

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção Civil e Infraestrutura

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE ELEMENTOS
CONSTRUTIVOS INOVADORES EM CONCRETO CELULAR ESPUMOSO COM
CASCA DE ARROZ**

DÉBORA BRETAS SILVA

PORTO ALEGRE

2023

DÉBORA BRETAS SILVA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE ELEMENTOS
CONSTRUTIVOS INOVADORES EM CONCRETO CELULAR ESPUMOSO COM
CASCA DE ARROZ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção Civil e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

PORTO ALEGRE

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Débora Bretas
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE ELEMENTOS
CONSTRUTIVOS INOVADORES EM CONCRETO CELULAR ESPUMOSO
COM CASCA DE ARROZ / Débora Bretas Silva. -- 2023.
204 f.
Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. desempenho das edificações habitacionais. 2.
concreto celular espumoso. 3. casca de arroz. 4.
compósitos. 5. vedações verticais. I. da Silva Filho,
Luiz Carlos Pinto, orient. II. Título.

DÉBORA BRETAS SILVA

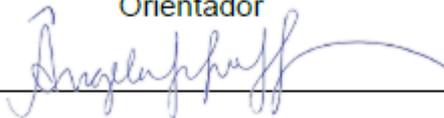
**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE ELEMENTOS
CONSTRUTIVOS INOVADORES EM CONCRETO CELULAR ESPUMOSO COM
CASCA DE ARROZ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção Civil e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de doutor.

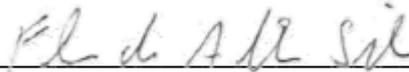
Aprovado em: Porto Alegre, 17 de maio de 2023



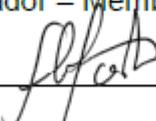
Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho – UFRGS
Orientador



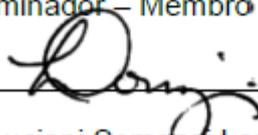
Prof.ª Dr.ª Ângela Gaio Graeff – UFRGS
Examinador – Membro interno



Prof. Dr. Flávio de Andrade Silva – PUC/RJ
Examinador – Membro externo



Prof.ª Dr.ª Fernanda Bianchi Pereira da Costa – UNIPAMPA
Examinador – Membro externo



Prof.ª Dr.ª Luciani Somensi Lorenzi – UFRGS
Examinador – Membro convidado

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela oportunidade de seguir a trajetória que faz meu coração pulsar de alegria e gratidão.

Aos meus familiares (mineiros e gaúchos) por me apoiarem ao longo de todos esses anos de muita dedicação e que mesmo muitas vezes não compreendendo as atividades desenvolvidas ou as razões para continuar trilhando tal percurso, sempre me estenderam a mão. Em especial, agradeço ao meu marido, amigo e colega de profissão Eduardo Pachla por todo auxílio técnico e emocional, essa conquista também é sua.

Às minhas filhas Carolina e Cecília, que renovaram minhas forças e esperanças na vida como um todo e trouxeram um brilho ainda mais especial para a conclusão deste trabalho.

Aos professores Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho e Dr^a. Luciani Lorenzi, pela orientação, disposição em contribuir com o trabalho e principalmente pela compreensão.

Ao técnico do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME-UFRGS), Edgar Lucas, por todo o auxílio prestado na parte prática de desenvolvimento do trabalho. Sem a sua experiência e dedicação o projeto não teria saído do papel. Agradeço também à colega de laboratório, Engenheira Civil Carolina Dalazen, pelo auxílio prestado na realização dos ensaios experimentais.

Às empresas Rodo Química e HMA Equipamentos, pela doação dos aditivos utilizados na pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de auxílio financeiro.

“A mais bela coisa que podemos vivenciar é o mistério.
Ele é fonte de qualquer arte verdadeira e qualquer ciência.
Aquele que desconhece esta emoção, aquele que
não para mais para pensar e não se fascina,
está como morto: seus olhos estão fechados”.

- Albert Einstein.

RESUMO

Frente ao elevado déficit habitacional brasileiro e uma construção civil ainda caracterizada pela reduzida produtividade, grandes desperdícios e acentuada extração de recursos naturais escassos, há uma crescente busca por tecnologias construtivas inovadoras que vão de encontro com premissas como sustentabilidade, racionalização, agilidade de fabricação/montagem e que simultaneamente tenham coerência com o clima e as condições sociais do país. No Brasil, para que uma inovação no setor construtivo seja efetivamente introduzida no mercado ela precisa previamente ter sua qualidade atestada por meio de ensaios de desempenho especificados pela ABNT NBR 15.575/2021. Dessa forma, com o intuito de disseminar e incentivar o desenvolvimento de produtos inovadores, ambientalmente mais amigáveis, bem como auxiliar na validação dos critérios normativos e consolidação da cultura de desempenho, o presente trabalho avaliou a hipótese de que elementos (paredes) para vedação vertical interna formados por componentes de concreto celular espumoso e casca de arroz *in natura* atendem ao desempenho mínimo perante a requisitos de segurança, habitabilidade e sustentabilidade. Para tanto, foram desenvolvidas análises a nível de material (dosagem, massa específica, consistência, resistência mecânica), de componente (análise das placas e dos blocos) e de elementos/sistema através da realização de ensaios de tipo em laboratório avaliando a resistência às solicitações de peças suspensas, a resistência a impactos de corpo mole e de corpo duro, a permeabilidade à água, a estanqueidade à água da chuva e pôr fim a ação de calor e choque térmico. Os resultados obtidos demonstram que os elementos desenvolvidos possuem potencial para uso como vedação vertical interna sem função estrutural, todavia ainda carecem da implementação de certos aprimoramentos de modo a obter-se o desempenho mínimo frente à totalidade dos critérios. O elemento formado por blocos apresentou desempenho superior em relação àquele formado por placas, provavelmente em razão da maior espessura dos componentes construtivos utilizados, bem como pelo travamento empregue e a presença de revestimento argamassado. O ensaio de resistência às solicitações de peças suspensas evidenciou a atuação da casca na atenuação da propagação de fissuras e no aprimoramento da ancoragem do sistema de fixação da mão-francesa. O ensaio de resistência a impactos de corpo mole contribuiu para a identificação de uma divergência quanto as condições de contorno do ensaio, resultando na sugestão da unificação da forma de apoio dos corpos de prova de modo a aproximar-se ainda mais do cenário real. No ensaio de permeabilidade evidenciou-se que os parâmetros normativos são bem rigorosos e seu atendimento demanda a utilização de revestimentos de baixa absorção ou impermeabilizantes. O ensaio de estanqueidade destacou a importância da impermeabilização da base do corpo de prova de modo a impedir a entrada de água por capilaridade. Os ensaios de ação do calor e choque térmico apontaram a possibilidade de utilização dos elementos avaliados também como vedações externas (sem função estrutural), assim como corroboram para o princípio de que compósitos cimentícios com casca de arroz são duráveis. Por fim, a principal contribuição do trabalho foi a comprovação de que blocos de concreto celular com casca de arroz podem ser utilizados como componente em elementos de vedação que atendem ao nível de desempenho mínimo frente a requisitos de segurança, habitabilidade e sustentabilidade.

Palavras-chave: desempenho das edificações habitacionais; concreto celular espumoso; casca de arroz; compósitos; vedações verticais.

ABSTRACT

In the face of the high housing deficit in Brazil and a construction industry characterized by low productivity, significant waste, and excessive extraction of scarce natural resources, there is a growing search for innovative construction technologies that align with principles such as sustainability, rationalization, manufacturing/assembly agility, and that are coherent with the climate and social conditions of the country. In Brazil, for an innovation in the construction sector to be effectively introduced to the market, it needs to undergo quality testing through performance tests specified by ABNT NBR 15.575/2021. Therefore, in order to disseminate and encourage the development of environmentally-friendly and innovative products, as well as to assist in the validation of regulatory criteria and the consolidation of a performance culture, this study evaluated the hypothesis that elements (walls) for internal vertical enclosure formed by foamed cellular concrete components and unprocessed rice husk meet the minimum performance requirements for safety, habitability, and sustainability. To achieve this, analyses were conducted at the material level (mixture, specific mass, consistency, mechanical strength), component level (analysis of plates and blocks), and element/system level through laboratory-type tests evaluating resistance to suspended loads, impact resistance to soft and hard bodies, water permeability, water tightness against rainwater, as well as thermal heat and shock resistance. The results obtained demonstrate that the developed elements have the potential for use as internal vertical enclosures without structural function, but still require certain improvements to achieve minimum performance across all criteria. The element formed by blocks showed superior performance compared to the one formed by plates, likely due to the greater thickness of the construction components used, as well as the employed interlocking and the presence of mortar coating. The test for resistance to suspended loads demonstrated the role of the husk in attenuating crack propagation and improving the anchoring of the bracket fixing system. The test for impact resistance to soft bodies contributed to identifying a discrepancy in the test boundary conditions, resulting in the suggestion to unify the support form of test specimens in order to better approximate the real scenario. The permeability test revealed that the normative parameters are quite rigorous, and their compliance requires the use of low-absorption coatings or waterproofing. The water tightness test highlighted the importance of waterproofing the base of the test specimen to prevent water entry through capillarity. The thermal heat and shock resistance tests indicated the possibility of using the evaluated elements as external enclosures (without structural function) as well, and they support the principle that cementitious composites with rice husk are durable. Finally, the main contribution of this work was to demonstrate that cellular concrete blocks with rice husk can be used as components in enclosure elements that meet the minimum performance level for safety, habitability, and sustainability requirements.

Keywords: performance of residential buildings; foamed concrete; rice husk; composites; vertical sealings.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura da Norma de Desempenho (ABNT NBR 15.575:2013)	35
Figura 2 - Reforços para fixação de peças suspensas	38
Figura 3 - Tipos de carregamento para verificação da resistência à solicitação de peças suspensas	39
Figura 4 - Cargas máximas por ponto faceando a parede para diferentes substratos	39
Figura 5 - Cargas de uso por ponto para objetos afastados da parede	40
Figura 6 - Tipos de reforços para Drywall.....	40
Figura 7 - Cargas de uso por ponto com a utilização de reforço	41
Figura 8 - Comportamento no ensaio de impacto de corpo duro de diferentes SVVIE utilizados em edificações habitacionais.....	42
Figura 9 – Deslocamento horizontal para diferentes SVVIE	42
Figura 10 – Resultado do ensaio de permeabilidade à água para alvenaria de blocos cerâmicos com revestimento (Corpo de Prova 1).....	43
Figura 11 – Resultado do ensaio de permeabilidade à água para alvenaria de blocos cerâmicos com revestimento (Corpo de Prova 2).....	44
Figura 12 – Resultado do ensaio de permeabilidade à água para alvenaria de blocos de concreto com revestimento (Corpo de Prova 1)	44
Figura 13 – Resultado do ensaio de permeabilidade à água para alvenaria de blocos de concreto com revestimento (Corpo de Prova 2)	44
Figura 14 – Resultado do ensaio de permeabilidade à água para alvenaria de blocos de solo-cimento.....	45
Figura 15 – Absorção de água ao longo do tempo em alvenaria de vedação de blocos cerâmicos com diferentes revestimentos e acabamentos	46
Figura 16 - Absorção de água pelo método da permeabilidade para CAAL	46
Figura 17 – Resultados do ensaio de impactos de corpo mole para alvenaria de vedação de blocos de concreto com RCD	47
Figura 18 – Resultados do ensaio de impactos de corpo duro para alvenaria de vedação de blocos de concreto com RCD	48
Figura 19 – Resultados ação de peças suspensas para diferentes configurações...	49
Figura 20 - Classificação dos Concretos Celulares	54
Figura 21 - Teste de Cone de Marsh Modificado.....	59

Figura 22 - Esquema de uma residência em LSF	73
Figura 23- Exemplo de concepção do SVVI sem função estrutural	73
Figura 24- Exemplo de concepção do SVVI com função estrutural	74
Figura 25- Tipos de perfis de aços zincados formados a frio para uso em sistema construtivo de paredes, pisos e cobertura	75
Figura 26- Construção em LSF utilizando método "Stick build"	76
Figura 27- Construção em LSF utilizando método por painéis	77
Figura 28- Construção em LSF utilizando método modular	78
Figura 29- Construção em LSF utilizando método "Platform"	79
Figura 30- Construção em LSF utilizando método "Balloon"	79
Figura 31 - Transmissão da carga vertical à fundação	80
Figura 32- Painel típico em LSF	81
Figura 33 - Ancoragem química na fundação	82
Figura 34 - Ancoragem com fitas metálicas	83
Figura 35 - Tipos de Laje LSF	84
Figura 36 - Facha com fechamento externo em OSB.....	85
Figura 37 - Coloração chapas de gesso acartonado	89
Figura 38 - Tipos de bordas chapas em gesso acartonado	90
Figura 39 - Classificação das construções LSF dependendo da posição dos materiais de isolamento.....	94
Figura 40 - Distribuição de temperatura dentro das paredes LSF	94
Figura 41- Modos de ruptura parafuso	95
Figura 42 - Blocos de concreto celular autoclavado (BCCA)	97
Figura 43 – Classes de BCCA	97
Figura 44 - Sequência de realização da pesquisa	99
Figura 45 - Curva granulométrica da areia	101
Figura 46 - Curva granulométrica discreta da areia.....	101
Figura 47- Casca de Arroz in natura	102
Figura 48 - Curva granulométrica da CA	103
Figura 49- Curva granulométrica discreta da CA.....	103
Figura 50- Espuma pré-formada	105
Figura 51 - Aparência dos compósitos contendo diferentes percentuais de CA	110
Figura 52 – Simplificação do processo de dosagem	111
Figura 53 – Índice de consistência com Mini Slump	112

Figura 54 – Processo de moldagem das placas de concreto celular CA	115
Figura 55 – Placa de concreto celular com CA após desmolde.....	116
Figura 56 – Blocos de concreto celular com CA após desmolde	116
Figura 57 – Placas de gesso na face não ensaiada	118
Figura 58 – a) Estrutura metálica; (b) Fixação das placas de concreto celular com CA	119
Figura 59 – Aparafusamento das placas	119
Figura 60 – Montagem das placas do Corpo de Prova 1.....	120
Figura 61 – (a) Região de lixamento na face externa; (b) Face lateral das placas .	120
Figura 62 – (a) e (b) Danos nas placas em razão da montagem	121
Figura 63 – Tratamento das juntas.....	121
Figura 64 – Produtos para tratamento das juntas: (a) fita; (b) massa única.....	122
Figura 65 – Elemento 1 finalizado	122
Figura 66 – Representação esquemática dos Elementos 2 e 3.....	123
Figura 67 – Processo executivo dos elementos 2 e 3: (a) esquema de encaixe dos blocos e barras e (b) zoom na disposição das barras	124
Figura 68 – Elemento 2 antes da aplicação do revestimento de argamassa e acabamento	124
Figura 69 - Esquema de mão-francesa para ensaios de peças suspensas.....	127
Figura 70 – (a) Mão-francesa utilizada no ensaio; (b) fixador toggler bolt	128
Figura 71 – Dispositivo de fixação utilizado no Elemento 2.....	128
Figura 72 – (a) Posição da mão-francesa e dos relógios R1, R2 e R3; (b) vista frontal da mão-francesa e dos relógios R4 e R5	130
Figura 73 – (a) Face oposta à aplicação de carga - R1, R2 e R3; (b) face da aplicação de cargas - R4 e R5	130
Figura 74 – Desenho esquemático do ensaio: (a) localização do corpo mole, facetando o corpo de prova; (b) detalhe do movimento pendular livre do corpo mole.....	132
Figura 75 – Impacto de corpo mole para vedações verticais internas sem função estrutural	132
Figura 76 – Saco de couro cilíndrico em repouso e tangenciando o Elemento 1....	133
Figura 77 – (a) Pontos de impacto; (b) Pontos de marcação dos deslocamentos ..	133
Figura 78 – Lápis marcador	134
Figura 79 - Impactos de corpo duro para vedações verticais internas.....	135

Figura 80 - Desenho esquemático do ensaio de corpo duro: (a) localização do corpo duro, face externa do corpo de prova e (b) detalhe do movimento pendular livre da esfera para realização do ensaio	135
Figura 81 – Esferas utilizadas como corpo duro: (a) 500 gramas; (b) 1000 gramas	136
Figura 82 - Acoplamento de câmara de ensaio à parede	137
Figura 83 - Posicionamento dos (a) termopares na superfície do corpo de prova e (b) do defletômetro	139
Figura 84 - Parâmetros para o ensaio de estanqueidade à água da chuva	140
Figura 85 - Comparação da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de cura	144
Figura 86 - Comparação da resistência à tração na flexão aos 7 e aos 28 dias de cura	144
Figura 87 – Primeira ocorrência de fissura (carga de 400 N)	149
Figura 88 – Fissuração imediatamente anterior à interrupção do ensaio.....	149
Figura 89 – Elemento 1 após impactos no ponto A: (a) face do sistema após impacto de 60 J; (b) dano causado pelo impacto de 120 J	151
Figura 90 – Elemento 1 após impactos no ponto B: (a) região fragilizada pelo ensaio de permeabilidade; (b) dano causado pelo impacto de 180 J.....	152
Figura 91 – Aspecto das mossas para energia de 2,5J (cor verde).....	153
Figura 92 – Aspecto das mossas para energia de 10,0J (cor preta).....	155
Figura 93 – (a) Mossas perfuradas pela ponta do paquímetro; (b) Fissuração do lado externo do Elemento 1	155
Figura 94 – Ponto de acoplamento da câmara (linha na cor azul).....	156
Figura 95 – Zoom fissura canto esquerdo com destaque para ponto de encharcamento no local da fissura	156
Figura 96 – Zoom fissura canto direito com destaque para ponto de encharcamento no local da fissura	157
Figura 97 – Elemento 2 após impactos no ponto A: (a) dano causado pelo impacto de energia de 120 J; (b) zoom do dano.....	159
Figura 98 - Face de impacto e face para medição	160
Figura 99 – Vista geral do Elemento 2 após os impactos de 2,5 J e 10 J.....	161
Figura 100 – Exemplo de medição da profundidade das mossas	162
Figura 101 – Aspecto das mossas para energia de 2,5J.....	163

Figura 102 – Aspecto das mossas para energia de 10,0J.....	164
Figura 103 - Parâmetros para atendimento aos níveis intermediário e superior frente ao ensaio de impactos de corpo duro	165
Figura 104 – Configuração de ensaio do Elemento 2 frente à permeabilidade à água	165
Figura 105 – Execução do ensaio de estanqueidade à água da chuva.....	167
Figura 106 – Face de verificação das manchas de umidade no ensaio de estanqueidade	169
Figura 107 - Posicionamento do defletômetro utilizado para a coleta dos deslocamentos na face oposta à fonte radiante: (a) visão frontal; (b) visão lateral.	171
Figura 108 – Configuração da face externa: (a) câmara utilizada para aquecimento e resfriamento posicionada defrente com o corpo de prova; (b) posicionamento dos termopares.....	171
Figura 109 – Configuração do ensaio de solicitações de peças suspensas para o Elemento 3.....	173
Figura 110 – Detalhes observados no ensaio do dispositivo de fixação do Tipo 1: (a) início do deslizamento do ponto R5 e (b) deslizamento do parafuso.....	175
Figura 111 – Queda da mão-francesa: (a) deslizamento do parafuso e da bucha no ponto R4 e (b) vista frontal.....	175
Figura 112 – Aspectos do dispositivo de fixação que levaram ao encerramento do ensaio (a) bucha e parafuso no ponto R5 e (b) bucha e parafuso no ponto R4.....	177
Figura 113 - Profundidade das mossas da energia de impacto de 2,5 J (Elemento 1)	179
Figura 114 - Profundidade das mossas relativas às energias de impacto de 2,5 J e 10,0 J (Elemento 2).....	179
Figura 115 - Comparativo de cargas de uso para diferentes elementos de vedação	182
Figura 116 - Deslocamentos horizontais obtidos no ensaio de impactos de corpo mole	184
Figura 117 - Comparativo de resultados do ensaio de permeabilidade à água para diferentes tipos de blocos de vedação	186

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparativo de cargas máximas de uso do fabricante em relação às peças suspensas.....	37
Tabela 2 - Classificação do concreto celular pelo percentual de dispersão	60
Tabela 3 - Relação entre densidade e retração do concreto celular espumoso	62
Tabela 4- Características painéis OSB LP Brasil	86
Tabela 5- Espessura mínima das placas de OSB conforme a modulação e o tipo de revestimento	86
Tabela 6- Requisitos de resistência à tração na flexão	88
Tabela 7- Características placas cimentícias Brasilit.....	88
Tabela 8- Tipos de chapa em gesso acartonado.....	89
Tabela 9- Tolerâncias das características geométricas das chapas de gesso	90
Tabela 10- Limites para as características físicas e mecânicas das chapas de gesso para drywall.....	91
Tabela 11 – Características das chapas de gesso acartonado comercial	91
Tabela 12- Caracterização areia	102
Tabela 13 – Composição química da casca de arroz in natura	104
Tabela 14 - Traço utilizado como parâmetro inicial	106
Tabela 15- Traço referência concreto celular espumoso.....	107
Tabela 16- Determinação do teor ideal de casca	109
Tabela 17- Determinação do teor ideal de areia.....	109
Tabela 18 - Dosagem concreto celular com incorporação de CA e areia	110
Tabela 19 – Parâmetros normativos utilizados na avaliação experimental de desempenho	125
Tabela 20 - MEF e MEE aos 28 dias de cura das diferentes dosagens	141
Tabela 21 - Índice de consistência das diferentes dosagens.....	143
Tabela 22 - Resistência mecânica das diferentes dosagens aos 7 dias de cura	143
Tabela 23 - Resistência mecânica das diferentes dosagens aos 28 dias de cura ..	143
Tabela 24 - Comparação do traço selecionado com os dados da literatura	145
Tabela 25 - Resistência à compressão das amostras cúbicas aos 28 dias de cura (Traço Referência)	147
Tabela 26 - Resistência à compressão das amostras cúbicas aos 28 dias de cura (Concreto celular com CA).....	147

Tabela 27 – Resultado do ensaio de resistência do Elemento 1 às solicitações de peças suspensas	148
Tabela 28 – Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole com impactos no ponto A	151
Tabela 29 – Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole com impactos no ponto B	152
Tabela 30 – Resultado do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para energia de 2,5J.....	153
Tabela 31 – Resultado do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para energia de 10,0J.....	154
Tabela 32 – Resultado do ensaio de resistência do Elemento 1 às solicitações de peças suspensas	158
Tabela 33 – Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole com impactos no ponto A	159
Tabela 34 – Resultado do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para energia de 2,5J.....	162
Tabela 35 – Resultado do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro energia de 10,0J para o Elemento 2	163
Tabela 36 – Volume de água infiltrado durante a realização do ensaio de permeabilidade à água.....	166
Tabela 37 - Resultado ensaio de estanqueidade à água da chuva	168
Tabela 38 - Resultados coletados no ensaio de ação de calor e choque térmico...	170
Tabela 39 – Resultado do ensaio de resistência do Elemento 3 às solicitações de peças suspensas para o dispositivo de fixação do Tipo 1	174
Tabela 40 – Resultado do ensaio de resistência do Elemento 3 às solicitações de peças suspensas para o dispositivo de fixação do Tipo 2	176

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos resultados obtidos para o Elemento 1.....	177
Quadro 2 – Resumo dos resultados obtidos para o Elemento 2.....	177
Quadro 3 – Resumo dos resultados obtidos para o Elemento 3.....	178

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI – American Concrete Institute
ASTM – American Society for Testing and Materials
BCCA – Blocos de concreto celular autoclavado
BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento
BNH – Banco Nacional da Habitação
CIB – International Council for Research and Innovation in Building and Construction
CEF – Caixa Econômica Federal
DATec – Documento de Avaliação Técnica
EED – Ensaio Experimentais de desempenho
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
FJP – Fundação João Pinheiro
G – Peso-próprio
IBTQC - Instituto Brasileiro de Tecnologia em Qualidade da Construção
ISO – International Organization for Standardization
LSF – Light Steel Framing
MEF – Massa específica no estado fresco
MEE – Massa específica no estado endurecido.
PAC – Programa de Aceleração do Crescimento
PBQP-h – Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat
PeBBu – Performance Based Building
PIL – Programa de Investimento em Logística
PMCMV – Programa Minha Casa Minha Vida
PNUD – Programa das Nações Unidas para o desenvolvimento
RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
 R_c – Resistência à compressão
 R_{TF} – Resistência à tração na flexão
SINAT – Sistema Nacional de Avaliação Técnica
SVVE – Sistemas de Vedações Verticais Externas
SVVI – Sistemas Verticais de Vedações Internas
SVVIE – Sistemas de Vedações Verticais Internas e Externas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	22
1.2 IMPORTÂNCIA E INEDITISMO DO ESTUDO	26
1.3 OBJETIVOS.....	27
1.3.1 Objetivo geral	27
1.3.2 Objetivos específicos.....	27
1.4 HIPÓTESE.....	27
1.5 LIMITAÇÕES	28
1.6 DELIMITAÇÕES	28
1.7 ESTRUTURA DA TESE	29
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	30
2.1 DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES	30
2.1.1 Definições e conceitos gerais	30
2.1.2 Histórico e Impacto Cultural.....	31
2.1.3 Estrutura da norma de desempenho brasileira (ABNT NBR 15575)	34
2.1.4 Análises de desempenho em sistemas de vedação vertical interna.....	36
2.2 INDUSTRIALIZAÇÃO E INOVAÇÃO DA CONSTRUÇÃO.....	50
2.2.1 Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Sistemas Inovadores e Convencionais – SINAT	52
2.3 CONCRETO CELULAR	53
2.3.1 Normatização Técnica	57
2.3.2 Dosagem	58
2.3.3 Propriedades no Estado Fresco e Endurecido.....	58
2.3.3.1 Fluidez, Consistência e Estabilidade	59
2.3.3.2 Densidade.....	60
2.3.3.3 Retração por secagem	60
2.3.3.4 Resistência mecânica	63
2.3.4 Uso de resíduos no concreto celular espumoso	64
2.3.5 Durabilidade em compósitos cimentícios leves com fibras vegetais	68
2.4 LIGHT STEEL FRAMING.....	71
2.4.1 Tipos de perfis utilizados	74
2.4.2 Métodos construtivos.....	75
2.4.2.1 “Stick-build”	75
2.4.2.2 Construção por Painéis.....	76
2.4.2.3 Construção Modular	77
2.4.2.4 “Platform” e “Balloon”	78

2.4.3	Painéis.....	80
2.4.4	Fundação	81
2.4.5	Lajes e cobertura.....	83
2.4.6	Componentes de fechamento.....	84
2.4.6.1	Oriented Strand Board (OSB).....	85
2.4.6.2	Placas cimentícias	87
2.4.6.3	Gesso acartonado (Drywall).....	88
2.4.7	Isolamento térmico e acústico	92
2.4.8	Ligações	95
2.5	ALVENARIA DE VEDAÇÃO EM BLOCOS DE CONCRETO.....	96
2.5.1	Blocos de concreto leve.....	97
3.	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	99
3.1	CRONOLOGIA DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	99
3.2	PRODUÇÃO DOS COMPONENTES.....	99
3.2.1	Materiais e equipamentos.....	100
3.2.2	Dosagem e Caracterização dos Concretos.....	106
3.2.3	Moldagem e cura.....	114
3.2.3.1	Amostras para definição do traço	114
3.2.3.2	Componentes (placas e blocos)	114
3.2.4	Caracterização mecânica das placas e dos blocos de vedação	117
3.3	CHARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE VEDAÇÃO INTERNA	117
3.3.1	ELEMENTO 1: Perfis metálicos e fechamento em placas leves com CA.....	117
3.3.2	ELEMENTOS 2 e 3: Alvenaria com blocos leves.....	122
3.4	AValiação EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DOS ELEMENTOS..	124
3.4.1	Resistência às solicitações de peças suspensas.....	126
3.4.2	Resistência a impactos de Corpo mole.....	131
3.4.3	Resistência a impactos de Corpo duro	134
3.4.4	Permeabilidade à água.....	136
3.4.5	Ação do calor e Choque térmico para SVVE	137
3.4.6	Estanqueidade à água da chuva	139
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	141
4.1	CHARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS	141
4.2	CHARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPONENTES	146
4.3	EED – PERFIS METÁLICOS COM FECHAMENTO EM PLACAS LEVES	147
4.3.1	Resistência às solicitações de peças suspensas.....	147
4.3.2	Resistência a impactos de corpo mole	150

4.3.2.1	Aplicação no ponto A (vão entre os montantes)	150
4.3.2.2	Aplicação no ponto B (montante)	151
4.3.3	Resistência a impactos de corpo duro	153
4.3.4	Permeabilidade à água	156
4.4	EED – ALVENARIA COM BLOCOS LEVES	157
4.4.1	Blocos leves com CA	157
4.4.1.1	Resistência às solicitações de peças suspensas	157
4.4.1.2	Resistência a impactos de corpo mole	159
4.4.1.3	Resistência a impactos de corpo duro	160
4.4.1.4	Permeabilidade à água	165
4.4.1.5	Estanqueidade à água	166
4.4.1.1	Ação do calor e choque térmico	169
4.4.2	Blocos leves sem CA	172
4.4.2.1	Resistência às solicitações de peças suspensas	173
4.5	ANÁLISE DO DESEMPENHO GLOBAL DOS PRODUTOS DESENVOLVIDOS	177
4.6	ANÁLISE COMPARATIVA COM SISTEMAS EXISTENTES (CONVENCIONAIS E INOVADORES)	181
4.6.1	Elemento 1	181
4.6.2	Elemento 2	185
5.	CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS	188
6.	CONCLUSÃO	192
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	194
	REFERÊNCIAS	196

1. INTRODUÇÃO

Este primeiro capítulo visa introduzir e justificar o trabalho de pesquisa que foi desenvolvido, bem como, apresentar os objetivos que o estudo se propôs a alcançar, seu ineditismo, suas limitações, suas delimitações e um breve escopo da estrutura da tese.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

É indiscutível que a construção civil exerce uma função de suma importância para a sociedade, contribuindo para o desenvolvimento econômico e social, seja pela geração de empregos, implementação de políticas habitacionais, como o Programa Casa Verde e Amarela, ou obras de infraestrutura, como o Programa de Aceleração do Crescimento – PAC – e o Programa de Investimento em Logística – PIL (ABDI, 2015; AZEVEDO, 2018; NUNES et al., 2020).

