos vazios e da densidade do meio são mais reduzidos graças aos valores extremos obtidos a partir de argamassa com teores acima de 70% de substituição para este material. A argamassa industrializada novamente está situada entre os resultados obtidos para as argamassas com substituição de 30% e 50%.

Na tabela 18, está descrito o resultado obtido pela ANOVA sobre o módulo de elasticidade dinâmico, o qual indica que o tipo de material, o teor de substituição e a interação entre estes dois fatores influenciam significativamente a propriedade em questão.

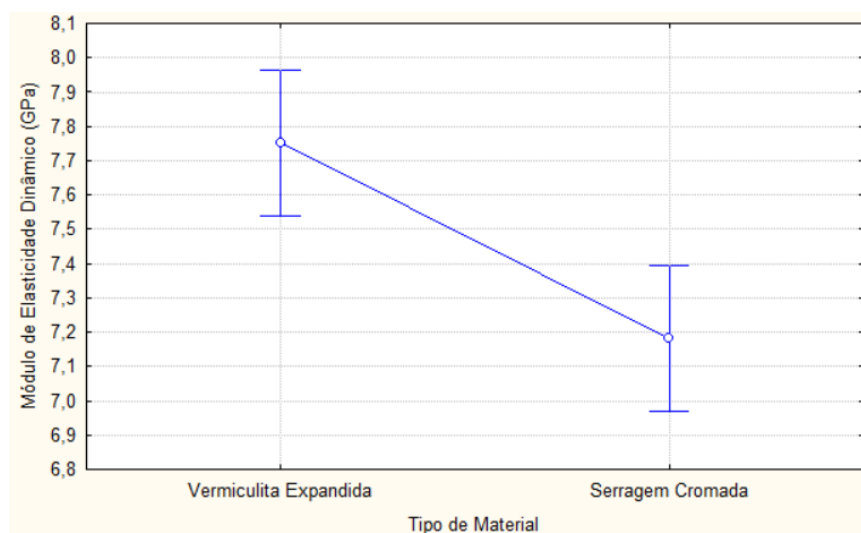
Tabela 18 – ANOVA: resultados do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas

Módulo de Elasticidade Dinâmico (NBR 15.630/2009)						
Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias Quadradas	Teste F	p-nível	Significância
Tipo de Material	2,44	1	2,44	15,55	0,0008	Sim
Teor de Substituição (%)	575,46	4	143,87	915,22	0,0000	Sim
Teor de Substituição (%) / Tipo de Material	3,21	4	0,80	5,10	0,0053	Sim
Erro	3,14	20	0,16	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 46 aponta que para as argamassas moldadas com substituição de areia natural por vermiculita expandida, obtiveram-se os maiores módulos de elasticidade dinâmicos, mesmo que o índice de vazios foi maior para estas argamassas em comparação com as moldadas com serragem cromada (figura 39). Este comportamento pode estar associado com a dispersão dos agregados leves na matriz cimentícia, pela capacidade de propagação de ondas ultrassônicas pelos mesmos e pelo fato de que os valores do módulo se diferiram mais nos teores com substituição de 30% e 70% (figura 45), justamente nos teores onde a densidade de massa aparente das argamassas com vermiculita foram superiores aos obtidos para as moldadas com serragem cromada (figura 44).

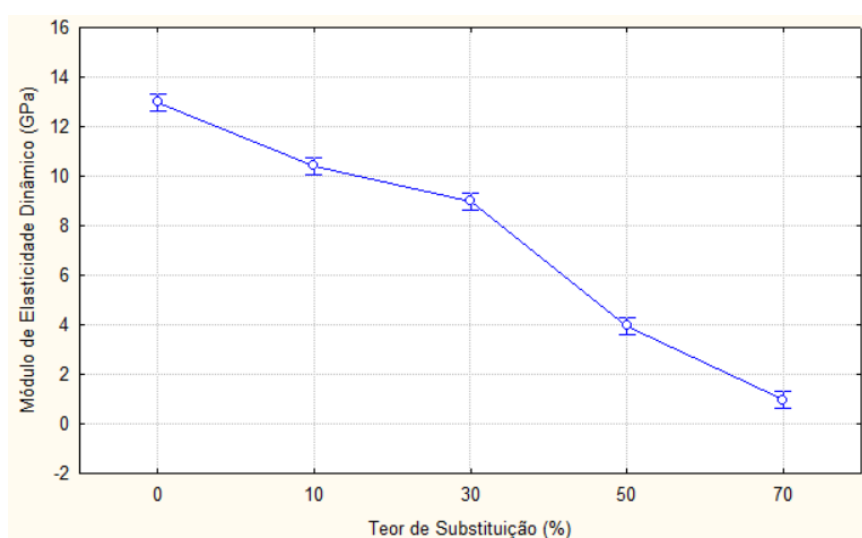
Figura 46 – Influência do tipo de material no módulo de elasticidade dinâmica das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

Como esperado, através da figura 47, avalia-se que os módulos de elasticidade dinâmicos decrescem à medida que os teores de substituição aumentam. Além disso, para substituições a acima de 30%, a queda do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas é acentuada, mesmo comportamento obtido para as propriedades do índice de vazios e da densidade de massa aparente, onde foi acentuado o acréscimo e a redução, respectivamente, destas propriedades. Com isso, os menores módulos obtidos correspondem às argamassas com maiores teores de substituição e, conseqüentemente, com maiores índices de vazios e menores densidades de massa aparente, o que implica em meios menos densos e de maior porosidade.

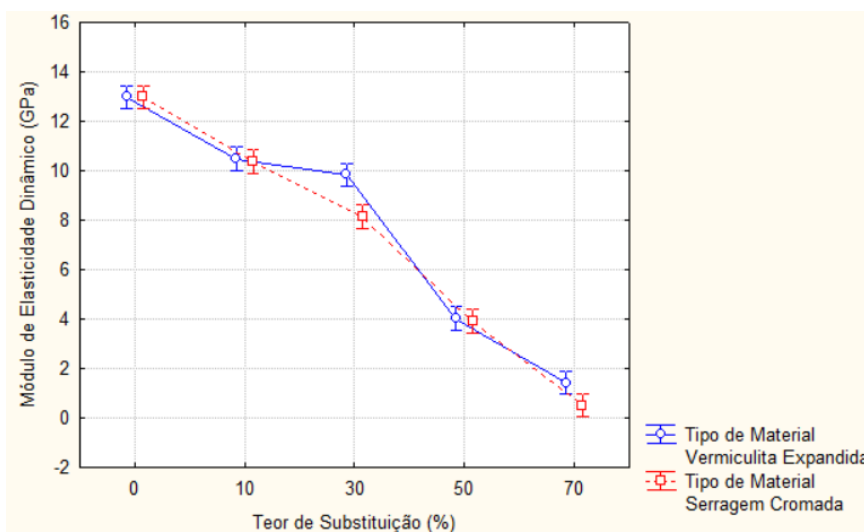
Figura 47 – Influência do teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmica das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

Para concluir, na figura 48 está apresentada a influência da interação entre o tipo de material e teor de substituição sobre o módulo de elasticidade dinâmica. Verifica-se que o comportamento, já mencionado, da queda do módulo de elasticidade dinâmica em função do aumento dos teores de substituição. Além disso, é evidente que a interação entre os fatores apresentados altera o comportamento das argamassas utilizadas nesta pesquisa, graças à influência significativa na variável dependente em questão. Observa-se que nos teores de 30% e 70%, as argamassas com vermiculita expandida apresentaram valores significativamente mais elevados do que as moldadas com serragem cromada, reafirmando o apontamento mencionado anteriormente de que o tipo de material é um fator significativo.

Figura 48 – Influência do tipo de material e do teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.4 Resistência à Tração na Flexão

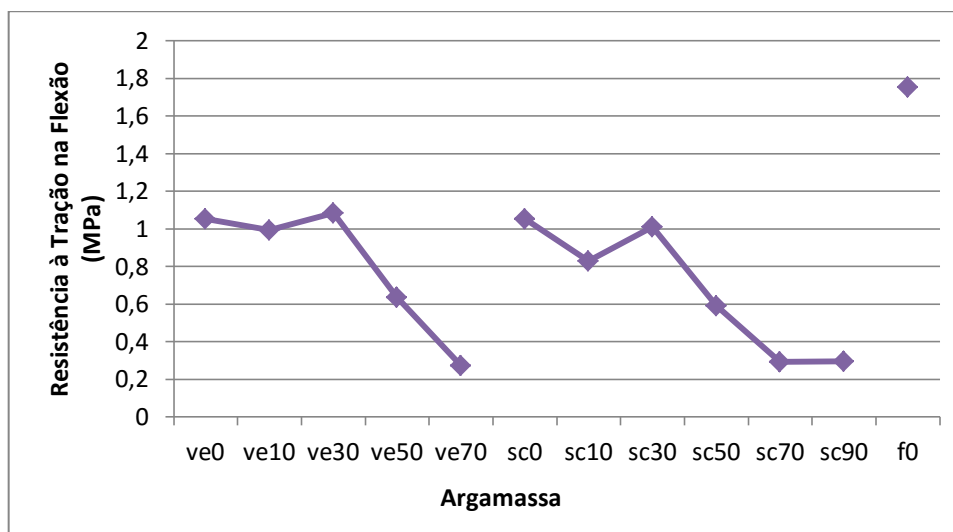
A resistência à tração na flexão média das argamassas empregadas neste trabalho está apresentada na tabela 19, já o comportamento destas propriedades em função do teor de substituição e do tipo de material está ilustrado na figura 49.

Tabela 19 – Resistência à tração na flexão média das argamassas

Resistência à Tração na Flexão (NBR 13.279/2005)		
Argamassa	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	
	Média	Desvio Padrão
ve0	1,05	0,05
ve10	0,99	0,12
ve30	1,09	0,03
ve50	0,64	0,06
ve70	0,27	0,02
sc0	1,05	0,05
sc10	0,83	0,00
sc30	1,01	0,01
sc50	0,59	0,02
sc70	0,29	0,04
sc90	0,30	0,02
f0	1,75	0,13

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 49 – Comportamento da resistência à tração na flexão das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material



(fonte: elaborado pelo autor)

Com base na figura 49, constata-se que na medida em que houve a substituição da areia natural pelos agregados leves houve uma redução na resistência à tração na flexão, tal comportamento é motivado pela relação entre a resistência mecânica com o índice de vazios e a densidade das argamassas. Com isso, o aumento do índice de vazios e a redução da densidade de massa aparente, ambos motivados pela incorporação dos agregados leves desta pesquisa, implicaram na redução da resistência à tração na flexão destas argamassas. Este comportamento é similar ao encontrado em pesquisas que incorporaram diferentes agregados leves na matriz cimentícia de argamassas (BORGES, 2015; RIBEIRO, R. et al., 2005; ZUCHETTO et al., 2015b).

Todavia, para ambos os materiais, é evidente que no teor de 30% de substituição houve um acréscimo na resistência à tração, cujo resultado se aproxima do valor obtido para a argamassa de referência. Este resultado pode ser explicado pelo proporcionamento dos materiais empregados. Segundo Recena (c2012), é possível aumentar a resistência mecânica das argamassas através da mistura de agregados, a fim de obtenção de uma granulometria mais contínua, melhorando a composição granulométrica. De acordo com Rossignolo (c2009), a partir de certo limite o agregado leve se torna o agente determinante da resistência mecânica. Com isso, verifica-se que para teores mais elevados, a resistência à tração das argamassas tem comportamento decrescente, até o ponto em que a adição de agregados leves determina a tração “limite”, a partir da qual adições superiores tendem a não alterar bruscamente a resistência de aderência à tração, conforme observado para as argamassas sc70 e sc90.

Em relação à argamassa industrializada, é possível verificar que mesmo com o índice de vazios e densidade de massa aparente compreendido entre as argamassas dosadas com teores de substituição entre 30% e 50%, a resistência à tração foi superior inclusive à obtida para a argamassa com teor de 0%. Tal comportamento pode ser explicado possivelmente pela composição granulométrica do produto ensacado, além da presença de fibras naturais e artificiais. Outra hipótese possível é a ordem de mistura dos componentes, visto que a água foi adicionada após a mistura do produto ensacado com o cimento. Já para a mistura das argamassas dosadas em laboratório, a água foi adicionada apenas ao cimento e sendo o restante do material adicionado em seguida. Com isso, pode-se ter alterado a absorção de água pelos agregados empregados, possibilitando diferentes quantidades de água para a hidratação do cimento.

A tabela 20 apresenta o resultado da ANOVA, na qual se verifica que há influência significativa do tipo de material e do teor de substituição sobre a resistência à tração na flexão das argamassas empregadas. Já a interação entre estes fatores não influenciou a respectiva propriedade em análise.

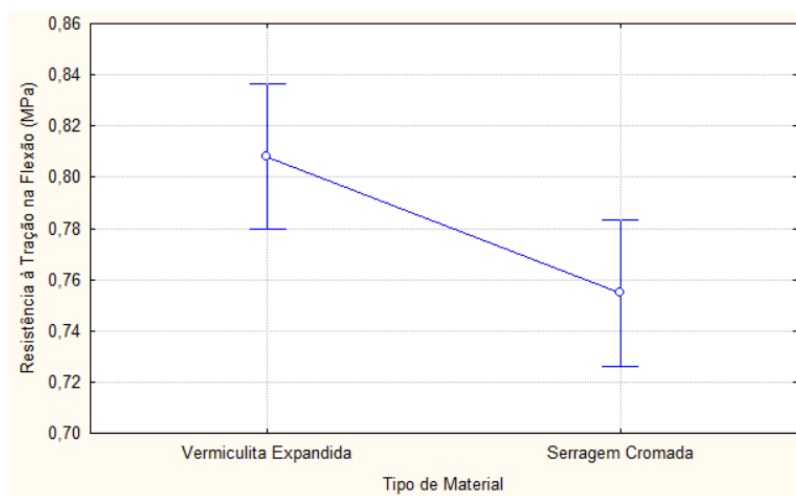
Tabela 20 – ANOVA: resultados da resistência à tração na flexão das argamassas

Resistência à Tração na Flexão (NBR 13.279/2005)						
Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias Quadradas	Teste F	p-nível	Significância
Tipo de Material	0,02	1	0,02	7,84	0,013	Sim
Teor de Substituição (%)	2,17	4	0,54	238,54	0,000	Sim
Teor de Substituição (%) / Tipo de Material	0,03	4	0,01	2,86	0,058	Não
Erro	0,04	16	0,00			-

(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a figura 50, em comparativo com a serragem cromada, a adição de vermiculita expandida na matriz cimentícia das argamassas resultou em valores maiores de resistência à tração. Em geral, para os teores passíveis de comparação, os resultados foram realmente maiores para as argamassas com incorporação de vermiculita expandida, com exceção da sc70 que apresentou um resultado ligeiramente superior a ve70 (figura 49). Mas de maneira geral os resultados para argamassas com diferentes tipos de materiais em questão são relativamente próximos, mas com a ressalva que o tipo de material influenciar significativamente a resistência à tração das argamassas deste estudo.

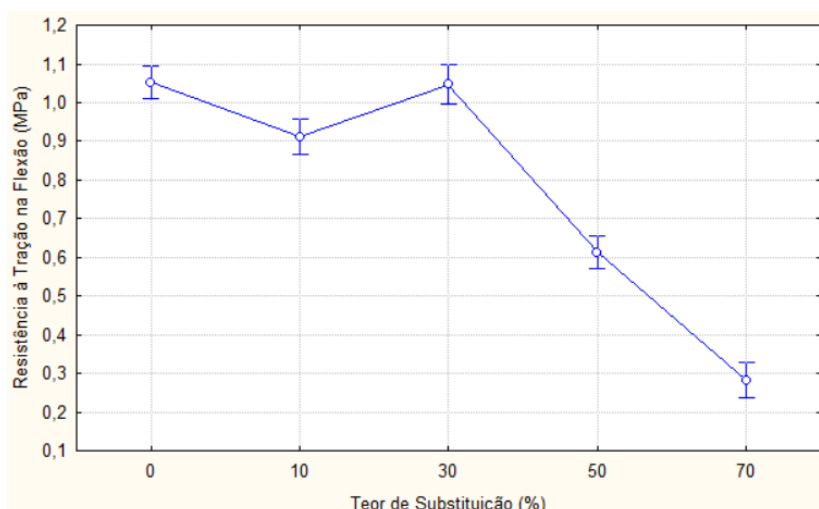
Figura 50 – Influência do tipo de material na resistência à tração na flexão das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 51 é comprovado que o teor de substituição e a resistência à tração na flexão têm dependência inversa. Com isso, para maiores teores de substituição, menores foram às resistências à tração obtidas pelos motivos, já mencionados, como o aumento do índice de vazios e a redução da densidade de massa aparente das argamassas. No entanto, reitera-se a exceção obtida para as argamassas com teor de substituição de 30%, onde houve um acréscimo da resistência à tração, cujas causas prováveis foram mencionadas anteriormente. As quedas mais bruscas na resistência à tração ocorreram para os teores de substituição acima de 30%, comportamento semelhante ao encontrado para o acréscimo do índice de vazios, a redução da densidade de massa aparente e a redução do módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 51 – Influência do teor de substituição na resistência à tração na flexão das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.5 Resistência à Compressão

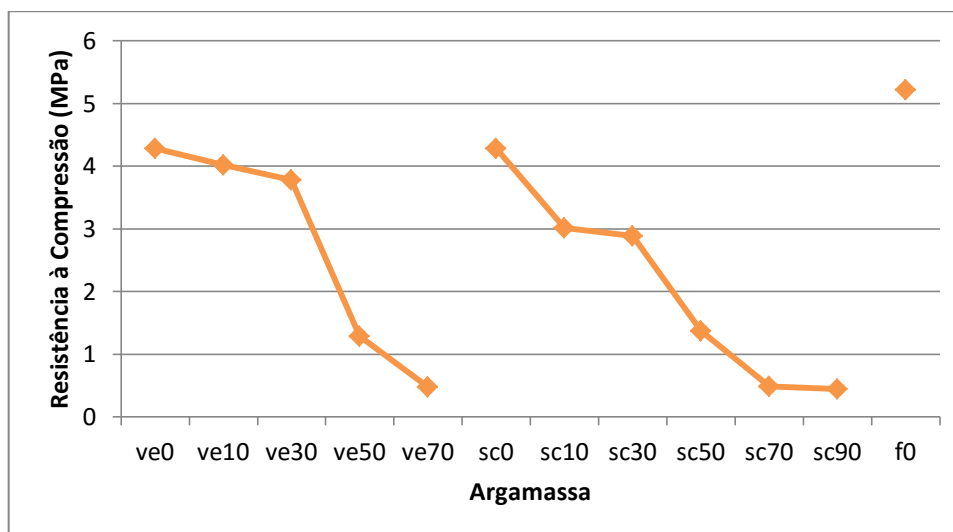
O valor médio da resistência à compressão de cada argamassa desta pesquisa está indicado na tabela 21, já o comportamento desta propriedade em função do teor de substituição e do tipo de material está apresentado na figura 52.

Tabela 21 – Resistência à compressão média das argamassas

Resistência à Compressão (NBR 13.279/2005)		
Argamassa	Resistência à Compressão (MPa)	
	Média	Desvio Padrão
ve0	4,28	0,32
ve10	4,02	0,30
ve30	3,78	0,31
ve50	1,28	0,12
ve70	0,48	0,06
sc0	4,28	0,32
sc10	3,01	0,25
sc30	2,88	0,16
sc50	1,38	0,22
sc70	0,49	0,03
sc90	0,44	0,04
f0	5,22	0,25

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 52 – Comportamento da resistência à compressão das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material



(fonte: elaborado pelo autor)

A partir da figura 52, verifica-se que da mesma maneira que a resistência à tração na flexão, a substituição do agregado miúdo natural por ambos agregados leves implicou na redução da resistência à compressão. Com base nesta constatação, é evidente o vínculo de ambas as resistências com o índice de vazios e a densidade de massa aparente das argamassas. Este comportamento é descrito tanto por Gregório e Lintz (2009), ao considerar a incorporação de vermiculita expandida em argamassas, quanto por Fujikawa (2002), ao levar em conta a incorporação da serragem cromada em concretos. Complementarmente, pesquisas com outros agregados leves incorporados a argamassas indicam a mesma tendência (BEUTHER, 2015; BORGES, 2015; RIBEIRO, R. et al., 2005; SILVA, J., 2015; ZUCHETTO et al., 2015b). Novamente, é observado que entre as argamassas sc70 e sc90, a adição de mais resíduo não implicou em uma queda brusca da resistência à compressão, devido ao “limite” de adição citado anteriormente.

Em relação à argamassa industrializada, assim como nos resultados de resistência à tração na flexão, a resistência à compressão foi superior a todas as outras argamassas empregadas neste estudo, mesmo que o índice de vazios e a densidade de massa aparente estiveram compreendidos entre os resultados obtidos para as argamassas com teores substituição de 30% e 50%. As possíveis causas para este comportamento são similares às descritas para o caso da resistência a tração, mas neste caso, a incorporação de fibras naturais e artificiais possivelmente não propiciam ganhos na resistência à compressão, graças à maneira que a solicitação é aplicada nos corpos de prova.

A tabela 22 apresenta o resultado ANOVA sobre a resistência à compressão e indica que existe influência significativa do tipo de material do teor de substituição sobre a resistência à compressão das argamassas desta pesquisa. Diferentemente da análise estatística da resistência à tração na flexão, neste caso a interação entre estes fatores influenciou a resistência à compressão das argamassas.

Tabela 22 – ANOVA: resultados da resistência à compressão das argamassas

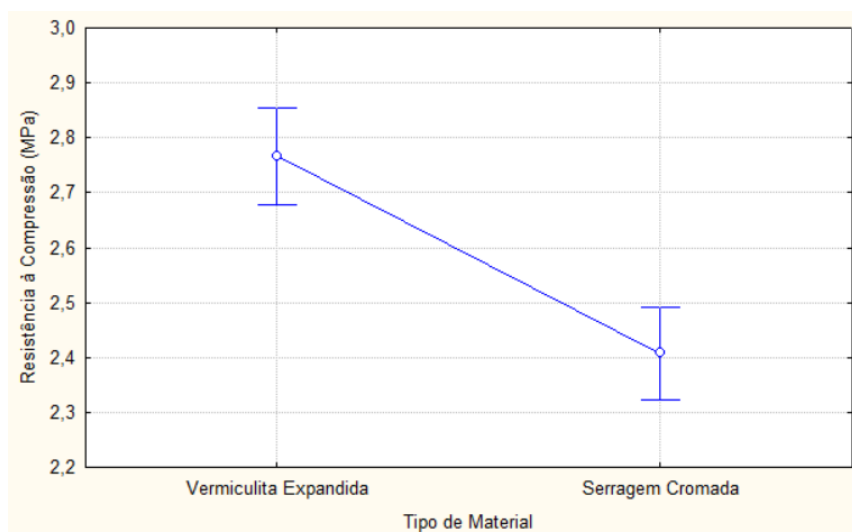
Resistência à Compressão (NBR 13.279/2005)						
Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias Quadradas	Teste F	p-nível	Significância
Tipo de Material	1,79	1	1,79	34,94	0,0000	Sim
Teor de Substituição (%)	115,77	4	28,94	565,67	0,0000	Sim
Teor de Substituição (%) / Tipo de Material	3,26	4	0,81	15,92	0,0000	Sim
Erro	2,35	46	0,05			-

(fonte: elaborado pelo autor)

Com base na figura 53, observa-se que o comportamento é similar ao obtido na análise de resistência à tração na flexão (figura 50), visto que os resultados da resistência à compressão foram maiores para as argamassas moldadas com vermiculita expandida, em comparativo quando a serragem cromada foi incorporada. Este comportamento é mantido para as argamassas com 10% e 30% de agregado leve em substituição da areia (figura 52), já para os teores mais elevados os resultados foram levemente superiores para as argamassas com serragem cromada. Levando em consideração o índice de vazios (figura 41), é evidente que a partir de teores de substituição de 30% este índice é mais consideravelmente mais elevado para as argamassas com vermiculita expandida, o que pode indicar a queda da resistência à compressão para valores mais baixos do que os obtidos para argamassas com serragem cromada.

Já para os teores de 10% e 30%, sendo o índice de vazios mais próximo para ambas as argamassas (figura 41), conclui-se que a resistência à compressão e, inclusive, a resistência à tração são mais elevadas para as argamassas com vermiculita expandida, provavelmente por causa da resistência do próprio agregado leve quanto incorporado a matriz cimentícia e possivelmente por uma melhoria na composição granulométrica das argamassas em relação as moldadas com serragem cromada.

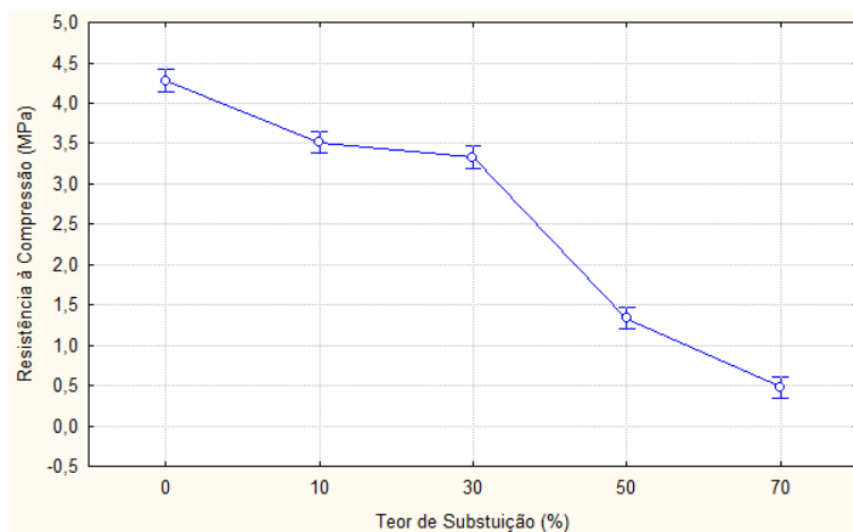
Figura 53 – Influência do tipo de material na resistência à compressão das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

Como já citado anteriormente, o teor de substituição e a resistência à compressão são inversamente dependentes, assim como para a resistência à tração na flexão. De acordo com a figura 54, observa-se este comportamento e como já esperado, as maiores quedas da resistência à compressão ocorreram a partir do teor de substituição de 30%, esta tendência de variações acentuadas foi observada, a partir deste teor, para o índice de vazios, densidade de massa aparente, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão. Como mencionado nos resultados da resistência à tração na flexão, para o teor de substituição de 30% houve um acréscimo na resistência (figura 51), ao contrário do que era esperado. No caso da análise sobre os resultados de resistência à compressão, não houve um acréscimo de resistência para o teor de 30%, mas observa-se (figura 54) que a menor queda na resistência à compressão ocorreu entre os teores de 10% e 30%, indicando que as possíveis causas descritas para a resistência a tração são similares para o comportamento da resistência à compressão neste teor.

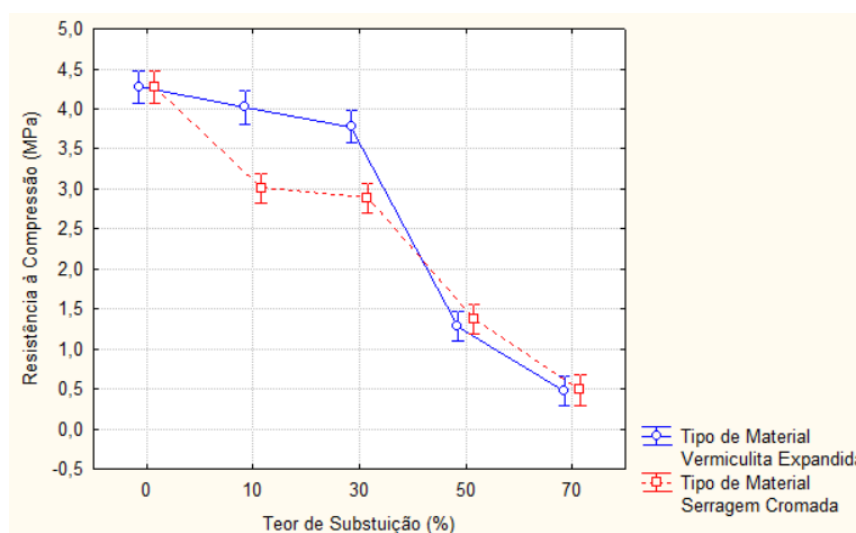
Figura 54 – Influência do teor de substituição na resistência à compressão das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

Por fim, a figura 55 ilustra a interação entre o tipo de material e o teor de substituição, na qual é possível avaliar que a interação implica em uma mudança de comportamento na resistência à compressão das argamassas, o que indica há inexistência de padronização dos resultados em função da interação. Com base na figura 55 é possível rever em um único local todas as considerações feitas anteriormente para justificar o comportamento tanto do tipo de material quanto do teor de substituição sobre a resistência à compressão.

Figura 55 – Influência do tipo de material e do teor de substituição na resistência à compressão das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

De forma geral, as propriedades físicas e mecânicas das argamassas deste estudo são afetadas tanto pelo índice de vazios quanto pela densidade de massa aparente, ambos influenciados pela incorporação dos agregados leves empregados neste estudo. Sendo que para todos os resultados de caracterização das argamassas analisados pela ANOVA, o teor de substituição do agregado miúdo natural pelos agregados leves empregados influenciou significativamente todas as propriedades físicas e mecânicas analisadas destas argamassas.

É importante reiterar que os teores de substituição acima de 30% resultaram em acentuadas alterações nas propriedades físico-mecânicas, com destaque para as resistências mecânicas. Com base na tabela 23, avalia-se que a partir do teor de substituição de 30%, a resistência à tração na flexão sofre reduções acima de 39% e 72% para argamassas com teores de substituição de 50% e 70%, ambas em comparação com a argamassa de referência. Já a resistência à compressão, para estes teores, respectivamente, tem decréscimos acima de 67% e 88%. É evidente que, para estas argamassas, o teor de 30% é definido como um limiar para as propriedades físico-mecânicas, já que as principais alterações ocorrem a partir deste teor de substituição, resultando inclusive em resistências mecânicas consideravelmente baixas. Apesar do questionamento em relação às resistências mecânicas das argamassas com teores de substituição acima de 30%, a ausência de condicionantes para argamassas de contrapiso, principalmente em relação às resistências mínimas, limita as conclusões em relação às propriedades em questão, mas é possível verificar claramente o limiar destacado acima.