Todavia, é importante pontuar que, em seu atual cenário, o setor ainda apresenta resquícios culturais do Brasil Colônia, isto é, em que prevalecem métodos construtivos artesanais (caracterizados pela reduzida produtividade, por grandes desperdícios, custo elevado e trabalhadores de baixa qualificação). Além disso, em termos internacionais, é responsável por 35% das emissões globais de CO₂ e por cerca de 45% a 65% dos resíduos depositados em aterros (ALENCAR *et al.*, 2020).

É provável que tal panorama ainda se intensifique nas próximas décadas com o aumento da urbanização, uma vez que existe a previsão de que, até o ano de 2050, aproximadamente, 68% da população mundial viverá em áreas urbanas, o que poderá intensificar o déficit habitacional existente, que se encontra hoje na faixa das 5,876 milhões de moradias (ALMEIDA et al., 2020; GOMES, 2012; FJP, 2021).

Observa-se, portanto, uma crescente busca por alternativas técnicas (novos materiais, métodos, processos e sistemas construtivos) que proporcionem maior agilidade construtiva, racionalização, menor impacto ambiental e que, simultaneamente, sejam coerentes com o clima e as condições sociais do país (CARDOSO, 2019; GOMES, 2007; MUZZI, 2014; ROS, 2019; SOTSEK; SANTOS, 2018, POLETO et al., 2019).

Contudo, paralelamente ao surgimento de tais inovações, vêm a necessidade de avaliação dessas, de modo a assegurar-se que estas atendem a parâmetros mínimos

que viabilizem sua colocação em uso, isto é, a modernização deve vir acompanhada da comprovação técnica de qualidade (PBQP-h, 2023).

Desse modo, ao avaliar sistemas construtivos com enfoque na inovação, torna-se imprescindível avaliar aspectos ligados ao desempenho (GOMES, 2012; MUZZI, 2014; VELOSA; FANGUEIRO; MENDONÇA, 2013). O atendimento aos requisitos e critérios de desempenho, comprovadamente, asseguram maior segurança, sustentabilidade e qualidade de vida aos usuários da edificação (RIBAS, 2013).

A habitabilidade, em especial, conquistou ainda mais destaque e relevância no ano de 2020 em razão do contexto pandêmico causado pelo vírus SARS-CoV-2 (Coronavírus) que demandou longos períodos de isolamento social e tornaram as habitações ambientes múltiplos, isto é, de ensino, moradia, trabalho, lazer, etc. (BARBIRATO, 2020; BRITO; IKEDA; AKUTSU, 2020; OLIVEIRA, 2019; ZOU; ZHAN; XIANG, 2021).

A “Norma de Desempenho”, atual NBR 15.575 (ABNT, 2021), foi implementada no ano de 2013, bem mais tarde que países como França, Espanha e Portugal, que já haviam implementado o assunto há cerca de 30-40 anos, e, embora tenha enfrentado limitações, como falta de infraestrutura para que sua disseminação fosse rápida e apropriada, trouxe consigo mudanças significativas no modo de se pensar e projetar edificações (LORENZI, 2013).

Uma década após todo este processo movimentar não somente os construtores e incorporadores, que passaram a ter que entregar obras com desempenho comprovado, mas também fornecedores, projetistas e os próprios usuários das edificações, a cultura de desempenho está mais consolidada no Brasil, fato este observado pelo aumento do interesse do mercado em conhecer o comportamento dos novos produtos e o conseqüente aumento da demanda por serviços nas instituições de avaliação (LORENZI; STEIN; SILVA FILHO, 2020).

Entretanto, é sabido que os parâmetros e métodos avaliativos estipulados pela normativa brasileira carecem de constantes adaptações e melhorias, de modo a acompanhar as mudanças tecnológicas constantes e, uma vez que essa se baseou em normas estrangeiras, devido à maior experiência destes países na avaliação experimental do desempenho de sistemas construtivos (LORENZI; STEIN; SILVA FILHO, 2020).

Porém, é importante evidenciar que, embora os métodos sejam apropriados, a infraestrutura disponível em tais países é bem diferente da realidade brasileira, o que

pode originar critérios demasiadamente exigentes para a conjuntura nacional. Ademais, o Brasil ainda demanda um maior volume de ensaios para caracterizar o comportamento de sistemas construtivos, sejam estes inovadores ou não, de modo a obter-se uma maior expressividade nos resultados obtidos e nas correlações desenvolvidas (LORENZI; STEIN; SILVA FILHO, 2020).

Neste sentido, elucida-se como a principal iniciativa criada no Brasil, até o presente momento, para avaliar o desempenho de sistemas construtivos inovadores e convencionais, a instauração do Sistema Nacional de Avaliação Técnica (SiNAT), relacionado ao Ministério do Desenvolvimento Regional do Governo Federal e ao Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat (PBQP-h), visando, substancialmente, à disseminação desse saber no país e estimular, com respaldo técnico, inovações tecnológicas na área (LORENZI, 2013).

Neste contexto, é sabido que o concreto celular espumoso possui grande aptidão para ser uma excelente rota de incorporação de resíduos e em grandes volumes (até cerca de 75% em substituição ao cimento), especialmente pela resistência mecânica não ser seu foco principal, mas sim propriedades voltadas ao aspecto funcional, isto é, a razão do concreto celular se destacar está ligada não somente à sua baixa densidade, mas, também, devido ao melhor desempenho em relação a questões como isolamento térmico, isolamento acústico e resistência ao fogo (CHICA; ALZATE, 2019; SHAH *et al.*, 2021, SENTHILKUMAR *et al.*, 2021; MADHWANI; SATHYAN; MINI, 2020; JUNAID *et al.*, 2022).

De forma análoga, as potencialidades de aplicação na construção civil de inúmeros subprodutos – resíduos de vidro, cortiça, borracha, plástico reciclado, resíduos cerâmicos, pó de pedra, escórias, cinzas volantes, resíduos de construção e demolição, etc. – têm sido foco de estudos por diversos pesquisadores ao redor do país (LOPES *et al.*, 2023; AZEVEDO, 2018; SALADO, 2011) e do mundo (AGRAWAL *et al.*, 2007; ASDRUBALI; D’ALESSANDRO; SCHIAVONI, 2015; MADURWAR; RALEGAONKAR; MANDAVGANE, 2013; SAFIUDDIN *et al.*, 2010), tendo os resíduos agroindustriais recebido atenção especial nos últimos anos, como: casca e palha de arroz, palha de trigo, resíduos de serraria, juta, sisal, entre outros (ANTÓNIO *et al.*, 2018; PRUSTY; PATRO; BASARKAR, 2016).

A este respeito, no que tange os resíduos agroindustriais existentes, a casca de arroz é um dos mais abundantes em termos de acúmulo, posto que representa 20% do peso do arroz e este, por sua vez, possui uma elevada produção mundial.

Anualmente, são produzidos ao redor do mundo em torno de 700 milhões de toneladas de arroz (ANTÓNIO et al., 2018), sendo que, no Brasil, somente o estado do Rio Grande do Sul produziu, na última safra (2021/2022), 7.708.229 toneladas do grão (IRGA, 2020).

É importante evidenciar que grande parte dessa enorme quantia de resíduos é, em geral, disposta em aterros, trazendo diversos malefícios ao meio ambiente em razão de sua árdua decomposição pelo solo devido à presença de lignina e sílica (RIPOLI FILHO; RIPOLI; BAESSO, 2022).

A utilização de resíduos no desenvolvimento de materiais mais sustentáveis configura-se não somente como uma alternativa para frear a poluição ambiental, como também para a redução de custos dos produtos construtivos e gastos com o condicionamento artificial dos ambientes (BARRERO et al., 2016). E, embora o uso de resíduos no concreto celular já tenha sido avaliado, a efetiva aplicação do conceito ainda não está difundida em sua totalidade, existindo, portanto, espaço e necessidade de novas investigações (FALLIANO et al., 2019; SHAH et al., 2021). Além do que o uso da fibra *in natura* raramente é investigado, sendo a utilização da cinza da casca de arroz bem mais recorrente (MARQUES et al., 2021; CHABANNES et al., 2014), o que remete a uma experiência internacional pouco consolidada neste âmbito (SERRANO et al., 2012).

A escolha pela utilização da casca de arroz como resíduo não se embasa unicamente em sua grande oferta local e custo praticamente nulo de obtenção, mas também em suas vantagens substanciais, isto é, não inflamar com facilidade, devido ao seu particular arranjo estrutural sílica-celulose (GARCIA-DIAZ et al., 2014), ter baixa densidade (150-175 kg/m³) e diminuta condutividade térmica (SANGMESH et al., 2023; KABAY et al., 2013), e, principalmente, ser compatível com matrizes cimentícias produzindo compósitos duráveis (PACHLA, 2022; SOUZA, 2008).

Portanto, configura-se como uma excelente oportunidade o emprego de técnicas com um maior grau de industrialização, racionalização e sustentabilidade, como placas/painéis pré-fabricados e blocos com reaproveitamento de resíduos (DELAZERI, 2018; SABĂU et al., 2018; SALADO, 2011; XU et al., 2020) no subsistema das vedações verticais, que, em geral, é o que mais requer matéria-prima durante a etapa de construção e que, conseqüentemente, mais produz resíduos em caso de demolição (CARDOSO, 2016).

1.2 IMPORTÂNCIA E INEDITISMO DO ESTUDO

O presente trabalho propôs o desenvolvimento de dois sistemas construtivos inovadores distintos, representados para fins de análise por elementos (painéis/alvenarias) formados por componentes leves (placas e blocos de concreto celular com casca de arroz), bem como, a avaliação do atendimento destes ao desempenho mínimo especificado pela ABNT NBR 15.575-4:2021 para sistemas de vedação vertical interna (SVVI).

Desse modo, pode-se citar como fatores que ressaltam a importância e o ineditismo do trabalho:

- desenvolvimento de produtos inovadores, ambientalmente mais amigáveis e alternativos aos comumente empregues para a mesma função, explorando sua capacidade de aplicação na construção civil brasileira;
- disseminação e incentivo das práticas de incorporação de resíduos (especialmente os de grande disponibilidade regional) em produtos cimentícios para torná-los mais sustentáveis;
- avaliação, pela primeira vez no Brasil, do desempenho de componentes de concreto celular espumoso contendo casca de arroz em sua forma natural frente aos critérios da ABNT NBR 15.575-4 (ABNT, 2021).

É importante destacar que, até o presente momento, somente blocos de concreto celular autoclavado foram avaliados frente aos critérios da ABNT NBR 15.575-4 (ABNT, 2021). Além disso, tratando-se do concreto celular espumoso a grande maioria dos trabalhos são voltados apenas para sua avaliação mecânica, bem como, raríssimos trabalhos utilizam a casca *in natura*, sendo o mais comum sua utilização na forma de cinzas.

Ademais, o trabalho possui significado intrínseco ao fomentar o banco de dados sobre o desempenho das edificações habitacionais, contribuindo para a construção e expansão do conhecimento científico, bem como, na validação de critérios normativos, visto que existem poucos laboratórios no país equipados com a infraestrutura necessária para a realização de tais análises em universidades.

1.3 OBJETIVOS

Neste tópico, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver elementos de vedação vertical internos, sem função estrutural, a partir de componentes em concreto celular espumoso com casca de arroz e analisar se estes possuem as características necessárias para atender ao desempenho mínimo exigido pela ABNT NBR 15.575-4:2021 perante requisitos de segurança, habitabilidade e sustentabilidade.

1.3.2 Objetivos específicos

- Produzir componentes de fechamento (placas) para o sistema LSF em concreto celular espumoso e casca de arroz;
- Produzir componentes (blocos) para alvenaria em concreto celular espumoso e casca de arroz;
- Desenvolver a partir dos componentes produzidos dois elementos (paredes) para vedação vertical interna, sem função estrutural, sendo um leve ($G \leq 600 \text{ N/m}^2$) e um pesado ($G > 600 \text{ N/m}^2$);
- Avaliar o desempenho dos elementos por meio de ensaios especificados pela NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) que traduzem os requisitos dos usuários quanto a questões de segurança, habitabilidade e sustentabilidade, tais como: resistência às solicitações de peças suspensas, resistência a impactos de corpo mole e de corpo duro, permeabilidade à água, estanqueidade à água da chuva, e ação do calor e choque térmico.

1.4 HIPÓTESE

Elementos de vedação vertical interna, sem função estrutural, desenvolvidos a partir de componentes em concreto celular espumoso e casca de arroz, atendem ao nível mínimo de desempenho estabelecido pela ABNT NBR 15.575-4 (ABNT, 2021), no que tange os ensaios de permeabilidade à água, estanqueidade à água da chuva, resistência às solicitações de peças suspensas, resistência a impactos de corpo mole e de corpo duro, e ação do calor e choque térmico.

1.5 DELIMITAÇÕES

Para viabilizar o desenvolvimento do presente trabalho, foi necessária a definição de algumas delimitações, tais quais:

- Foram consideradas apenas duas dosagens, isto é, uma contendo casca de arroz e outra consistindo apenas no concreto celular espumoso, a qual serviu de parâmetro de referência;
- Os ensaios de desempenho foram realizados na infraestrutura disponível no laboratório LEME/UFRGS localizado na cidade de Porto Alegre – RS;
- A avaliação de desempenho restringiu-se à realização dos ensaios de resistência às solicitações de peças suspensas, resistência a impactos de corpo mole e de corpo duro, permeabilidade à água, estanqueidade à água da chuva e ação do calor e choque térmico;
- A compatibilidade dos elementos desenvolvidos com outros sistemas e subsistemas, bem como, questões ligadas à microestrutura dos componentes (compósitos de concreto celular com casca de arroz) não foram objeto de estudo.

1.6 LIMITAÇÕES

O presente trabalho se limitou a avaliar o desempenho especificado pela ABNT NBR 15.575:2021 no que tange os ensaios de resistência às solicitações de peças suspensas, resistência a impactos de corpo mole e de corpo duro, permeabilidade à água, estanqueidade à água da chuva, e ação do calor e choque térmico. Assim, é válido, portanto, ressaltar que os ensaios experimentais realizados são apenas um recorte da NBR 15.575-4 (ABNT, 2021), a qual engloba uma análise bem mais extensa do desempenho dos SVVIE.

Ademais, todas as análises foram realizadas em laboratório a partir de ensaios experimentais em protótipos em escala real.

1.7 ESTRUTURA DA TESE

Além deste capítulo introdutório, o qual se refere à contextualização do tema abordado pelo trabalho e descreve seu ineditismo e objetivos, a presente tese é constituída por outros cinco capítulos.

No CAPÍTULO 2, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica acerca dos sistemas construtivos analisados (seus benefícios e suas lacunas técnicas), do concreto celular espumoso e do uso de resíduos vegetais neste tipo de material, bem como, definições acerca do surgimento da cultura de desempenho no Brasil, abordando trabalhos e publicações que norteiam a sequência da pesquisa.

Os materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, de forma a responder a hipótese criada, são apresentados minuciosamente no CAPÍTULO 3, o qual foi dividido em três partes. A primeira parte é voltada para a produção dos componentes de fechamento em si, a segunda diz respeito à caracterização dos elementos de vedação desenvolvidos e a terceira referente aos ensaios experimentais de desempenho, balizados pela NBR 15.575-4 (ABNT, 2021).

O CAPÍTULO 4 contempla a análise e discussão dos resultados experimentais encontrados por meio do confronto com os argumentos apresentados nos capítulos dois e três. Nessa parte, a hipótese foi validada ou refutada, ainda que parcialmente.

O CAPÍTULO 5 reúne e discute as principais contribuições científicas geradas a partir do presente estudo.

O CAPÍTULO 6 trata das conclusões do trabalho, em que estão agrupadas as ideias principais discutidas ao longo do seu desenvolvimento, bem como, os aspectos positivos e negativos vislumbrados durante o processo.

A tese é concluída com as sugestões para futuras pesquisas na área e as referências bibliográficas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo aborda a literatura atual acerca dos tópicos tratados na presente tese, que são: os sistemas de vedação vertical interna (SVVI), o concreto celular espumoso – material base para o desenvolvimento dos componentes de fechamento – e o uso de biomassa em materiais cimentícios, mais especificamente, em concretos leves, de modo a fundamentar o trabalho que foi desenvolvido nos capítulos subsequentes.

2.1 DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES

Este subitem apresenta a estrutura geral da NBR 15.575 (ABNT, 2021), destacando as diferenças entre esta e as normas tradicionais (prescritivas), seu histórico e sua abrangência.

2.1.1 Definições e conceitos gerais

A principal distinção entre as normas tradicionais e as normas de desempenho está na abordagem. As normas tradicionais são prescritivas, isto é, com base no uso consagrado, apresentam um determinado “roteiro” de como a edificação deve ou não ser construída ou como determinado método/processo deve ser executado (BUKOWSKI; FOLIENSTE, 2003; CBIC, 2013; CIB, 1982).

Por outro lado, as normas de desempenho são expressas em termos de fins e não de meios, ou seja, há uma preocupação com os requisitos que a edificação deve atender independentemente da solução adotada. Todavia, isso não significa que os materiais empregados não sejam considerados, mas sim que o foco está na questão se estes irão atingir os objetivos propostos de maneira confiável ao longo do período de uso especificado (BUKOWSKI; FOLIENSTE, 2003; CBIC, 2013; CIB, 1982).

A abordagem de desempenho é favorável uma vez que submete todas as partes da edificação a uma avaliação minuciosa, contudo, para que isso se concretize, é necessário um amplo e aprofundado conhecimento científico acerca de cada um dos aspectos construtivos envolvidos na técnica, bem como, noções claras dos requisitos dos usuários da edificação e do contexto no qual esta será inserida (CIB, 1982).

Surge, então, o conceito de desempenho, isto é, o comportamento em uso das edificações, o qual é traduzido em termos de normativa pelo conjunto de requisitos e critérios que são abordados mais detalhadamente nos tópicos seguintes (CBIC, 2013).

2.1.2 Histórico e Impacto Cultural

O conceito desempenho em sua forma mais abstrata não é recente, existem relatos na literatura de que esse está presente desde o período anterior a Cristo (a.C.), podendo ser citado como exemplo a Lei de Talião presente no Código de Hammurabi, que foi o primeiro código na história a reunir diversas leis, que vigorou na Mesopotâmia, aproximadamente, em meados de 1900 a.C (LORENZI, 2013).

A Lei de Talião ficou popularmente conhecida como “olho por olho, dente por dente”, que traduz muito bem uma de suas principais regras: se um construtor construir uma casa para alguém, e não a fizer bem feita, e a casa ruir e matar o proprietário, então, o construtor deverá ser condenado à morte. Basicamente, a lei visa assegurar que o construtor se responsabilize pelos seus atos e, ao mesmo tempo, que as construções alcancem e mantenham ao longo do tempo o que foi proposto na sua concepção (LORENZI, 2013).

Apesar disso, a avaliação técnica do desempenho das edificações só iniciou, realmente, no século XX, surgindo nas décadas de 1930 e 1940 as primeiras normativas juntamente com a expressão “requisitos de desempenho”, e, na década de 60, um amadurecimento do conceito – frente ao empenho dos EUA e alguns países da Europa após a Segunda Guerra mundial em razão do déficit habitacional existente (BORGES, 2008; LORENZI, 2013).

Em razão do grande número de manifestações patológicas oriundas do emprego de tecnologias inovadoras na reestruturação do pós-guerra, foi criado na França o Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB) em 1947 – para avaliar tecnicamente tais sistemas – e, em 1960, a Union Européenne pour Agrément Technique de La Cosntruction (UEAtc) – para unificar o conceito de desempenho (BORGES, 2008; LORENZI, 2013).

Pode-se dizer que o conceito de desempenho das edificações como é tratado atualmente surgiu no final da década de 60. A partir daquele momento, diferentes países começaram a elaborar trabalhos na área, o que desencadeou a criação do W60, grupo de trabalho *do Conseil International du Bâtiment* – CIB, cujo propósito era instaurar uma estrutura conceitual e tecnológica acerca do desempenho de edifícios que tivesse abrangência internacional, assim como, proporcionar a troca de experiências entre organizações da área (OKAMOTO, 2015; KERN, SILVA e KAZMIERCZAK, 2014).

Paralelamente, nos EUA, ocorreu, na Philadelphia, no ano de 1972, o primeiro simpósio sobre o tema em uma parceria entre a NBS – atualmente, denominada National Institute of Standards and Technology (NIST), RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages), ASTM (American Society for Testing and Materials) e CIB (Internacional Council for Research and Innovation in Building and Construction). Posteriormente, em 1975, o desempenho foi definido pelo CIB como sendo o comportamento de um produto em uso (BORGES, 2008; LORENZI, 2013).

Outro marco importante foi a entrada em vigor, em 1984, da ISO 6241 – Performance Standards in Building: Principles for their Preparation and Factors to be Considered, determinando parâmetros gerais para a elaboração de padrões de desempenho em termos de requisitos funcionais dos usuários (BORGES, 2008; LORENZI, 2013).

No Brasil, um dos primeiros marcos tratando-se da cultura de desempenho que está sendo, aos poucos, instaurada foi o trabalho desenvolvido por Teodoro Rosso, em 1980, na FAU-USP (Faculdade de Arquitetura da Universidade de São Paulo) (VARISCO, 2010). Mais tarde, outros trabalhos deram continuidade às pesquisas na área, expandindo o estudo para além das habitações térreas e investigando, também, as edificações de múltiplos pavimentos (OKAMOTO, 2015).

Durante este mesmo período, houve uma crescente busca pela racionalização e industrialização do setor, o que culminou no desenvolvimento de sistemas construtivos inovadores, tornando imprescindível a busca por meios de avaliar tecnicamente tais sistemas, de modo que fosse possível prever o comportamento das edificações ao longo de sua vida útil (VARISCO, 2010).

Todavia, infelizmente, esse processo foi desafiador e tecnologias insuficientemente consolidadas foram inseridas precocemente no mercado causando os mais diversos prejuízos, desde a degradação precoce das residências e prejuízos financeiros até a descredibilidade acerca da inovação da construção (VARISCO, 2010).

Na década seguinte, o Banco Nacional da Habitação (BNH), até então o principal órgão financiador de habitações populares no país, firmou contrato com o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) para o desenvolvimento de pesquisas visando à estruturação de critérios relativos à

avaliação de sistemas construtivos inovadores e à criação de normas técnicas (LORENZI, 2013; VARISCO, 2010).

Posteriormente, o BNH foi sucedido pela Caixa Econômica Federal (CEF), processo este que foi prejudicial em termos de prosseguimento no desenvolvimento mecanismos de avaliação, sendo que, somente em 1997, a CEF contratou, novamente, o IPT para revisar os trabalhos realizados até então (LORENZI, 2013; VARISCO, 2010).

Simultaneamente, de forma independente, outras análises avançaram por meio do Instituto Brasileiro de Tecnologia em Qualidade da Construção (IBTQC), as quais, mais tarde, em 2000, foram transformadas em normas técnicas (Projeto “Normas Técnicas para Avaliação de Sistemas Construtivos Inovadores para Habitações”) com o auxílio do meio técnico e com a contribuição da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) (LORENZI, 2013; VARISCO, 2010).

Também em 2000, mas em âmbito internacional, surgiu, na União Europeia, a Rede Temática PeBBu – Performance Based Building (em Português, algo como Construção Baseada no desempenho). Posteriormente, a este momento, pode-se citar como pontos relevantes os Eurocódigos desenvolvidos pelo Comitê Europeu, a criação da Lei de Planejamento das Construções Espanholas e, mais adiante, a criação do Código Técnico das Edificações (CTE) no ano de 2006 (KERN, SILVA e KAZMIERCZAK, 2014).

É possível citar-se, ainda, como outro momento marcante nesta história, a sanção, em 1990, do Código de Proteção e Defesa do Consumidor, tornando responsabilidade dos fornecedores o atendimento às normativas vigentes e ressaltando o direito do consumidor final brasileiro ao adquirir um produto de que este atenda e respeite a tais prerrogativas (OKAMOTO, 2015).

A NBR 15.575 (ABNT, 2013) propriamente dita, nacionalmente conhecida como “Norma de Desempenho Brasileira”, foi publicada, inicialmente, no mês de maio de 2008, devendo ter entrado em vigor ainda no ano de 2010. Todavia, devido a solicitações para extensão do prazo de entrada em vigor da norma conduzido pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), sua implementação ocorreu, efetivamente, em julho de 2013 (LORENZI, 2013; VARISCO, 2010).

Neste cenário de grandes transformações, toda uma cadeia se viu obrigada a se reestruturar, isto é, trazer à tona, novamente, as boas práticas construtivas, mudando

completamente a forma de se pensar, projetar e conceber as edificações (OKAMOTO, 2015).

A partir desse momento, começou-se a entender as particularidades de cada sistema, bem como, as interfaces entre estes. Preocupações deixaram de ser imediatas para se transformarem numa atenção generalizada como todo o ciclo de vida da edificação, o antes, o durante e o depois ganharam o mesmo peso na balança (OKAMOTO, 2015).

Outro ponto interessante foi a clara definição das incumbências de cada um dos intervenientes, isto é, fornecedores, projetistas, construtores, incorporadores e os próprios usuários da edificação. Ademais, evidenciou-se o conceito de vida útil, a influência das condições bioclimáticas e do entorno no processo de projeto e destacou a necessidade de intensificar-se as preocupações também com os efeitos da edificação no ambiente, e não somente o contrário (OKAMOTO, 2015; KERN, SILVA e KAZMIERCZAK, 2014).

Ao discorrer sobre o surgimento do conceito de desempenho e da normativa, mais especificamente, fica nítido que sua origem se deu na necessidade de avaliar sistemas construtivos, principalmente os disruptivos e inovadores, de forma a garantir um balisamento mínimo que protegesse a população brasileira, especialmente aquelas mais vulneráveis financeiramente, ao assegurar uma qualidade mínima às moradias e facilitar a compreensão do que é um imóvel “aceitável”, “bom” ou “ruim”. Conjuntamente, observa-se o estabelecimento de uma cultura orientativa para os profissionais que atuam no setor (KERN, SILVA e KAZMIERCZAK, 2014).

2.1.3 Estrutura da norma de desempenho brasileira (ABNT NBR 15.575)

A norma NBR 15.575 (ABNT, 2013) dedica-se às edificações habitacionais de modo geral, sem restrições quanto ao número de pavimentos, ressalvando quando necessárias condições aplicáveis exclusivamente para edificações de até cinco pavimentos. Portanto, não se aplica a obras construídas anteriormente à sua publicação, obras em desenvolvimento ou projetos protocolados na sua data de entrada em vigor, edificações provisórias, reformas ou retrofit (CBIC, 2013).

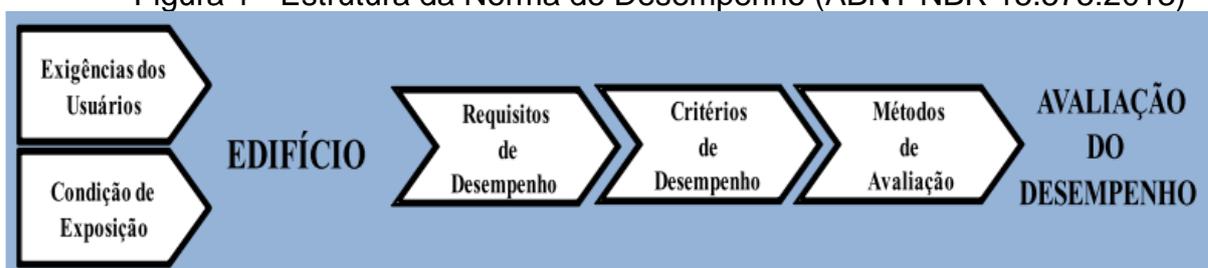
Divide-se em seis partes, cada qual referente a um determinado subsistema da edificação, que são:

- Parte 1: Requisitos gerais;
- Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais;
- Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos;
- Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas;
- Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas;
- Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

A norma foi concebida a partir de modelos internacionais de normalização de desempenho, ou seja, contempla para cada necessidade do usuário e condição de exposição, respectivamente, requisitos de desempenho, critérios de desempenho e métodos de avaliação (CBIC, 2013).

Os requisitos são condições que visam traduzir qualitativamente as características que a edificação e seus sistemas devem apresentar de modo que as exigências dos usuários sejam atendidas. Por sua vez, os critérios têm o objetivo de expressar de maneira quantitativa os requisitos de desempenho de modo que estes se tornem mensuráveis (CBIC, 2013). A Figura 1 ilustra a estrutura geral da norma de desempenho, qual a não sofreu alterações em sua versão de 2021.

Figura 1 - Estrutura da Norma de Desempenho (ABNT NBR 15.575:2013)



Fonte: Lorenzi (2013)

A norma baseia-se, fundamentalmente, na tríade: segurança (desempenho mecânico, segurança contra incêndio, segurança no uso e na operação), habitabilidade (estanqueidade, desempenho termo-acústico, desempenho lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil) e sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade e adequação ambiental) (CBIC, 2013; LORENZI, 2013).

Todos os requisitos incluídos na norma contemplam um patamar mínimo (M) de desempenho, o qual deverá obrigatoriamente ser assegurado pelos diferentes

componentes, elementos e sistemas que compõem a edificação. Ademais, alguns requisitos indicam adicionalmente outros dois níveis, que são o intermediário (I) e o superior (S), que não possuem obrigatoriedade (CBIC, 2013; LORENZI, 2013).

2.1.4 Análises de desempenho em sistemas de vedação vertical interna

Como mencionado anteriormente, a parte 4 da ABNT NBR 15.575 (ABNT, 2021) é aquela que aborda os requisitos para os sistemas de vedações internas e externas (SVVIE). No que concerne ao desempenho estrutural (item 7 da normativa), podem ser citados os seguintes critérios:

- Estado-limite último;
- Limitação de deslocamentos, fissuras e deslocamentos;
- Capacidade de suporte para as peças suspensas;
- Resistência a impactos de corpo mole;
- Ações transmitidas por portas internas ou externas;
- Resistência a impactos de corpo duro;
- Ações estáticas horizontais, estáticas verticais e de impactos incidentes em guarda-corpos e parapeitos.

Delazeri (2018) coletou e comparou dados e documentos relativos a análises de desempenho de diversos fabricantes de elementos/componentes de vedação vertical interna e externa que atendem ao sistema construtivo LSF. Os resultados dos dados relativos às cargas máximas de uso dos fabricantes analisados em relação à capacidade de suporte para as peças suspensas são indicados na Tabela 1.

A norma prevê que a carga inicial de ensaio para peças suspensas fixadas por mão-francesa seja de 40 kg por ponto de aplicação (embora a norma cite que este valor contemple um coeficiente de segurança da ordem de dois, em relação a situações típicas de uso), logo, sob esta análise simplista, pode-se dizer que nenhum dos fabricantes analisados atende à normativa (DELAZERI, 2018).