Tabela 23 – Variação das resistências mecânicas das argamassas, em relação à argamassa de referência

Argamassa	Resistência à Tração na Flexão (MPa)		Resistência à Compressão (MPa)	
	Média	Variação	Média	Variação
ve0	1,05	0,00%	4,28	0,00%
ve10	0,99	-5,57%	4,02	-6,08%
ve30	1,09	3,12%	3,78	-11,72%
ve50	0,64	-39,50%	1,28	-70,00%
ve70	0,27	-74,09%	0,48	-88,90%
sc0	1,05	0,00%	4,28	0,00%
sc10	0,83	-21,16%	3,01	-29,57%
sc30	1,01	-4,12%	2,88	-32,58%
sc50	0,59	-43,95%	1,38	-67,84%
sc70	0,29	-72,16%	0,49	-88,63%
sc90	0,30	-71,79%	0,44	-89,69%

(fonte: elaborado pelo autor)

Por fim, verifica-se que, paralelamente ao aumento dos teores de substituição, ocorre o aumento da relação água/cimento utilizada para a moldagem das argamassas. Estes acréscimos tendem a aumentar a porosidade da argamassa, graças ao processo de evaporação da água em excesso durante a cura, implicando na introdução de vazios responsáveis por reduzir as propriedades físicas e mecânicas das argamassas, como: densidade de massa aparente, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração na flexão e à compressão.

6.2 ENSAIO DE RIGIDEZ DINÂMICA

A tabela 24 apresenta o valor médio tanto da frequência de ressonância quanto da rigidez dinâmica calculada para cada argamassa empregada nesta pesquisa. É importante alertar que por causa do alto índice de variabilidade dos resultados, os mesmos foram selecionados de acordo com o critério descrito na sequência. Para cada argamassa foi estipulado um coeficiente de variação máximo de 15% em relação aos valores de rigidez dinâmica, este valor foi baseado na pesquisa de Neves et al. (2008), cujo desvio padrão máximo adotado foi de 10%. Frente à elevada variabilidade dos resultados desta pesquisa, foi estipulado o limite descrito de 15%. Em caso de extrapolação do coeficiente de variação limite, o resultado de rigidez dinâmica com maior percentual em relação à média foi desconsiderado, além de valores com comportamentos incoerentes do ponto de vista dos autores desta pesquisa. Com isso, foi possível reduzir o coeficiente de variação para cada argamassa dentro dos limites estipulados neste estudo, com a exceção das argamassas ve10 e sc50, cuja variabilidade e limitação do número de dados implicaram em coeficientes de variação acima deste limite.

Tabela 24 – Média da frequência de ressonância e rigidez dinâmica das argamassas

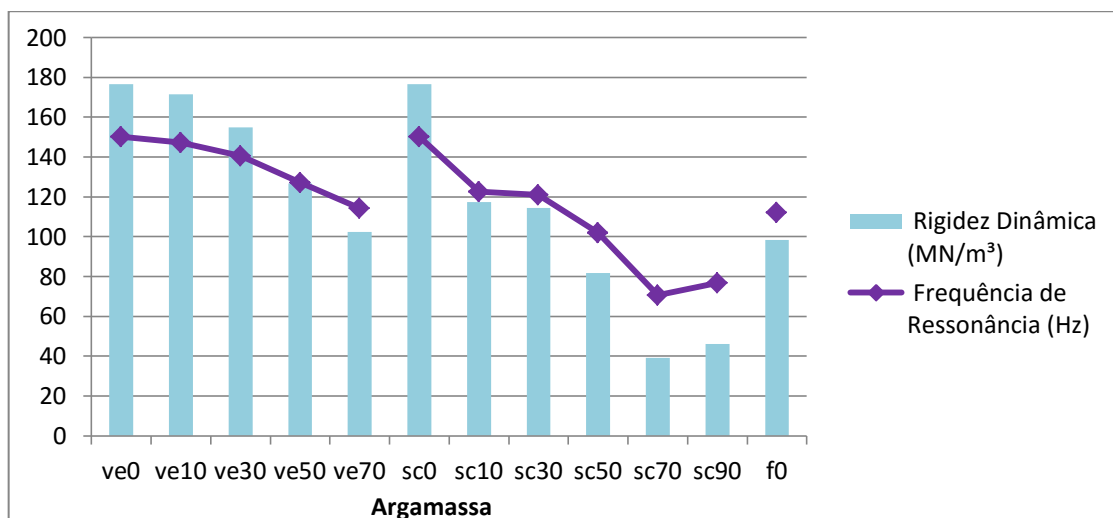
Argamassa	Rigidez Dinâmica (ISO 9.052-1/1989)			
	Frequência de Ressonância (Hz)		Rigidez Dinâmica (MN/m ³)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
ve0	150,30	5,83	176,69	13,78
ve10	147,25	22,84	171,46	52,56
ve30	140,67	6,66	154,84	14,49
ve50	127,25	4,88	126,62	9,70
ve70	114,25	8,13	102,25	14,52
sc0	150,30	5,83	176,69	13,78
sc10	122,50	1,27	117,26	2,44
sc30	120,95	6,01	114,45	11,36
sc50	102,00	10,18	81,70	16,23
sc70	70,70	1,98	39,07	2,19
sc90	76,85	3,89	46,21	4,67
f0	112,20	5,37	98,48	9,42

(fonte: elaborado pelo autor)

O gráfico proveniente dos resultados médios da frequência de ressonância e da rigidez dinâmica é apresentado na figura 56 e demonstra o comportamento destas propriedades em função do teor de substituição e do tipo de material. Como esperado, visto que a rigidez dinâmica é calculada com base na frequência de ressonância das amostras de contrapiso, observa-se que ambas tem o mesmo comportamento. Avalia-se que, em geral, a adição de teores de substituição do agregado miúdo, tanto pela vermiculita expandida quanto pela serragem cromada, induziram a redução da frequência de ressonância do sistema e, conseqüentemente, da rigidez dinâmica. Com isso, os menores valores de rigidez dinâmica correspondem às argamassas com teores mais elevados de substituição. É importante reiterar que a redução da rigidez dinâmica implica no aumento do potencial de atenuação de ruídos de impacto das amostras, quando aplicadas em sistemas massa-mola, ou seja, em pisos flutuantes.

No comparativo com a argamassa industrializada, apenas as argamassas com serragem cromada com teores de substituição a partir 50% tiveram menor rigidez dinâmica que esta argamassa. Por parte das argamassas com vermiculita expandida, para o teor de 70%, a rigidez dinâmica foi a mais próxima e ligeiramente acima do valor obtido para a argamassa industrializada.

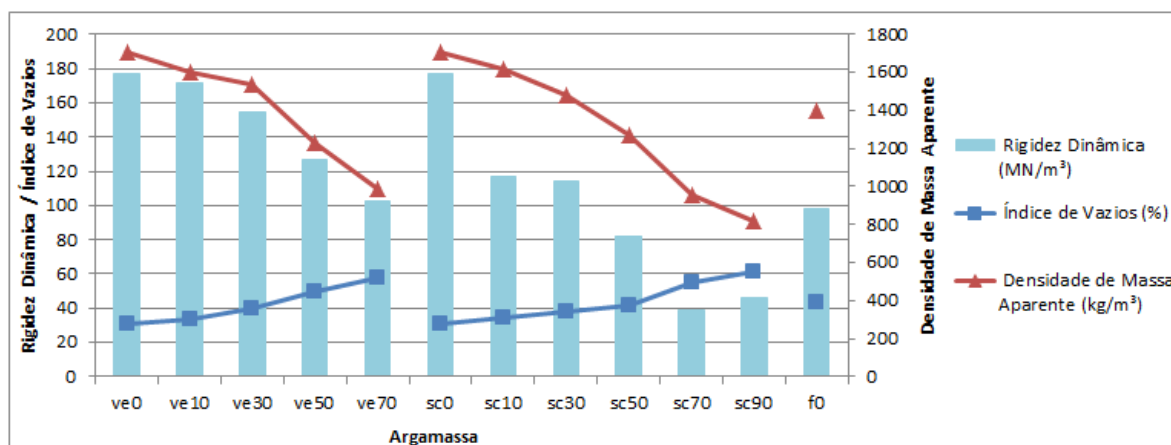
Figura 56 – Comportamento da frequência de ressonância e da rigidez dinâmica das argamassas em função do teor de substituição e do tipo de material



(fonte: elaborado pelo autor)

A fim de facilitar o entendimento do comportamento da rigidez entre as argamassas, o gráfico apresentado na figura 57 relacionada à rigidez dinâmica com duas propriedades físicas das argamassas, o índice de vazios e a densidade de massa aparente.

Figura 57 – Relação entre a rigidez dinâmica, o índice de vazios e a densidade de massa aparente das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

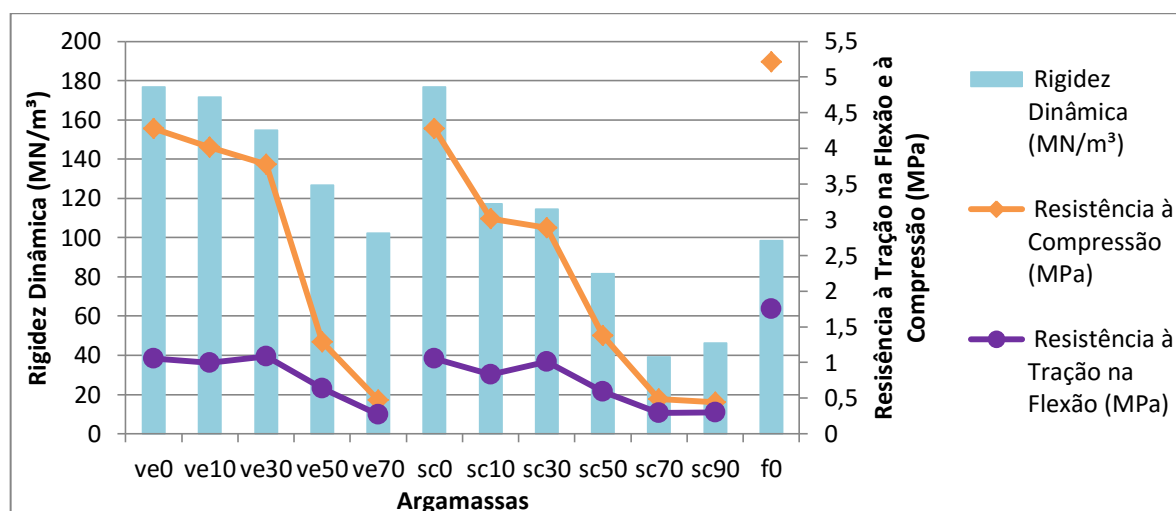
Com base na figura 57, constata-se que a incorporação de agregados leves nas argamassas promove a redução da densidade de massa aparente das mesmas, juntamente com o acréscimo no índice de vazios. Com isso, a rigidez dinâmica das argamassas, em geral, tende a reduzir, implicando em melhorias nas propriedades acústicas, levando em conta os agregados leves

empregados neste estudo. Tal comportamento está de acordo com as conclusões obtidas em pesquisas que também avaliaram a rigidez dinâmica de argamassas com incorporação de agregados leves (BORGES, 2015; ZUCHETTO et al., 2015a).

A única exceção ao comportamento em discussão pode ser observada entre as argamassas sc70 e sc90, visto que mesmo com o aumento do índice de vazios e a redução da densidade de massa aparente, a argamassa sc90 teve uma rigidez dinâmica imediatamente maior que a obtida para a sc70. Esta distinção pode estar vinculada com a variabilidade do ensaio. De qualquer maneira, como os resultados são relativamente próximos, ainda mais ao ser levando em consideração o desvio padrão, foi admitido que ambas as misturas apresentam valores semelhantes de rigidez dinâmica. Por fim, é possível verificar, inclusive, para a argamassa industrializada que as propriedades físicas em questão influenciaram a rigidez dinâmica, em comparação com a argamassa de referência.

Pela figura 58, considerando as argamassas dosadas em laboratório, observa-se que as menores resistências mecânicas estão associadas às amostras com os menores valores de rigidez dinâmica, ou seja, amostras com maiores potenciais para atenuação de ruídos de impacto. Tal tendência é consequência da influência dos teores de substituição e do tipo de material nestas propriedades, como citado anteriormente. Por isso, salienta-se que apesar da melhoria no desempenho acústico, a incorporação de agregados leves nas argamassas implicou na queda das resistências mecânicas das argamassas, em relação à composição de referência.

Figura 58 – Relação entre a rigidez dinâmica e as resistências mecânicas das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

Como abordado anteriormente, as resistências mecânicas decrescem acentuadamente a partir dos teores de substituição de 30%. Do ponto de vista das resistências mecânicas, o teor de substituição de 30% tende a representar o limiar tolerável de substituição para estas argamassas, a fim de limitar alterações substanciais nestas propriedades. Tal constatação se fortalece ao ser abordado noções técnicas, visto que o sistema proposto neste estudo é representado obrigatoriamente por camadas de contrapisos com base no sistema massa-mola. Considerando a parte técnica, espera-se que a camada de contrapiso moldada com as argamassas estudadas nesta pesquisa, cujo comportamento resiliente representa a mola do sistema, apresente compatibilidade com as propriedades mecânicas com o sistema como um todo. Com isso, argamassas com teores de substituição de 30% tendem a apresentar um comportamento mais favorável em relação à resistência mecânica, fissuração e durabilidade quando empregadas no sistema massa-mola, já que as propriedades físico-mecânicas sofreram menores variações em relação à argamassa de referência, além de apresentarem certo potencial de isolamento acústico, já que a rigidez dinâmica é inferior à amostra de referência.

Para argamassas com teores acima de 30% de substituição, é evidente que aliado à melhoria do potencial de atenuação de ruídos de impacto, através do decréscimo da rigidez dinâmica, há uma redução brusca nas propriedades mecânicas na mesma. No entanto, já que estas argamassas compõem apenas a camada resiliente do sistema, entende-se que é função da camada de contrapiso adicionada sobre estas argamassas resistir e distribuir os esforços para o

conjunto, além de desempenhar o papel de massa do sistema. Aliado a estas constatações, a ausência de limitações normatizadas e recomendações bibliográficas em relação às propriedades físico-mecânicas para argamassas de contrapiso, demonstram que há ainda um potencial de utilização das argamassas com melhores desempenhos acústicos, ou seja, argamassas com teores acima do limiar citado, com a ressalva que ensaios complementares são fundamentais para avaliar a fissuração e a durabilidade da camada resiliente, a fim de evitar descontinuidades futuras no sistema.

Por parte da argamassa industrializada, verifica-se que as resistências mecânicas foram superiores em relação argamassas dosadas em laboratório, mesmo a rigidez dinâmica estando próxima à obtida para as argamassas com teores mais elevados de substituição. Indicando assim, que os menores valores de rigidez dinâmica não estão obrigatoriamente associados a valores mais baixos de resistência mecânica, mostrando certa dependência com o índice de vazios e com a densidade de massa aparente das argamassas, além da influência do tipo de material nas propriedades acústicas das amostras.

Para avaliar a influência das variáveis de pesquisa, isoladamente e em conjunto, foi realizado a ANOVA sobre a rigidez dinâmica. A tabela 25 apresenta o resultado na análise estatística e aponta que o tipo de material e o teor de substituição influenciaram significativa a rigidez dinâmica das argamassas deste estudo. Já a interação entre ambos os fatores alterou significativa o comportamento da variável dependente em análise.

Tabela 25 – ANOVA: resultados da rigidez dinâmica das argamassas

Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias Quadradas	Teste F	p-nível	Significância
Tipo de Material	9129,77	1	9129,77	25,52	0,0002	Sim
Teor de Substituição (%)	30747,51	4	7686,88	21,49	0,0000	Sim
Teor de Substituição (%) / Tipo de Material	3111,20	4	777,80	2,17	0,1291	Não
Erro	4649,99	13	357,69			-

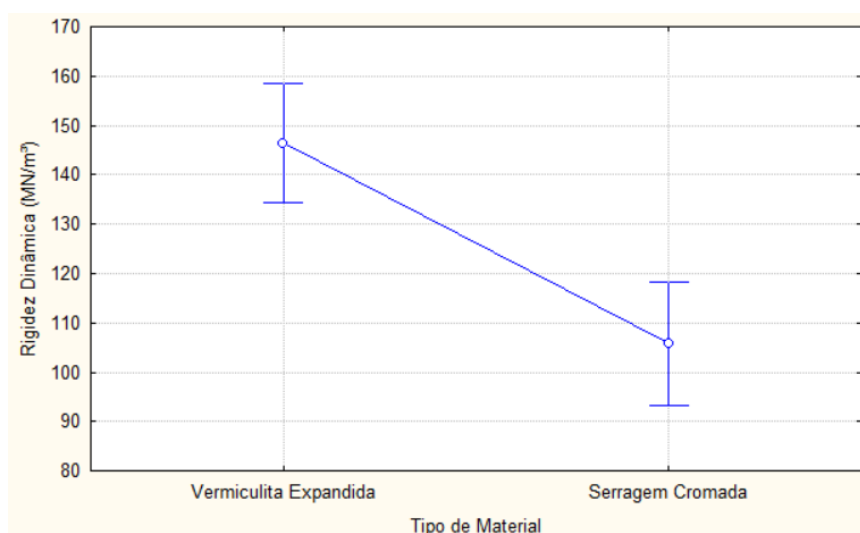
(fonte: elaborado pelo autor)

Pela figura 59, é possível concluir que os maiores valores de rigidez dinâmica estão contidos nas argamassas com vermiculita expandida. Partindo disso, entende-se que para estas argamassas o desempenho acústico para atenuação de ruído de impacto tende a ser inferior em relação às argamassas com serragem cromada. No entanto, com base na figura 57, verifica-se um comportamento bem definido da redução da rigidez dinâmica, com o acréscimo nos teores

de substituição, tanto em relação às amostras de referência quanto à amostra com teor de substituição imediatamente anterior. Portanto, para as argamassas com vermiculita expandida, o melhor resultado do ponto de vista do isolamento acústico de ruído de impacto é o referente à argamassa ve70, cujo índice de vazios é superior e a densidade de massa aparente é inferior tanto em relação à referência quanto em comparação com as outras moldadas com este material.

Por conseguinte, os menores resultados de rigidez dinâmica são observados para as amostras moldadas com argamassas com adição de serragem cromada. Como ilustrado na figura 59, a argamassa com vermiculita expandida com menor rigidez dinâmica, com teor de substituição de 70%, superou apenas as argamassas com serragem cromada nos teores substituição de 10% e 30% no quesito de desempenho acústico. Em relação exclusivamente as amostras com serragem cromada, é possível verificar que as argamassas sc10 e sc30 apresentam valores praticamente semelhantes, considerando o desvio padrão, mesmo comportamento observado para as argamassas sc70 e sc90, cuja menção foi realizada anteriormente. Por fim, verifica-se que o maior potencial para atenuação de ruído de impacto em um sistema de piso flutuante é observado para a argamassa sc70, estando a sc90 com um comportamento levemente inferior, se não for considerado o desvio padrão.

Figura 59 – Influência do tipo de material na rigidez dinâmica das argamassas



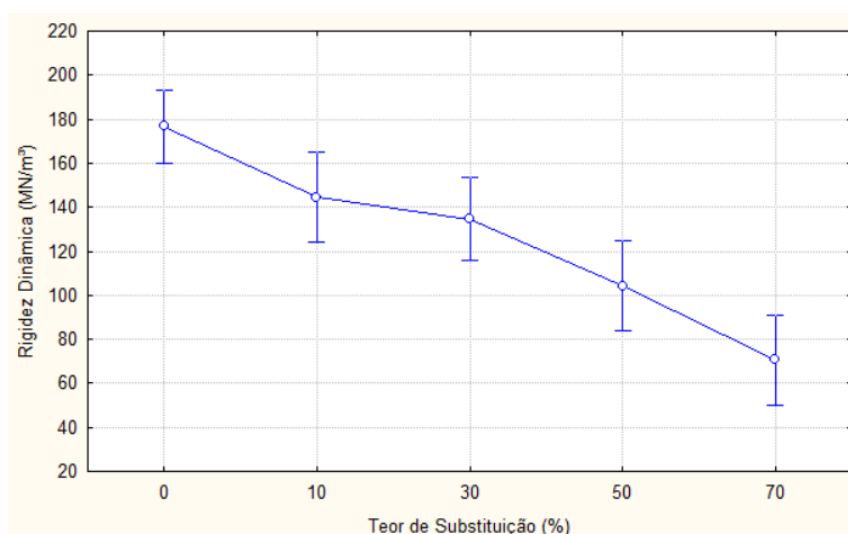
(fonte: elaborado pelo autor)

Portanto, é evidente a influência do tipo de material na rigidez dinâmica, mesmo com a proximidade do índice de vazios e da densidade de massa aparente entre amostras moldadas

com vermiculita expandida e serragem cromada. Esta constatação é compatível, visto que a frequência de ressonância de uma amostra depende diretamente das características naturais dos materiais que compõem a mesma. Com isso, era esperado que as argamassas moldadas com os mesmos teores, mas com agregados leves diferentes, apresentassem valores diferentes de frequência de ressonância e, conseqüentemente, de rigidez dinâmica. Esta tendência foi observada inclusive em relação à argamassa industrializada, em comparação com as argamassas dosadas com valores próximos de índice de vazios e densidade de massa aparente desta argamassa (figura 59).

Apenas para ilustrar, a figura 60 apresenta a influência do teor de substituição na rigidez dinâmica. Como amplamente discutido durante esta análise, os melhores resultados do ponto de vista acústico foram obtidos para as argamassas com os maiores teores de substituição, já que para estes teores, tanto a frequência de ressonância quanto a rigidez dinâmica assumiram os menores resultados.

Figura 60 – Influência do teor de substituição na rigidez dinâmica das argamassas

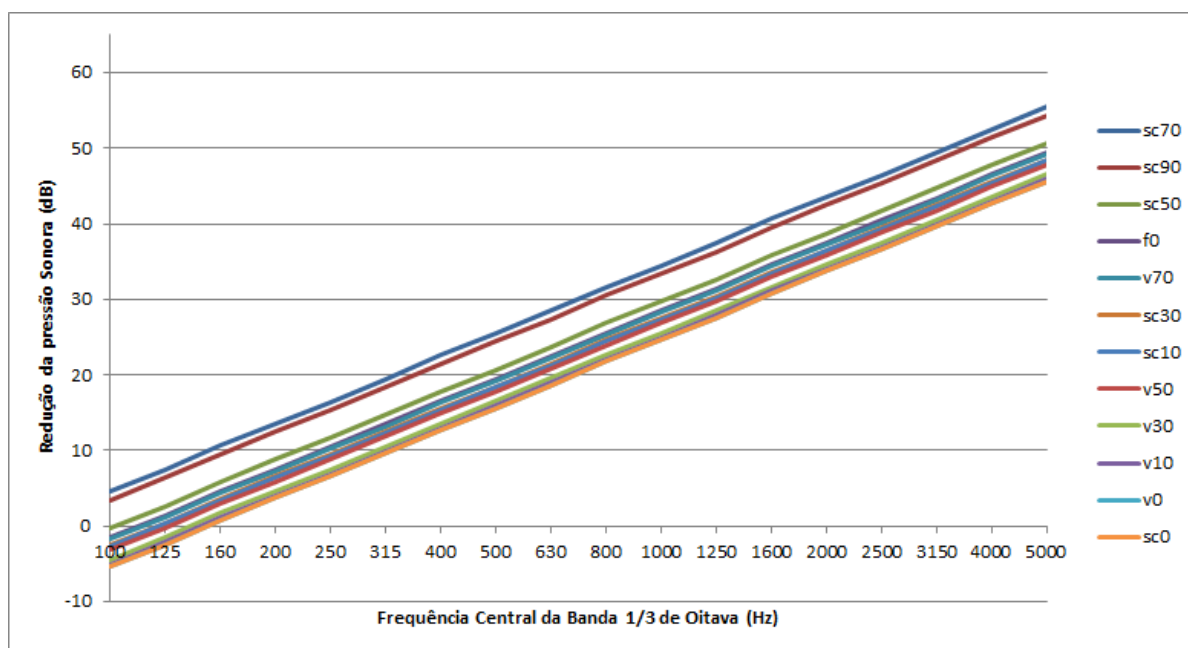


(fonte: elaborado pelo autor)

Como descrito no capítulo relativo à normalização brasileira, mais precisamente no item referente à normalização internacional, é possível estimar a redução do nível de pressão sonora para ruídos de impacto em sistemas de piso flutuante, com base nas propriedades dinâmicas dos materiais resilientes, utilizando a formulação descrita pela EN 12.354-2 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2000). Primeiramente, a figura 61

apresenta o comportamento da estimativa preliminar da redução do ruído de impacto em função da frequência central.

Figura 61 – Comportamento da estimativa da redução do ruído de impacto em função da frequência central



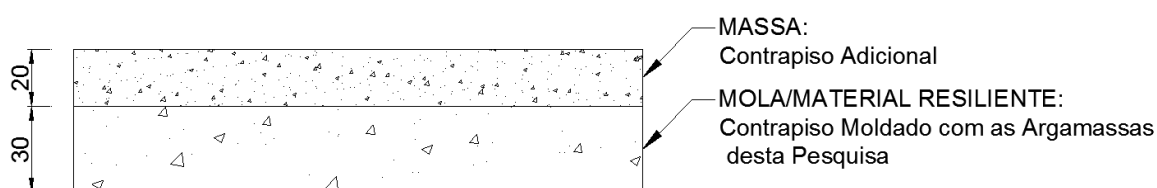
(fonte: elaborado pelo autor)

Como esperado, para as frequências centrais mais próximas da frequência ressonância das argamassas desta pesquisa, faixa entre 70,70 Hz e 150,30 Hz, houve a radiação dos ruídos de impacto. Este comportamento é observado quando o sistema de piso flutuante entra em ressonância, visto que a frequência de excitação coincide com a frequência de ressonância do sistema. Já para valores acima da frequência de ressonância, observa-se a melhora gradativa do desempenho acústico das argamassas, visto que as propriedades de isolamento acústico dos materiais resilientes são mais eficientes na atenuação de altas frequências de excitação. Por fim, é evidente que os melhores desempenhos acústicos apresentados na figura 61 correspondem diretamente às argamassas com valores menores de rigidez dinâmica.

Em seguida, para estimar numericamente a redução do ruído de impacto em pisos flutuantes, foi considerada a rigidez dinâmica de cada argamassa. Como se trata de um sistema massa-mola, cuja mola (material resiliente) é representada pelas argamassas empregadas neste estudo, adotou-se como massa do sistema uma camada adicional de contrapiso sobre a camada resiliente, resultando no sistema ilustrado na figura 62. Para este estudo, adotou-se

um contrapiso adicional com propriedades idênticas a argamassa de referência (ve0/sc0), além de um segundo contrapiso com propriedades descritas na NBR 6.120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000), ambos com espessura de 2 cm, a fim de respeitar as recomendações mínimas da bibliografia. A tabela 26 apresenta a estimativa de redução do nível de pressão para cada piso flutuante, além de descrever as propriedades dos contrapisos adicionais.

Figura 62 – Representação do sistema massa-mola considerado nesta pesquisa, dimensões em milímetros



(fonte: elaborado pelo autor)

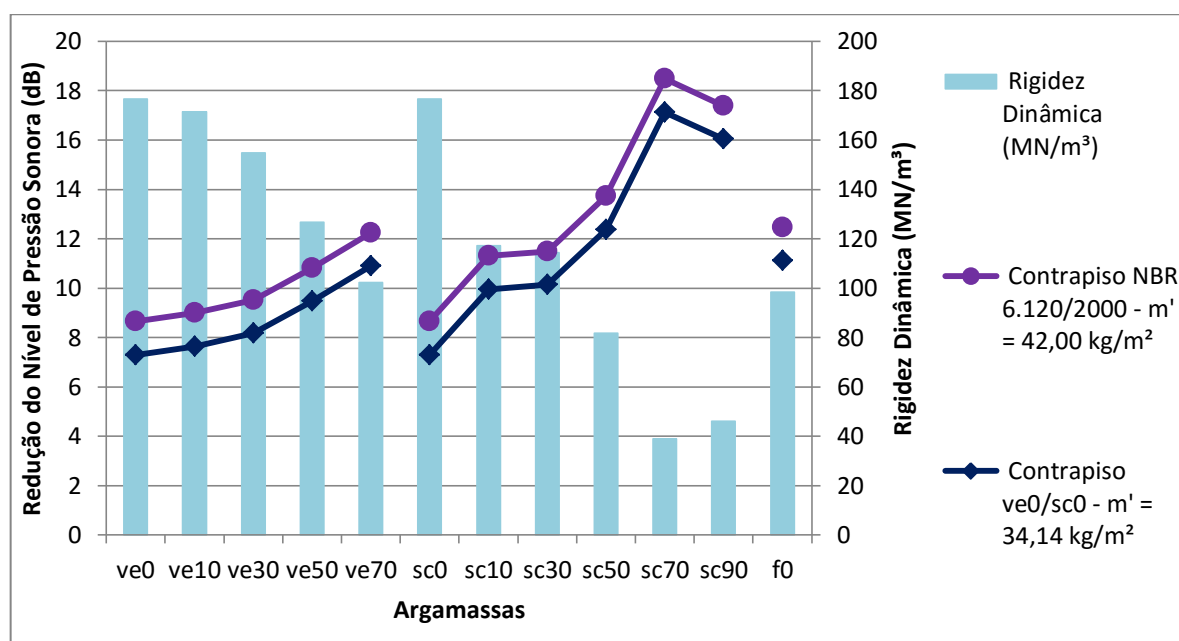
Tabela 26 – Estimativa da redução do nível de pressão sonora

Estimativa da Redução Ponderada do Nível de Pressão Sonora para Ruído de Impacto (EN 12.354-2/2000)		
Propriedades	Contrapiso Adicional ve0/sc0	Contrapiso Adicional NBR 6.120/2000
Densidade de Massa Aparente (kg/m ³)	1706,87	2100,00
Espessura (m)	0,02	0,02
Massa por Unidade de Área do Piso Flutuante (kg/m ²)	34,14	42,00
Argamassa	Redução (dB)	Redução (dB)
ve0	7,30	8,65
ve10	7,64	8,99
ve30	8,17	9,52
ve50	9,47	10,82
ve70	10,89	12,24
sc0	7,30	8,65
sc10	9,96	11,31
sc30	10,14	11,49
sc50	12,38	13,73
sc70	17,13	18,48
sc90	16,04	17,39
f0	11,11	12,46

(fonte: elaborado pelo autor)

Para facilitar a análise dos resultados da tabela 26, a figura 63 apresenta os mesmos através da ferramenta gráfica. Da mesma maneira da estimativa preliminar, é possível concluir que o desempenho acústico é dependente da rigidez dinâmica, já que os melhores desempenhos correspondem às argamassas com menor rigidez dinâmica. Além da influência da rigidez dinâmica, a massa por unidade de área do piso flutuante influencia no comportamento acústico do sistema. Partindo dessas afirmações, conclui-se que o desempenho acústico foi melhor para as argamassas com menor rigidez dinâmica quando aplicadas sob um contrapiso de maior massa por unidade de área.