Todavia, a norma cita também outros tipos de fixação, isto é, cantoneira em L ou dispositivo recomendado pelo fabricante/proponente da tecnologia, para aplicação de cargas faceando a parede (sem excentricidade) ou, ainda, em caso de não haver indicação específica, a adoção de arruela de aço de 25 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, como corpo de apoio (NBR 15.575-4, ABNT 2021).

Tabela 1- Comparativo de cargas máximas de uso do fabricante em relação ao ensaio de peças suspensas

Sistema/Tipo de revestimento	Quantidade /tipo da placa/ espessura (mm)	Tipo de fixação/reforço	Carga máxima de uso/tipo de dispositivo de fixação (kg)	Avaliação
KNAUF DRYWALL/ GESSO	1/ST/12,5	Por ponto/Sem Reforço	20 kg por ponto/ Bucha Plástica tipo parafuso	Atende a norma segundo o fabricante.
KNAUF DRYWALL / GESSO	1/ST/12,5	Por ponto causando cisalhamento*/S em Reforço	15 kg por ponto (rente à parede)/ Bucha de expansão curta ou média	Atende parcialmente
DATEC 014b / GESSO	1/ST/12,5	Mão-francesa/Sem Reforço	11,5 kg por ponto ou 23kg por peça/ Parafusos	Atende parcialmente.
GYPNUM DRYWALL / GESSO	1/ST/12,5	Por ponto/ Sem Reforço	5 kg por ponto/ Bucha expansão curta ou média	Atende parcialmente.
GYPNUM DRYWALL / GESSO	2/ST/12,5	Por ponto/ Sem Reforço	30 kg por ponto/ Bucha basculante com braço metálico	Atende a norma segundo o fabricante.
LP OSB / SISTEMA CES HOME PLUS	1/OSB/9,5-15,1	Por ponto causando cisalhamento*/O SB como reforço de placa gesso	15 kg por ponto (rente à parede) / Parafuso para madeira	Atende parcialmente.

*Cisalhamento ocorre quando o objeto está faceando a parede, rente à parede, como um quadro ou espelho.

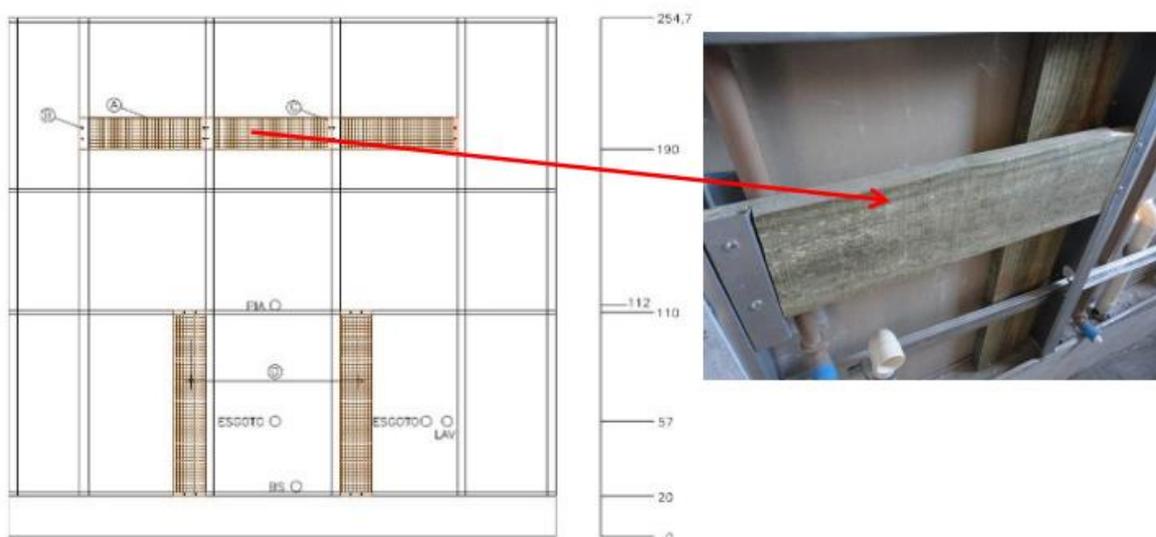
Fonte: Adaptado de Delazeri (2018)

É indicado, ainda, que a carga de uso deverá ser o menor dos seguintes valores: 1/3 da carga de ruptura (para cargas de curta duração) e a carga que provoque um deslocamento horizontal superior a $h/500$. Ademais, todos os pormenores adotados pelo fabricante devem ser indicados como: carga de uso, tipo de sistema de fixação e valor-limite da distância entre dois pontos de fixação (NBR 15.575-4, ABNT 2021).

Como a norma não é bem específica quanto às questões das cargas faceando a parede e em alguns componentes/elementos foi observado cisalhamento nestas situações, alguns fabricantes indicaram que atendem a normativa e outros apontam que “atendem parcialmente” (DELAZERI, 2018).

A DATec nº 014b, por exemplo, que, após o ensaio de solicitações de peças suspensas utilizando o esquema de mão-francesa fixada com dois parafusos TOGGLE BOLT $\frac{1}{4}$ ”, realizado na face interna da vedação sem nenhum tipo de reforço, obteve cargas de uso máxima de 23,0 kg por peça ou 11,5 kg por ponto de fixação (abaixo dos 40,0 kg exigido para o desempenho mínimo) propôs para situações em que cargas maiores sejam necessárias, a utilização de reforços de madeira pinus fixados aos montantes estruturais, como ilustra a Figura 2.

Figura 2 - Reforços para fixação de peças suspensas



Fonte: (SiNAT, 2018)

O Manual de Resistência Mecânica e Fixação de objetos em paredes Drywall, elaborado pela Associação Brasileira do Drywall traz alguns apontamentos interessantes quanto à fixação de objetos nos elementos de Drywall. A primeira divisão que o manual traz diz respeito à forma de fixação dos objetos, isto é, rente à parede (exercem esforços de cisalhamento), como quadros e espelhos ou afastados da parede (exercem esforços de momento), como armários e bancadas, os quais podem ser aplicados em um único ponto ou em dois ou mais (DE LUCA, 2018). A Figura 3 ilustra essa situação.

Figura 3 - Tipos de carregamento para verificação da resistência à solicitação de peças suspensas



Fonte: (TESIS, 2015)

A Figura 4 e Figura 5 ilustram, respectivamente, as cargas máximas por ponto faceando a parede e as cargas máximas por ponto para objetos afastados da parede apresentadas pelo manual.

Figura 4 - Cargas máximas por ponto faceando a parede para diferentes substratos

Substrato	Carga máxima de uso (kg)*	Tipo de fixação	Tipo de parede		
			Nº de chapas de gesso 12,5 ou 15 mm	Tipo de montante	Distância entre montantes em mm
Fixação direta na chapa de gesso	5	Prego galvanizado 17 x 21 mm	1	48/70/90	600 ou 400
	5	Gancho metálico			
	5	Bucha de expansão HDF			
	10	Gancho com 3 pregos			
	10	Bucha parafuso plástico			
	15	Bucha parafuso metálica			
	15	Bucha expansão curta/média			
	20	Bucha basculante com braço metálico	70/90		
	15	Bucha "guarda-chuva" 9 x 52**	2	48/70/90	
	15	Bucha "guarda-chuva" 10 x 52**			
	10	Prego galvanizado 17 x 21 mm			
	20	Bucha de expansão longa			
20	Bucha basculante com braço metálico	70/90			
20	Bucha "guarda-chuva" 10 x 65**	48/70/90			
Fixação no montante	40	Bucha basculante com braço metálico***	1	70/90	600 ou 400

Fonte: (DE LUCA, 2018).

Figura 5 - Cargas de uso por ponto para objetos afastados da parede

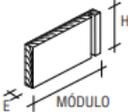
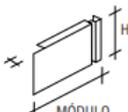
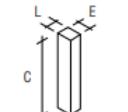
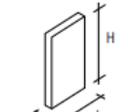
Substrato	Carga máxima de uso (kg)	Tipo de fixação	Tipo de parede		
			Nº de chapas de gesso 12,5 ou 15 mm	Tipo de montante	Distância entre montantes em mm
Fixação direta na chapa de gesso	5	Bucha expansão curta/média	1	48/70/90	600 ou 400
	10	Bucha basculante com braço metálico			
	10	Bucha basculante com braço plástico			
	15	Bucha expansão longa	2	48/70/90 70/90	
	30	Bucha basculante com braço metálico			
Fixação direta na chapa de gesso com azulejo	20	Bucha basculante com braço metálico	1	70/90	600 ou 400
Fixação em montante simples	40*	Bucha basculante com braço metálico	1	70/90	600 ou 400
Fixação em montante duplo encaixado	70	Bucha basculante com braço metálico			

* Fixação no eixo do montante

Fonte: (DE LUCA, 2018).

O manual traz, ainda, quatro diferentes tipos de reforços que podem ser utilizados para fixação de objetos pesados, como ilustram as Figura 6 e Figura 7. A recomendação dada é que a altura vertical do reforço seja maior ou igual que a dimensão do braço vertical da mão-francesa utilizada (DE LUCA, 2018).

Figura 6 - Tipos de reforços para Drywall

Formato	Especificação	Uso
	RMA - reforço de madeira Tábua de madeira maciça tratada em autoclave Peças moduladas ou tábua corrida H = 200 mm E (espessura) = mínimo 22 mm	Como reforço para fixação de objetos pesados. Usado em paredes novas ou reformas
	RME - reforço metálico Chapa de aço galvanizado com espessura nominal de 0,95 mm H = 250 mm p/ módulo 600 H = 200 mm p módulo 400 Comprimento = módulo	
	SMM - Sarrafo de madeira maciça tratada em autoclave para ser encaixada nos montantes 48/70/90 E/ L e C = variáveis	
	RCP - reforço de compensado plastificado para ser fixado entre os montantes - peça única para módulos de 400 e 600 H = 600 ou 400 mm L = 400 ou 600 mm E (espessura) = 18 mm	

Fonte: (DE LUCA, 2018).

Figura 7 - Cargas de uso por ponto com a utilização de reforço

Fixação com reforço	Carga máxima de uso (kg)	Tipo de fixação	Tipo de parede		
			n° de chapas de gesso 12,5 ou 15 mm	Tipo de montante	Distância entre montantes em mm
Reforço RME nominal 0,95 mm	20	Bucha basculante com braço metálico	1	70/90	600 ou 400
Reforço RME nominal 0,95 mm com azulejo	30				
Reforço RMA 22 mm	20			90	
Reforço RCP 600 x 400 x 18 mm	20			70/90	

Fonte: (DE LUCA, 2018).

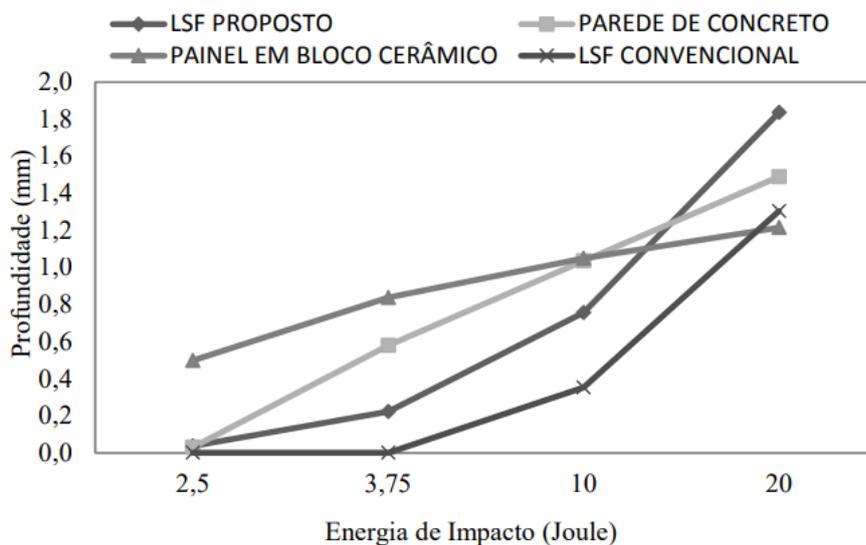
Por fim, o manual cita alguns fatores que influenciam o desempenho das paredes, a saber:

- largura dos montantes (montantes mais largos podem alcançar pés direitos maiores com o mesmo desempenho);
- espaçamento entre montantes (espaçamentos menores elevam a resistência da parede);
- uso de montante duplo (elevação da resistência);
- número e espessura das chapas (elevação da resistência).

Nogueira, Callejas e Durante (2018) fizeram um comparativo entre o sistema proposto pelos autores, classificado como leve ($G < 60 \text{ kg/m}^3$), consistindo em LSF composto por placas de madeira mineralizada (também conhecida como chapa cimento-madeira) e as médias de profundidades nas mossas em várias energias de impactos de corpo duro para diferentes SVVIE. A Figura 8 ilustra o resultado obtido.

Como pode ser visto na Figura 8, o sistema LSF desenvolvido pelos autores e o LSF convencional demonstraram ser mais resistentes nas energias mais baixas (até 10,0 J), com afundamentos de no máximo 0,76 mm. Enquanto, as paredes de concreto e em blocos cerâmicos apontaram mossas maiores até a energia de 10,0 J. Para energias maiores (20 J), o sistema em LSF proposto pelos autores apresentou o pior desempenho e o painel em bloco cerâmico o melhor (NOGUEIRA; CALLEJAS; DURANTE, 2018).

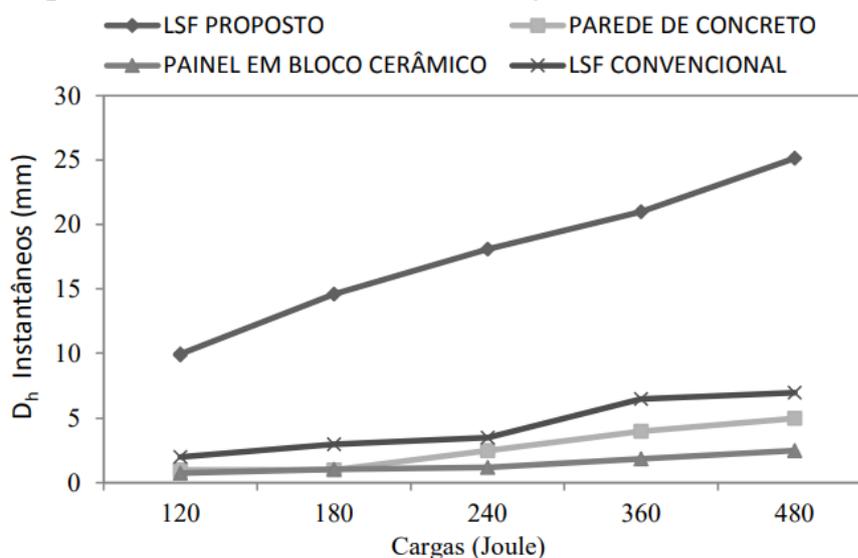
Figura 8 - Comportamento no ensaio de impacto de corpo duro de diferentes SVVIE utilizados em edificações habitacionais.



Fonte: (NOGUEIRA; CALLEJAS; DURANTE, 2018)

Nogueira, Callejas e Durante (2018) realizaram o mesmo comparativo frente ao ensaio de impactos de corpo mole (ver Figura 9). Observa-se que o LSF proposto pelo autores apresentou diferenças significativas quanto ao deslocamento horizontal em comparação aos demais SVVIE, inclusive o LSF convencional.

Figura 9 – Deslocamento horizontal para diferentes SVVIE



Fonte: (NOGUEIRA; CALLEJAS; DURANTE, 2018)

Os autores presumiram que esse fato esteja ligado ao sistema de fixação do painel no pórtico de ensaio, isto é, enquanto o LSF proposto foi ensaiado com os painéis apoiados apenas em duas extremidades, os outros SVVIE foram apoiados nas

quatro extremidades. Essa mudança de configuração acarretou em modos de vibração diferentes entre os painéis de madeira mineralizada em comparação aos daqueles com quatro apoios, provocando maiores deslocamentos durante os impactos. Contudo, mesmo com essa observação, os deslocamentos encontraram-se abaixo do limite normativo (NOGUEIRA; CALLEJAS; DURANTE, 2018).

Hattge (2004) realizou um estudo comparativo acerca da permeabilidade das alvenarias em blocos cerâmicos e alvenarias em blocos de concreto utilizando corpos de prova nas dimensões de 1,20 m x 1,60 m. Dentre as análises, estava o atual ensaio de permeabilidade apresentado pela NBR 15.575-4 (ABNT, 2021), na época, denominado método do IPT de permeabilidade.

Em suas análises, o autor avaliou, além das diferenças entre as alvenarias, a presença ou ausência de revestimento. No que tange o ensaio de permeabilidade à água, a ausência de revestimento impossibilitou a execução do ensaio, uma vez que a demasiada infiltração de água impossibilitou que a leitura da bureta graduada fosse feita (HATTGE, 2004).

A Figura 10 à Figura 13 ilustram os resultados obtidos por Hattge (2004) frente ao ensaio de permeabilidade à água para as alvenarias com blocos cerâmicos e com blocos de concreto. Nota-se que, logo nos primeiros trinta minutos, o volume já ultrapassou os 3,0 cm³ estipulado em norma para ambas as alvenarias. Todas as paredes foram executadas com juntas verticais e horizontais e revestidas com argamassa de cal, no traço 1:1:6 e areia média.

Figura 10 – Resultado do ensaio de permeabilidade à água para alvenaria de blocos cerâmicos com revestimento (Corpo de Prova 1)

Corpo de prova 1	Volume do período (mL)	Volume total (mL)
Hora início	0	0
½ hora	340	340
1 horas	345	685
2 horas	555	1240
4 horas	830	2070
6 horas	855	2925

Fonte: Adaptado de Hattge (2004)

Figura 11 – Resultado do ensaio de permeabilidade à água para alvenaria de blocos cerâmicos com revestimento (Corpo de Prova 2)

Corpo de prova 2	Volume do período (mL)	Volume total (mL)
Hora início	0	0
½ hora	815	815
1 horas	615	1430
2 horas	395	1825
4 horas	490	2315
6 horas	695	3010

Fonte: Adaptado de Hattge (2004)

Figura 12 – Resultado do ensaio de permeabilidade à água para alvenaria de blocos de concreto com revestimento (Corpo de Prova 1)

Corpo de prova 1	Volume do período (mL)	Volume total (mL)
Hora início	0	0
½ hora	385	385
1 horas	355	740
2 horas	650	1390
4 horas	1115	2505
6 horas	930	3435

Fonte: Adaptado de Hattge (2004)

Figura 13 – Resultado do ensaio de permeabilidade à água para alvenaria de blocos de concreto com revestimento (Corpo de Prova 2)

Corpo de prova 2	Volume do período (mL)	Volume total (mL)
Hora início	0	0
½ hora	95	95
1 horas	55	150
2 horas	80	230
4 horas	125	355
6 horas	110	465

Fonte: Adaptado de Hattge (2004)

Uma curiosidade levantada pelo autor é que um aspecto muitas vezes negligenciado na avaliação da permeabilidade das alvenarias é o espectro de poros de suas unidades. Quanto maior for a quantidade de poros capilares ativos (raio > 0,1 µm) nas unidades, maior será a capacidade absorvente da alvenaria, todavia, quanto menor for o raio médio de tais poros, maior será a força de absorção capilar, facilitando a percolação da água (HATTGE, 2004).

Giorgi (2016), por sua vez, analisou a permeabilidade à água de uma parede, contudo, esta foi construída utilizando-se blocos de solo-cimento. Os valores

encontrados pela autora estão ilustrados na Figura 14. A parede em questão também não atendeu à normativa logo nos primeiros trinta minutos de ensaio (primeiro período avaliado).

Figura 14 – Resultado do ensaio de permeabilidade à água para alvenaria de blocos de solo-cimento

Tempo de ensaio	Volume do período (cm³)
Início	0
30 minutos	36,0
1 horas	11,6
2 horas	17,8
4 horas	18,0
6 horas	16,5
24 horas	54,0
Volume total	153,9

Fonte: Adaptado de Giorgi (2016)

Rodrigues (2010) optou por avaliar a influência de diferentes revestimentos e acabamentos na infiltração de água em alvenarias de vedação de blocos cerâmicos. A Figura 15 ilustra os resultados obtidos pelo autor, na qual se constata que nenhum modelo avaliado atendeu ao desempenho mínimo.

Uma observação feita pelo autor, que inclusive justifique sua análise em períodos adicionais aos apresentados pela norma de desempenho, é que esta solicita o registro da quantidade de água infiltrada somente após decorridos trinta minutos de ensaio, sendo que, como pode ser observado na literatura apresentada, a grande maioria dos ensaios ultrapassa os valores normativos neste período, podendo, portanto, ser encerrado (RODRIGUES, 2010).

Rodrigues (2010) identificou, ainda, que os melhores desempenhos obtidos foram o revestimento de argamassa de cal do tipo produzida no canteiro no traço no traço 1:1:6, em razão da menor quantidade de cal presente, o que reduziu a porosidade da argamassa. Ademais, o autor comenta, ainda, que essa preocupação não é muito relevante quando se trata de argamassas industrializadas, uma vez que, de modo geral, não utilizam cal, mas sim aditivos, e a questão da porosidade é, portanto, controlada. Quanto ao acabamento, o melhor resultado adveio de uma demão de selador acrílico e duas demãos de tinta acrílica.

Figura 15 – Absorção de água ao longo do tempo em alvenaria de vedação de blocos cerâmicos com diferentes revestimentos e acabamentos

Acabamento	Argamassa de Revestimento	Tempo (min)																Quantidade de água infiltrada (cm ³)	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60		
Sem acabamento	1:1:6	0	6.5	11	14.8	18	20.9	23.6											
	IND.	0	9.4	14.3	18.3	21.6	24.5												
	1:2:9	0	15.5	22.4															
Selador Acrílico	1:1:6	0	4.5	7.7	10.2	12.2	14	15.5	16.9	18	19	19.9							
	IND.	0	9.5	13	15.1	16.7	17.9	19	19.9	20.7	21.4	22							
	1:2:9	0	7.2	11.5	14.8	17.6	20	22.2	24.1										
Selador Acrílico + 2 Demãos de Tinta PVA	1:1:6	0	3.2	5.3	6.9	8.1	9.2	10.2	11.1	11.9	12.7	13.5	19.4	23.7					
	IND.	0	4	7.1	9.8	11.8	13.6	15.1	16.4	17.5	18.5	19.5							
	1:2:9	0	4.8	8.1	11	13.6	16.1	18.3	20.4	22.1	23.5	24.6							
Selador Acrílico + 2 Demãos de Tinta Acrílica	1:1:6	0	3.4	4.6	5.7	6.6	7.5	8.3	9.1	9.8	10.5	11.1	15	17.8	20.2	22.3	24.3		
	IND.	0	4.6	6.3	7.8	9	10	11	11.8	12.5	13.2	13.8	18.3	20.6	22.6	24.6			
	1:2:9	0	5.5	7.7	9.6	11.2	12.5	13.7	14.8	15.7	16.6	17.4	21.7	23.8					
Selador Acrílico + Textura Acrílica	1:1:6	0	9.8	11.4	12.3	13	13.5	14.3	15.1	15.7	16.3	16.9	21.5	24					
	IND.	0	7.7	11	13.2	14.8	16	17.1	18	18.9	20	20.7							
	1:2:9	0	10	13.5	15.4	17.1	18.8	20.2	21.2	22.1	22.9	23.7							
Selador Acrílico + Textura Acrílica + 2 Demãos de Tinta PVA	1:1:6	0	9.8	11.4	12.3	13	13.5	14	14.5	15	15.3	15.7	18.8	21.4	23.5				
	IND.	0	9.5	11.3	12.6	13.8	15	16	17	17.9	18.7	19.4	24.8						
	1:2:9	0	10.8	12.8	14.4	15.5	16.6	17.7	18.6	19.5	20.4	21.3							
Selador Acrílico + Textura Acrílica + 2 Demãos de Tinta Acrílica	1:1:6	0	7	10	11.5	12.4	13	13.4	13.8	14.2	14.6	15	18.1	20.1	22.1	24.1			
	IND.	0	7.7	11	13.2	14.3	15	15.6	16.1	16.6	17	17.4	21	23.2					
	1:2:9	0	8.6	12	14.5	16.2	17.1	17.8	18.4	18.9	19.4	19.8	22.8	24.8					

Fonte: (RODRIGUES, 2010)

SANTOS et al. (2018) avaliaram a permeabilidade em painéis de vedação de concreto autoadensável leve (CAAL) pelo método que consta na ABNT NBR 15.575-4 (2021). Foram confeccionados painéis utilizando-se formas verticais (CAAL - V) e horizontais (CAAL - H), e a avaliação ocorreu em dois pontos distintos dos painéis, isto é, superior e inferior. Os resultados obtidos pelos autores estão apresentados na Figura 16.

Figura 16 - Absorção de água pelo método da permeabilidade para CAAL

Tempo (hr)	Absorção (mL)			
	CAAL-H		CAAL-V	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
1	69,7	48,6	63,6	20,3
2	85,4	64,7	85,7	36,3
4	106,0	82,4	110,7	53,8
6	123,0	97,8	131,7	76,0
24	148,0	122,8	156,7	101,0

Fonte: Adaptado de SANTOS et al. (2018)

Os autores levantaram, ainda em seu trabalho, após a comparação dos resultados com outros tipos de materiais avaliados por diferentes autores, a possibilidade de que

o valor estipulado em norma seja inviável de ser alcançado e que, provavelmente, tenha ocorrido algum equívoco na especificação do critério (SANTOS et al., 2018).

Dentre os diversos autores e materiais encontrados na literatura atual, a única situação em que se observou o atendimento ao parâmetro normativo, isto é, infiltração de água inferior a 3,0 cm³ no período de 24 horas, foi o SVVI em Drywall com chapas de gesso que são provenientes de empresas participantes e qualificados no âmbito do Programa Setorial da Qualidade dos Componentes para Sistemas Construtivos em Chapas de Gesso para Drywall do PBQP-h em avaliação realizada pela empresa TESIS (TESIS, 2015).

As configurações que atenderam ao desempenho mínimo possuíam ou revestimento de tinta epóxi (base solvente ou água) ou revestimento cerâmico tipo porcelanato aplicado com argamassa AC II e rejunte Tipo II e placas de gesso acartonado RU, ou seja, resistentes à umidade (TESIS, 2015).

Chiele (2022) realizou uma avaliação de desempenho de um sistema de vedação vertical de blocos de concreto fabricados com resíduos de construção e demolição (RCD), cuja resistência característica era de 3,01 MPa e as dimensões variavam entre 14 x 19 x 39 cm e 14 x 19 x 19 cm. A Figura 17 ilustra os resultados encontrados pelo autor frente ao ensaio de impactos de corpo mole.

Figura 17 – Resultados do ensaio de impactos de corpo mole para alvenaria de vedação de blocos de concreto com RCD

Energia (J)	Altura equivalente (cm)	d_{hi} (mm)	d_{hr} (mm)	Descrição de danos
60	15	1,45	0,00	Nenhuma ocorrência
120	30	1,90	0,00	-
180	45	3,40	1,90	-
240	60	4,25	2,20	-
360	90	-	-	-
480	120	-	-	-
720	180	-	-	Fissura horizontal

Fonte: Adaptado de CHIELE (2022)

Nota-se que a parede atendeu aos critérios de não ocorrência de danos até a energia de impacto de 480 J, falhando somente na energia máxima, que é de 720 J. Ademais atendeu aos itens de deslocamento horizontal instantâneo ($\leq 20,0$ mm) e residual ($\leq 4,0$ mm) para uma energia de 240 J.

O sistema desenvolvido também atendeu ao ensaio de impacto de corpo duro, isto é, não apresentou nenhum tipo de falha e a profundidade das mossas ficaram dentro dos limites normativos ($\leq 2,0$ mm). Os resultados são indicados na Figura 18.

Figura 18 – Resultados do ensaio de impactos de corpo duro para alvenaria de vedação de blocos de concreto com RCD

Identificação do corpo duro (g)	Altura equivalente (cm)	Impactos	Profundidade das mossas (mm)	Descrição de sinais de falhas
500	75	1	0,50	Sem danos
		2	0,90	Sem danos
		3	0,85	Sem danos
		4	1,10	Sem danos
		5	1,05	Sem danos
		6	1,05	Sem danos
		7	0,65	Sem danos
		8	0,65	Sem danos
		9	1,00	Sem danos
		10	0,75	Sem danos
1000	200	1	1,15	Sem danos
		2	2,15	Sem danos
		3	1,95	Sem danos
		4	1,55	Sem danos
		5	1,80	Sem danos
		6	2,50	Sem danos
		7	1,90	Sem danos
		8	1,50	Sem danos
		9	1,40	Sem danos
		10	1,50	Sem danos

Fonte: (CHIELE, 2022)

Frente às solicitações de peças suspensas, as paredes avaliadas por Chiele (2022) atenderam ao critério de deslocamentos horizontais instantâneos, contudo, observou-se o deslizamento do sistema de fixação (sistema bucha-parafuso) sob o carregamento de 800 N, não atendendo, portanto, ao nível mínimo de desempenho. Como carga de uso, o autor propôs a quantia de 400N no total ou 200N por ponto.

Varisco (2010) desenvolveu uma análise de desempenho de blocos de concreto celular autoclavado (BCCA) em um sistema de vedação externa. Para compor o sistema de vedação proposto, o autor utilizou 27 BCCA da classe C 25 (resistência à

compressão média de 2,5 MPa), nas dimensões de 60 cm x 30 cm x 12,5 cm e massa específica de 535 kg/m³.

Os blocos foram unidos utilizando-se argamassa industrializada (Votomassa AC I) formando juntas em amarração e, posteriormente, revestidos com argamassa de revestimento industrializada (Votomassa massa pronta). Os protótipos do SVVE possuíam as dimensões finais de 1,80 m de largura e 2,70 m de altura, e uma espessura de 0,12 (contabilizando a espessura do revestimento).

Sob a ação de cargas provenientes de cargas suspensas, o autor avaliou três diferentes aparelhos (mão-francesa, carga inclinada e cantoneira em L), isto é, avaliando tanto o ensaio de longa quanto de curta duração, e três diferentes modos de fixação:

- Fixação com buchas Fischer SX-8 (comprimento = 40 mm e diâmetro = 8 mm) e parafuso Chipboard (4,5 x 35 mm);
- Fixação com buchas Fischer UX-8 (comprimento = 50 mm e diâmetro = 8mm) e parafuso Chipboard (5,0 x 40 mm);
- Fixação com buchas Fischer FUR 8X80 SS (comprimento = 80 mm e diâmetro = 8 mm) e parafuso Chipboard (6,0 x 80 mm).