Figura 63 – Estimativa da redução do nível de pressão sonora



(fonte: elaborado pelo autor)

É possível observar que a argamassa com serragem cromada no teor de substituição de 70% apresentou a maior redução do nível de pressão sonora, correspondente a 18,48 dB, o que representa uma melhoria na capacidade de isolamento próxima de 114%, em relação a argamassa de referência. Já a argamassa com vermiculita expandida com melhor desempenho (ve50) e a argamassa industrializada resultaram, respectivamente, em uma melhoria na redução no nível de pressão sonora próxima de 42% e 44%, ambas em relação à argamassa de referência. Destacam-se também as argamassas com vermiculita expandida e serragem cromada no teor de substituição 30%, que além de uma melhoria no potencial de redução dos ruídos de impacto próxima de 10% e 33%, em comparativo com a amostra de referência,

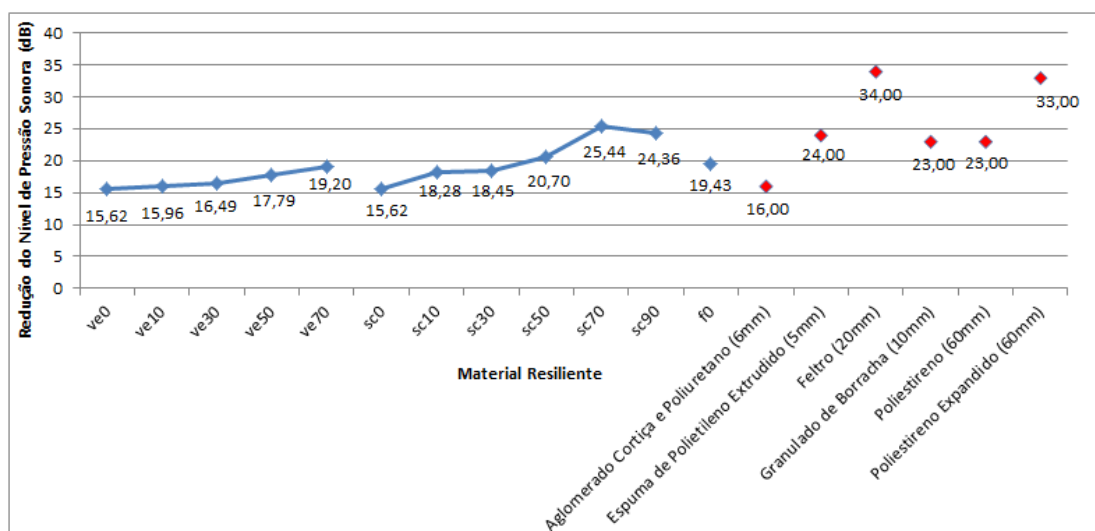
apresentam propriedades mecânicas com variações bem menores em relação à argamassa de referência, quando comparado às variações obtidas para os teores maiores de substituição, indicando tanto o potencial acústico quanto técnico para execução de contrapisos. Alerta-se que os percentuais citados representam variações da redução do nível de pressão sonora em decibel, ou seja, em escala logarítmica.

De maneira geral, as argamassas de contrapiso com incorporação de vermiculita expandida ou de serragem cromada, independente do teor, demonstraram maior potencial de atenuação de ruído de impacto do que a argamassa de referência deste trabalho. Este comportamento é similar ao encontrado em pesquisas com argamassas leves, já que a incorporação de agregados leves na matriz cimentícia afeta positivamente o desempenho acústico das argamassas de contrapiso (BORGES, 2015; ZUCHETTO et al., 2015a).

Em relação à argamassa industrializada, as únicas argamassas que tiveram um melhor desempenho acústico, foram às argamassas com serragem cromada nos teores de substituição acima de 50%. Já por parte das argamassas com vermiculita expandida, a argamassa com teor de substituição de 70% foi a que teve o comportamento mais próximo da argamassa industrializada. Com isso, estas argamassas de contrapiso, além do maior potencial de redução no nível de pressão sonora para ruídos de impacto em comparativo com as outras argamassas dosadas, representam uma solução competitiva em relação à argamassa industrializada avaliada neste trabalho, do ponto de vista acústico.

A fim de possibilitar o comparativo entre o desempenho acústico das argamassas deste trabalho com soluções acústicas comerciais empregadas em pisos flutuantes, optou-se por utilizar como base os resultados das estimativas da redução do nível de pressão sonora para um conjunto de materiais resilientes determinados pelos autores Neves et al. (2008). Partindo da massa por unidade de área de 122,4 kg/m² adotado por estes autores, foram recalculadas todas as estimativas da redução do nível de pressão sonora para as argamassas dosadas em laboratório e para a argamassa industrializada. Estes valores, juntamente com os estimados por Neves et al. (2008), devidamente identificados com o respectivo material resiliente, estão apresentados na figura 64. Ressalva-se que resultados retirados da pesquisa destes autores, correspondem aos valores estimados com melhor desempenho acústico para cada tipo de material resiliente avaliado.

Figura 64 – Comparação do desempenho acústico entre materiais resilientes



(fonte: elaborado pelo autor)

Com base na figura 64, é possível mencionar que a partir do teor de substituição de 10% para ambos os agregados leves, o resultado estimado para o aglomerado de cortiça e poliuretano foi igualado ou superado para as argamassas de contrapiso desta pesquisa. Em comparação aos outros materiais resilientes testados por Neves et al. (2008), apenas as argamassas com serragem cromada com teores de substituição acima 70% resultaram em uma estimativa de redução sonora acima da espuma de polietileno extrudido, do granulado de borracha e do poliestireno. Com isso, para o restante das argamassas com teores de substituição entre 10% e 70%, além da argamassa industrializada, o desempenho acústico ficou compreendido entre os materiais resilientes descritos anteriormente. Já em relação ao feltro e ao poliestireno expandido, observa-se que as estimativas de todas as argamassas deste trabalho não foram sequer próximas. No entanto, é possível que o desempenho das argamassas supere outras configurações existentes de cada material resiliente em comparação, visto que estas estimativas apresentadas referem-se à configuração do material que apresentou o melhor desempenho acústico na análise de Neves et al. (2008).

Em relação ao comparativo apresentado na figura 64, deve-se ressaltar que se trata apenas de uma comparação entre estimativas, sendo que o desempenho acústico de todos os materiais em análise pode variar quando ensaiados em campo, ou seja, nas reais condições de instalação. Mas de acordo com Neves et al. (2008), apesar destas possíveis diferenças entre os resultados estimados e os resultados em campo, esta estimativa pode servir claramente para comparar o desempenho acústico dos materiais resilientes. Com isso, pode se concluir que as

argamassas avaliadas nesta pesquisa, principalmente as moldadas com teores de substituição mais elevados, tem potencial para se tornar um material alternativo em comparação às soluções comerciais empregadas em pisos flutuantes, levando em conta sempre o desempenho acústico.

6.3 ANÁLISE DE CUSTO

A análise de custo descrita neste item foi simplificada, a fim de considerar apenas os custos dos insumos, desconsiderando custos como transporte, aluguel de equipamentos, contratação de mão de obra, energia, ferramentas, taxas e impostos.

Com base nos traços das argamassas deste estudo e na determinação da massa específica dos materiais constituintes, foi calculado o consumo de cimento e as quantidades de material por m³ de cada argamassa. Ressalva-se que a argamassa industrializada também sofreu a mesma análise simplificada de custos, já que o produto exige a adição em separado de qualquer tipo de cimento, o que pode interferir diretamente no consumo de cimento e alterar os custos fornecidos pelo fabricante. Os resultados estão identificados na tabela 27.

Tabela 27 – Consumo de material de cada argamassa

Argamassa	Consumo por m ³					
	Cimento (kg)	Areia (kg)	Vermiculita Expandida (kg)	Serragem Cromada (Kg)	Produto Ensacado (Kg)	Água (m ³)
ve0	436,84	1747,37				0,17
ve10	442,96	1572,64	19,58			0,20
ve30	455,72	1223,16	58,75			0,25
ve50	480,51	873,69	97,91			0,29
ve70	508,16	524,21	137,08			0,33
sc0	436,84	1747,37				0,17
sc10	452,33	1572,64		10,57		0,20
sc30	486,84	1223,16		31,72		0,27
sc50	541,32	873,69		52,87		0,32
sc70	609,54	524,21		74,02		0,40
sc90	697,42	174,74		95,16		0,49
f0	412,39				824,78	0,41

(fonte: elaborado pelo autor)

Para possibilitar o custo final de cada argamassa, foram determinados os custos unitários de cada material. É importante ressaltar que a serragem cromada, por ser considerado um resíduo

descartável, o custo da mesma foi considerado nulo. Além disso, o valor do produto ensacado foi obtido diretamente com o fabricante do material, já o custo da vermiculita expandida foi determinado através de uma pesquisa de preços realizada com fornecedores do material na cidade de Porto Alegre/RS e região. Os custos unitários dos materiais estão apresentados na tabela 28.

Tabela 28 – Custos unitários dos materiais

Material	Unidade	Custo
Cimento CP IV	kg	R\$ 0,51
Areia Média	kg	R\$ 0,04
Vermiculita Expandida	kg	R\$ 1,67
Serragem Cromada	kg	R\$ 0,00
Produto Ensacado	kg	R\$ 0,64
Água	m ³	R\$ 3,03

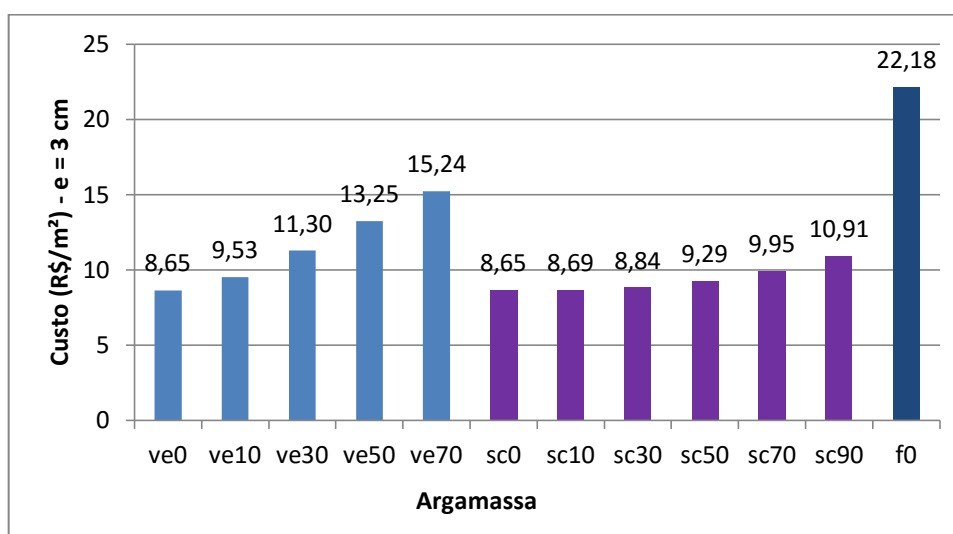
(fonte: elaborado pelo autor)

Como este trabalho tem enfoque em argamassas de contrapiso, a análise de custos é descrita na forma de custo por área, considerando a espessura adotada nesta pesquisa para as amostras de contrapiso, que foi de 3 cm. Na tabela 29 estão indicados os custos das argamassas tanto por m³ quanto por m², além da ilustração gráfica da análise de custo por m² (figura 65).

Tabela 29 – Custos das argamassas

Argamassa	Custo (R\$/m ³)	Custo (R\$/m ²) e = 3 cm
ve0	288,28	8,65
ve10	317,61	9,53
ve30	376,56	11,30
ve50	441,60	13,25
ve70	508,11	15,24
sc0	288,28	8,65
sc10	289,76	8,69
sc30	294,57	8,84
sc50	309,54	9,29
sc70	331,55	9,95
sc90	363,66	10,91
f0	739,43	22,18

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 65 – Custo por m² das argamassas

(fonte: elaborado pelo autor)

Com base na figura 65, observa-se imediatamente que o custo por área da argamassa industrializada é consideravelmente superior ao custo das argamassas dosadas em laboratório, o que representa um aumento de aproximadamente 156,42% no custo em relação à argamassa de referência. Este comportamento é consequência tanto do consumo quanto do custo do produto ensacado, em comparação aos consumos e custos da areia e dos agregados leves deste estudo. Como esperado, para os mesmos teores, as argamassas com vermiculita expandida tiveram custos maiores do que as argamassas com serragem cromada, simplesmente pelo fato da vermiculita expandida ter custo de aquisição, ao contrário do resíduo.

Observa-se o aumento no custo das argamassas com a adição dos teores de substituição. Este comportamento pode ser explicado por causa da substituição do agregado miúdo pelos agregados leves ter sido feita utilizando a massa unitária dos materiais, o que implica em uma redução do volume deste material quando incorporado a matriz cimentícia, exigindo maiores consumos de cimento. Este acréscimo dos custos poderia ter sido controlado, através da consideração da massa específica no cálculo das substituições. No entanto, este método de cálculo implicaria em maiores quantidades de agregados leves, o naquele momento era uma limitação da pesquisa.