A Figura 19 ilustra os resultados obtidos por Varisco (2010). Nota-se que somente as amostras em que foram utilizadas a cantoneira em L atingiram o desempenho mínimo.

Figura 19 – Resultados ação de peças suspensas para diferentes configurações

Aparelhos	Situação 1	Situação 2	Situação 3
Mão francesa	Abaixo do mínimo	Abaixo do mínimo	Abaixo do mínimo
Carga inclinada	Abaixo do mínimo	Abaixo do mínimo	Abaixo do mínimo
Cantoneira L	M	M	M

Fonte: Adaptado de VARISCO (2010)

O autor comenta em seu trabalho que, uma vez que todo o conjunto de engaste (bucha e parafuso) e o material no qual este engaste é feito (material do local do furo) são avaliados quanto à resistência a uma força de arranque oriunda do carregamento, seria interessante assegurar que o mesmo torque foi aplicado em todos os parafusos, de modo a gerar uma maior padronização dos resultados. Em relação aos ensaios de

impactos de corpo mole e corpo duro, o SVVE ensaiado obteve nível de desempenho superior.

2.2 INDUSTRIALIZAÇÃO E INOVAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

De acordo com o contexto, o termo industrialização pode possuir diferentes significados, porém, em algum grau, remete à mecanização, ao emprego de máquinas para otimizar o trabalho e a transferências do trabalho para as fábricas (LESSING, 2006).

Historicamente, existe uma associação entre construção industrializada e pré-fabricação, ou seja, fabricação em massa de elementos e componentes fora do local no qual a obra será propriamente instalada. Todavia, com o transcorrer do tempo, a industrialização da construção passou por modificações e, atualmente, pode-se dizer que se configura em um processo sistemático, controlado e padronizado de produção de sistemas construtivos, o qual possibilita um maior monitoramento e documentação ao longo de todo o processo (projeto, produção e montagem), e, conseqüentemente, na melhoria contínua (ANDERSSON; LESSING, 2017).

Sabe-se que, na construção tradicional, questões como padronização e melhorias contínuas são difíceis de serem implementadas. Nos sistemas construtivos industrializados, a documentação do sistema como um todo e de seus elementos e componentes oportuniza a extração de informações extremamente pertinentes para o processo de projeto, para a logística e para a montagem (ANDERSSON; LESSING, 2017).

A documentação consiste em uma importante conexão entre as diferentes etapas, evidenciando as delimitações de cada sistema construtivo, isto é, suas dimensões, seu peso, sua capacidade de carga etc. A reunião destas informações contribui para a retroalimentação favorecendo a continuação dos procedimentos de padronização, podendo ser citado o BIM como uma forma apropriada e atual de reunir e trocar informações (ANDERSSON; LESSING, 2017).

A padronização, por meio da sistematização das regulamentações, almeja soluções técnicas e econômicas mais favoráveis para os problemas rotineiros. Isso significa a predeterminação de tamanhos, dimensões, interfaces, bem como, a restrição de variedade, o que, por sua vez, assegura a intercambialidade, a compatibilidade e a flexibilidade (LESSING, 2006).

Resumidamente, essa visão mais abrangente nos possibilita vislumbrar que a construção industrializada não se restringe à pré-fabricação e ao processo fabril, mas engloba todo o ciclo de produção, com processos e padrões bem delimitados, a despeito de a fabricação ocorrer fora do local de implantação da obra ou não. No momento atual, o cerne da questão está no processo e não no projeto (ANDERSSON; LESSING, 2017).

Pode-se citar o emprego das técnicas concreto armado e da construção em aço (estrutura metálica) como os primeiros vislumbres da industrialização da construção civil brasileira. E, posteriormente, a construção de módulos de banheiro, que, mais tarde, são apenas colocados na laje previamente preparada para o encaixe (ABDI, 2015).

O intuito da industrialização é o incremento da produtividade e do desempenho das operações construtivas, seja por meio de ações organizacionais, inovação tecnológica, modificação dos métodos e técnicas de trabalho e planejamento/controle. Além disso, processos construtivos industrializados asseguram uma redução da produção de resíduo, da emissão de CO₂ e no uso de recursos como a água e energia, bem como facilita a avaliação do ciclo de vida (ACV) em razão de permitir um maior controle dos processos (ABDI, 2015).

Deste modo, pode-se dizer que sistemas construtivos industrializados conferem produções maiores e de melhor qualidade, com um controle mais rigoroso dos processos, maiores informações do desempenho ambiental e mais rapidamente que outros modelos construtivos devido à sua natureza repetitiva e uniforme, e uso de mão de obra especializada (ABDI, 2015).

A escolha pelo uso de componentes, elementos e sistemas construtivos industrializados deve passar por uma análise prévia. Tratando-se de inovações tecnológicas, os critérios e métodos de avaliação para assegurar o potencial desempenho do sistema proposto são apresentados por uma diretriz SINAT (LORENZI, 2013).

Para Sabatini (1989), na esfera na construção civil, novos produtos, processos ou sistemas construtivos são ditos inovadores somente quando traduzem uma nova ideia e representam avanços significativos na tecnologia existente, seja em seu desempenho, qualidade ou custo do edifício como um todo ou de suas partes. Sob a ótica do SINAT, uma tecnologia é considerada inovadora quando não possui suporte normativo em vigor (MENDES; FABRICIO; IMAI, 2017).

Atualmente, frente à elevada competitividade, a inovação consiste em uma forma de permanência no mercado para a grande maioria das empresas, porém, apesar de necessária, sua implantação ainda ocorre em taxas inferiores a outros setores (CBIC, 2016). Ademais, no Brasil, infelizmente, a bússola das inovações aponta, primordialmente, na direção do lucro contrariamente ao interesse pela qualidade (MENDES; FABRICIO; IMAI, 2017).

Neste contexto, o SINAT atua justamente de modo a garantir que, previamente a sua entrada no mercado, produtos inovadores sejam avaliados em ambiente laboratorial, impedindo que a inovação se configure na inovação de erros e riscos, e que o desempenho mínimo, em seu sentido amplo, seja assegurado (MENDES; FABRICIO; IMAI, 2017).

2.2.1 Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Sistemas Inovadores e Convencionais – SiNAT

O pontapé inicial para entender o funcionamento do SiNAT é distinguir o que são sistemas inovadores e o que são sistemas convencionais. Neste aspecto, são considerados inovadores aqueles sistemas que, até o momento de avaliação, não possuem normas técnicas vigentes, sendo, por consequência, convencionais aqueles que as possuem (MENDES, FABRICIO e IMAI, 2017).

O SiNAT atua, então, nesta lacuna existente em nosso país, operacionalizando os processos de avaliação técnicas, visando à mitigação dos riscos intrínsecos às inovações e à proteção do desempenho e da vida útil dos sistemas construtivos, estando, portanto, suas análises diretamente relacionadas à norma de desempenho (MENDES, FABRICIO e IMAI, 2017; AMANCIO, FABRICIO e MITIDIARI FILHO, 2012).

Sabidamente é, portanto, uma entidade de grande relevância nacional ao avaliar precocemente os produtos, isto é, antes que estes sejam efetivamente colocados em utilização atuando na redução de riscos no incentivo à inovação (MENDES, FABRICIO e IMAI, 2017).

A fim de ser homologado pelo SiNAT um sistema construtivo inovador, este deve percorrer algumas etapas (MENDES, FABRICIO e IMAI, 2017), que são:

- Enquadrar-se em um dos tipos de Diretrizes de Avaliação Técnica do SiNAT;

- Passar pela avaliação de uma Instituição Técnica Avaliadora – ITA;
- Atender aos requisitos de desempenho nas avaliações e nos ensaios prescritos.

Vencidas estas etapas, é emitida uma DATec para o sistema, a qual possui prazo de validade, as descrições dos componentes que formam o sistema, os pormenores do processo de fabricação, bem como, das questões ligadas ao uso do sistema (MENDES, FABRICIO e IMAI, 2017). Em relação aos sistemas convencionais, o procedimento é, basicamente, o mesmo, contudo, ao invés de ser emitida uma DATec é emitida uma Ficha de Avaliação de Desempenho – FAD (PBQP-h, 2023).

As FADs são vitalícias, podendo passar por revisões, enquanto as DATECs requerem a renovação a cada período de três anos (PBQP-h, 2023). Atualmente, todos os documentos homologados (Diretrizes, DATec's e FAD's), bem como, as instituições credenciadas para realizar as avaliações técnicas podem ser acessadas diretamente na página virtual do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-h), na aba referente ao SiNAT.

No que tange, especificamente, os sistemas de vedação interna e externa, a grande maioria das DATec's encontra, no presente momento, com o prazo de validade vencido, podendo ser citadas:

- DATec nº 002 – Sistemas de paredes integrados por painéis pré-moldados de concreto ou mistos para emprego em edifícios habitacionais;
- DATec nº 003 – Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço zincado conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas;
- DATec nº 011 – Paredes, moldadas no local, constituídas por componentes de poliestireno expandido (EPS), aço e argamassa, microconcreto ou concreto;
- DATec nº 0,15 – Sistema de vedações verticais internas e externas sem função estrutural de painéis vazados de geopolímero.

2.3 CONCRETO CELULAR

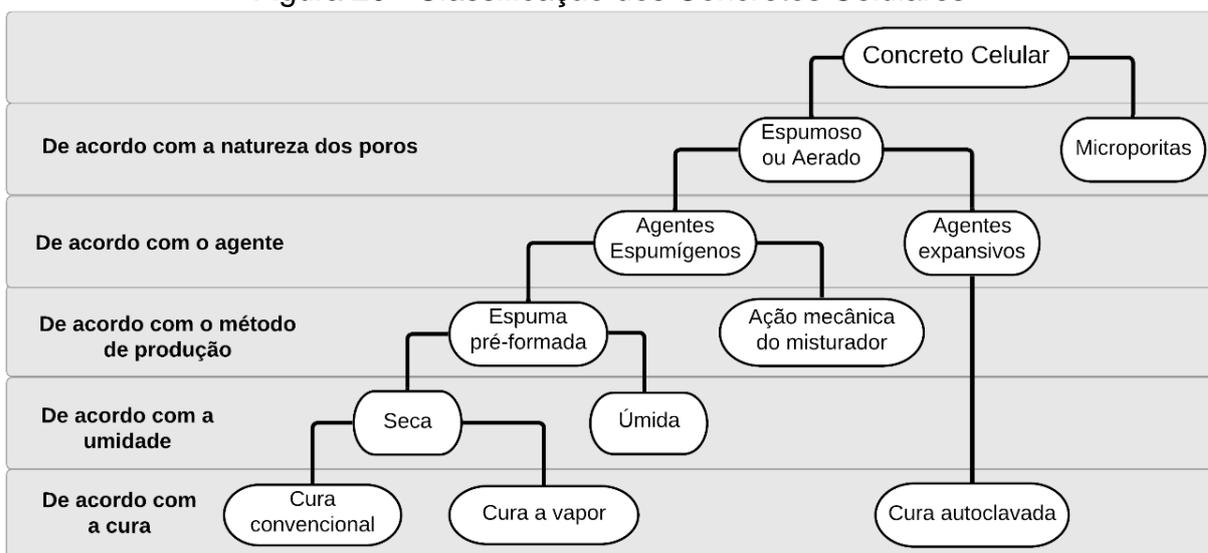
Em conformidade com o guia de terminologia do American Concrete Institute (ACI, 2013), concretos celulares são um produto de densidade reduzida que consistem na mistura de cimento Portland ou cal com material silicioso fino (areia,

escória ou cinza volante) ou, ainda, pastas/argamassas contendo misturas destes materiais que possuem uma estrutura celular homogênea.

A estrutura homogênea com células de ar não interligadas e de formato, aproximadamente, esférico é alcançada por meio de produtos químicos ou agentes espumígenos. Nota-se, portanto, que, com exceção do produto utilizado para realizar a aeração, os demais materiais são similares aos utilizados na fabricação de concretos convencionais (CHICA; ALZATE, 2019).

Em geral, considera-se que existam dois grandes grupos de concreto celular, isto é, os aerados ou espumosos e os microporitas (CHICA; ALZATE, 2019; TEIXEIRA FILHO, 1992), como ilustra a Figura 20.

Figura 20 - Classificação dos Concretos Celulares



Fonte: Adaptado de Chica; Alzate (2019)

A principal distinção entre os dois grupos baseia-se em seu sistema poroso e no tamanho médio dos poros. Nos concretos aerados ou espumosos em virtude da aeração decorrer da incorporação de ar por meio do gás formado por agentes químicos ou da utilização de agentes espumígenos, as células de ar formadas possuem dimensões macroscópicas e estão presentes em grandes quantidades enquanto nos microporitas, como o próprio termo sugere, microporos são formados uma vez que a entrada de ar ocorre durante o assentamento da argamassa extremamente fluida (CHICA; ALZATE, 2019). Essa estrutura das células de ar está diretamente relacionada às propriedades físicas do material (WALISUNDARA, 2019).

Em comparação ao tradicional concreto de cimento Portland com massa específica de, aproximadamente, 2400 kg/m^3 , o concreto celular se destaca em razão de seu peso reduzido, superior isolamento acústico e térmico, elevada resistência à ação do fogo, diminuta quantidade de insumos requeridos, facilidade de bombeamento e dispensabilidade de vibração/nivelamento (CHICA; ALZATE, 2019).

Diferentes faixas de densidade são encontradas na literatura, de acordo com Shah *et al.* (2021), por meio de um controle adequado na dosagem da espuma, podem ser obtidas densidades que vão de 400 kg/m^3 a 1850 kg/m^3 , para Nandi *et al.* (2016), essa faixa de densidade em geral fica compreendida entre 400 kg/m^3 e 1800 kg/m^3 , enquanto, para Chica e Alzate (2019), tais valores vão de 320 kg/m^3 (densidade muito baixa, sem adição de agregados) a 1600 kg/m^3 (com adição de agregados).

A densidade do concreto celular espumoso é considerado critério primordial de projeto, uma vez que está intimamente ligada às propriedades físicas (peso leve, baixa condutividade térmica, elevada resistência ao fogo, baixa resistência ao congelamento) e mecânicas do material (baixa resistência à compressão) (DUNN; VAN ZIJL; VAN ROOYEN, 2018; NANDI *et al.*, 2016; ZAMORA, 2007).

Dentro dos concretos celulares ditos aerados ou espumosos, existe, ainda, uma subclassificação, isto é, aqueles que usam aeração química (pó de alumínio, peróxido de hidrogênio e carboneto de cálcio) e aqueles que utilizam aeração por meio de agente espumígeno. Contudo, embora exista uma variedade de métodos de incorporar ar à mistura, o ponto-chave do tema é como aprisionar esse ar e distribuí-lo de maneira uniforme na mistura (CHICA; ALZATE, 2019).

Nesse sentido, a incorporação de ar por meio da formação de espuma é tido como o processo mais econômico e de fácil controle, visto que não existem reações químicas envolvidas no processo (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000). Além disso, é o método em que as maiores resistências à compressão são obtidas, possui fácil execução, é padronizado e possui maior taxa de utilização (CHICA; ALZATE, 2019).

O agente espumígeno pode ser utilizado de dois modos, isto é, previamente à mistura com os outros materiais formando uma espuma pré-formada por meio de equipamento mecânico ou ser diretamente acrescentado aos demais materiais e, pela agitação mecânica do misturador, a espuma é gerada. Em ambos os casos, o intuito é fornecer células de ar à mistura para que, em conjunto com o cimento, produza-se um sólido poroso e, conseqüentemente, mais leve (CHICA; ALZATE, 2019).

Como desvantagem do método que utiliza a própria agitação mecânica do misturador para formar a espuma, pode-se citar a geração de células de ar danificadas, o que pode influenciar na quantidade de ar que será inserida na mistura. Por sua vez, a espuma pré-formada, apesar de ter um custo mais elevado, produz uma espuma de melhor qualidade, consome menos agente espumígeno, e possui conexão direta entre o teor de ar incorporado e o teor de agente utilizado (CHICA; ALZATE, 2019).

Independentemente do modo de produção empregado, no que tange concretos celulares o tópico principal é como aprisionar e distribuir uniformemente o ar na mistura. Tratando-se de espuma pré-formada, esta deve apresentar grande estabilidade para que não se dissolva (CHICA; ALZATE, 2019).

Diferentes relações água/cimento são reportadas, indo de 0,4 a 1,25 (ausência de superplastificante), contudo, a quantidade de água irá depender de uma gama de fatores, como a trabalhabilidade requerida para determinada aplicação, material ligante utilizado, tipo de enchimento, entre outros (CHICA; ALZATE, 2019).

A cura pode ser realizada em condições normais, com vapor ou em autoclave. Em relação à pré-fabricação, não existe um método de cura mais indicado, contanto que a temperatura do ambiente seja mantida constante (CHICA; ALZATE, 2019; NANDI et al., 2016).

Em geral, o concreto celular é utilizado na pré-fabricação e para moldagens *in loco*. A pré-fabricação é utilizada para a produção de painéis, lajes e blocos, enquanto a moldagem *in loco* é uma boa opção para elementos estruturais e secundários. Todavia, também existem relatos de seu emprego como material de enchimento, estabilização de túneis, base de pavimentos, suporte lateral de pontes (FU et al., 2020).

A primeira pesquisa científica envolvendo concreto celular data do ano de 1954, mas, nos dias de hoje, ainda há muito a ser estudado acerca deste material. Atualmente, algumas linhas de pesquisa têm recebido atenção especial (CHICA; ALZATE, 2019), como:

- Uso de adições pozolânicas (como cinzas volantes), resíduos de cana-de-açúcar, microssílica e escórias, reforços (como fibras naturais e sintéticas) e cargas (poliestireno);

- Avaliação das propriedades físicas (calor de hidratação, resistência às variações de temperatura, microestrutura, distribuição e tamanho dos poros, comportamento reológico);
- Determinação das propriedades mecânicas e modelagem numérica;
- Desenvolvimento de novas aplicações com base em sua densidade.

2.3.1 Normatização Técnica

O American Concrete Institute (ACI) possui três relatórios técnicos voltados especificamente para o concreto celular, que são: ACI PRC 523.1-06 (Concreto Celular de baixa densidade moldado no local), ACI PRC 523.2-96 (Unidades de piso, telhado e parede de concreto celular pré-moldado), ACI PRC 523.3-14 (Concretos celulares acima de 800 kg/m³).

Existem também normas internacionais, como a ASTM C 869 – Especificação padrão para agentes espumantes usados na fabricação de espuma pré-formada para concreto celular, a ASTM C 796 – Método de teste padrão para agentes de espuma para uso na produção de concreto celular usando espuma pré-formada e ASTM 495 – Método de teste padrão para resistência à compressão de concreto leve isolante.

O Brasil possui normatização própria acerca do concreto celular, que são as seguintes:

- NBR 12.644/2014: Concreto leve celular estrutural — Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco (ABNT, 2014a);
- NBR 12.645/1992: Execução de Paredes em Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local (ABNT, 1992a);
- NBR 12.646/1992: Paredes de Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local (ABNT, 1992b);
- NBR 13.438/2013: Blocos de concreto celular autoclavado – Requisitos (ABNT, 2013b);
- NBR 13.440/2013: Blocos de concreto celular autoclavado – Métodos de Ensaio (ABNT, 2013c);
- NBR 14.956/2013: Blocos de concreto celular autoclavado – Execução de alvenaria sem função estrutural (ABNT, 2013d, 2013e).

Todavia, no que diz respeito às prescrições de ensaio, só existem recomendações para concretos celulares curados em autoclave, tendo os espumosos recomendações apenas no que tange a execução.

2.3.2 Dosagem

De modo geral, a dosagem é realizada por tentativa e erro, todavia, existem relatos na literatura de alguns métodos utilizados para determinar as proporções dos insumos (água, espuma e cimento), seja relacionando o volume de sólidos ou teor de cimento e a relação a/c com uma densidade-alvo (CHICA; ALZATE, 2019) ou por meio de equações embasadas na relação a/c e aglomerante (KEARSLEY; WAINWRIGHT, 2001).

Para que a densidade-alvo seja alcançada, uma importante propriedade a ser controlada no estado fresco é a consistência, a qual é extremamente afetada pelos materiais de enchimento empregados e minimamente pelo volume de espuma. Em razão de sua área superficial ser mais elevada, misturas com cinzas volantes demandam maiores proporções a/c do que misturas com areia, contudo estas demandam maiores volumes de espuma (ACI, 2014; RAJ; SATHYAN; MINI, 2019).

Baixas relações a/c resultam em misturas rígidas, o que acaba por romper as bolhas de ar durante a etapa de mistura, conseqüentemente, elevando a densidade. Relações a/c maiores podem acarretar misturas demasiadamente fracas para reter as bolhas, uma vez que a pasta acaba ficando muito fina, havendo a possibilidade de segregação da espuma e da própria mistura, também resultando em um aumento da densidade (NAMBIAR; RAMAMURTHY, 2006; RAJ; SATHYAN; MINI, 2019).

Nesse sentido, Raj, Sathyan e Mini (2019) indicam que sejam utilizadas relações a/c que vão de 0,40 a 1,25, a British Cement Association (1994) relações a/c de 0,5 a 0,6 e a ASTM C 796 (1997) relações entre 0,58 e 0,64 conforme o cimento empregado.

É importante ressaltar que esta água deverá estar limpa e sem a presença de óleos, ácidos, álcalis, sais, matérias orgânicas, entre outros. Além disso, a solução da espuma também deve ser incluída no cálculo da água total da mistura, e, conseqüentemente, na determinação do fator a/c (ASTM, 1997).

2.3.3 Propriedades no Estado Fresco e Endurecido

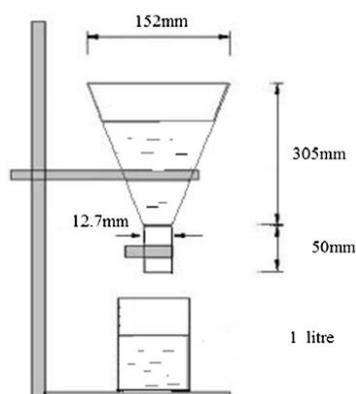
No estado fresco, devem ser controladas, primordialmente, a consistência e a estabilidade do concreto celular espumoso, parâmetros que são alterados segundo a

relação a/c, materiais suplementares e agregados utilizados, plastificantes, volume e tipo de agente espumígeno (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015; NANDI et al., 2016).

2.3.3.1 Fluidez, Consistência e Estabilidade

A consistência e a estabilidade são influenciadas pela quantidade de água na mistura e pela quantidade de espuma incorporada. A aferição ocorre pelo Teste de Cone de Marsh Modificado (ver Figura 21), que consiste em despejar 1,0L de material no cone com a saída do funil obstruída (necessário o auxílio manual de outro operador). Em seguida, deve-se posicionar um recipiente logo abaixo a saída do funil, liberar a saída e, então, cronometrar por 20 s. A relação entre a quantidade de material que fluiu para o recipiente inferior e a quantidade total (1,0 L) expressa o fluxo em percentual.

Figura 21 - Teste de Cone de Marsh Modificado



Fonte: Raj, Sathyan e Mini (2019)

Valores de fluxo entre 40 e 60% para tempos de fluxo inferiores a 20 s são considerados bons parâmetros de consistência (ver Tabela 2). Por sua vez, misturas de concreto celular espumoso que atinjam a densidade-alvo sem apresentar exsudação e segregação, apresentando aspecto homogêneo, consistência cremosa que pode, facilmente, ser vertida (quase fluida) são consideradas misturas estáveis, sendo que misturas com densidade inferior a 500 kg/m^3 possuem uma maior tendência à instabilidade (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015; RAJ; SATHYAN; MINI, 2019).

O tempo de fluxo abaixo de 20 s assegura que a mistura obtenha características que permitam que esta seja lançada nos moldes e seja auto compactada sem a necessidade de auxílios externos. Em razão de uma maior coesão e uma reduzida densidade, a adição excessiva de espuma reduz tanto a consistência quanto a

estabilidade da mistura, enquanto se eleva com a adição de superplastificante. Ademais, quando maior for a relação a/c, maior será a consistência, mas deve-se atentar para a segregação (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015; RAJ; SATHYAN; MINI, 2019).

Tabela 2 - Classificação do concreto celular pelo percentual de dispersão

Valores de fluxo (%)	Descrição
0 – 20	Muito baixo
20 – 40	Baixo
40 – 60	Médio
60 – 80	Alto
80 – 120	Muito alto

Fonte: Nambiar, Ramamurthy, ASCE (2008)

No estado endurecido, a aferição das propriedades mecânicas do concreto celular espumoso, mais especificamente, a resistência à compressão é a avaliação mais importante, todavia, uma análise geral de suas propriedades é recomendada (NANDI et al., 2016).

2.3.3.2 Densidade

A massa específica ou densidade é uma propriedade que deve ser aferida em ambas as fases, isto é, no estado fresco e no estado endurecido, não devendo estas apresentarem diferenças maiores que 120 kg/m^3 entre si (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015).

No estado fresco, basta tarar um recipiente de volume conhecido, preenchê-lo com o concreto produzido e, em seguida, pesá-lo. A relação entre massa e volume resultará na densidade fresca, a qual deverá ser comparada com a densidade inicialmente estipulada como alvo. Esse controle é primordial para os procedimentos de moldagem, enquanto a determinação da densidade no estado endurecido – que consiste também na relação da massa pelo volume (agora do corpo de prova) – serve para ter maior controle das propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015).

2.3.3.3 Retração por secagem

O concreto celular espumoso é um importante e versátil material de construção por apresentar propriedades como densidade reduzida e ajustável e excelente

isolamento térmico e acústico, porém, a ausência de agregados produz uma acentuada retração por secagem, que pode ser até dez vezes superior à apresentada por concretos de densidade normal (CHINDAPRASIRT; RATTANASAK, 2011; WAN et al., 2017).

Essa acentuada retração pode originar fissuras e reduzir, ainda mais, a resistência mecânica do concreto celular, sendo, portanto, uma de suas principais limitações (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015; WAN et al., 2017). Amran, Farzadnia e Ali (2015) apontam que, em geral, a retração por secagem no concreto celular está compreendida entre 0,1% e 0,35% do volume total e ocorre nos primeiros 20 dias de cura.

Por esse motivo, ao se propor a utilização desse tipo de material para a fabricação de elementos construtivos, em especial, elementos pré-fabricados, os quais possuem um controle dimensional ainda mais rigoroso que aqueles moldados *in loco*, é de suma importância averiguar esse aspecto (SOARES et al., 2017).

De acordo com Nambiar e Ramamurthy (2002), alterações de volume em um material à base de cimento provenientes da remoção de umidade deve-se, essencialmente, à alteração do volume da pasta de cimento hidratada sem restrições, a qual ocorre devido à remoção da água adsorvida presente na superfície dos poros do gel formado.

No que tange o concreto celular espumoso, os fatores que influenciam a retração são distintos àqueles que interferem na retração dos concretos normais (NAMBIAR; RAMAMURTHY, 2002). Trabalhos afirmam que tal retração seja função da estrutura física do produto de hidratação, outros relacionam ao volume e à superfície específica, e distribuição dos microporos, e ao teor de umidade (NAMBIAR; RAMAMURTHY, 2002).

Para Nambiar e Ramamurthy (2002), os fatores são: o método de cura, a composição, a densidade inicial e final, o teor de umidade, a duração e o clima de armazenamento, a estrutura e a distribuição dos microporos.

Chindaprasirt e Rattanasak (2011) apontam que a retração do concreto leve depende do conteúdo de pasta e de vazios. Yerramala e Ramachandrudu (2004) acrescentam que uma porcentagem elevada de poros de menor dimensão também tem influência na retração e que esta aumenta com a redução da densidade, como aponta a Tabela 3.

Tabela 3 - Relação entre densidade e retração do concreto celular espumoso

Densidade no Estado	Retração por	Condutividade
Endurecido	secagem	Térmica
kg/m³	%	W/mK
700	0,25	0,15
1100	0,15	0,30
1500	0,10	0,55

Fonte: Adaptado (YERRAMALA; RAMACHANDRUDU, 2004)

Jones, McCarthy e McCarthy (2003) avaliaram os efeitos da substituição parcial e total da areia por cinzas volantes nas propriedades de um concreto celular com densidade de 1000 kg/m³, consumo de cimento de 300 kg/m³ e relação a/c igual a 0,5. Nessa comparação, as misturas contendo areia apresentaram menor retração, o que, segundo os autores, está ligado à reduzida capacidade de encolhimento da areia em comparação às cinzas volantes.

Kunhanandan Nambiar e Ramamurthy (2009) avaliaram o efeito da relação carga-cimento na retração do concreto celular e concluíram que, conforme essa relação aumenta, a retração diminui, o que, segundo os autores, se deve à elevação da restrição conferida pelo aumento da quantidade de agregado. Ademais, para todas as relações carga-cimento, a retração do concreto celular contendo cinza volante foi maior que aquele que só tinha areia.

O aumento da retração por secagem a partir da substituição da areia por cinzas volantes também foi observado por Ramamurthy e Narayanan (2000) em concretos celulares autoclavados. Nambiar e Ramamurthy (2002) comentam ainda que misturas estáveis e viáveis de concreto celular contendo cinzas volantes como material de enchimento requerem uma maior relação água/sólidos, o que também contribui para esse aumento da retração.

Essa maior relação água/sólidos torna o material mais permeável absorvendo uma maior quantidade de água durante a etapa de cura e, conseqüentemente, produzindo uma maior camada de água adsorvida. Além disso, a taxa de secagem é diretamente relacionada com a permeabilidade da mistura (NAMBIAR; RAMAMURTHY, 2002).

Além da utilização de areia e cinzas volantes em substituição ao cimento, outras alternativas também já foram avaliadas, como a utilização de agregados leves

(NAMBIAR; RAMAMURTHY, 2002), a adição de compostos de glicol (CHINDAPRASIRT; RATTANASAK, 2011) e a cura em autoclave (RAMAMURTHY; KUNHANANDAN NAMBIAR; INDU SIVA RANJANI, 2009).

Nesse sentido, devido ao fator de restrição, estudos apontam que, no que tange os materiais de enchimento, a areia é mais efetiva na redução da retração por secagem do que a cinza volante (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015).

Além disso, a incorporação de fibras, comprovadamente, auxilia na redução da retração por secagem, visto que estas retêm água e, portanto, retardam a evaporação. Essa redução da retração é intimamente ligada ao percentual de fibra incorporado, isto é, quanto maior a porcentagem, maior será a redução (RAJ; SATHYAN; MINI, 2019). As fibras contribuem para uma maior estabilização da mistura no estado fresco e aumentam a resistência à tração, reduzindo a retração (NAMSONE; ŠAHMENKO; KORJAKINS, 2017).

2.3.3.4 Resistência mecânica

São aspectos que influenciam a resistência mecânica do concreto celular: a dimensão e formato do corpo de prova utilizado, o método de aeração, a direção do carregamento, idade de ensaio, quantidade de água utilizada na mistura, características dos insumos e o método de cura.

Em termos gerais, a resistência à compressão reduz exponencialmente com a redução da densidade (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000). Na literatura, diferentes valores são encontrados para diferentes relações a/c e diferentes composições: 0,48 MPa (240 kg/m³), 3,10 MPa (640 kg/m³), 1,80 MPa (800 kg/m³), 2,07 MPa (660 kg/m³), 2,00 MPa (800 kg/m³), 1,81 MPa (1300 kg/m³) 10,00 MPa (1600 kg/m³) 17,60 MPa (1800 kg/m³) (RAMAMURTHY; KUNHANANDAN NAMBIAR; INDU SIVA RANJANI, 2009).

Outros fatores, como relação cimento/areia, distribuição e tamanho das partículas de areia também influenciam a resistência do concreto celular espumoso. Para uma certa densidade, misturas com areia fina apresentam melhores resultados. Para densidades mais elevadas, em que a influência das propriedades dos materiais empregados é mais significativa do que o volume de espuma – que, por sua vez, impacta mais nas densidades mais baixas – resistências mais elevadas são alcançadas com o uso de cinzas volantes (RAMAMURTHY; KUNHANANDAN NAMBIAR; INDU SIVA RANJANI, 2009).

Tratando-se das diferentes formas de cura, a cura em autoclave (concreto celular autoclavado) é o procedimento que possibilita o alcance de maiores resistências mecânicas, sendo mais utilizada na produção de elementos pré-moldados. Todavia, comparando-se a cura ambiente com a cura úmida, a segunda opção se mostra mais vantajosa, apesar do ganho de resistência ser lento, é um processo relativamente barato (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015; RAMAMURTHY; KUNHANANDAN NAMBIAR; INDU SIVA RANJANI, 2009).

2.3.4 Uso de resíduos no concreto celular espumoso

Atualmente, algumas das principais preocupações e alguns desafios do setor da construção consistem na redução do impacto ambiental e no aprimoramento da eficiência energética das edificações (CHABANNES et al., 2014). Grandes quantidades de recursos são consumidos no transcorrer do ciclo de vida de uma edificação, desde a extração das matérias-primas, passando pela produção de materiais de construção, seu transporte, seu uso, sua manutenção até a fase de demolição e descarte (ANTÓNIO et al., 2018; MEYER, 2009).

Nesse sentido, tem crescido o desenvolvimento de materiais denominados “eco-friendly”, ou seja, que tenham esse viés sustentável, utilizem recursos renováveis e, preferencialmente, regionais (CHABANNES et al., 2014). Por esse ângulo, o concreto é um material vantajoso, uma vez que permite que um leque de constituintes sejam selecionados para sua composição de modo a atender às mais diversas especificações técnicas, abrindo caminho para a exploração de possibilidades de tornar esta indústria mais ecologicamente correta (MEYER, 2009; SHAFIGH et al., 2014).

Diversos pesquisadores relatam que uma forma de alcançar tal objetivo é utilizar materiais residuais (MADHWANI; SATHYAN; MINI, 2020; SHAFIGH et al., 2014), tendo, ao longo dos últimos anos, os resíduos agroindustriais recebido atenção especial frente a sua intensa geração, como é o caso da casca de arroz, que representa 20% do peso do arroz e ocupa grandes espaços ao ser descartada em aterros, motivo pelo qual, geralmente, é incinerada, gerando prejuízos não só ao meio ambiente, mas, também, à população (ANTÓNIO et al., 2018; CHABANNES et al., 2014; SHAH et al., 2021).

É realmente uma via de mão dupla, ao dar uma destinação apropriada a tais resíduos, torna-se a indústria agrícola mais sustentável, ao passo que é possível

produzir materiais construtivos de qualidade, com propriedades adequadas a sua aplicação e, ainda, colaborar para mitigar os impactos ambientais (ANTÓNIO et al., 2018; CHABANNES et al., 2014).

O emprego de resíduos em materiais cimentícios tem sido discutido há algum tempo, porém existem algumas limitações, como menor resistência, incertezas acerca da durabilidade em longo prazo, que, até então, dificultam sua introdução efetiva no mercado (SHAFIGH et al., 2014; SHAH et al., 2021).

Nesse sentido, atualmente, concretos utilizados para fins não estruturais, como o concreto celular espumoso, em que a resistência mecânica não é o foco principal, têm sido vistos como importantes rotas de incorporação de resíduos, possibilitando o uso de grandes volumes destes subprodutos (SHAH et al., 2021; WEI et al., 2013).

Em sua produção, assim como nos concretos ditos tradicionais, o concreto celular espumoso requer a utilização de cimento Portland, que é um dos materiais que mais causa preocupações sob o ponto de vista ambiental, uma vez que a indústria cimenteira é uma das maiores emissoras de dióxido de carbono em termos globais, tendo produzido, no ano de 2019, cerca de 4,2 bilhões de toneladas (MAHMOUD et al., 2021; SHAH et al., 2021).

Portanto, a avaliação de possíveis substituições desse insumo na fabricação de concreto celular espumoso pode contribuir para a mitigação dos problemas ambientais e dar mais um passo em direção à evolução da construção civil (SHAH et al., 2021).

A incorporação de uma grande variedade de resíduos no concreto celular espumoso já foram estudados, como resíduos de pedra, da indústria da construção, agrícolas, da indústria de ferro, entre outros (AHMAD, 2014; RAJ et al., 2020). Porém, embora pesquisas na área já tenham sido desenvolvidas, a efetiva aplicação do conceito ainda não está difundida completamente, havendo espaço e necessidade de novas avaliações (FALLIANO et al., 2019; JUNAID et al., 2022; SHAH et al., 2021).

Em comparação às fibras sintéticas, as fibras naturais se sobressaem em diversos pontos, como baixa densidade, serem recicláveis e biodegradáveis, e apresentarem custo inferior. Embora em termos de resistência mecânica sejam inferiores, contribuem para uma melhora na ductilidade e na retração (ARUNACHALAM et al., 2015; FALLIANO et al., 2019; MADHWANI; SATHYAN; MINI, 2020).

Ahmad (2014) avaliou aspectos ligados à durabilidade do concreto celular espumoso com incorporação de fibras sintéticas e naturais (vidro, polipropileno, aço, kenaf e dendê) e observou que o uso de fibras é eficiente no controle da retração por secagem, sendo que a fibra de vidro foi a que mais se destacou nesse sentido, mas que, por outro lado, todas as fibras produziram compósitos de menor desempenho térmico.

Raj *et al.* (2020) avaliaram o uso combinado de fibras PVA e coco nas propriedades mecânicas, de durabilidade e funcionais do concreto celular espumoso, e observou que, tratando-se de misturas monotípicas, isto é, com incorporação de um único tipo de fibra, elevou a absorção de água em ambos os casos, sendo que as fibras PVA apresentaram ainda valores superiores. Consequentemente, as misturas com fibras de coco apresentaram menor retração e menor condutividade térmica. Ademais, na mistura híbrida, a proporção 0,3% PVA e 0,2% coco foi a que apresentou o melhor desempenho.

Madhwani; Sathyan; Mini (2020) investigaram a incorporação de três diferentes percentuais de fibras de cana-de-açúcar (1%, 3% e 5%) e concluíram que, mesmo tratando as fibras com solução de hidróxido de sódio, as fibras foram suscetíveis à absorção de água e que tal absorção foi diretamente proporcional ao teor de fibra utilizada, isto é, quanto maior o percentual de fibra, maior a absorção.

Raj *et al.* (2021) produziram um revestimento para isolamento térmico em concreto celular espumoso e palha de arroz, e observaram uma redução na condutividade térmica em comparação ao mesmo material sem palha. Além disso, em um dado dia de pico de temperatura exterior (~38 °C), foi possível manter a parte interna confortável, em torno de 21 °C. E, por meio de simulações numéricas, constataram uma diferença de temperatura de 4 K entre um ambiente isolado e outro não, comprovando a eficiência da palha no desenvolvimento de um produto ambientalmente amigável e com excelentes propriedades isolantes.

Hossain et al. (2021) utilizaram uma combinação de fibras de casca de arroz (em substituição parcial ao cimento) e fibras de juta em diferentes percentuais para desenvolver um compósito reforçado por fibras e avaliar a possível melhora na resistência à compressão e na redução das fissuras relativas à retração plástica. Após as análises, os autores observaram um aumento na resistência à compressão para percentuais menores de ambas as fibras (até em torno dos 10%) e, para percentuais menores, esse aumento não foi tão expressivo, sendo equivalente ao mesmo concreto

sem as fibras. Além disso, incorporações de casca de arroz em torno do percentual de 15% gerou uma redução nos custos de produção em torno dos 7%.

Chabi et al. (2020) realizaram uma pesquisa na área de desenvolvimento sustentável e proteção do ambiente por meio da valorização dos resíduos agrícolas na construção. No estudo em questão, a casca de arroz foi empregada como agregado vegetal em uma matriz cimentícia a fim de produzir compósitos leves com a destinação final como material de construção.

Os autores concluíram que o material produzido possuía boas propriedades mecânicas e térmica que possibilitam sua utilização na fabricação de componentes como blocos, vigas e tetos falsos, especialmente em países de clima tropical ou árido (CHABI et al., 2020).

Madhwani; Sathyan; Mini (2020) apontam em seu trabalho que a utilização de fibras no concreto celular se dá, principalmente, para atenuar a fragilidade, e reduzir o custo e o peso total. Desse modo, desde que adequadamente selecionada, a tipologia da fibra, compósitos leves com melhores propriedades mecânicas e de durabilidade podem ser obtidos.

Os autores comentam ainda que, em razão da pasta de cimento ser alcalina, e, portanto, apresentar uma “ameaça” para as fibras (degradação), rotineiramente, estas são previamente tratadas antes de serem inseridas, aleatoriamente, na matriz (MADHWANI; SATHYAN; MINI, 2020).

De modo geral, as constatações dos diferentes autores é a mesma, o uso de resíduos vegetais, sem a realização de nenhum tipo de tratamento prévio, na produção de compósitos cimentícios, reduz as propriedades mecânicas e gera melhorias na condutividade térmica, razões pelas quais os pré-tratamentos da fibra são alvo de diversas pesquisas e o desenvolvimento de produtos utilizando as *fibras in natura* tem alavancado (CHABRIAC et al., 2016; LABOREL-PRÉNERON; MAGNIONT; AUBERT, 2018).

Laverde et al. (2022) apontam que há uma correlação entre o comprimento da fibra e as propriedades mecânicas de compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras vegetais.

Os autores observaram que as resistências à flexão e à tração, e a tenacidade do compósito se elevaram após a adição de fibras curtas e longas. Este fato foi explicado como sendo desencadeado pelo efeito de ponte desenvolvido pelas fibras

dentro do compósito, o que gera um aumento na absorção de energia e um comportamento superior pós-fissuração (LAVERDE et al., 2022).

Por outro lado, Laverde et al. (2022) identificaram que a resistência à compressão dos compósitos reduziu-se por meio da adição de fibras curtas em razão da formação de poros no interior da matriz. Nesses casos, as fibras impedem o colapso de forma abrupta do elemento ao passo que mantêm a estrutura da matriz fissurada, formando uma teia de microfissuras. Por sua vez, fibras longas elevam a resistência à compressão.

2.3.5 Durabilidade em compósitos cimentícios leves com fibras vegetais

Em conformidade com o American Concrete Institute (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2013), durabilidade fundamenta-se na habilidade que um material apresenta de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão e outras condições. Nesse sentido, tanto fatores ambientais externos – variações de temperatura, ação da água e umidade – quanto fatores internos (elevada retração como potencial fonte de trincas) devem ser observados (NAMSONE; ŠAHMENKO; KORJAKINS, 2017).

Sob o ponto de vista sustentável, materiais duráveis são extremamente positivos, pois, ao estender seu ciclo de vida, reduz impactos ambientais por meio de uma menor extração dos recursos naturais escassos para substituição e/ou reparos (NAMSONE; ŠAHMENKO; KORJAKINS, 2017).

O concreto celular é um importante material de construção nos dias de hoje, combinando propriedades térmicas, acústicas, baixa densidade, elevada fluidez, baixo consumo de agregados e potencial para incorporação de resíduos. Todavia, a elevada porosidade limita a resistência mecânica, eleva a absorção de água e contribui para uma maior retração por secagem, aspectos que devem ser considerados quando se fala em durabilidade (AHMAD, 2014; NAMSONE; ŠAHMENKO; KORJAKINS, 2017). Outros aspectos, como resistência ao gelo e a retração por carbonatação, também devem ser observados (CHICA; ALZATE, 2019).

Como medidas auxiliares, neste aspecto, pode-se citar a adição de materiais pozolânicos, materiais de enchimento, fibras e o uso de aditivos, produzindo uma estrutura porosa menos aberta, conseqüentemente, elevando a resistência ao congelamento/descongelamento e a durabilidade, especialmente no que diz respeito a climas úmidos e frios (CHICA; ALZATE, 2019).

Pachla (2022), por sua vez, analisou a durabilidade de compósitos cimentícios leves com incorporação da casca de arroz. O autor realizou ensaios de envelhecimento natural (em ambiente interno protegido da ação das intempéries e em ambiente externo), envelhecimento acelerado e ataques agressivos, avaliando a fundo a influência da degradação da casca de arroz neste processo, tanto em escala micro quanto na escala macro.

Após suas análises, Pachla (2022) constatou que a utilização da casca de arroz em uma matriz cimentícia leve não afeta negativamente o comportamento mecânico em curto, médio e longo prazo, uma vez que, em contrapartida à redução da capacidade mecânica em razão da degradação dos polímeros naturais, atuam as reações químicas da casca *in natura* (óxido de silício presente na superfície da fibra) com a matriz cimentícia (cimento Portland). Ademais, a resistência residual (ao fim da vida útil do compósito), conforme o autor, atendeu aos valores mínimos exigidos pelas normativas em vigor, que é de 1,0 MPa, viabilizando a utilização do compósito.

Junaid et al. (2022) defendem que vários são os fatores que influenciam na durabilidade e na vida útil dos concretos leves, tais como: tipo, composição, condições de ensaio, ambiente de exposição, mecanismo de deterioração, entre outros. Todavia, o autor destaca que é inconstestável a durabilidade em termos de aplicações estruturais antigas, podendo ser citadas embarcações navais em situações de guerras expostas, portanto, a condições ambientais severas por mais de um século.

Os autores identificaram, ainda, vários fatores que controlam o uso de resíduos nos concreto leves conforme as funções desejadas. No que tange o uso como fibra ou bioagregado, os fatores gerais são: resistência, peso unitário, distribuição granulométrica, compatibilidade com os demais constituintes, interação/estabilidade intermolecular e características baseadas em necessidades específicas do material (JUNAID et al., 2022).

Por fim, um ponto muito importante a ser discutido é a compatibilidade das fibras vegetais com o cimento Portland utilizado na fabricação de compósitos cimentícios. Nesse sentido, é comum o acordo pela literatura que, desde que as fibras não afetem negativamente o processo de endurecimento do cimento e a razão entre valores de liberação de calor do mesmo material sem as fibras e o material com fibras fique superior a 68%, há grandes indícios de que sejam compatíveis (PACHLA, 2022).

Ademais, Miller e Moslemi (1991) identificaram que, de modo geral, madeiras e fibras em que há a predominância de celulose, lignina, ácido graxo, ácido resinoso,

esterol e terpeno não reduzem significativamente a resistência de compósitos cimentícios. Por outro lado, a glicose foi a que provocou a redução mais substancial da resistência à tração.

Jaubethie et al. (2003) propuseram que argamassas leves com casca de arroz podiam se beneficiar por meio da reação pozolânica entre a pasta e o reforço com fibras orgânicas. Para isso, avaliaram os efeitos da cura e do armazenamento em duas condições distintas, isto é, armazenamento de um ano a 50% de umidade relativa e 95% de umidade relativa. Como destaque, os pesquisadores constataram a relevância das condições ambientais nas propriedades do material.

Para a situação de maior umidade relativa, a argamassa ganhou resistência, o que é explicado pelos autores como um acontecimento decorrente da reação pozolânica bem-sucedida, porém a fibra demonstrou perder capacidade de reforço, logo o material tornou-se mais frágil. Na umidade relativa de 50%, o contrário foi observado, isto é, menor resistência à compressão, maior resistência à flexão e maior elasticidade (JAUBERTHIE et al., 2003). Pachla (2022) também observou o mesmo fenômeno por meio de análises microestruturais em compósitos leves com casca de arroz.

Segundo Pachla (2022), a manutenção do desempenho em longo prazo do compósito desenvolvido pelo autor se deu em razão das características químicas da casca, principalmente a sílica presente em sua superfície.

Souza (2008) estudou a durabilidade de argamassas contendo cinza da casca de arroz e casca de arroz *in natura*, por meio de ensaios de envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem, e encontrou resultados semelhantes. Conforme os resultados da autora demonstram, o envelhecimento acelerado até 180 dias não afetou a durabilidade dos compósitos com casca de arroz.

Os constituintes da CA oscilam em razão das condições geográficas, tipo de grão, condições climáticas, química do solo e adubação utilizada. De modo geral, com base em análises de cascas de diferentes regiões, a composição média fica em torno de 80% de matéria orgânica e 20% de cinzas (BISHT; GOPE; RANI, 2020).

Serrano et al. (2012) apontam que a composição orgânica da casca é muito semelhante à da maioria das fibras orânicas, ou seja, formada por celulose (28%-49%), hemicelulose (16%-22%), lignina (19%-25%), compostos nitrogenados, lipídios e ácidos orgânicos.

Por outro lado, os componentes inorgânicos, que, usualmente, no caso da casca, são determinados em cinza, difere-se das demais fibras orgânicas em razão do alto teor de sílica, representando em termos percentuais valores superiores a 90%, e o restante sendo relativo a outros óxidos (SERRANO et al., 2012).

Estudos acerca da parcela inorgânica demonstram que o principal componente é sílica amorfa e alguns poucos óxidos alcalinos, metais terrosos, alumínio e ferro. Essa sílica amorfa encontra-se, em sua grande maioria, no exterior da CA, enquanto uma pequena quantidade de sílica encontra-se na região central e interna (BISHT; GOPE; RANI, 2020; PACHLA, 2022). Ademais, as principais impurezas presentes são cálcio, potássio, magnésio e manganês, e, de forma secundária, alumínio, ferro, boro e fósforo, comumente, na forma de óxidos (SERRANO et al., 2012).

Em relação às dimensões da CA, conforme estudo realizado por Zhang, Ghaly e Li (2013), há uma grande variedade ao redor do globo, podendo serem citadas como as principais faixas valores entre 0,1-1,0 mm (Portugal), 0,075-3,0 mm (Índia), 0-10,0 mm (China), 1,40-2,36 mm (EUA).

E por fim, quanto às características mecânicas da fibra, pode haver variabilidade significativa em decorrência da origem da amostra, isto é, com as variações microestruturais que podem acarretar em concentração de tensões durante os testes, contudo, há relatos de que os valores de resistência à tração ficam entre 11-71 MPa, ou seja, a casca tem elevada resistência à tração.

2.4 LIGHT STEEL FRAMING

O Light Steel Framing (LSF) consiste em um sistema de construção a seco composto por três materiais fundamentais que podem ser utilizados para compor tanto paredes quanto lajes, que são: seções de aço formadas a frio (parte resistente), painéis de revestimento (placa de fio orientado – OSB, placa de gesso acartonado – *Drywall* ou placas cimentícias) e materiais de isolamento (lã mineral, poliestireno expandido) (CRASTRO, 2005; GOMES, 2007; SOARES et al., 2017).

Além destes materiais principais, também são necessários materiais de fixação e união, como parafusos autobrocantes, membranas impermeáveis e estanques ao ar e camadas para o acabamento final (SOARES et al., 2017). Trata-se de um sistema construtivo racionalizado e industrializado, o qual viabiliza uma construção enxuta e ágil do ponto de vista executivo. Em razão de suas características, muitas vezes, a

denominação “sistema autoportante em aço de construção a seco” é utilizada (CRASTRO, 2005).

Seu surgimento data do início do século XIX, em que colonizadores dos EUA construíam edificações em madeira serrada (Balloon Framing) utilizando conceitos da Revolução Industrial, como praticidade, produtividade e agilidade, de modo a atender ao crescimento acelerado da população na época. Temos, depois, gradativamente, a estruturação em madeira (Wood Frame), a qual foi sendo substituída pelos perfis em aço em razão do desenvolvimento industrial (GOMES, 2007).

Na metade do século seguinte, desenvolveu-se a tecnologia dos aços galvanizados, possibilitando que, em 1933, na FERIA Mundial de Chicago, fosse mostrado um protótipo de habitação em Light Steel Framing, passando, desde então, a ser utilizado como sistema estruturante também na Austrália frente às restrições de controle da madeira quanto a ataque de pragas e doenças (GOMES, 2007).

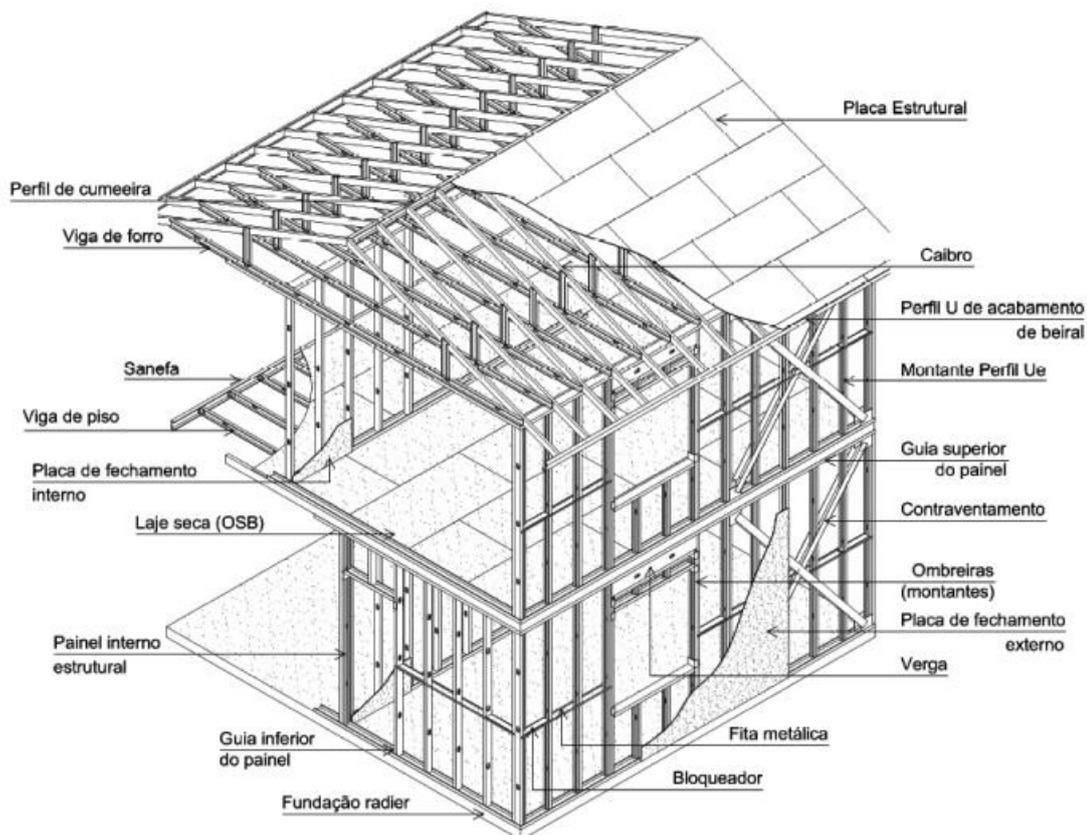
O termo, portanto, em inglês, “Framing” deriva do termo “Frame” que significa estrutura/esqueleto e o termo, também em Inglês, “steel” faz menção ao aço. Desse modo, o termo “Light Steel Framing” pode ser traduzido como processo por meio do qual um esqueleto estrutural em aço leve é produzido (CRASTRO, 2005).

De modo geral, em locais nos quais a construção civil é majoritariamente dotada de processos industrializados, o Light Steel Framing é uma realidade. Nos dias de hoje, por exemplo, o Japão é considerado o país que detém o maior conhecimento técnico-científico na área de perfis leves, uma vez que seu mercado de aço é demasiadamente desenvolvido (GOMES, 2007).

Esse tipo de sistema reserva-se a habitações térreas e sobrados, isoladas e geminadas, unifamiliares ou multifamiliares com até cinco pavimentos, sendo tal restrição uma de suas poucas desvantagens (GOMES, 2007). A Figura 22 ilustra o esquema de uma residência em LSF.

Do ponto de vista de sua concepção, pode assumir características estruturais ou apenas de vedação (SINAT, 2016). A Figura 23 ilustra um exemplo de sua concepção sem função estrutural, bem como, a Figura 24 ilustra como se dá sua concepção com função estrutural.

Figura 22 - Esquema de uma residência em LSF



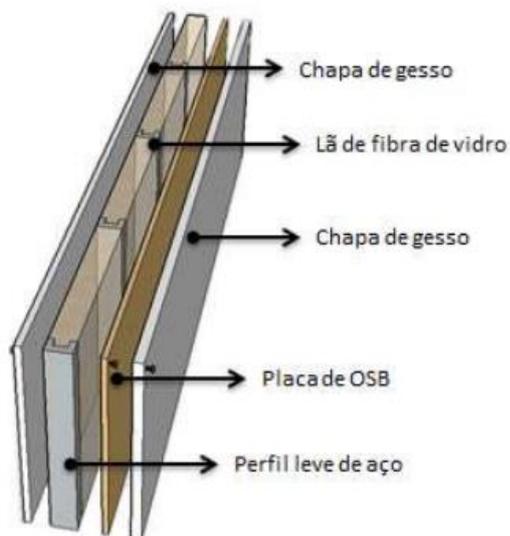
Fonte: Crastro (2005)

Figura 23- Exemplo de concepção do SVVI sem função estrutural



Fonte: SINAT (2016)

Figura 24- Exemplo de concepção do SVVI com função estrutural



Fonte: SINAT (2016)

Em decorrência de ser um sistema importado para o Brasil, carece, desde sua implementação, de alguns ajustes em razão das diferenças climáticas de modo a elevar seu desempenho (GOMES; DE SOUZA; TRIBESS, 2013). Além disso, embora tenha-se avançado nessa área na última década, como por exemplo através da publicação da NBR 16.970 (ABNT, 2022) a qual fixa parâmetros de qualidade bem definidos, pesquisas mais aprofundadas ainda são necessárias, especialmente no que tange aos aspectos de pós-ocupação (MALTA, 2021).

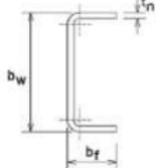
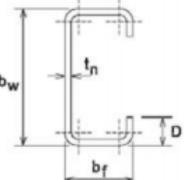
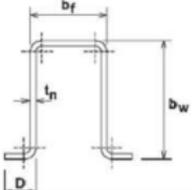
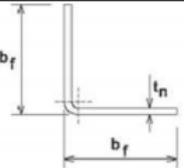
2.4.1 Tipos de perfis utilizados

A estrutura responsável pelo suporte de cargas no sistema LSF é composta por seções de aço formadas a frio. A capacidade resistente e a rigidez de cada perfil está ligada à sua espessura, à classe do aço e à forma de sua seção transversal (SOARES et al., 2017). A norma que especifica os requisitos gerais para tais perfis é a NBR 15.253 (ABNT, 2014), por sua vez, a NBR 14.762 (ABNT, 2010) aborda os requisitos básicos relativos ao dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.

A Figura 25 apresenta as seções transversais típicas dos perfis e suas respectivas utilizações. De acordo com a NBR 15.253 (ABNT, 2014), o aço utilizado para fabricação dos perfis deve apresentar resistência ao escoamento mínima de 230 MPa, a espessura nominal mínima dos perfis (t_n) deve ser $\geq 0,80$ mm para os perfis U

simples e enrijecido, e $\geq 0,65$ mm para os perfis Cartola. Estes valores vão de encontro às especificações norte-americanas, mas diferem do Eurocódigo EN1993-1-3, que é menos conservador, exigindo limite de escoamento mínimo de 220 MPa para aços de qualidade estrutural, e espessuras entre 0,45 mm e 0,15 mm (CARDOSO, 2016).

Figura 25- Tipos de perfis de aços zincados formados a frio para uso em sistema construtivo de paredes, pisos e cobertura

SEÇÃO TRANSVERSAL	SÉRIE DESIGNAÇÃO	UTILIZAÇÃO
	U simples U $b_w \times b_f \times t_n$	Guia Ripa Bloqueador Sanefa
	U enrijecido Ue $b_w \times b_f \times D \times t_n$	Bloqueador Enrijecedor de alma Montante Verga Viga
	Cartola Cr $b_w \times b_f \times D \times t_n$	Ripa
	Cantoneiras de abas iguais L $b_w \times b_f \times D \times t_n$	Cantoneira

Fonte: SINAT (2016)

2.4.2 Métodos construtivos

De modo geral, existem, no total, três métodos para a construção de edificações em LSF, as quais são apresentadas, mais detalhadamente, nos itens a seguir.

2.4.2.1 “Stick-build”

O método “Stick-build” consiste no processo de corte e montagem *in loco* dos perfis, isto é, os elementos são fornecidos em um comprimento pré-determinado, com furos para a passagem das tubulações pré-perfurados, e apenas as conexões são realizadas no local da obra a partir de parafusos autoperfurantes, autobrocantes e cavilhas (YANDZIO; LAWSON; WAY, 2015).

A montagem desses perfis forma as colunas, as paredes, as vigas e os suportes aos quais os revestimentos internos e externos serão ligados. Em geral, este método é utilizado para obras menores (YANDZIO; LAWSON; WAY, 2015) e quando a pré-fabricação não é factível (ABDI, 2015). A Figura 26 ilustra esse processo.

Figura 26- Construção em LSF utilizando método "Stick build"



Fonte: ABDI (2013)

O método possui inúmeras vantagens, tais como: permite que desvios e modificações sejam ajustados no próprio local; as técnicas utilizadas para conectar os elementos são simples e um número elevado de elementos pode ser transportado simultaneamente e serem facilmente manuseados no local; diferentemente dos métodos por painel e modular, os fabricantes não precisam instalar oficinas de montagem. Como desvantagem, é possível citar que o "Stick-build" requer uma maior carga de trabalho *in situ* (YANDZIO; LAWSON; WAY, 2015).