Como esta pesquisa tem como foco o desempenho acústico das argamassas de contrapiso em questão, é apresentado na tabela 30 e ilustrado na figura 66 o custo por área e por redução do nível de pressão sonora para ruído de impacto, ou seja, custo/m²/MPa. Todavia, é importante alertar que o custo por área engloba tanto a argamassa que representa o material resiliente,

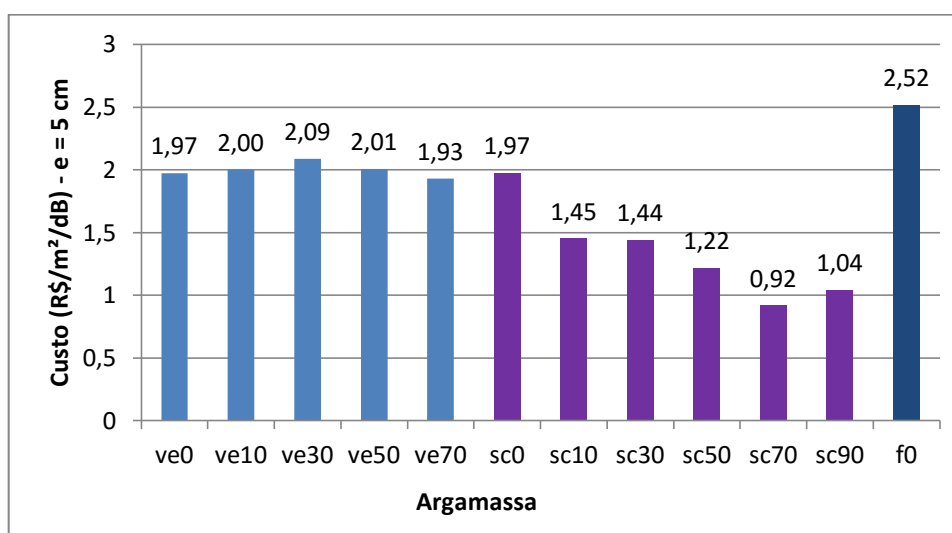
com espessura de 3 cm, quanto a argamassa com função de massa, com espessura de 2 cm. Pelo fato da pesquisa já ter o custo da argamassa de referência (ve0/sc0), optou-se por considerá-la como a massa do sistema de piso flutuante, incluindo as estimativas de redução para este caso, para esta análise de custo.

Tabela 30 – Custo por m² e por dB das argamassas

Argamassa	Custo (R\$/m ²) e= 3 cm	Custo (R\$/m ²) e = 2 cm	Custo (R\$/m ²) e = 5 cm	Redução (dB)	Custo (R\$/m ² /dB) e = 5 cm
ve0	8,65	5,77	14,41	7,30	1,97
ve10	9,53	5,77	15,29	7,64	2,00
ve30	11,30	5,77	17,06	8,17	2,09
ve50	13,25	5,77	19,01	9,47	2,01
ve70	15,24	5,77	21,01	10,89	1,93
sc0	8,65	5,77	14,41	7,30	1,97
sc10	8,69	5,77	14,46	9,96	1,45
sc30	8,84	5,77	14,60	10,14	1,44
sc50	9,29	5,77	15,05	12,38	1,22
sc70	9,95	5,77	15,71	17,13	0,92
sc90	10,91	5,77	16,68	16,04	1,04
f0	22,18	5,77	27,95	11,11	2,52

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 66 – Custo por m² e por dB das argamassas



(fonte: elaborado pelo autor)

Pela na figura 66, verifica-se que mesmo considerando a redução do nível de pressão sonora, a argamassa industrializada ainda apresenta um custo mais elevado do que as argamassas dosadas em laboratório, neste caso, representa um aumento de 27,92% no custo por área por dB em relação à argamassa de referência. Todavia, ressalva-se que apesar do custo mais elevado esta argamassa tem desempenho acústico, em geral, melhor que as argamassas de contrapisos deste estudo, sendo superada apenas para as argamassas com serragem cromada com teor acima de 50%.

Em relação às argamassas com vermiculita expandida, observa-se que a melhoria na capacidade de redução de ruídos de impacto, compensou o aumento no custo por m³ para os teores mais elevados de substituição. Já para as argamassas com serragem cromada, constata-se o menor custo por área por dB, em relação as outras argamassas desta pesquisa, o que indica que além de menor custo por m³ (figura 65), as mesmas apresentam, em geral, melhores desempenhos acústicos, compensando inclusive o aumento no custo por m³ para os teores mais elevados de substituição.

Alerta-se que para o cálculo do consumo de cimento não foi considerada a incorporação de ar no estado fresco, visto que este ensaio não entrou no escopo deste trabalho. Por isso, infere-se que a análise dos custos das argamassas é conservativa, visto que há não consideração do ar incorporado resultou em maiores consumos de cimento nesta análise. Partindo disso, é plausível mencionar que os custos destas argamassas tendem a serem inferiores aos valores apresentados neste item.

Com base nos resultados apresentados nesta análise de custo, é possível afirmar que todas as argamassas de contrapiso propostas neste trabalho são viavelmente econômicas quando comparadas com a argamassa industrializada em questão. Mas quando levado em consideração o desempenho acústico, a viabilidade tanto econômica quanto acústica é respeitada apenas pelas argamassas ve70, sc50, sc70 e sc90, quando comparadas a esta argamassa comercializada. Todavia, reitera-se que estas argamassas apresentam baixa resistência mecânica em relação à argamassa de referência, mas pela maneira que as mesmas são empregadas no sistema e pela ausência de limitações normatizadas em relação às propriedades mecânicas e, inclusive, físicas, as mesmas tem potencial para serem empregadas como materiais resilientes, A comprovação do potencial destas argamassas pode ser realizada através de ensaios complementares de laboratório e campo, a fim de avaliar a fissuração e a

durabilidade da camada resiliente, evitando assim discontinuidades no sistema de piso flutuantes. Outra possibilidade está no desenvolvimento de pesquisas que permitam uma melhoria na resistência mecânica destas argamassas em discussão.

Tendo em vista a viabilidade técnica, entende-se esta viabilidade como o caso no qual os teores que não alteram substancialmente as propriedades mecânicas das argamassas, favorecendo a compatibilidade com sistema de massa-mola, além de implicar em certo potencial de isolamento acústico para o emprego em pisos flutuantes, destacam-se as argamassas com teores de substituição de 30%, ou seja, as argamassas ve30 e sc30. Apesar das estimativas estarem abaixo das encontradas para a argamassa industrializada, estas argamassas tem um potencial acústico superior a argamassa de referência, com destaque para a argamassa com serragem cromada, cujas estimativas indicaram um desempenho acústico superior inclusive a argamassa com ve50, além de apresentar uma estimativa com 1 dB de diferença em relação a argamassa industrializada.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de argamassas de contrapiso com propriedades de isolamento acústico a fim de reduzir os ruídos de impactos nas edificações, cuja verificação do desempenho acústico, além do físico-mecânico, foi realizada a partir de avaliações laboratoriais. O comportamento das argamassas desta pesquisa foi avaliado tanto em relação às variações dos materiais e dos teores de substituição, como também em comparação a argamassa industrializada, inclusive no que se refere aos custos. Além da análise comparativa do desempenho acústico destas argamassas com base em soluções acústicas comerciais.

É importante ressaltar que os resultados obtidos e as conclusões apresentadas estão diretamente restritos aos materiais e a metodologia aplicada neste trabalho. De qualquer forma, é possível considerar que o desempenho acústico e físico-mecânico das argamassas apresentou comportamento similar ao descrito em pesquisas com incorporação de agregados leves em matrizes cimentícias de argamassas de contrapiso.

Reitera-se que a análise quantitativa e qualitativa das propriedades físico-mecânicas das argamassas empregadas neste trabalho foi dificultada pela carência de normalização brasileira relativa a critérios e requisitos referentes à argamassa de contrapiso neste quesito. Com isso, para estas argamassas de contrapiso, não foi possível avaliar precisamente se as mesmas realmente apresentam propriedades físico-mecânicas compatíveis com as exigências reais da camada de contrapiso. A seguir estão descritos as principais conclusões obtidas a partir do desenvolvimento do programa experimental deste trabalho.

7.1 CONCLUSÕES

A substituição da areia média natural tanto pela vermiculita expandida quanto pela serragem resultou em argamassas de contrapiso com maiores índices de vazios e menores densidades de massa aparente, motivados pela porosidade e densidade dos agregados leves empregados neste estudo. É evidente que a capacidade de absorção dos agregados exigiu maiores quantidades de água para os teores de maiores substituição, a fim de garantir a consistência

definida nesta pesquisa, o que tende a resultar em maiores perdas por evaporação da água livre durante o período de cura, elevando assim o índice de vazios. A alteração no índice de vazios e na densidade de massa aparente afetou diretamente o módulo de elasticidade e as resistências à flexão na tração e à compressão das argamassas.

Como esperado, para os maiores teores de substituição houve o acréscimo no índice de vazios e a redução na densidade de massa de ambas as argamassas. Este comportamento, por dependência, resultou em argamassas de menor módulo de elasticidade e com menores resistências mecânicas. Para os teores de substituição acima de 30%, este comportamento apresentou níveis mais acentuados de variação destas propriedades, basicamente pelo fato do índice de vazios ter elevadas variações a partir deste teor.

Em geral, o teor de substituição influenciou significativa todas as propriedades físico-mecânicas avaliadas nesta pesquisa. Com o acréscimo no teor de substituição, foi observado o aumento no índice de vazios, e a redução da densidade de massa aparente, do módulo de elasticidade dinâmico, da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão. A exceção foi observada nas argamassas com teores de substituição com 30%, cuja resistência à tração apresentou um acréscimo, tal comportamento foi explicado pela possível melhoria na composição granulométrica para este teor. De maneira geral, o teor de 30% se apresentou como o limiar de substituição para as propriedades físico-mecânicas, já que as principais alterações ocorrem a partir deste teor de substituição. Por fim, é possível afirmar que os teores mais elevados reduziram consideravelmente a resistência mecânica das argamassas, mas com o aumento no índice de vazios e a queda na densidade de massa aparente e no módulo dinâmico há uma tendência na melhoria das propriedades acústicas destas argamassas de contrapiso.

Já em relação aos materiais empregados, houve influência significativa no índice de vazios, no módulo de elasticidade dinâmico e nas resistências mecânicas, todas estas propriedades tiveram em média valores superiores às argamassas de serragem cromada. Por parte da argamassa industrializada, vale ressaltar que as propriedades físico-mecânicas tiveram valores contidos entre os resultados obtidos para as argamassas com teores de 30% e 50% de substituição.

No que se refere à rigidez dinâmica, conclui-se que tanto o tipo de material quanto a o teor de substituição influenciaram significativamente a rigidez dinâmica das argamassas, sendo que os menores valores encontrados foram obtidos para as argamassas com serragem cromada nos teores mais elevados de substituição. Tal comportamento está intimamente ligado com o índice de vazios e a densidade de massa aparente das argamassas. Mas, é possível afirmar que para os mesmos teores de substituição, as argamassas com serragem cromada resultaram em valores menores de rigidez dinâmica, em relação às moldadas com vermiculita expandida, o que indica que o material interfere na frequência natural de ressonância de sistema de piso flutuante, mesmo para valores próximos de índice de vazios e de densidade.

Com base nas estimativas da redução do nível de pressão sonora para ruídos de impacto, comprovou-se que os materiais com os menores valores de rigidez dinâmica apresentaram os melhores comportamentos no que se refere ao desempenho acústico do sistema de piso flutuante. As estimativas apontaram que para as argamassas de contrapiso desta pesquisa, os melhores desempenho acústicos, superando inclusive a argamassa industrializada, foram obtidos para as argamassas com serragem cromada nos teores de substituição acima de 50%, mostrando que além do potencial acústico oferecido, estas argamassas reutilizam resíduos descartáveis, favorecendo a sustentabilidade ambiental. Por parte da argamassa industrializada, verifica-se que a argamassa com vermiculita expandida com teor de 70% teve desempenho acústico relativamente próximo a esta argamassa. Estes resultados indicam o potencial competitivo destas argamassas descritas em relação à argamassa industrializada, considerando exclusivamente o ponto de vista de isolamento acústico para ruídos de impacto.

De maneira geral, pode-se concluir que a incorporação de agregados na matriz cimentícia das argamassas reduziu a rigidez dinâmica para valores abaixo da argamassa de referência, o que melhorou o desempenho acústico do sistema de piso flutuante. Além disso, foi observado que o desempenho acústico de todas as argamassas desta pesquisa teve uma melhora para as frequências de excitação acima da frequência de ressonância, principalmente no quando se refere a altas frequências.

Por fim, a análise comparativa entre as argamassas propostas neste estudo com algumas soluções tradicionais de mercado, indicou que as argamassas tem potencial para se tornar um material alternativo para o isolamento de ruídos de impacto em sistemas de piso flutuante. Todas as argamassas com vermiculita expandida e serragem cromada a partir dos teores de

substituição de 30% e 10%, respectivamente, resultaram em estimativas de redução de ruídos de impacto superiores aos seguintes materiais: aglomerado de cortiça e poliuretano (6 mm). O destaque em relação ao comparativo é dado para as argamassas com serragem cromada nos teores de substituição acima de 70%, cuja estimativa da redução no nível de pressão sonora para ruídos de impacto superou a estimativa de materiais como espuma de polietileno extrudido, do granulado de borracha e do poliestireno. Por tanto, é possível o desenvolvimento de argamassas de contrapiso com propriedades de isolamento acústico, com base no sistema de piso flutuante.

Pela análise de custo das argamassas, foi possível observar o aumento no custo das argamassas dosadas em laboratório com o acréscimo dos teores de substituição, estas variações foram inferiores para as argamassas com serragem cromada, já que se incorpora um resíduo descartável. No entanto, quando a análise foi relacionada com o desempenho acústico, houve uma compensação da elevação do custo pela capacidade de atenuação das argamassas. De maneira geral, as argamassas dosadas em laboratório apresentaram custos inferiores à argamassa industrializada, para ambas as análises. Com isso, é possível concluir que as argamassas de contrapiso propostas são viavelmente econômicas em comparação à argamassa industrializada.

Portanto, do ponto de vista acústico, os melhores desempenhos foram obtidos para as argamassas com vermiculita no teor de 70% e com serragem cromada nos teores a partir de 50% de substituição. No entanto, apesar de tais argamassas, assim como as argamassas com teores acima de 30% de substituição, apresentarem potencial de utilização como material resiliente em pisos flutuantes para atenuação de ruídos de impacto, estas ainda carecem de ensaios complementares destinados à avaliação da fissuração e da durabilidade das argamassas quando empregadas no sistema massa-mola, visto a baixa resistência mecânica em relação as demais.