2.4.2.2 Construção por Painéis

O conceito da construção em LSF por painéis baseia-se na ideia de que painéis de parede, de piso, e treliças de cobertura podem ser pré-fabricados e, posteriormente, serem unidos no local da obra em mesas específicas de trabalho utilizando parafusos. Em situações nas quais os andares sejam altos, isto é, possuam elevado pé-direito, os painéis podem ser fabricados utilizando-se gabaritos fabricados

sob medida para que uma maior precisão seja alcançada (YANDZIO; LAWSON; WAY, 2015). A Figura 27 ilustra esse processo.

Algumas das vantagens da construção por painéis são: as aberturas podem ser inseridas durante a fabricação do painel; o tempo de instalação *in loco* é menor em relação ao “Stick-build”; há a possibilidade de os painéis serem erguidos de forma mecânica; maior precisão geométrica; custo com mão de obra reduzido e a produção na fábrica proporciona uma maior segurança aos envolvidos, do que em relação à montagem dos elementos no próprio local da obra (YANDZIO; LAWSON; WAY, 2015).

O método de construção por painéis é o mais usual no Brasil, em razão de ter se adaptado melhor às formas de trabalho das empresas nacionais e à mão de obra disponível (CRASTRO, 2005).

Figura 27- Construção em LSF utilizando método por painéis



Fonte: ABDI (2013)

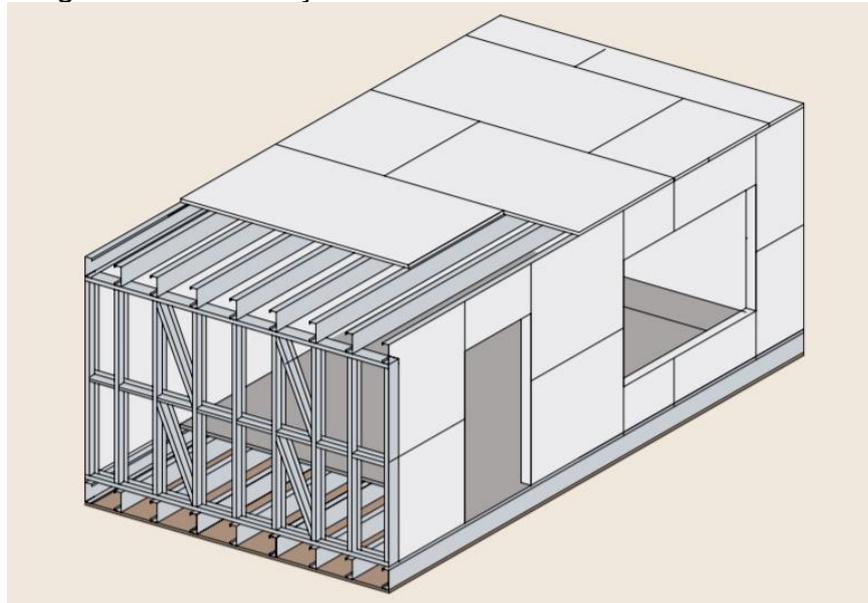
2.4.2.3 Construção Modular

A construção modular, como o próprio termo sugere, consiste em pré-fabricar unidades/módulos completos, os quais podem ser encaminhados para o local da obra com todos os acabamentos e acessórios instalados. A união desses módulos irá formar a edificação final (YANDZIO; LAWSON; WAY, 2015).

O método modular (ver Figura 28) mostra-se mais econômico em situações em que é possível produzir-se a mesma unidade básica em grande escala, uma vez que as configurações empregadas podem ser compartilhadas por tais unidades, havendo, portanto, reduções em tais custos. A pré-fabricação fornece também, assim como no

método por painéis, maior segurança aos envolvidos, por ocorrer em ambiente fabril (YANDZIO; LAWSON; WAY, 2015).

Figura 28- Construção em LSF utilizando método modular



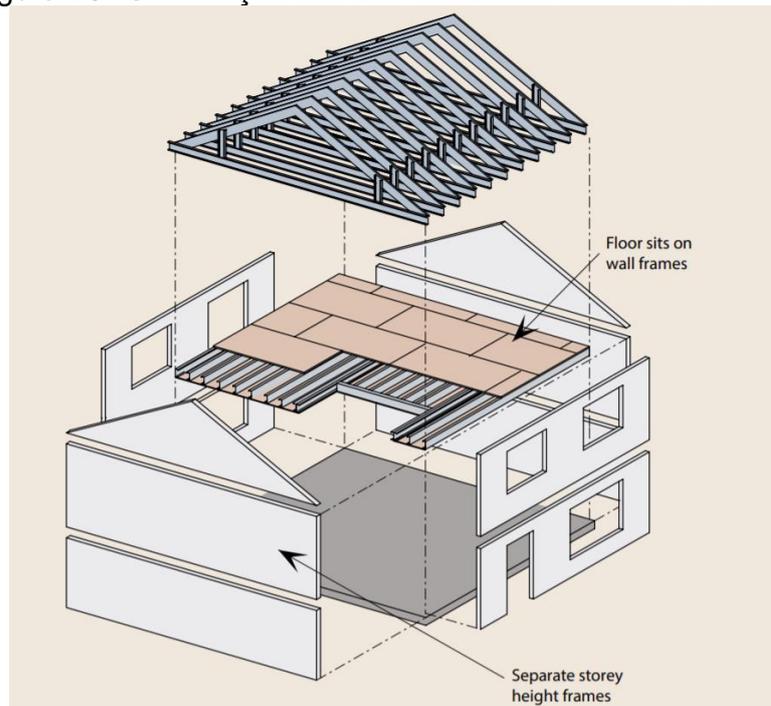
Fonte: Yandzio; Lawson; Way (2015)

2.4.2.4 “Platform” e “Balloon”

Nos métodos “Stick” ou por painéis, os perfis podem ser instalados no modo “Platform” ou no modo “Balloon”. A construção plataforma consiste em montar paredes e pisos de forma sequencial, isto é, um pavimento por vez, e, conseqüentemente, as paredes não se tornam estruturalmente contínuas (YANDZIO; LAWSON; WAY, 2015). A Figura 29 ilustra essa metodologia.

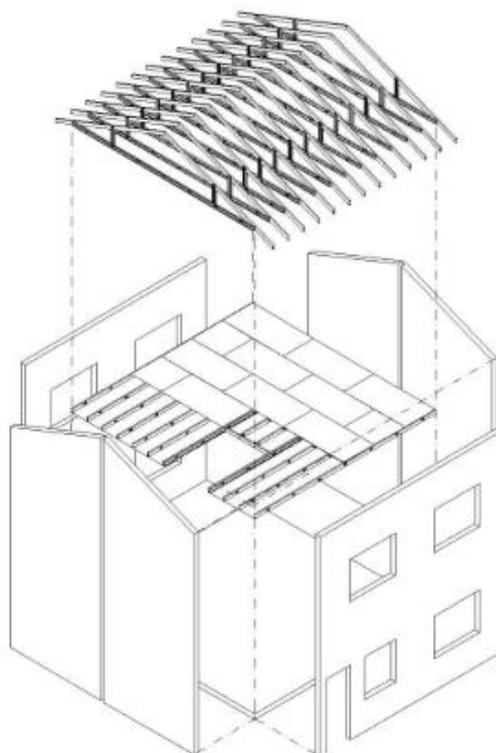
Por sua vez, na construção “Balloon” (Figura 30), os painéis são mais extensos e se prologam por mais de um pavimento. Esse tipo de painel possui maior dificuldade de montagem e requerem apoio durante a instalação dos pisos. Atualmente, raramente, é utilizado (YANDZIO; LAWSON; WAY, 2015).

Figura 29- Construção em LSF utilizando método “Platform”



Fonte: Yandzio; Lawson; Way (2015)

Figura 30- Construção em LSF utilizando método “Balloon”



Fonte: Crastro (2005)

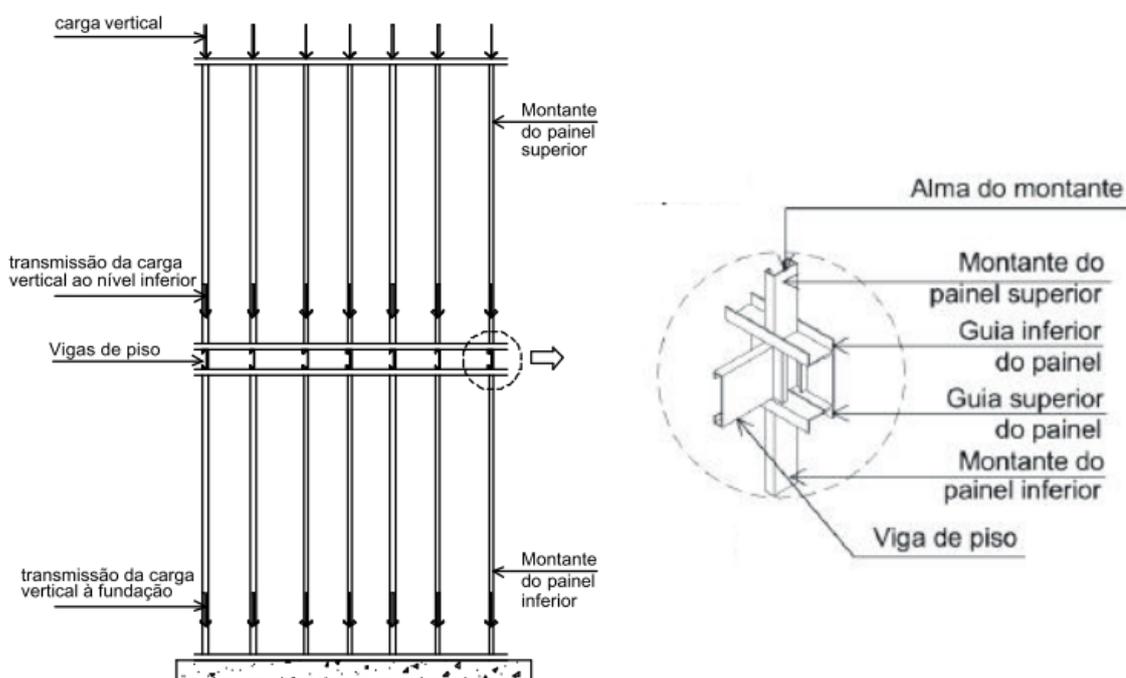
2.4.3 Painéis

Os painéis autoportantes (estruturais) possuem o papel de absorver e distribuir, de maneira uniforme, os carregamentos e transmiti-los às fundações. São formados por montantes (perfis galvanizados de seção transversal U_e) espaçados constantemente conforme a modulação definida, a qual varia de 400 a 600 mm (GOMES, 2007).

Por sua vez, os montantes transferem as cargas de origem vertical por meio do conceito “in-line framing”, isto é, por meio do contato direto de suas almas com as guias (seção transversal U simples), as quais são unidos em ambas as extremidades formando o quadro estrutural (GOMES, 2007). A Figura 31 e a Figura 32 ilustram esse processo.

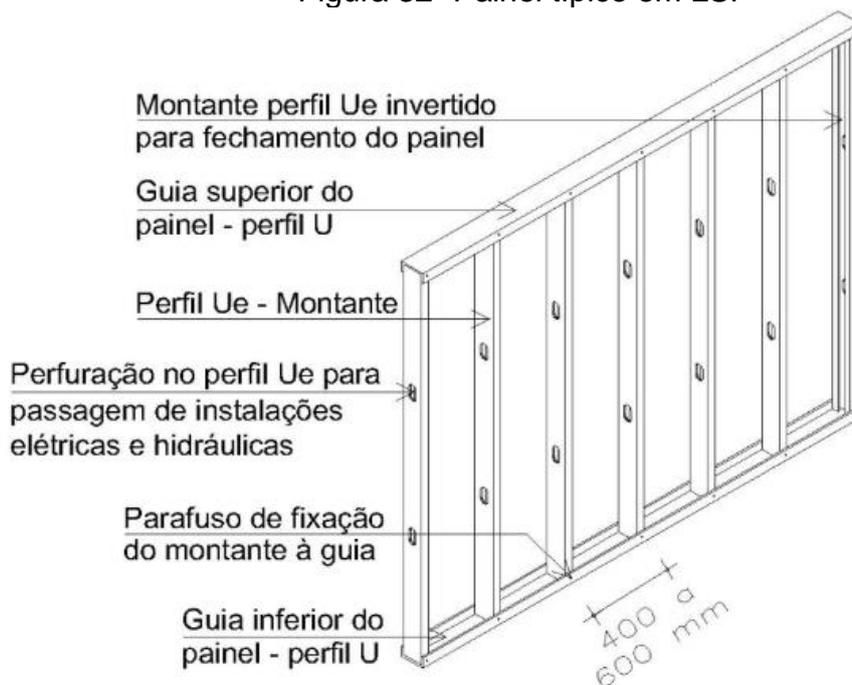
De modo a assegurar a resistência aos esforços horizontais, devem ser instalados contraventamentos em “X” ou placas estruturais de fechamento, atuando como diafragma rígido. Ademais, em situações nas quais existam aberturas (portas e janelas), é necessário realizar reforços, tais como vergas, de modo a redistribuir as cargas, passando dos montantes que sofreram a interrupção aos montantes que demarcam lateralmente o vão em questão (GOMES, 2007).

Figura 31 - Transmissão da carga vertical à fundação



Fonte: Crastro (2005)

Figura 32- Painel típico em LSF



Fonte: Crastro (2005)

2.4.4 Fundação

Em razão da leveza da estrutura e dos componentes de fechamento, o LSF demanda pouco das fundações em comparação a outros sistemas construtivos. Entretanto, posto que as cargas são distribuídas de maneira uniforme, é preciso que esta tenha continuidade ao longo de toda a extensão dos painéis (VIVAN, 2015).

Comumente, o radier é utilizado para construções em LSF, que é uma fundação do tipo rasa constituída, basicamente, de uma laje contínua de concreto e, eventualmente, algum tipo de reforço ou enrijecimento, transmitindo as cargas da estrutura de modo uniforme para o terreno. Todavia, a sapata corrida também pode ser utilizada, atuando como apoio para o contrapiso, que pode tanto ser de concreto armado quanto de perfis de aço galvanizado (ABDI, 2015; VIVAN, 2015).

Sob a ótica da racionalização, o radier se sobressai, mas, assim como nos demais sistemas construtivos, a seleção da fundação e de sua tipologia também deve levar em consideração fatores como: topografia do local, tipo de solo, nível do lençol freático e profundidade do solo firme (ABDI, 2015; VIVAN, 2015).

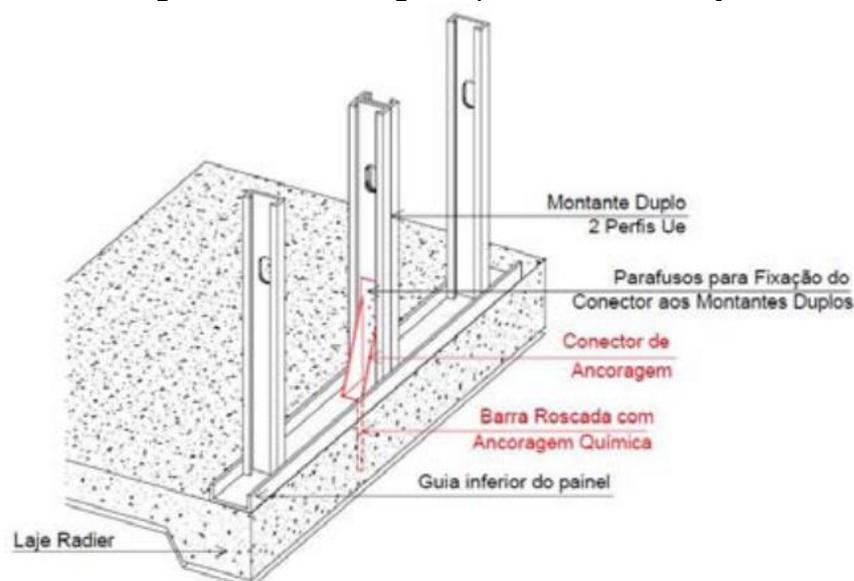
Para que a edificação não se movimente sob a ação do vento, resistindo aos deslocamentos de translação/rotação, é necessário ancorar devidamente a superestrutura na fundação. A ancoragem mais eficiente irá depender do tipo de

fundação empregada e das solicitações presentes, e deverá ser definida com base em uma análise estrutural (ABDI, 2015; VIVAN, 2015).

De acordo com a literatura (CRASTRO, 2005; VIVAN, 2015), existem, atualmente, cinco diferentes modos de ancoragem: química com barra roscada, com fita metálica, com chumbadores tipo parabolts, com barra roscada tipo J e provisória.

A ancoragem química recebe essa nomenclatura por ser formada por um sistema de barra roscada com arruela e porca, o qual é fixado no concreto da fundação (o qual é perfurado posteriormente à concretagem) por meio de um conector de aço próprio, e esse furo é, então, preenchido com resina química (com resistência superior à do concreto em si) proporcionando a fixação entre barra e concreto. A Figura 33 faz essa ilustração.

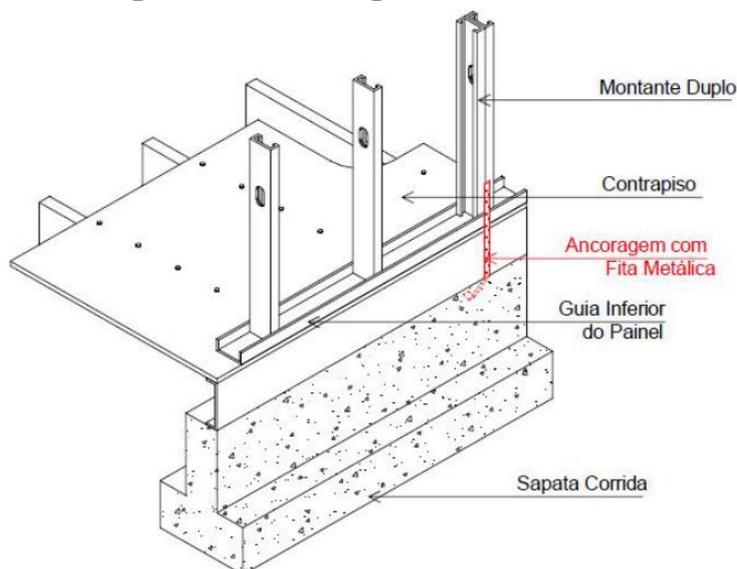
Figura 33 - Ancoragem química na fundação



Fonte: Vivan (2015)

A ancoragem com fitas metálicas, por sua vez, é realizada por meio do chumbamento destas na fundação. Basicamente, as fitas metálicas são elementos de aço galvanizado em que uma de suas extremidades é engastada na fundação e a outra parafusada nos montantes, como ilustra a Figura 34. São comercializadas em diferentes dimensões e também podem ser utilizadas para reduzir o comprimento de flambagem dos montantes e para o travamento lateral das vigas (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012; VIVAN, 2015).

Figura 34 - Ancoragem com fitas metálicas



Fonte: Vivan (2015)

A ancoragem com chumbadores tipo parabolts consiste em um processo mecânico e consiste na fixação da guia inferior dos painéis, por meio dos bolts, na fundação. Enquanto no caso da barra roscada tipo “J”, como o próprio termo remete, consiste em uma barra roscada com uma das extremidades curvadas (a qual deverá ser engastada na fundação) e a outra reta (que irá ficar fixa na guia/montante) (VIVAN, 2015).

E, por fim, a ancoragem provisória corresponde à fixação realizada por meio de um sistema finca pino acionado por pólvora. É usado para garantir o prumo dos painéis durante a montagem/conexão com os demais painéis até que as ancoragens definitivas sejam finalizadas (VIVAN, 2015).

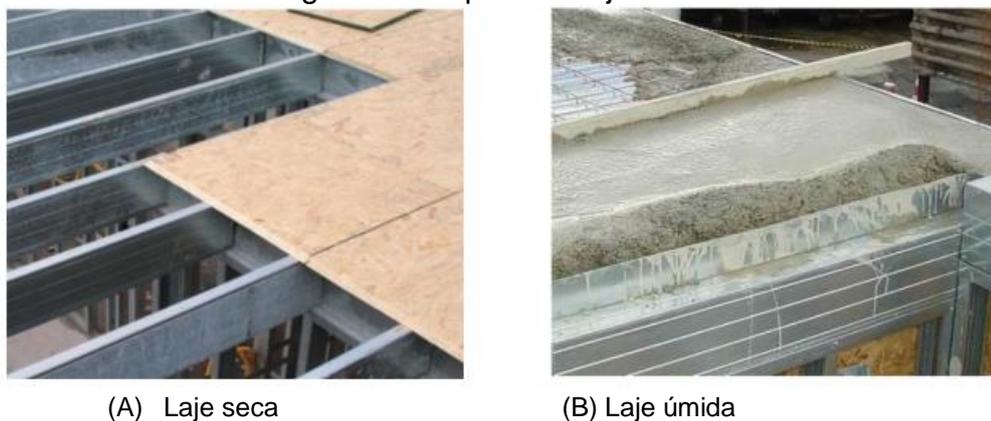
2.4.5 Lajes e cobertura

Nas lajes e coberturas, o conceito estrutural de divisão de cargas é exatamente o mesmo dos perfis, isto é, consistem em elementos biapoiados, os quais deverão transferir os carregamentos de forma contínua (ausência de elementos de transição) até as fundações (ABDI, 2013; MUZZI, 2014). Rotineiramente, são utilizados, basicamente, dois tipos de lajes, os quais estão ilustrados pela Figura 35.

Nas lajes secas, como são chamadas, são utilizados painéis OSB ou placas cimentícias apoiadas diretamente sobre as vigas de entrepiso (perfis metálicos), daí o nome “seca”. Por outro lado, as lajes úmidas são constituídas pela combinação de

telhas galvanizadas, as quais servem de forma para o concreto e para a tela de reforço (ABDI, 2015).

Figura 35 - Tipos de Laje LSF



Fonte: ABDI (2013)

A cobertura, de modo semelhante aos demais painéis, deverá ser contraventada e travada para resistir aos esforços oriundos do vento. Seu dimensionamento deverá ocorrer de tal modo que a transmissão de cargas se dê diretamente dos montantes para a fundação, podendo ser utilizados os mais diversos tipos de telha (ABDI, 2013; MUZZI, 2014).

2.4.6 Componentes de fechamento

No LSF, tanto o fechamento interno quanto o externo são compostos por componentes devidamente posicionados à estrutura formada pelos perfis galvanizados. Intrinsecamente, por razões de compatibilidade, devem apresentar baixo peso próprio, procedimentos de montagem ágeis e a seco. Ademais, devem propiciar o atendimento a critérios como: habitabilidade, segurança, desempenho estrutural, resistência e reação ao fogo, estanqueidade à água, conforto térmico-acústico, durabilidade e estética (GOMES, 2007).

No Brasil, os componentes de fechamento são comercializados na forma de placas ou chapas e os materiais mais comumente utilizados para tal finalidade são o OSB (tiras de madeira orientada), as placas cimentícias e o gesso acartonado (*drywall*), sendo que este último é indicado apenas para aplicações em áreas internas da edificação (CRASTRO, 2005).

Como apresentado no item 2.2.2, no sistema LSF, em geral, a distância entre os montantes é de 400 mm a 600 mm. Por esta razão, visando otimizar o processo

construtivo, as placas e chapas utilizadas como fechamento vertical são produzidas com largura de 1,20m, valor este que é múltiplo de ambas as modulações (CRASTRO, 2005).

2.4.6.1 Oriented Strand Board (OSB)

As placas OSB consistem na união (com resina) e prensagem sob elevada temperatura de três camadas perpendiculares de tiras de madeira de reflorestamento orientadas. Podem ser empregadas tanto no fechamento interno dos painéis quanto no fechamento externo, nos forros, nos pisos e no substrato da cobertura. Todavia, sua aplicação principal é como camada impermeável externa, como ilustra a Figura 36 (GOMES, 2007).

Além disso, deve haver a previsão de juntas de dilatação entre tais placas externas e a instalação de uma proteção com a ação da água e da umidade por meio de manta ou membrana de polietileno de alta densidade, assegurando a estanqueidade e minimizando a condensação interna dos painéis. Também em razão da umidade, é imprescindível proteger as placas externas de OSB do contato direto com o solo (GOMES, 2007).

Figura 36 - Facha com fechamento externo em OSB



Fonte: Crastro (2005)

De acordo com Crastro (2005), em geral, as placas de OSB são comercializadas nacionalmente nas dimensões de 1,22 m x 2,44 m e espessuras que variam entre 9, 12, 15 e 18 mm. Atualmente, o principal fabricante das placas de OSB, no Brasil, é Louisiana Pacific (LP) Building Products. A Tabela 4 apresenta as características dos principais painéis comercializados pela empresa no presente momento.

Diversos fatores influenciam na espessura das placas a serem utilizadas, como: tipo de acabamento, espaçamento entre montantes e função estrutural (CRASTRO, 2005). A Tabela 5 apresenta a espessura mínima da placa em função da modulação e da forma de aplicação, para dois tipos de revestimento (*siding* vinílico e argamassa).

Tabela 4- Características painéis OSB LP Brasil

Espessura (mm)	Dimensão (m)	Peso por Painel (kg)	Aplicação
9,5	1,20 x 2,40	17,50	Paredes e telhados com perfis espaçados a, no máximo, 40 cm.
	1,20 x 3,00	21,90	
11,1	1,20 x 2,40	20,40	Parede e telhados com perfis espaçados a, no máximo, 60 cm.
	1,20 x 3,00	25,60	
15,1	1,20 x 2,40	27,80	Parede com perfis, espaçados a, no máximo, 60 cm. Telhado a, no máximo, 80 cm. Pisos e lajes secas a, no máximo, 40 cm.
18,3*	1,20 x 2,40	33,70	Pisos e lajes secas com perfis espaçados a, no máximo, 60 cm.

*O LP OSB Home com espessura de 18,3 mm possui opção de bordas com encaixe macho-fêmea para aplicação em lajes.

Fonte: Adaptado de
<https://www.lpbrasil.com.br/wpcontent/uploads/2017/06/Catalogo_Tecnico_LP-OSB-APA.pdf>

Tabela 5- Espessura mínima das placas de OSB conforme a modulação e o tipo de revestimento

Tipo de revestimento	Aplicação	Espaçamento máximo entre montantes (mm)	Espessura mínima (mm)
Siding Vinílico e similares	Horizontal	400	9,00
		600	
	Vertical	400	12,00
		600	
Argamassa	Horizontal	400	12,00
		600	
	Vertical	400	12,00
		600	

Fonte: Adaptado de Crasto (2005).

O transporte das placas OSB pode ocorrer de forma manual e sua fixação se dá por meio de parafusos autobrocantes e autoatarraxantes devidamente especificados para os perfis galvanizados (GOMES, 2007).

2.4.6.2 Placas cimentícias

As placas cimentícias consistem em uma mistura de cimento Portland, fibras de celulose/sintéticas e agregados, mas, de modo geral, todas as chapas delgadas que possuem cimento em sua composição recebem a denominação de cimentícia. O intuito de incorporar as fibras é aprimorar a resistência à tração e contornar seu comportamento frágil (FONTENELLE, 2012).

As placas cimentícias também podem ser utilizadas tanto interna quanto externamente, sendo, contudo, primordialmente aplicadas em áreas molhadas ou sujeitas a intempéries, em razão de sua elevada resistência à umidade. Consistem, basicamente, em uma mistura de cimento Portland, fibras de celulose ou sintéticas e agregados (GOMES, 2007).

De acordo com a NBR 15498 (ABNT, 2016), no que diz respeito à sua aplicação, as placas de fibrocimento possuem duas classificações distintas, denominadas Classe A e Classe B. As placas que se enquadram na Classe A são aquelas indicadas para aplicações externas e estarão, portanto, expostas à ação direta do sol, da chuva, do calor e da umidade. Por sua vez, as placas da Classe B são recomendadas para aplicações tanto internas quanto externas, desde que não submetidas à ação direta das intempéries.

No que diz respeito aos requisitos de resistência à tração na flexão, as placas da Classe A possuem quatro categorias e as placas da Classe B, cinco, conforme apresenta a Tabela 6.

É importante destacar que a resistência das placas na direção de menor resistência deve ser de, no mínimo, 70% dos valores especificados pela Tabela 6, em que a Classe A é relativa à condição saturada e a Classe B à condição de equilíbrio (ABNT 15.498, 2016).

Conforme Crastro (2005), as dimensões das placas cimentícias oscilam conforme o fabricante de origem, contudo, de modo geral, possuem largura fixa de 1,20 m, comprimentos de 2,00 m, 2,40 m ou 3,00 m e espessuras iguais a 6 mm, 8 mm ou 10 mm, segundo sua função e forma de aplicação, como aponta a Tabela 7.

Tabela 6- Requisitos de resistência à tração na flexão

Categoria	Placas da Classe A	Placas da Classe B
1	-	4 MPa
2	4 MPa	7 MPa
3	7 MPa	10 MPa
4	13 MPa	16 MPa
5	18 MPa	22 MPa

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15498 (2016)

Tabela 7- Características placas cimentícias Brasilit

Espessura (mm)	Dimensão nominal (m)	Dimensão real(m)	Peso da Placa (kg)	Aplicações ideais
6,00	1,20 x 2,00	1,195 x 1,995**	24,00	Divisórias leves, forros e dutos de ar-condicionado.
	1,20 x 2,40	1,195 x 2,395**	29,40	
	1,20 x 3,00	1,195 x 2,995**	36,70	
8,00*	1,20 x 2,00	1,195 x 1,995**	32,60	Paredes internas em áreas secas e úmidas, revestimentos de paredes comuns ou em subsolos. Utilizadas para áreas secas e úmidas, internas e externas. Ideais no fechamento externo em Sistema Steel ou Wood Framing e isolamentos termoacústicos.
	1,20 x 2,40	1,195 x 2,395**	39,20	
	1,20 x 3,00	1,195 x 2,995**	49,00	
10,00*	1,20 x 2,00	1,195 x 1,995**	40,80	Para uso interno na compatibilização com o Drywall ou em fechamentos internos ou externos que necessitem de maior espessura por questões estéticas ou físicas específicas.
	1,20 x 2,40	1,195 x 2,395**	49,00	
	1,20 x 3,00	1,195 x 2,995**	61,20	
12,00*	1,20 x 2,40	1,195 x 2,395	58,80	
	1,20 x 3,00	1,195 x 2,995	73,50	

* Placas disponíveis com bordas longitudinais rebaixadas para junta invisível.

**Poderá variar +/- 1 mm.

***Todas as espessuras disponíveis poderão ter variação de +/- 10%.

Fonte: Adaptado de <https://www.brasilit.com.br/produtos/placa-cimenticia>

2.4.6.3 Gesso acartonado (Drywall)

No sistema LSF, as chapas de gesso acartonado são utilizadas como fechamento interno e na face interna dos painéis externos da edificação (GOMES, 2007). De acordo com Crastro (2005), as dimensões nominais e as tolerâncias das chapas de gesso acartonado são especificadas por meio da NBR 14715-1 (ABNT, 2010), mas,

de maneira geral, são vendidas com largura de 1,20 m, comprimentos que variam de 1,80 a 3,60 m, nas espessuras de 9,5 mm, 12,50 mm e 15,00 mm.

A NBR 14715-1 (ABNT, 2010) apresenta três tipos distintos de chapas em gesso acartonado, cada qual possuindo aplicação específica, como apresenta a Tabela 8. Além disso, cada placa possui coloração específica, como ilustra a Figura 37, e dois tipos de borda, como ilustra a Figura 38.

Tabela 8- Tipos de chapa em gesso acartonado

Tipo de chapa	Código	Aplicação
Standard	ST	Paredes, revestimentos e forros em áreas secas ^a
Resistente à umidade	RU	Paredes, revestimentos e forros em áreas sujeitas intermitentemente à umidade.
Resistente ao fogo	RF	Paredes, revestimentos e forros em áreas secas, com chapas de características especiais de resistência ao fogo.

^a Em caso de forros, a chapa Standard pode ser utilizada em áreas úmidas, desde que previsto em projeto.

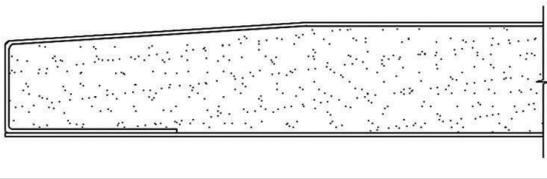
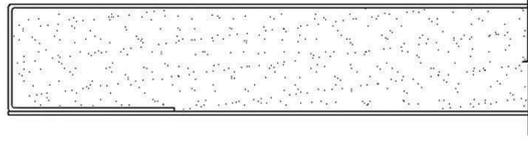
Fonte: ABNT NBR 14715-1 (2010)

Figura 37 - Coloração chapas de gesso acartonado



Fonte: Campos (2014)

Figura 38 - Tipos de bordas chapas em gesso acartonado

Tipo de borda	Código	Desenho
Borda rebaixada	BR	
Borda quadrada	BQ	

Fonte: ABNT NBR 14715-1 (2010)

A NBR 14715-1 (ABNT, 2010) apresenta, ainda, as tolerâncias geométricas das chapas de gesso acartonado e os limites para as características físicas e mecânicas, como apontam a Tabela 9 e a Tabela 10.

Tabela 9- Tolerâncias das características geométricas das chapas de gesso

Característica geométrica		Tolerância	Limite
Espessura	9,5 mm	-	-
	12,5 mm	-	-
	15,0 mm	± 0,5 mm	-
Largura		+ 0 / - 4 mm	Máximo de 1200 mm
Comprimento		+ 0 / - 5 mm	Máximo de 3600 mm
Esquadro		≤ 2,5 mm	
Rebaixo	Largura	Mínimo	40 mm
		Máximo	80 mm
	Profundidade	Mínimo	0,6 mm
		Máximo	2,5 mm

^a A borda rebaixada deve estar situada na face da frente da chapa, e sua largura e profundidade devem ser medidas de acordo com a ABNT NBR 14715-2.

Fonte: ABNT NBR 14715-1 (2010)

Tabela 10- Limites para as características físicas e mecânicas das chapas de gesso para drywall

Características		Limites		
		Espessura da chapa (mm)		
		9,5	12,5	15,0
Densidade superficial de massa kg/m ²	Mínima	6,5	8,0	10,0
	Máxima	8,5	12,0	14,0
	Varição máxima em relação à média das amostras de um lote		± 0,5	
Resistência mínima à ruptura na flexão N	Longitudinal ^a	400	550	650
	Transversal ^b	160	210	250
Dureza superficial determinada pelo diâmetro máximo da moesa (mm)			20	
Absorção máxima de água para chapa resistente à umidade (RU) (%)			5	

^a Amostra com a face da frente virada para baixo. Carga aplicada na face do verso.

^b Amostra com a face da frente virada para cima. Carga aplicada na face da frente.

Fonte: ABNT NBR 14715-1 (2010)

A Tabela 11 indica as características de chapas de gesso acartonado comerciais disponíveis, atualmente, no mercado por diferentes empresas.

Tabela 11 – Características das chapas de gesso acartonado comercial

Fabricante	Tipo de Placa	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Peso por chapa (kg)	
KNAUF	ST	12,50	600	2000	10,00	
		12,50	1200	1800	18,00	
		12,50	1200	2400	24,00	
		15,00	1200	1800	24,50	
		15,00	1200	2400	32,50	
	RF	12,50		1800	20,00	
		12,50		2400	28,00	
		15,00		1800	25,00	
			15,00	1200	2400	35,00
	RU	12,50			1800 - 2000	10,00
15,00		1200		2400 - 2700	11,50	

		6,50		2400	
		9,50		2400	
		12,50		3000	
	ST	12,50		1800	
		12,50	1200	2000	-
		12,50		2400	
GYPSUM					
	RF	12,50	1200	2400	-
	RU	12,50	1200	2400	-
		6,00	1200	2000	15,00
		9,50	1200	2400	19,00 –
					25,00
					6,00 –
	ST	12,50	600		22,00
		12,50	1200	1200-3000	12,00 –
					44,00
PLACO					
	RF	12,50	1200	1200 - 3000	12,00 –
					44,00
		15,00	1200	1200 - 3000	15,00 –
					50,00
	RU	12,50	1200	1800 - 3000	18,00 –
					44,00

Fonte: Elaboração Própria

2.4.7 Isolamento térmico e acústico

No sistema construtivo em LSF, o isolamento térmico fundamenta-se no emprego de um conjunto de fechamento multicamada de modo que, internamente, o espaço compreendido entre o fechamento externo e interno seja preenchido com material isolante, em geral, lã mineral, a qual também contribui para o desempenho acústico (GOMES, 2007).

A vantagem de se empregar um sistema multicamada é elevar a resistência térmica do conjunto, uma vez que esta será a soma da resistência de cada uma das camadas e, portanto, o isolamento térmico será tão maior quanto for o número de materiais adicionados à camada de fechamento. Contudo, as propriedades termofísicas destes componentes também impactam no resultado final (GOMES, 2007).

Em países de clima temperado, diferentemente dos climas quentes e úmidos, as pontes térmicas pelos perfis podem ser acentuadas, portanto, têm sido pesquisados painéis especiais de maior capacidade de isolamento térmico, como o EIFS – Exterior

Insulation and Finish System (Isolamento Externo e Sistema de Acabamento) (CAMPOS, 2014; GOMES, 2007; OLIVEIRA, 2019).

De acordo com o posicionamento do isolamento térmico em relação ao fechamento exterior, o sistema LSF recebe uma determinada classificação, como ilustra a Figura 39 (SOARES et al., 2017).

A construção fria caracteriza-se pelo posicionamento do isolamento térmico na parte interna da parede, e fica, portanto, mais suscetível à condensação intersticial e pontes térmicas mais elevadas, caso esquadrias de aço sejam empregadas. Além disso, é necessário que o isolamento seja do tipo maleável, tais quais a lã mineral, que se ajustem entre os perfis (SANTOS, 2018; SOARES et al., 2017).

Por outro lado, quando o isolamento é formado por uma camada homogênea posicionada na parte externa da parede (ETICS), o sistema é do tipo quente, proporcionando um melhor isolamento, mas, também, as paredes têm maior espessura. E, por fim, na construção híbrida, há uma mescla dos dois tipos de isolamento (SANTOS, 2018; SOARES et al., 2017).

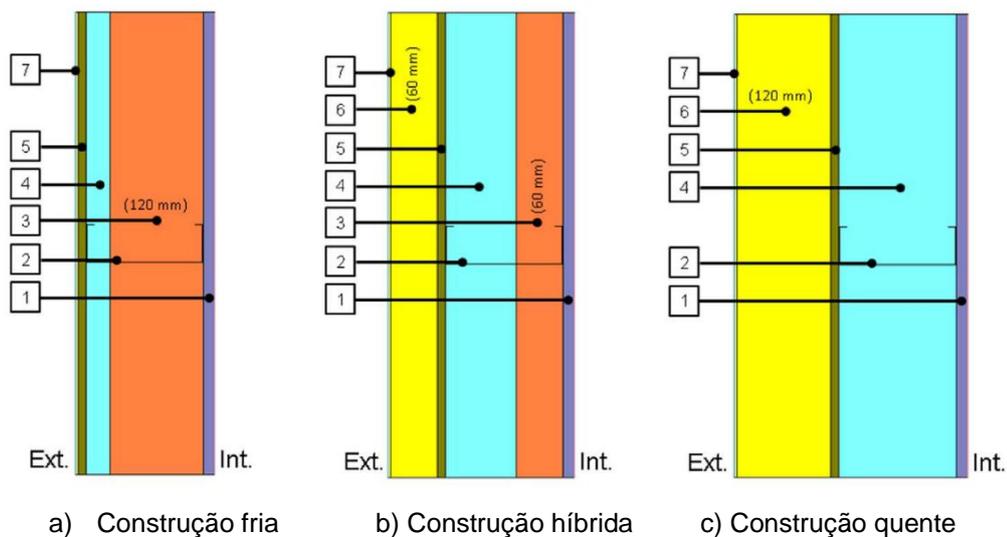
A

Figura 40 ilustra a distribuição da temperatura tanto na superfície interior quanto no interior das paredes. É possível observar a influência dos perfis de aço – material de elevada condutividade térmica – na distribuição das temperaturas.

A formação de pontes térmicas significativas e a baixa inércia térmica – habilidade do material em absorver, reter e, posteriormente, liberar, gradativamente, o calor – são características inatas ao próprio sistema, sendo que a inércia térmica está ligada à condutividade térmica, à capacidade térmica e à densidade do material (SANTOS, 2018).

Diferentes formas de mitigar essa transferência acentuada de calor, que ocorre sempre no caminho de menor resistência térmica, sendo as principais: assegurar uma camada contínua de isolamento, impedir quebras do isolamento nas uniões e projetar edifícios de geometria simplificada (SANTOS, 2018).

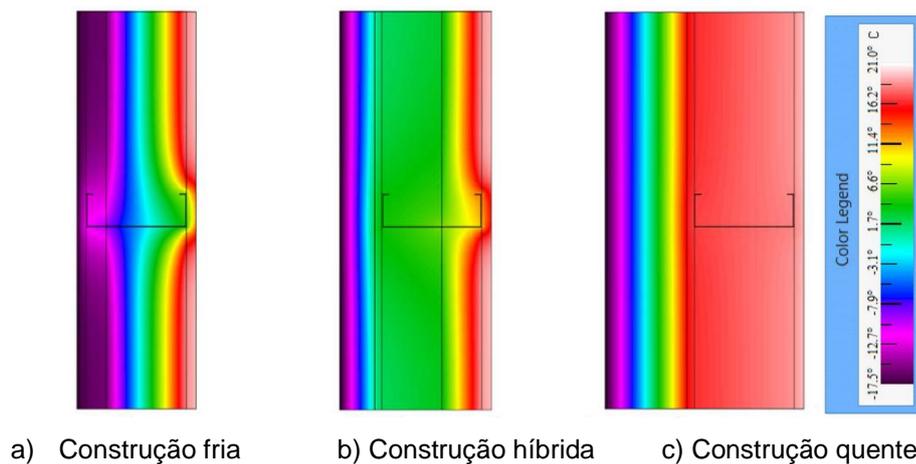
Figura 39 - Classificação das construções LSF dependendo da posição dos materiais de isolamento



(1- Gesso; 2- LSF; 3- Lã mineral; 4- Camada de ar; 5- OSB; 6- EPS; 7- ETICS: Isolamento Externo e Sistema de Acabamento)

Fonte: Soares *et al.* (2017)

Figura 40 - Distribuição de temperatura dentro das paredes LSF



Fonte: Soares *et al.* (2017)

Para Soares *et al.* (2017), a melhor forma de aprimorar a resistência térmica dos elementos em LSF é o emprego de materiais de baixa condutividade térmica nas camadas. Além disso, os autores pontuam que o desenvolvimento de novos materiais isolantes mais eficientes, como mantas aero gel e painéis de isolamento a vácuo, além de proporcionar melhor desempenho térmico às paredes também possibilita a redução da espessura da camada isolante.

Ademais, tratando-se do desempenho acústico, além da contribuição da lâmina mineral, atualmente, também existem disponíveis no mercado pinos específicos (com ranhura ou canais resilientes, por exemplo) que proporcionam uma conexão mais elástica (SOARES et al., 2017).

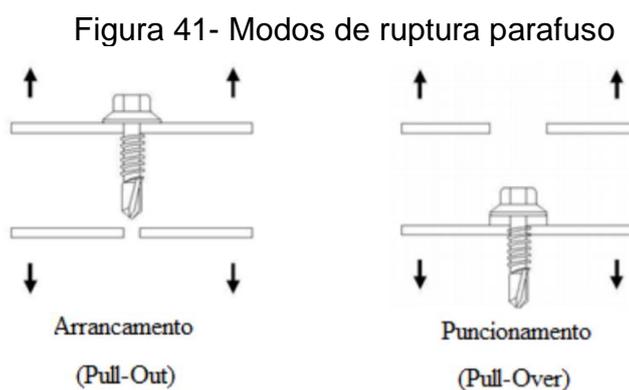
2.4.8 Ligações

No Brasil, comumente, emprega-se, nas ligações do sistema LSF, os parafusos autobrocantes e autoatarraxantes, principalmente por facilitarem a execução. São constituídos de aço carbono com camada protetora zinco-eletrolítica, que o protege da corrosão. São responsáveis tanto pela fixação entre os perfis metálicos quanto de outros componentes que compõem o sistema, como as placas de fechamento e, também, atuam na transmissão de esforços entre os perfis e os componentes de fechamento (CRASTRO, 2005; REZENDE, 2019).

Os parafusos estão disponíveis no mercado em diferentes dimensões, cada qual para uma determinada finalidade no processo construtivo. Na fixação de perfis metálicos/placa de fechamento, o parafuso deverá fixar todas as camadas do sistema de fechamento e ultrapassar os perfis em, no mínimo, 10 mm (CRASTRO, 2005; REZENDE, 2019).

Especificamente, os autoatarraxantes possuem dois tipos distintos de pontas (broca e agulha) e três modelos de cabeça (plana/lentilha e sextavada para ligação aço-aço, e trombeta para as placadas de fechamento), cada qual mais adequado para um determinado material (CRASTRO, 2005; REZENDE, 2019).

Quando os parafusos são submetidos à tração, podem ocorrer duas formas de ruptura, isto é, o parafuso juntamente com a placa de fechamento pode ser arrancado do perfil metálico (Pull-out) ou pode haver o puncionamento da placa (Pull-over), como ilustra a Figura 41.



Fonte: Rezende (2019)

2.5 ALVENARIA DE VEDAÇÃO EM BLOCOS DE CONCRETO

O emprego do processo construtivo em alvenaria é intimamente ligado à história de estruturação das cidades brasileiras, sendo, até os dias de hoje, o método de vedação mais utilizado na construção de edifícios em combinação com estruturas em concreto armado (SILVA, 2003).

A alvenaria de vedação consiste na união de componentes (tijolos ou blocos) por juntas de argamassa a fim de produzir um elemento rígido e coeso, cuja função é delimitar os ambientes, proteger a edificação de agentes externos e garantir o conforto ambiental, isto é, projetada para resistir unicamente a cargas provenientes de seu peso-próprio (SILVA, 2003).

Embora comumente sejam utilizados os tijolos e blocos cerâmicos na confecção das alvenarias de vedação, existe uma gama de materiais disponíveis, como: bloco de concreto, bloco de gesso, bloco de concreto celular autoclavado, tijolo de solo-cimento (GIRARDI JÚNIOR, 2019; GIORGI, 2016).

Ademais, em face das atuais necessidades de aprimoração tecnológica dos materiais frente a aspectos sustentáveis, diversos pesquisadores têm utilizado diferentes componentes, como blocos de concreto com RCD (CHIELE, 2022; FERREIRA, 2016) e outros diversos tipos de blocos de concreto com materiais residuais (MELO; FILHO, 2009; MENG; LING; MO, 2018), dentre eles, a casca de arroz (RIPOLI FILHO; RIPOLI; BAESSO, 2022).

Embora o uso de blocos de concreto nas vedações brasileiras remonta a década de 1940, a tecnologia encontra, até os dias atuais, dificuldade de disseminação para algumas regiões do país, tendo como principal razão a falta de conhecimento técnico acerca do método, desde questões ligadas à fabricação até noções das possibilidades de emprego (LORDSLEEM JÚNIOR et al., 2008).

Em sua configuração original, os blocos de concreto são constituídos, fundamentalmente, por cimento, agregados, água e aditivos, sendo comercializados em diferentes dimensões, de modo geral, nas modulações de 7,5 cm, 10,0 cm, 15,0 cm e 20,0 cm (GIRARDI JÚNIOR, 2019).

Aqueles destinados unicamente à vedação, isto é, sem função estrutural, devem apresentar resistência característica à compressão maior ou igual a 3,0 MPa. Comumente, a densidade média desse tipo de material fica compreendida na faixa dos 1800 kg/m³ (JÚNIOR, 2019).

2.5.1 Blocos de concreto leve

Com relação ao concreto leve, o uso mais recorrente é dos blocos de concreto celular autoclavado, o qual é ilustrado na Figura 42 (GIRARDI JÚNIOR, 2019). Varisco (2010) aponta como principais qualidades deste tipo de produto: a uniformidade dimensional, a planicidade, a massa específica, a facilidade de realizar-se cortes e talhos, e a resistência.

Figura 42 - Blocos de concreto celular autoclavado (BCCA)



Fonte: (GIRARDI JÚNIOR, 2019)

De modo geral, os blocos são comercializados nas espessuras de 7,5 cm, 10 cm, 12,5 cm, 15 cm, 17,5 cm e 20 cm, e o comprimento e a altura em duas modalidades, isto é, respectivamente, 60 cm e 30 cm ou de 30 cm e 25 cm. Porém, sob encomenda, podem assumir dimensões desejadas (VARISCO, 2010). A NBR 13438 (ABNT, 2013) traz uma classificação para esse tipo de material quanto à resistência à compressão e densidade de massa aparente seca, como ilustra a Figura 43.

Figura 43 – Classes de BCCA

Classe	Resistência à compressão (seca)		Densidade aparente seca
	Valor médio mínimo MPa ^a	Menor valor isolado MPa ^a	Média kg/m ³
C 12	1,2	1,0	< 450
C 15	1,5	1,2	< 500
C 25	2,5	2,0	< 550
C 35	3,5	3,0	< 600
C 45	4,5	4,0	< 650

^a Considerar: 1 MPa = 1 N/mm² = 10 kgf/cm².

Fonte: NBR 13438 (ABNT, 2013)

Em razão do baixo peso específico desses materiais, suas dimensões são, em geral, maiores que os tradicionais blocos cerâmicos e concreto convencional, o que acarreta reduções no tempo de execução, maior ergonomia aos profissionais, além de reduzir a carga nos pavimentos e, conseqüentemente, para as fundações da edificação (GIRARDI JÚNIOR, 2019).

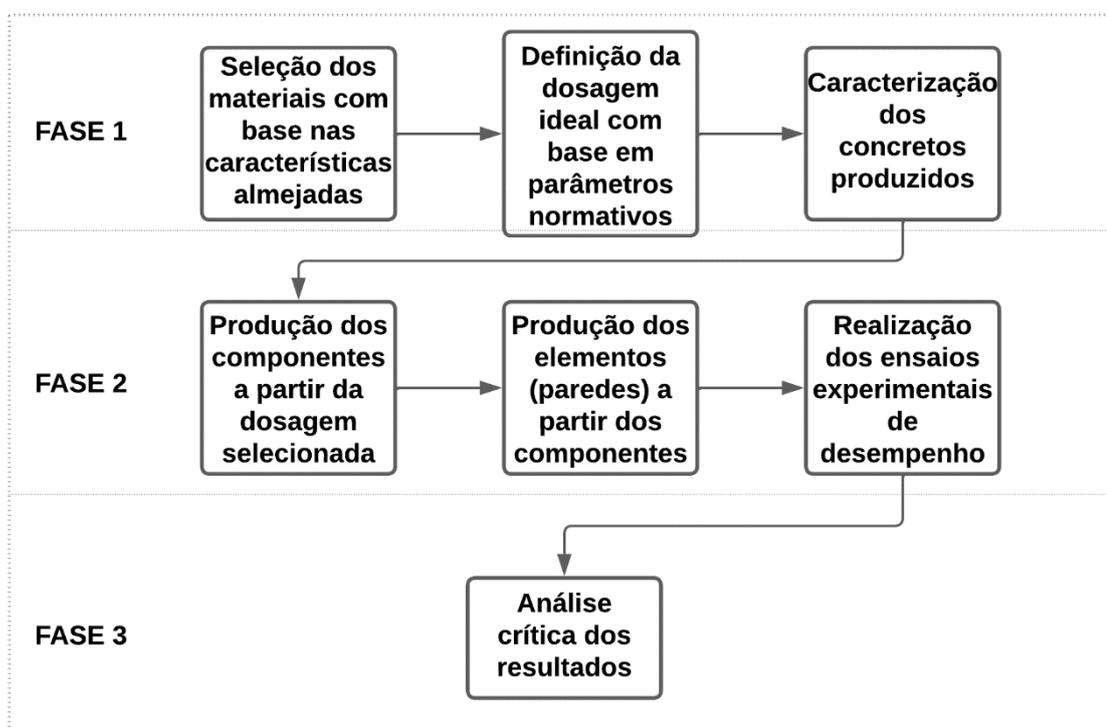
3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O capítulo de materiais e métodos experimentais inicia-se pela descrição das características dos materiais e equipamentos utilizados para a produção dos componentes, passa pelos estudos de dosagem, segue para a descrição dos elementos e se encerra por meio da apresentação dos ensaios experimentais de desempenho (EED) realizados.

3.1 CRONOLOGIA DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA

A Figura 44 ilustra as etapas que compuseram o desenvolvimento da pesquisa em ordem cronológica de realização. Cada uma destas etapas é pormenorizada nos tópicos a seguir.

Figura 44 - Sequência de realização da pesquisa



Fonte: Elaboração própria.

3.2 PRODUÇÃO DOS COMPONENTES

O presente tópico apresenta os materiais, os equipamentos e as técnicas que foram adotadas para a produção e caracterização dos concretos, bem como, para a fabricação dos componentes em si.

3.2.1 Materiais e equipamentos

Posto que a finalidade dos componentes é serem empregados como placas ou blocos de fechamento pré-moldados, optou-se por utilizar o cimento Portland CP V ARI, o qual possibilita um alcance mais rápido de resistência mecânica e, conseqüentemente, uma desforma antecipada. Ademais, é considerado um cimento mais “puro”, isto é, em conformidade com a NBR 16.697 (ABNT, 2018), os teores de material carbonático em sua composição devem permanecer entre 0% e 10%, que são valores baixos, o que tende a contribuir para uma menor retração, aspecto primordial tratando-se de concreto celular espumoso (NAMBIAR; RAMAMURTHY, 2009).

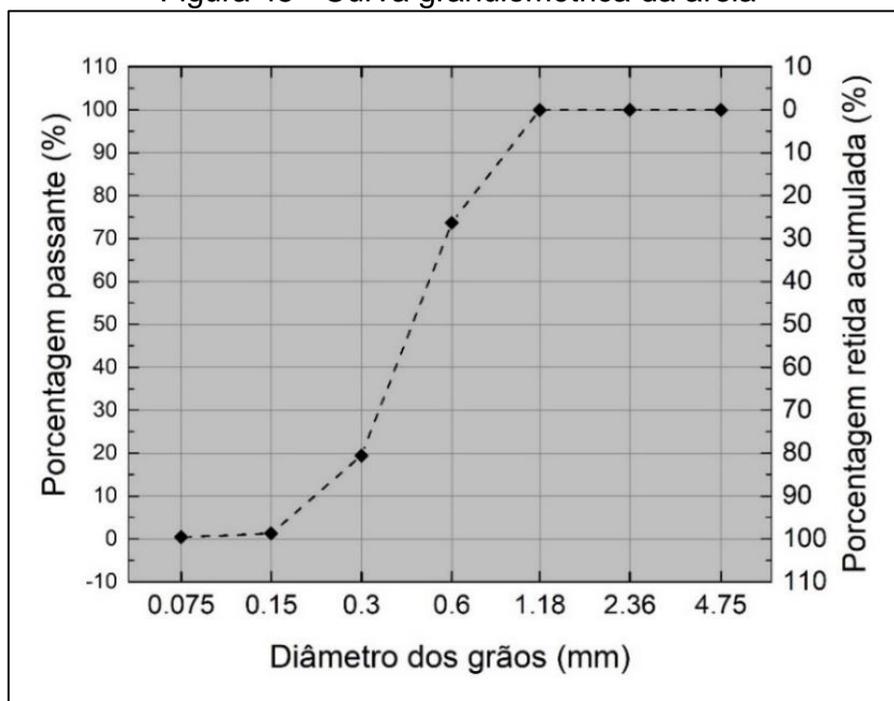
No capítulo introdutório e na revisão da literatura, apontou-se a necessidade de buscar substitutos ao principal insumo do concreto, que é o cimento, uma vez que seu processo de fabricação contribui significativamente com o lançamento dos gases de efeito estufa. No caso do concreto celular, em que o consumo de cimento pode ser ainda mais elevado que o concreto tradicional, tais substituições são essenciais.

Nesse sentido, além da incorporação da casca de arroz, pelo viés sustentável, optou-se, também, pela seleção de uma dosagem que contemplasse o uso de areia mineral, que, apesar de ser um recurso finito, contribui para a redução de custos e, conseqüentemente, aumenta a viabilidade de introdução do produto no mercado (posto que o cimento possui alto valor agregado) e ainda auxilia na minimização da retração por secagem, sendo, inclusive, mais eficiente nesse aspecto que as cinzas volantes (NAMBIAR; RAMAMURTHY, 2002).

No presente trabalho, optou-se pela caracterização apenas dos materiais tomados como não comerciais, no caso, a areia e a casca de arroz. A Figura 45 ilustra a curva granulométrica da areia natural selecionada. Nota-se que a distribuição dos grãos é uniforme e que não ficou material retido a partir da peneira com abertura de 1,18 mm, sendo, portanto, classificada como uma areia fina.

Essas características são apontadas por Nambiar e Ramamurthy (2006) como favoráveis para uma maior proporção resistência/densidade e por Lim *et al.* (2014) como benéfica para alcançar maiores resistências à compressão e à flexão, e, também, maior ductilidade.

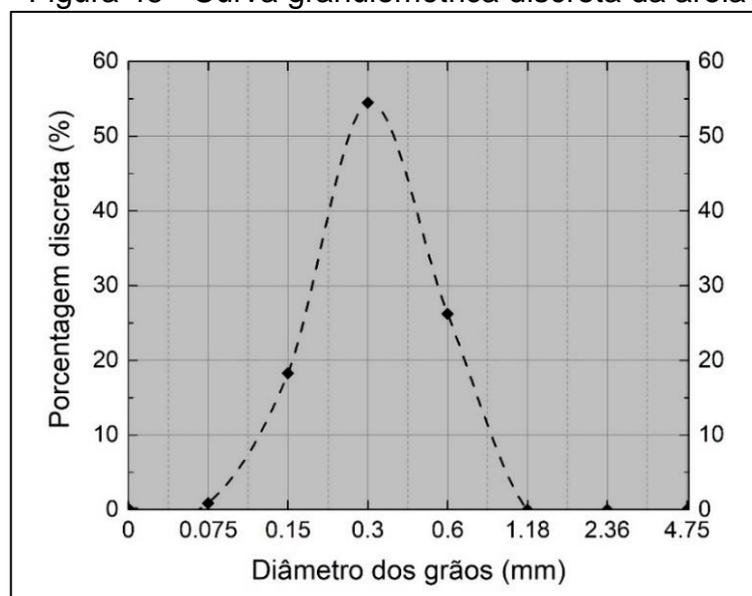
Figura 45 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Elaboração Própria

Para enriquecer a análise, traçou-se a curva granulométrica discreta da areia (ver Figura 46). Observa-se que 98,98% do material se encontra retido entre as peneiras com abertura de 0,15 mm e 0,60 mm, e 54,50% concentram-se na peneira com abertura de 0,30 mm, reafirmando a classificação quanto à distribuição uniforme.

Figura 46 - Curva granulométrica discreta da areia



Fonte: Elaboração Própria

Ademais, foram aferidas a massa unitária em conformidade com a NBR NM 45 (ABNT, 2006) e a massa específica seca em estufa por 24 horas a 105°C, a massa específica saturada superfície seca e a massa específica segundo as recomendações da NBR NM 52 (ABNT, 2009). Os resultados são expressos pela Tabela 12.

Tabela 12- Caracterização areia

Propriedade	Resultado (g/cm ³)
Massa unitária	1,74
Massa específica seca em estufa (105°C/24h)	2,54
Massa específica saturada superfície seca	2,57
Massa específica	2,62

Fonte: Elaboração própria

Por sua vez, a casca de arroz (CA) é proveniente da cidade de Eldorado do Sul – RS, e foi utilizada *in natura* (ver Figura 47), sem nenhum tipo de tratamento físico ou químico, tendo sido armazenada até o uso em ambiente seco, fechado e protegido das intempéries, sendo, portanto, utilizada totalmente seca uma vez que sua coleta foi feita diretamente na máquina que realiza a separação com o grão no ambiente industrial. Aravind; Sathyan; Mini (2020) apontam que tanto a densidade quanto a condutividade térmica da casca “não moída” são menores que da casca moída, o que, juntamente com a maior facilidade de implementação, justifica seu emprego deste modo.