Por parte da viabilidade técnica, conclui-se que as argamassas com teores de substituição de 30% apresentaram maior compatibilidade entre os resultados das propriedades físico-mecânicas e dinâmicas, com destaque principalmente para a argamassa com serragem cromada, cuja diferença de estimativa de redução de ruídos de impacto em comparação a industrializada foi de aproximadamente 1 dB. De qualquer forma, ambas as argamassas apresentaram estimativas superiores à argamassa de referência, sem afetar bruscamente as

propriedades mecânicas. Com isso, de imediato, estas argamassas se demonstram tecnicamente viáveis para o emprego como um material resiliente em pisos flutuantes, a fim de isolar os ruídos de impacto nas edificações.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como questões a serem analisadas em trabalhos futuros, sugere-se:

- a) determinar as propriedades no estágio fresco das argamassas desta pesquisa, a fim de compreender melhor o comportamento da mesma, além de possibilitar a determinação do teor de ar incorporado das argamassas para que o cálculo do consumo de cimento seja o mais próximo da realidade, interferindo nos custos das argamassas;
- b) determinar o teor de cromo nas argamassas com serragem cromada através de ensaios de lixiviação e solubilização, a fim de avaliar se houve realmente o encapsulamento deste resíduo;
- c) avaliar a influência de diferentes espessuras na rigidez dinâmica destas argamassas;
- d) determinar o comportamento da rigidez dinâmica ao longo do tempo destas argamassas, a fim de verificar a fluência à compressão quando submetida a uma carga padrão, segundo a ISO 20.392 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2007);
- e) determinar o nível de pressão sonora nível de pressão sonora de impacto-padrão ponderado para cada argamassa deste estudo, com base em ensaios citados na NBR 15.575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013e), além de classificar o comportamento do piso flutuante com estas argamassas de acordo com níveis de desempenho prescritos nesta norma;
- f) avaliar a influência do revestimento final nas propriedades acústicas do sistema de piso flutuante com estas argamassas, com base em ensaios de campo;
- g) comparar as estimativas de redução sonora descritas neste trabalho com as reduções reais determinadas tanto por ensaios de campo quanto por ensaios de laboratório, a fim de julgar a legitimidade destas estimativas. Além de comparar com os resultados de rigidez dinâmica das argamassas, para verificar se o desempenho acústico está correlacionado com a rigidez dinâmica de cada argamassa;
- h) avaliar a real viabilidade econômica e acústica do sistema de piso flutuantes com estas argamassas, em comparação aos sistemas tradicionais de mercado.

REFERÊNCIAS

- AKKERMAN, D. Norma e conforto acústico. **O Estado de S. Paulo**, São Paulo, p. I2, 22 jul. 2012. Disponível em:
<http://www.proacustica.org.br/assets/files/Artigos/NormaeConfortoAcustico_EstadodeSP_2.07.12.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2015.
- ASDRUBALI, F.; D’ALESSANDRO, F.; BALDINELLI, G. **Thermo-acoustic properties of floors made of concrete and scraps from electric wires**. In: INTER.NOISE, 2009, Ottawa. **Anais...** Ottawa: 2009. Não paginado. Disponível em:
<https://www.academia.edu/8881006/Thermo-acoustic_properties_of_floors_made_of_concrete_and_scraps_from_electric_wires>. Acesso em: 15 jan. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.152**: níveis de ruído para conforto acústico – procedimento. Rio de Janeiro, 1992a.
- _____. **NBR 12.179**: tratamento acústico em recintos fechados – procedimento. Rio de Janeiro, 1992b.
- _____. **NBR 13.753**: revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – procedimento. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR 6.120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. **NBR 10.151**: acústica – avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 10.004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 13.276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005a.
- _____. **NBR 13.279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005b.
- _____. **NBR 13.280**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005c.
- _____. **NBR 7.211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009a.
- _____. **NBR 9.778**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009b.
- _____. **NBR 15.630**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2009c.
- _____. **NBR 7.213**: agregados leves para concreto isolante térmico – requisitos. Rio de Janeiro, 2013a.

_____. **NBR 13.749**: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – especificação. Rio de Janeiro, 2013b.

_____. **NBR 15.575-1**: edificações habitacionais – desempenho parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013c.

_____. **NBR 15.575-2**: edificações habitacionais – desempenho parte 2: requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2013d.

_____. **NBR 15.575-3**: edificações habitacionais – desempenho parte 3: requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro, 2013e.

_____. **NBR 15.575-4**: edificações habitacionais – desempenho parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro, 2013f.

_____. **NBR 15.575-5**: edificações habitacionais – desempenho parte 5: requisitos para os sistemas de coberturas. Rio de Janeiro, 2013g.

_____. **NBR 15.575-6**: edificações habitacionais – desempenho parte 6: requisitos para os sistemas hidrossanitários. Rio de Janeiro, 2013h.

_____. **NBR 16.313**: acústica – terminologia. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 11.355**: vermiculita expandida – análise granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 45**: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 35**: agregados leves para concreto estrutural – especificação. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR NM 52**: agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA. **Manual ProAcústica sobre a norma de desempenho**: guia prático sobre cada uma das partes relacionadas à área de acústica nas edificações da norma ABNT NBR 15575:2013 – edificações habitacionais – desempenho. 1. ed. São Paulo: Rush, 2013.

_____. **O desempenho acústico um ano após a publicação da NBR 15575**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.proacustica.org.br/publicacoes/artigos-sobre->

ac%C3%BAstica-e-temas-relacionados/desempenho-acustico-apos-um-ano-publicacao-nbr-15575.html>¹⁶. Acesso em: 20 mar. 2015. Não paginado.

_____. **Manual ProAcústica de recomendações básicas para contrapisos flutuantes**. 1. ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2015.

BARON, N.; BONFIGLIO, P.; FAUSTI, P. **Dynamic stiffness of materials used for reduction in impact noise**: comparison between diferente measurement techniques. In: Acústica, 2004, Guimarães. **Anais...** Guimarães, 2004. p. 1-8. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/240918534_Dynamic_stiffness_of_materials_used_for_reduction_in_impact_noise_comparison_between_different_measurement_techniques>. Acesso em: 23 mar. 2016.

BARRA, N. B.; RENOFIO, A.; ALVES, V. C. **O aproveitamento da serragem cromada associada à fibra de bambu para a produção de pisos e divisórias**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2007, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ENEGEP, 2007. p. 1-9. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr650481_0134.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2016.

BARROS, M. M. S. B. de. Contrapisos para áreas internas de edifícios. **Revista Técnica**. São Paulo, v. 13, p. 51-54, 1994.

BARROS, M. M. S. B.de.; SABBATINI, F. H. **Tecnologia de produção de contrapisos para edifícios habitacionais e comerciais**. São Paulo: EPUSP, 1991. Boletim Técnico PCC n. 44.

BAUER, E. **Revestimentos de argamassa**: características e peculiaridades. Brasília: 2005.

BEUTHER, E. **Desenvolvimento de argamassas com adições porosas**. 2015. 61 f. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2. ed. rev. (1. reimp.). São Paulo: Blucher, c2011 (reimp. 2012).

BRANCHER, L. R.; NUNES, M. F. O.; GRISA, A. M. C.; PAGNUSSAT, D. T.; ZENI, M. Acoustic behavior of subfloor lightweight mortars containing micronized poly (Ethylene Vinyl Acetate) (EVA). **Materials**, Basel, v. 9, 1. ed., n. 51, 2016.

BORGES, J. G. K. **Análise das propriedades acústicas de contrapisos produzidos com materiais reciclados**. 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

¹⁶ Estando no site <<http://www.proacustica.org.br/publicacoes/artigos-sobre-ac%C3%BAstica-e-temas-relacionados/desempenho-acustico-apos-um-ano-publicacao-nbr-15575.html>>, realize o cadastro para visualizar o documento.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho de edificações habitacionais**: guia orientativo para atendimento à norma ANBT NBR 15575/2013. 2. ed. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CARVALHAES, C. Vermiculita. **Sumário Mineral**. Brasília, v. 35, p. 116-117, mar. c2016.

CARVALHO, M. L. U. **Resíduos de poli (tereftalato de etileno) e de pneu na confecção de pisos flutuantes para o isolamento do ruído de impacto**. 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

CARVALHO, R. P. **Acústica arquitetônica**. Brasília: Thesaurus, c2006.

CENTRO DAS INDÚSTRIAS DE CURTUMES NO BRASIL. **Exportações brasileiras de couros e peles**: 2015. Brasília: CICB, 2016.

CINTRA, C. L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus: propriedades relevantes. **Cerâmica**. v. 60, p. 69-76, fev. 2014.

COSTA, E. C. da. **Acústica técnica**. 1. ed. (3. reimp.). São Paulo: Blucher, c2003 (reimp. 2012).

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **BS EN 12.354-2**: building acoustics – estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – part 2: impact sound insulation between rooms. Brussels, 2000.

FERRAZ, R. **Atenuação de ruído de impacto em pisos de edificações de pavimentos múltiplos**. 2008. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos**: estudos e procedimentos de execução. 1. ed. São Paulo: PINI, c1994.

FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B. **Utilização da vermiculita como absorvente de compostos orgânicos poluentes da indústria do petróleo**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, n. 19, 2002, Pernambuco. **Anais...** Pernambuco: ENTMMME, 2009. p. 547-553.

FUJIKAWA, E. S. **Incorporação do resíduo “serragem cromada” em materiais de construção civil**. 2002. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2002.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. **Inventário nacional de resíduos sólidos industriais**. Porto Alegre: 2002.

GERGES, S. N. Y. **Ruído**: fundamentos e controle. 2. ed. atual. e aum. Florianópolis: NR, c2000.

GREGÓRIO, J. C. V.; LINTZ, R. C. C. **Estudo da influência da incorporação de vermiculita nas propriedades mecânicas de argamassas**. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, n. 14, 2009, Campinas. **Anais...** Campinas: PUC, 2009. Não paginado. Disponível em: <<https://www.puc-campinas.edu.br/websist/portal/pesquisa/ic/pic2009/resumos/%7BEB5DA7AF-F849-4B1C-94FA-EBC0777156A2%7D.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

HAX, S. P. P. **Estudo do potencial dos resíduos de E.V.A no isolamento de ruído de impacto nas edificações**. 2002. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria n. 115**, de 02 de junho de 1992a.

_____. **Portaria n. 181**, de 04 de agosto de 1992b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9.052-1**: acoustics – determination of dynamics stiffness – part 1: materials used under floating floors in dwellings. Geneva, 1989.

_____. **ISO 20.392**: thermal-insulating materials – determination of compressive creep. Geneva, 2007.

MADERUELO-SANZ, R.; MARTÍN-CASTIZO, M.; VÍLCHEZ-GÓMEZ, R. **The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction**. *Applied Acoustics*, v. 72, p. 823-828, Oct. c2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/251448294_The_performance_of_resilient_layers_made_from_recycled_rubber_fluff_for_impact_noise_reduction_Appl_Acoust>. Acesso em: 23 mar. 2016.

MARQUES, D. V. P. **Racionalização do processo construtivo de vedação vertical em alvenaria**. 2013. 84 f. Projeto de Final de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2008. ´

MÉNDEZ, A. M.; STORNINI, A. J.; SALAZAR, E. B.; GIULIANO, G.; VELIS, A. G; AMARILLA, B. C. **Acústica arquitectonica**. Buenos Aires: Universidad del Museo Social Argentino, 1994.

MORAIS, L.; PEREIRA, A.; GODINHO, L. **Caracterização experimental do isolamento a ruído de impacto de sistemas de laje flutuantes e de piso flutuantes utilizando um sistema de dimensões reduzidas**. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2009, Natal **Anais...** Natal: ANTAC, 2009. Não paginado.

MOREIRA, A.; ANTÓNIO, J.; TADEU, A. **Impact sound reduction of concrete layers containing cork granules**. In: INTER.NOISE, 2010, Lisbon. **Anais...** Lisbon, 2010. p. 1-8.

Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/262804426_Impact_Sound_Reduction_of_Concrete_Layers_with_Cork_Granules>. Acesso em: 23 mar. 2016.

NEVES, A.; ANTÓNIO, J.; NOSSA, A. **Resultados experimentais da rigidez dinâmica de materiais usados sob pavimentos flutuantes**. In: ACÚSTICA, 2008, Coimbra. **Anais...** Coimbra: UC, 2008. p. 1-12. Disponível em: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Coimbra08_id212.pdf>. Acesso em: 10 maio 2015.

NUNES, M. F. O.; ANDRADE, M. Z.; GRISA, A. M. C.; ZATERRA, A. J.; MENEGOTTO, A. N.; VERGARA, E. F.; PAIXÃO, D. X. **Avaliação de material com resíduos poliméricos na redução do ruído de impacto em pisos**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, n. 13, 2010, Canela. **Anais...** Canela: 2010. Não paginado. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/entac2014/2010/arquivos/169.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

NUNES, M. F. O.; ZINI, A.; PAGNUSSAT, D. T. **Desempenho acústico de sistemas de pisos: estudos de caso para isolamento ao ruído aéreo e de impacto**. **Acústica e Vibrações**, n. 46, p. 13-19, dez. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/277305728_Desempenho_Acustico_de_Sistemas_de_Piso_Estudos_de_Caso_Para_Isolamento_ao_Ruido_Aereo_e_de_Impacto>. Acesso em: 28 mar. 2016.

PACHECO, J. W. F. **Curtumes**: série P+L. São Paulo: CETESB, 2005.

PEDROSO, M. A. T. **Estudo comparativo entre as modernas composições de pisos flutuantes quanto ao desempenho no isolamento ao ruído de impacto**. 2007. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PEINADO, H. S. Execução de contrapiso com argamassa autonivelante sobre manta acústica. **Revista Técnica**, São Paulo, ano 22, n. 209, p. 72-76, ago. 2014.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: ediPUCRS, c2012.

RIBEIRO, D. V.; YUAN, S. Y.; MORELLI, M. R. Efeito da adição de serragem de couro tratada quimicamente nas propriedades do cimento Portland. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 6, p. 979-983, mar. 2011. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol34No6_979_11-AR10644.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2015.

RIBEIRO, R. A.; SILVA, L. M.; FERREIRA, V. M.; LABRINCHA, J. A. **Estudo da influência de cargas leves nas propriedades de uma argamassa bastarda**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 2005, Lisboa. **Anais...** Lisboa: APFAC, 2005. Não paginado. Disponível em: <<http://www.apfac.pt/congresso2005/comunicacoes/Paper%2018.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

RIBEIRO, W. B.; RIZZO, M. V.; BORTOLUZ, N.; NUNES, M. F. O.; GRISA, A. M. C. Characterization of polyurethan skin agglomerates for acoustic insulation from impact noise.

Materials Research, São Carlos, v. 17, p. 210-215, Aug. c2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/mr/v17s1/a34v17s1.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2016.

ROCHA, V. C. M. **Desenvolvimento de pavimento flutuante com aglomerado de cortiça, de desempenho acústico otimizado**. 2012. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2012.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural**: produção, propriedades, microestrutura e aplicações. 1. ed. São Paul: PINI, c2009.

RUBIN, A. P. **Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso**: análise do desempenho físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra. 2015. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RUSHFORTH, I. M.; HOROSHENKOV, K. V.; MIRAFTAB, M.; SWIFT, M. J. **Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactures from recycled carpet waste**. *Applied Acoustics*, v. 66, p. 731-749, May c2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/223831126_Impact_sound_insulation_and_viscoelastic_properties_of_underlay_manufactured_from_recycled_carpet_waste>. Acesso em: 28 mar. 2016.

SANTOS, A. M. M.; CORREA, A. R.; ALEXIM, F. M. B.; PEIXOTO, G. B. T. **Panorama do setor de couro no Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, p. 57-84, Set. 2002.

SANTOS, F. A.; MELO, A. B.; PIMENTEL, R. L.; SILVA, E. P. **Compósito cimentício com resíduos de EVA como alternativa para atenuação de ruídos de impactos entre lajes de piso nas edificações**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE, 2013, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa, 2013. p. 132.138. Disponível em: <<http://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2013/trabalhos/pdf/congestas2013-et-03-012.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

SILVA, A. L. R. T. da. **Avaliação da resistência mecânica de argamassas de cimento Portland contendo serragem de couro tratada em meio ácido**. 2006. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

SILVA, J. C. da. **A influência da adição de fibras de polipropileno e vermiculita expandida em argamassas de nanotitânia**. 2015. 64 f. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

SOUSA, N. R. V. de. **Caracterização do comportamento acústico a sons de percussão de soluções à base de espumas de poliuretano**. 2008. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2008.

SOUZA, L. C. L. de; ALMEIDA, M. G. de; BRAGANÇA, L. **Bê-á-bá da acústica arquitetônica**: ouvindo a Arquitetura. [1. ed.] (4. reimp). São Carlos: EdUFCar, [2006] (reimp. 2012).

SOUZA, R. D. de. **Estudo de propriedades acústicas e aplicações de materiais poliméricos**. 2012. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnólogo em Polímeros) – Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, Sorocaba, 2012.

UGARTE, J. F. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Vermiculita**. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia, p. 865-887, 2008.

YUAN, S. Y. **Estudo da influência da adição de serragem de couro tratada quimicamente nas características de argamassas de cimento Portland**. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

ZUCHETTO, L. K.; NUNES, M. F. O.; TUTIKIAN, B. F. **Dynamic stiffness evaluation of floor covering system made out of recycled EVA – Ethylene Vinyl Acetate**. In: INTER.NOISE, 2015, San Francisco. **Anais...** San Francisco: 2015a. Não paginado.

Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/281933255_Dynamic_Stiffness_evaluation_of_floor_covering_system_made_out_of_recycled_EVA_-_Ethylene_Vinyl_Acetate>. Acesso em: 15 jan. 2016.

ZUCHETTO, L. K.; SOUZA, R. P.; TUTIKIAN, B. F.; NUNES, M. F. O. **Estudo de contrapisos leves a base de EVA (Etileno Acetato de Vinila) para desempenho acústico e reduzidas cargas permanentes**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL EM REABILITAÇÃO DE CONSTRUÇÕES, 2015, Lisboa. **Anais...** Lisboa: CONPAT, 2015b. p. 1-8. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/280443710_ESTUDO_DE_CONTRAPISOS_LEVES_A_BASE_DE_EVA_ETILENO_ACETATO_DE_VINILA_PARA_DESEMPENHO_ACUSTICO_E_REDUZIDAS_CARGAS_PERMANENTES>. Acesso em: 15 jan. 2016.

**APÊNDICE A – Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica
Seca**

Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica (NBR 9.778/2009)														
Identificação	Número	Tipo de Material	Teor de Substituição (%)	Nomeclatura	a/c	Absorção de Água (%)			Índice de Vazios (%)			Massa Específica Seca (g/cm³)		
						Absorção	Média	Desvio Padrão	Vazios	Média	Desvio Padrão	Seca	Média	Desvio Padrão
1	1	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	17,43	17,38	0,33	31,27	31,29	0,31	1,79	1,80	0,02
	2	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	17,69			31,61			1,79		
	3	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	17,03			30,99			1,82		
2	1	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	19,16	19,42	0,46	33,35	33,71	0,47	1,74	1,74	0,02
	2	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	19,15			33,53			1,75		
	3	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	19,95			34,23			1,72		
3	1	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	24,71	25,13	0,41	39,19	39,60	0,39	1,59	1,58	0,01
	2	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	25,52			39,98			1,57		
	3	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	25,17			39,62			1,57		
4	1	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	37,40	38,02	1,09	48,95	49,34	0,65	1,31	1,30	0,02
	2	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	37,38			48,97			1,31		
	3	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	39,29			50,09			1,27		
5	1	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	57,21	55,65	1,37	58,87	58,14	0,67	1,03	1,04	0,01
	2	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	54,68			57,56			1,05		
	3	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	55,06			57,99			1,05		
6	1	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	17,43	17,38	0,33	31,27	31,29	0,31	1,79	1,80	0,02
	2	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	17,69			31,61			1,79		
	3	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	17,03			30,99			1,82		
7	1	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	19,53	20,48	0,84	33,12	34,12	0,86	1,70	1,67	0,03
	2	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	20,80			34,55			1,66		
	3	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	21,10			34,67			1,64		
8	1	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	24,68	24,71	0,25	37,30	37,60	0,32	1,51	1,52	0,01
	2	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	24,98			37,94			1,52		
	3	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	24,48			37,56			1,53		
9	1	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	33,06	33,51	0,55	41,29	42,04	0,85	1,25	1,25	0,01
	2	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	33,34			41,85			1,26		
	3	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	34,12			42,96			1,26		
10	1	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	53,08	52,72	1,25	55,61	55,43	0,58	1,05	1,05	0,01
	2	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	51,33			54,78			1,07		
	3	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	53,74			55,91			1,04		
11	1	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	73,21	72,83	1,11	60,75	60,90	0,30	0,83	0,84	0,01
	2	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	73,70			61,24			0,83		
	3	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	71,59			60,71			0,85		
12	1	Fornecedor	0	f0	1,00	32,28	32,56	0,25	42,90	43,14	0,21	1,33	1,32	0,00
	2	Fornecedor	0	f0	1,00	32,77			43,31			1,32		
	3	Fornecedor	0	f0	1,00	32,64			43,21			1,32		

APÊNDICE B – Densidade de Massa Aparente

Densidade de Massa Aparente (NBR 13.280/2005)								
Identificação	Número	Tipo de Material	Teor de Substituição (%)	Nomeclatura	a/c	Densidade de Massa Aparente (kg/m ³)		
						Densidade	Média	Desvio Padrão
1	1	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	1691,20	1706,87	14,09
	2	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	1718,49		
	3	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	1710,93		
2	1	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	1574,48	1596,97	22,83
	2	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	1620,12		
	3	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	1596,32		
3	1	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	1531,03	1534,21	4,67
	2	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	1539,57		
	3	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	1532,03		
4	1	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	1223,76	1229,19	11,38
	2	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	1242,26		
	3	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	1221,53		
5	1	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	980,97	985,32	3,78
	2	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	987,87		
	3	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	987,11		
6	1	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	1691,20	1706,87	14,09
	2	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	1718,49		
	3	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	1710,93		
7	1	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	1616,96	1619,23	1,96
	2	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	1620,35		
	3	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	1620,36		
8	1	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	1502,05	1480,52	20,44
	2	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	1461,40		
	3	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	1478,10		
9	1	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	1287,43	1269,72	15,39
	2	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	1259,66		
	3	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	1262,06		
10	1	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	946,00	955,26	14,47
	2	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	947,85		
	3	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	971,93		
11	1	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	812,30	815,49	5,13
	2	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	821,41		
	3	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	812,77		
12	1	Fornecedor	0	f0	1,00	1377,53	1397,24	23,56
	2	Fornecedor	0	f0	1,00	1390,85		
	3	Fornecedor	0	f0	1,00	1423,34		

APÊNDICE C – Módulo de Elasticidade Dinâmico

Módulo de Elasticidade Dinâmico (NBR 15.630/2009)								
Identificação	Número	Tipo de Material	Teor de Substituição (%)	Nomeclatura	a/c	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)		
						Módulo	Média	Desvio Padrão
1	1	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	12,17	12,98	0,76
	2	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	13,10		
	3	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	13,68		
2	1	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	10,44	10,48	0,38
	2	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	10,88		
	3	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	10,12		
3	1	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	10,13	9,84	0,28
	2	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	9,57		
	3	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	9,82		
4	1	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	4,09	4,02	0,13
	2	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	4,10		
	3	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	3,88		
5	1	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	1,48	1,43	0,05
	2	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	1,40		
	3	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	1,41		
6	1	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	12,17	12,98	0,76
	2	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	13,10		
	3	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	13,68		
7	1	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	10,49	10,36	0,13
	2	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	10,24		
	3	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	10,36		
8	1	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	8,56	8,14	0,40
	2	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	7,77		
	3	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	8,08		
9	1	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	3,97	3,91	0,06
	2	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	3,90		
	3	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	3,85		
10	1	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	0,52	0,52	0,01
	2	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	0,51		
	3	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	0,51		
11*	1	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	0,35	0,35	0,01
	2	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	0,36		
12	1	Fornecedor	0	f0	1,00	6,30	6,42	0,15
	2	Fornecedor	0	f0	1,00	6,38		
	3	Fornecedor	0	f0	1,00	6,59		

*Valores espúrios não estão indicados

APÊNDICE D – Resistência à Tração na Flexão

Resistência à Tração na Flexão (NBR 13.279/2005)								
Identificação	Número	Tipo de Material	Teor de Substituição (%)	Nomeclatura	a/c	Resistência à Tração na Flexão (MPa)		
						Resistência	Média	Desvio Padrão
1	1	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	1,11	1,05	0,05
	2	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	1,03		
	3	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	1,02		
2*	1	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	1,08	0,99	0,12
	3	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	0,91		
3*	1	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	1,06	1,09	0,03
	3	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	1,11		
4	1	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	0,71	0,64	0,06
	2	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	0,59		
	3	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	0,62		
5	1	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	0,29	0,27	0,02
	2	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	0,26		
	3	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	0,26		
6	1	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	1,11	1,05	0,05
	2	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	1,03		
	3	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	1,02		
7	1	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	0,83	0,83	0,00
	2	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	0,83		
	3	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	0,83		
8*	1	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	1,02	1,01	0,01
	3	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	1,00		
9	1	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	0,60	0,59	0,02
	2	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	0,57		
	3	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	0,60		
10*	1	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	0,26	0,29	0,04
	3	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	0,32		
11	1	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	0,31	0,30	0,02
	2	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	0,28		
	3	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	0,31		
12*	1	Fornecedor	0	f0	1,00	1,66	1,75	0,13
	2	Fornecedor	0	f0	1,00	1,85		

*Valores espúrios não estão indicados

APÊNDICE E – Resistência à Compressão

Resistência à Compressão (NBR 13.279/2005)								
Identificação	Número	Tipo de Material	Teor de Substituição (%)	Nomeclatura	a/c	Resistência à Compressão (MPa)		
						Resistência	Média	Desvio Padrão
1*	1a	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	3,93	4,28	0,32
	1b	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	4,01		
	2a	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	4,31		
	2b	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	4,73		
	3b	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	4,41		
2*	1a	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	3,97	4,02	0,30
	1b	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	3,62		
	2a	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	4,44		
	2b	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	3,94		
	3b	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	4,13		
3*	1a	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	3,43	3,78	0,31
	2a	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	4,15		
	2b	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	3,59		
	3a	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	3,65		
	3b	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	4,06		
4	1a	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	1,13	1,28	0,12
	1b	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	1,37		
	2a	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	1,31		
	2b	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	1,44		
	3a	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	1,31		
	3b	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	1,15		
5	1a	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	0,58	0,48	0,06
	1b	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	0,42		
	2a	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	0,49		
	2b	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	0,46		
	3a	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	0,45		
	3b	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	0,45		
6*	1a	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	3,93	4,28	0,32
	1b	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	4,01		
	2a	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	4,31		
	2b	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	4,73		
	3b	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	4,41		

*Valores espúrios não estão indicados

Resistência à Compressão (NBR 13.279/2005)								
Identificação	Número	Tipo de Material	Teor de Substituição (%)	Nomeclatura	a/c	Resistência à Compressão (MPa)		
						Resistência	Média	Desvio Padrão
7	1a	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	2,80	3,01	0,25
	1b	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	2,89		
	2a	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	2,79		
	2b	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	3,07		
	3a	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	3,44		
	3b	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	3,09		
8	1a	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	3,14	2,88	0,16
	1b	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	2,66		
	2a	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	2,92		
	2b	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	2,84		
	3a	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	2,92		
	3b	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	2,82		
9	1a	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	1,59	1,38	0,22
	1b	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	1,32		
	2a	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	1,37		
	2b	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	1,47		
	3a	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	1,53		
	3b	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	0,98		
10	1a	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	0,46	0,49	0,03
	1b	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	0,52		
	2a	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	0,49		
	2b	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	0,51		
	3a	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	0,48		
	3b	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	0,45		
11	1a	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	0,50	0,44	0,04
	1b	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	0,44		
	2a	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	0,41		
	2b	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	0,47		
	3a	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	0,44		
	3b	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	0,39		
12	1a	Fornecedor	0	f0	1,00	4,79	5,22	0,25
	1b	Fornecedor	0	f0	1,00	5,38		
	2a	Fornecedor	0	f0	1,00	5,05		
	2b	Fornecedor	0	f0	1,00	5,35		
	3a	Fornecedor	0	f0	1,00	5,29		
	3b	Fornecedor	0	f0	1,00	5,44		

*Valores espúrios não estão indicados

APÊNDICE F – Frequência de Ressonância e Rigidez Dinâmica

Rigidez Dinâmica (ISO 9.052-1/1989)											
Identificação	Número	Tipo de Material	Teor de Substituição (%)	Nomeclatura	a/c	Frequência de Ressonância (Hz)			Rigidez Dinâmica (MN/m³)		
						Frequência	Média	Desvio Padrão	Rigidez Dinâmica	Média	Desvio Padrão
1	1	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	156,70	150,30	5,83	191,87	176,69	13,78
	2	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	145,30			164,96		
	3	Vermiculita Expandida	0	ve0	0,40	148,90			173,24		
2*	1	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	163,40	147,25	22,84	208,62	171,46	52,56
	3	Vermiculita Expandida	10	ve10	0,45	131,10			134,30		
3	1	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	142,80	140,67	6,66	159,34	154,84	14,49
	2	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	133,20			138,63		
	3	Vermiculita Expandida	30	ve30	0,55	146,00			166,56		
4*	1	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	130,70	127,25	4,88	133,48	126,62	9,70
	3	Vermiculita Expandida	50	ve50	0,60	123,80			119,76		
5*	2	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	120,00	114,25	8,13	112,52	102,25	14,52
	3	Vermiculita Expandida	70	ve70	0,65	108,50			91,99		
6	1	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	156,70	150,30	5,83	191,87	176,69	13,78
	2	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	145,30			164,96		
	3	Serragem Cromada	0	sc0	0,40	148,90			173,24		
7*	2	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	123,40	122,50	1,27	118,98	117,26	2,44
	3	Serragem Cromada	10	sc10	0,45	121,60			115,54		
8*	2	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	116,70	120,95	6,01	106,41	114,45	11,36
	3	Serragem Cromada	30	sc30	0,55	125,20			122,48		
9*	1	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	109,20	102,00	10,18	93,18	81,70	16,23
	3	Serragem Cromada	50	sc50	0,60	94,80			70,22		
10*	1	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	69,30	70,70	1,98	37,53	39,07	2,19
	2	Serragem Cromada	70	sc70	0,65	72,10			40,62		
11*	2	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	79,60	76,85	3,89	49,51	46,21	4,67
	3	Serragem Cromada	90	sc90	0,70	74,10			42,90		
12*	1	Fornecedor	0	f0	1,00	108,40	112,20	5,37	91,82	98,48	9,42
	3	Fornecedor	0	f0	1,00	116,00			105,14		

*Valores espúrios não estão indicados