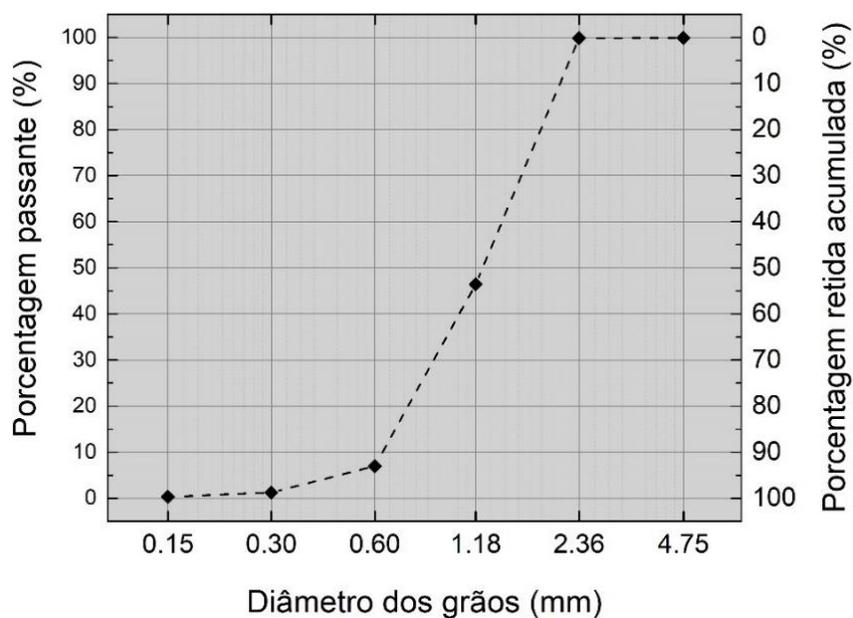
Figura 47- Casca de Arroz *in natura*



Fonte: Elaboração própria

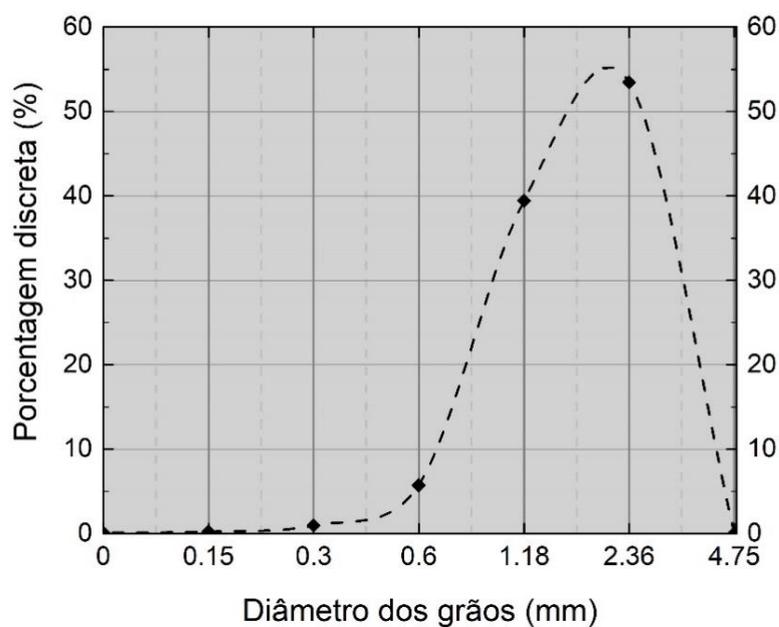
A Figura 48 e a Figura 49 ilustram, respectivamente, a curva granulométrica e a curva granulométrica discreta da CA. Por meio da análise destas curvas, notam-se uma distribuição uniforme do material.

Figura 48 - Curva granulométrica da CA



Fonte: Elaboração Própria

Figura 49- Curva granulométrica discreta da CA



Fonte: Elaboração Própria

Na curva discreta (Figura 49), é possível observar que 92,87% da casca ficou retida nas peneiras com abertura de malha de 1,18 mm (39,43%) e 2,36 mm (53,44%).

É importante ressaltar que a casca possui formato alongado, isto é, duas de suas dimensões são menores que a terceira. Nesse sentido, é válido pontuar que o percentual retido na peneira 1,18 mm passou na peneira de abertura 2,36 mm por meio das menores dimensões da CA, por outro lado, o percentual retido na peneira de abertura 2,36 mm não foi passante em decorrência da restrição da maior dimensão da CA.

A Tabela 13 apresenta a composição química da casca de arroz *in natura* empregada no presente estudo determinada por meio da técnica de fluorescência de raios-x. Observa-se que, em razão das limitações do ensaio, isto é, por não identificar material orgânico (abundantes no caso de fibras vegetais), o composto que se apresentou em maior quantidade foi o dióxido de silício. Os demais óxidos identificados apresentaram-se em quantidades muito pequenas, podendo estar relacionados a pequenas impurezas presentes.

Tabela 13 – Composição química da casca de arroz *in natura*

Composição química	Peso
SiO ₂	12,386%
Al ₂ O ₃	0,000%
Fe ₂ O ₃	0,010%
CaO	0,157%
MgO	0,022%
SO ₃	0,082%
Na ₂ O	0,018%
K ₂ O	0,003%
P ₂ O ₅	0,056%
TiO ₂	0,003%
Cr ₂ O ₃	0,000%
Mn ₂ O ₃	0,034%
ZnO	0,002%
SrO	0,000%

Fonte: Elaboração própria

No que tange aos aditivos, foram utilizados dois tipos: um incorporador de ar, responsável, como o próprio termo sugere, pela incorporação de ar na mistura e um

plastificante para garantir a consistência adequada das misturas sem que fosse necessário alterar a relação água/cimento (a/c).

O aditivo incorporador de ar utilizado é biodegradável, neutro e possui densidade de 1,026g/mL (considerando uma temperatura de 25°C), pH de 7,34 e ausência de odor. Por sua vez, o aditivo plastificante é composto por uma mistura equilibrada de éteres orgânicos e densidade compreendida entre 1,05-1,10 g/cm³. Previamente à execução das misturas, ambos permaneceram em temperatura ambiente, em local seco e ventilado, protegidos das intempéries.

O concreto celular espumoso proposto no presente trabalho utiliza para sua fabricação espuma do tipo pré-formada, isto é, produzida previamente e separadamente da mistura global. Portanto, para a produção da espuma pré-formada a partir do aditivo incorporador de ar, utilizou-se um gerador de espuma com alimentação de 220V, tensão de comando de 24VCC e vazão de 50L/min. Foi empregada uma pressão de trabalho de 2,50bar e o compressor de ar acoplado ao equipamento trabalhou a uma pressão de 120psi.

A proporção de aditivo selecionada foi de 1 L/50L d'água, o que gera uma espuma com densidade em torno de 50g/L (podendo sofrer pequenas oscilações em razão das variações ambientais, mais especificamente, a temperatura e a umidade relativa do ar, no momento de sua fabricação). A Figura 50 ilustra a aparência final da espuma.

Figura 50- Espuma pré-formada



Fonte: Elaboração Própria

Os materiais foram adicionados na betoneira seguindo a seguinte ordem: cimento, areia, água da mistura, espuma pré-formada e por fim a casca de arroz. É válido observar que os materiais que antecedem a espuma pré-formada foram adicionados, misturados com o auxílio do próprio equipamento e somente após a obtenção de uma mistura uniforme a espuma e a casca foram então adicionadas para obtenção do produto final. O processo como um todo possuía duração em torno de 6 minutos.

3.2.2 Dosagem e Caracterização dos Concretos

Previamente à moldagem dos componentes, fez-se necessário um estudo prévio para a definição da dosagem “ótima”, isto é, aquela que conferisse as melhores propriedades ao produto com base no uso estipulado e dentro das possibilidades dos materiais selecionados. Nesse sentido, por tratar-se de componentes de vedação, foram considerados alguns aspectos do compósito, como: densidade, fluidez, resistência mecânica (compressão axial e tração na flexão) e aparência estética final.

Conforme apontado no capítulo de revisão, não existe uma única forma consagrada para dosar concreto celular, tendo sido, portanto, aplicado neste caso em específico o método de “tentativa e erro” (método mais usual) a partir do traço definido por Pachla (2017), que continha, basicamente, cimento, água e espuma pré-formada (ver Tabela 14).

Tabela 14 - Traço utilizado como parâmetro inicial

TRAÇO	Cimento (kg)	Casca (L)	Água na Mistura (L)	Espuma (L)
Pachla (2017)	1	-	0,40	2,8

Fonte: Pachla (2017)

O material desenvolvido por Pachla (2017), nas proporções mostradas, apresentou massa específica no estado fresco (MEF) de 820,40 kg/m³, massa específica no estado endurecido (MEE) de 735,51 kg/m³, resistência à compressão axial média de 3,16 MPa e resistência à tração na flexão de 1,06 MPa.

Contudo, o traço desenvolvido por Pachla (2017) serviu apenas de ponto de partida, e não foi reproduzido na íntegra, isto é, foram realizadas algumas alterações. O aditivo incorporador de ar aqui selecionado foi diferente e, portanto, a proporção utilizada para a produção da espuma pré-formada modificou-se passando de 1 litro de

aditivo para 40 litros de água para 1 litro de aditivo para 50 litros de água, em ambos os casos, seguindo as recomendações do fabricante. Além disso, optou-se pela introdução de aditivo plastificante, uma vez que o novo aditivo incorporador de ar não contribui para o aprimoramento da fluidez. Houve, também, uma alteração no tipo de cimento utilizado, passando de CP V – ARI RS para CP V – ARI.

Para alcançar a dosagem ótima, diferentes percentuais de aditivo plastificante foram testados, porém teores acima de 0,5% tornavam a espuma instável, o que é indesejável e contribui para um concreto de baixa qualidade. Também foi avaliada a possibilidade de utilização de um aditivo superplastificante, porém não houve compatibilidade com a espuma pré-formada logo no primeiro teste. Existem outros relatos na literatura desse tipo de situação (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015). Desse modo, a reprodução do traço de Pachla (2017) com tais alterações pode ser visualizada na Tabela 15.

Tabela 15- Traço referência concreto celular espumoso

Traço	Cimento (kg)	Casca (L)	Água na Mistura (L)	Espuma (L)	Plastificante (kg)
Referência	1	-	0,40	2,8	0,005

Fonte: Elaboração própria

Uma vez que não existe norma técnica nacional que trata exclusivamente de painéis/placas pré-moldadas ou blocos de concreto celular espumoso para fins de vedação, apenas para blocos de concreto celular autoclavado (ABNT NBR 13.438:2013) e paredes moldadas no local (ABNT NBR 12.646:1992), buscou-se, adicionalmente, na literatura, trabalhos semelhantes desenvolvidos por outros pesquisadores e, também normas, técnicas internacionais a fim de ter um ponto de partida para balizar a dosagem a partir do parâmetro de resistência mecânica, uma vez que, até então, o balizamento havia sido a densidade.

A NBR 12.646 (ABNT, 1992) – Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local – indica que os lotes ensaiados devem apresentar resistência à compressão de, no mínimo, 2,50 MPa aos 28 dias de cura, sendo os ensaios realizados em corpos de prova cilíndricos com altura igual ao dobro do diâmetro e considerando uma densidade compreendida entre 1300 kg/m³ e 1900 kg/m³. Por sua vez, o relatório n° 523.2R-96 do American Concrete Institute (ACI, 1996), que é um guia para pisos, telhados e paredes pré-moldadas de concreto celular, recomenda que a resistência à

compressão mínima seja de 2,07 MPa (MEE de 800 kg/m³ e amostras cilíndricas com 7,5 cm de diâmetro e 15 cm de comprimento).

Aravind, Sathyan, Mini (2020) incorporaram três diferentes percentuais de casca de arroz (5%, 10% e 15%) em painéis de concreto celular espumoso com MEE de 1100 kg/m³ e encontraram, respectivamente, resistências à compressão de 3,00 MPa, 2,90 MPa e 2,84 MPa, e resistência à tração na flexão de 1,62 MPa, 1,51 MPa e 1,46 MPa. É importante pontuar que os ensaios de compressão conduzidos pelos autores foram realizados em cubos com 5 cm de aresta e os de tração na flexão em painéis de 45 cm x 30 cm x 1,8 cm e que a massa específica encontrada é bem superior à do presente trabalho.

Todavia, optou-se por seguir os parâmetros apresentados pela NBR 13.438 (ABNT, 2013). Conforme mostrado na Figura 43, a normativa apresenta diversas classes, sendo a classe determinada como alvo a C15, isto é, com valor médio mínimo de resistência à compressão igual a 1,5 MPa, valor isolado de 1,2 MPa e massa específica inferior a 500 kg/m³. Porém, com a ciência de que as condições de cura em autoclave são distintas daquelas quando a cura se dá em temperatura ambiente, como foi o caso em questão.

Dessa forma, a partir dos valores de resistência mecânica identificados, buscou-se desenvolver um traço com a maior quantidade possível de incorporação de CA e areia que se aproximasse de tais valores, e que, simultaneamente, fornecesse a menor densidade possível – de modo a facilitar o transporte e a instalação dos componentes, tanto para as placas quanto para os blocos.

Para isso, foram testados diferentes valores de adição de CA (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) em relação ao volume de espuma apresentado na Tabela 15, avaliando, em cada um dos testes, as respectivas massas específicas, a consistência e a resistência mecânica (compressão axial e tração na flexão). As formulações empregadas para esse processo de determinação do teor ideal de casca de arroz estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16- Determinação do teor ideal de casca

Traço	Cimento (kg)	Casca (L)	Água na Mistura (L)	Espuma (L)	Plastificante (kg)
Referência	1	-	0,40	2,8	0,005
10%CA	1	0,28	0,40	2,8	0,005
20%CA	1	0,56	0,40	2,8	0,005
30%CA	1	0,84	0,40	2,8	0,005
40%CA	1	1,12	0,40	2,8	0,005
50%CA	1	1,40	0,40	2,8	0,005

Fonte: Elaboração própria

Para minimizar o custo de produção dos produtos e aumentar a probabilidade de torná-lo economicamente viável para ser introduzido no mercado, bem como, para mitigar a retração por secagem, também foi adicionada areia natural fina à mistura. O intuito era melhorar a capacidade estrutural da matriz e reduzir o consumo de cimento.

Nesse sentido, após a definição do percentual ideal de casca, que foi de 20%, realizou-se a substituição dos diferentes percentuais de areia (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) em relação ao cimento.

Como pode ser constatado pela Tabela 17, a redução do consumo de cimento implicou na redução da quantidade de água inserida a partir do percentual de 30% de substituição de areia, todavia, a relação água/aglomerante foi mantida em 0,40. Optou-se por não alterar a quantidade de água até o teor de 20% em razão da mistura apresentar espalhamento e acabamento satisfatórios, contudo, a partir do teor de 30%, a mistura ficou demasiadamente fluida, gerando problemas na moldagem e desmoldagem (mesmo após transcorridas as 48 horas).

Tabela 17- Determinação do teor ideal de areia

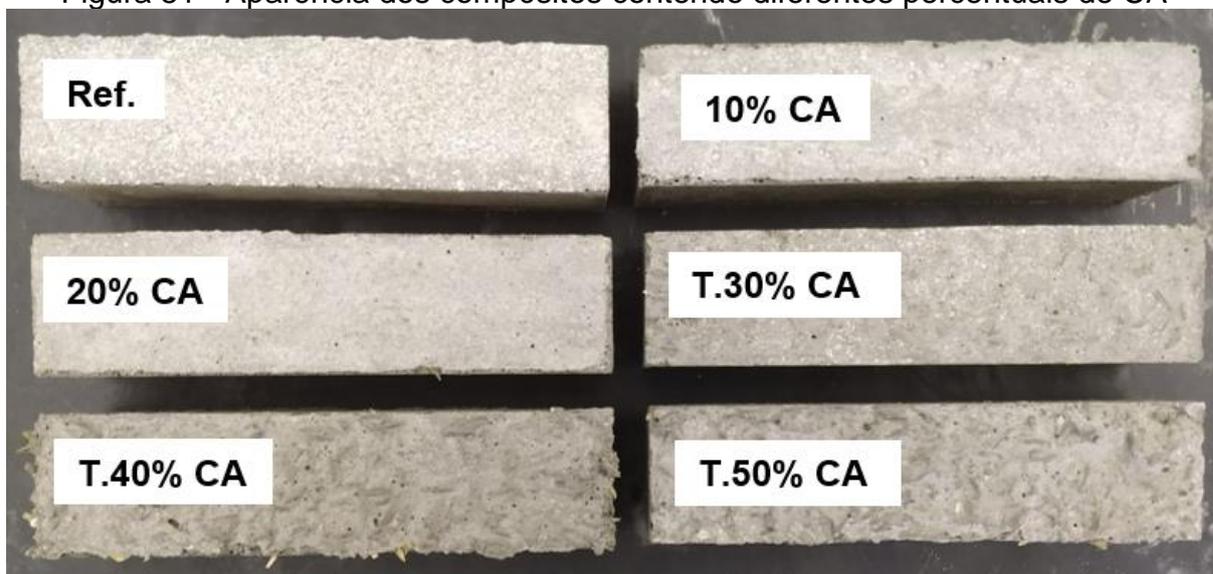
Traço	Cimento (kg)	Casca (L)	Areia (kg)	Água na Mistura (L)	Espuma (L)	Plastificante (kg)
Referência	1	-	-	0,40	2,8	0,005
20%CA-10%AR	0,90	0,56	0,10	0,40	2,8	0,005
20%CA-20%AR	0,80	0,56	0,20	0,40	2,8	0,005
20%CA-30%AR	0,70	0,56	0,30	0,28	2,8	0,005
20%CA-40%AR	0,60	0,56	0,40	0,24	2,8	0,005
20%CA-50%AR	0,50	0,56	0,50	0,20	2,8	0,005

Fonte: Elaboração própria

Nesse sentido, os valores de 20% de CA e 10% de areia foram os que apresentaram os melhores conjuntos de resultados, isto é, menores valores de massa

específica, tanto no estado fresco (MEF) quanto no estado endurecido (MEE), mantendo valores aceitáveis de resistência mecânica, consistência e aparência estética final (ver Figura 51), isto é, sem a demarcação da casca na superfície, sendo, portanto, selecionados. A dosagem do concreto celular com incorporação de CA e areia é apresentada pela Tabela 18.

Figura 51 - Aparência dos compósitos contendo diferentes percentuais de CA



Fonte: Elaboração própria

Tabela 18 - Dosagem concreto celular com incorporação de CA e areia

Traço	Cimento (kg)	Casca (L)	Areia (kg)	Água na Mistura (L)	Espuma (L)	Plastificante (kg)
20%CA-10%AR	0,90	0,56	0,10	0,40	2,80	0,0050
Otimizado	1,00	0,62	0,11	0,44	3,60	0,0055

Fonte: Elaboração própria

Uma vez que a resistência à compressão obtida para a formulação 20%CA-10%AR (apresentada no Capítulo 4) estava acima dos valores apresentados pela NBR 13438 (ABNT, 2013), que era de 1,5 MPa, o traço foi otimizado a fim de buscar-se uma menor massa específica (uma vez que esta está diretamente ligada a propriedades do concreto celular espumoso como isolamento térmico-acústico e, até mesmo, ergonomia dos componentes).

Esse processo de redução da massa específica se deu por meio do aumento do volume de espuma, mantendo-se a proporção de 20% de casca de arroz sobre este

volume. Todavia, uma vez que os dois materiais tinham sua quantidade atrelada na mistura ao elevar o volume de espuma, o volume de casca mostrou-se demasiadamente elevado para o consumo de cimento proposto, gerando resistências mecânicas muito baixas sem grandes alterações na massa específica.

Portanto, a última tentativa abordada foi o aumento do volume de espuma e a manutenção do volume de casca, resultando no traço denominado “otimizado”, que foi, por fim, utilizado no desenvolvimento do presente estudo. A Figura 52 ilustra o processo de dosagem de maneira simplificada.

Figura 52 – Simplificação do processo de dosagem



Fonte: Elaboração própria

A aferição da MEF seguiu as recomendações da NBR 12.644 (ABNT, 2014) e consistiu, basicamente, em obter a relação entre a massa de concreto e o volume do recipiente empregado, como aponta a Equação 1.

$$MEF = \frac{m_c}{V_{rec}} * 1000 \quad (1)$$

Em que:

- MEF: massa específica no estado fresco (kg/m^3);
- m_c : massa do concreto no estado fresco (kg);
- V_{rec} : volume do recipiente utilizado para aferição do volume (L).

Além disso, por ser um parâmetro correlacionado às demais propriedades, ao longo de todo o trabalho, a MEF foi aferida após cada uma das concretagens a fim de assegurar a padronização dos materiais produzidos.

No que tange a avaliação do índice de fluidez do concreto celular, em geral, emprega-se o teste de Cone de Marsh Modificado, todavia, com a incorporação de casca de arroz ao material, sua aplicação fica restrita em decorrência da abertura do cone ser muito pequena. Nesse sentido, optou-se por realizar o teste de Cone de Marsh somente para o traço referência (para fins de classificação quanto à necessidade de adensamento) e o ensaio de índice de consistência por meio do Mini Slump para as demais dosagens, de modo que os valores pudessem ser comparados. O ensaio de índice de consistência foi realizado em conformidade com a NBR 13.276 (ABNT, 2016), como ilustra a Figura 53.

Figura 53 – Índice de consistência com Mini Slump



Fonte: Elaboração própria

A massa específica no estado endurecido (MEE) também foi determinada de acordo com as recomendações da NBR 12.644 (ABNT, 2014a), aos 28 dias de cura. Previamente à determinação da MEE, as amostras permaneceram em estufa a 105°C, por um período de 24h, a fim de eliminar por completo qualquer umidade presente. O cálculo consistiu na aplicação da Equação 2:

$$MEE = \frac{m_c}{V_c} * 1000 \quad (2)$$

Em que:

- MEE: massa específica no estado endurecido (kg/m³);
- mc: massa do concreto no estado endurecido (kg);
- V_c: volume da amostra de concreto utilizada (m³).

A resistência à tração na flexão do concreto celular espumoso foi determinada segundo a NBR 13.279 (ABNT, 2005) aos 28 dias de cura utilizando amostras prismáticas com dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm, como aponta a Equação 3:

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

Em que:

- R_f: é a resistência à tração na flexão (MPa);
- F_f: é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);
- L: é a distância entre os suportes (mm).

Relativamente ao ensaio de resistência à compressão, conforme apresentado previamente neste capítulo e no capítulo de revisão, diferentes autores empregam diferentes metodologias e dimensões de corpos de prova para obter tal resultado, não existindo, portanto, um consenso na literatura (BHOSALE et al., 2020).

A resistência à compressão foi aferida a partir das metades das amostras prismáticas 4 cm x 4 cm x 16 cm (ensaiadas previamente à tração na flexão), sob as recomendações da NBR 13.279 (ABNT, 2005), por meio da Equação 4:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (4)$$

Em que:

- R_c: é a resistência à compressão (MPa);
- F_c: é a carga máxima aplicada (N).

3.2.3 Moldagem e cura

Neste item, são descritos os processos de moldagem e cura das amostras utilizadas para definição do traço ideal do compósito desenvolvido, bem como, dos componentes (placas e blocos) utilizados para compor os elementos que passaram pelas análises de desempenho.

3.2.3.1 Amostras para definição do traço

Para a definição do traço, foram avaliadas a resistência à compressão axial e à tração na flexão, nas dimensões mencionadas no item anterior, as quais estão em concordância com a ABNT NBR 13.279 (ABNT, 2005), que, embora seja especificamente para argamassas, supre a necessidade em questão, uma vez que não existem, até o presente momento, normativas que definam critérios de ensaio para tais parâmetros em relação ao concreto celular espumoso.

Uma vez que tanto a areia quanto a casca de arroz apresentam granulometria inferior a 4,75 mm (granulometria de agregado miúdo), as características finais do agregado são semelhantes às das argamassas, havendo, portanto, uma coerência na utilização da norma mencionada.

No total, foram produzidos (moldados) oito corpos de prova prismáticos, isto é, 4 corpos de prova representativos para cada uma das idades avaliadas (7 e 28 dias de cura). Após a moldagem, as amostras foram posicionadas e mantidas durante o período de 48h em câmara úmida com temperatura de 23°C e umidade relativa do ar de 95% até a desmoldagem, quando, então, retornaram para a câmara úmida nas mesmas condições até serem ensaiadas.

3.2.3.2 Componentes (placas e blocos)

Em relação às placas, inicialmente, estas foram moldadas utilizando-se formas de compensado marítimo, desenvolvidas exclusivamente para esta pesquisa, nas dimensões de 1,20 m x 0,60 m x 0,020 m, como ilustra a Figura 54. Posteriormente, por questões de montagem explicadas, mais detalhadamente, no Capítulo 3.3, outras dimensões foram utilizadas (0,40 m x 0,60 m x 0,020 m/ 0,40 m x 0,10 m x 0,020 m), sendo estas extraídas das placas de tamanho original.

É possível observar, na Figura 55, que as placas apresentaram um bom acabamento, não requerendo, portanto, nenhum tipo de aplicação de revestimento e/ou acabamento.

Os componentes do tipo bloco foram produzidos nas dimensões de 0,60 m x 0,65 m x 0,07 m, também a partir de formas de compensado marítimo. Destes blocos, foram extraídas, com o auxílio de um dispositivo de corte a seco, amostras cúbicas nas dimensões de 0,07 m x 0,07 m x 0,07 m (ver Figura 56) para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial, como elucida a ABNT NBR 13438 (ABNT, 2013 a).

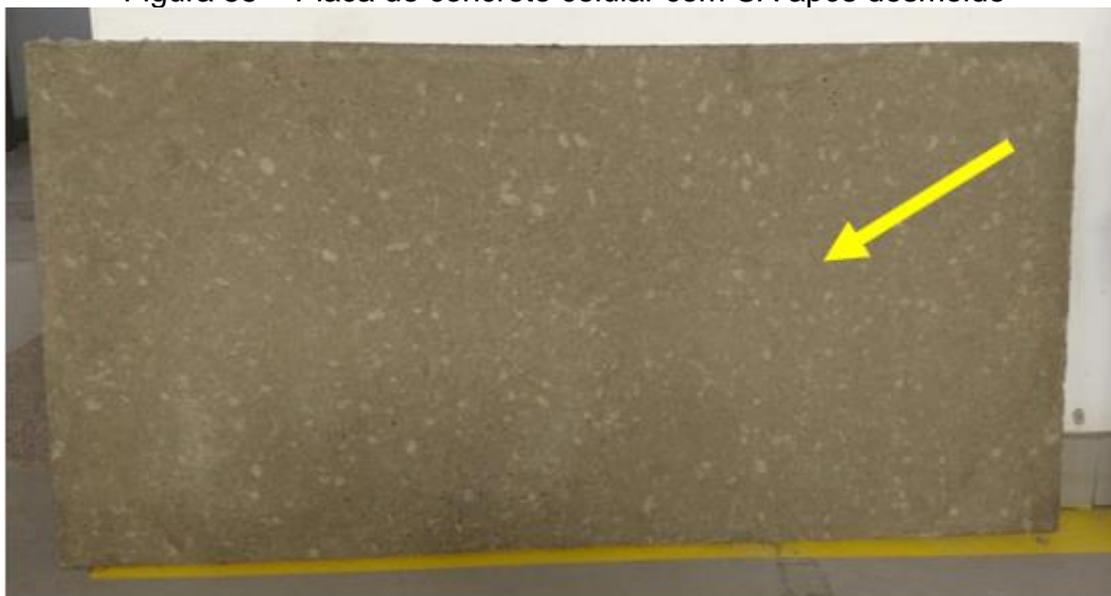
Após a extração, os cubos tiveram suas superfícies retificadas de modo a garantir o paralelismo entre as faces da amostra, sendo, então, mantidos em estufa a 105°C até alcançar massa constante (variação de massa $\leq 1,0$ g).

Figura 54 – Processo de moldagem das placas de concreto celular CA



Fonte: Elaboração própria

Figura 55 – Placa de concreto celular com CA após desmolde



Fonte: Elaboração própria

Figura 56 – Blocos de concreto celular com CA após desmolde



Fonte: Elaboração própria

Posteriormente à moldagem, as placas e os blocos permaneceram por, no mínimo, 48h em câmara úmida, sob as mesmas condições mencionadas para as demais amostras, até a desmoldagem, quando, então, retornaram para a câmara úmida nas mesmas condições até serem levados para a montagem dos elementos de

vedação. Ademais, as três dimensões dos componentes foram sempre verificadas com réguas metálicas, tomando como referência o centro de cada retângulo.

3.2.4 Caracterização mecânica das placas e dos blocos de vedação

Em razão da ausência de normativa específica para concreto celular espumoso, optou-se por, adicionalmente, resistência à tração na flexão avaliada com as amostras prismáticas e a resistência à compressão obtida com a metade das amostras prismáticas, por avaliar-se, também, a resistência à compressão axial, conforme as especificações da NBR 13440 (ABNT, 2013B), empregando-se amostras cúbicas.

A resistência à compressão, conforme a normativa, é determinada pela média aritmética dos resultados coletados nas amostras ensaiadas, sendo que, para cada amostra, a resistência é calculada por meio da Equação 5. A velocidade de ensaio foi de 0,05 MPa/s e foram utilizadas três amostras representativas.

$$f_{cb} = \frac{F}{S} \quad (5)$$

Em que:

- f_{cb} : resistência à compressão de cada amostra (MPa);
- F: carga máxima suportada pela amostra (N);
- S: área da seção transversal comprimida, determinada geometricamente (mm^2).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE VEDAÇÃO INTERNA

3.3.1 ELEMENTO 1: Perfis metálicos e fechamento em placas leves com CA

Para simular um Sistema de Vedação Vertical Interno (SVVI) sem função estrutural, do tipo leve, isto é, totalizando 16 kg/m^2 ; foi utilizado um corpo de prova de 4,40 m x 2,50 m composto por perfis metálicos, placas de concreto celular com casca de arroz, placas de gesso acartonado e parafusos para fixar as placas nos montantes e nas guias.

De modo a obter-se um elemento completo com componentes fechando os perfis metálicos em ambas as faces, foram utilizadas placas de gesso (ver Figura 57) na face que não foi ensaiada. O intuito era priorizar as placas de concreto celular com CA na face ensaiada, evitando-se, assim, desperdícios de material.

A Figura 58 ilustra a estrutura metálica utilizada, composta por guias e montantes, bem como, a forma, de fixação das placas de concreto celular com CA. Para viabilizar a fixação das placas em pontos mais distantes das bordas, de modo a evitar-se fissuras ou, até mesmo, a ruptura de tais pontos, foram utilizados montantes duplos na parte intermediária. Nas laterais do corpo de prova, os montantes utilizados foram simples, uma vez que não haveria o encontro de duas placas. A montagem ocorreu a partir de um pórtico de apoio.

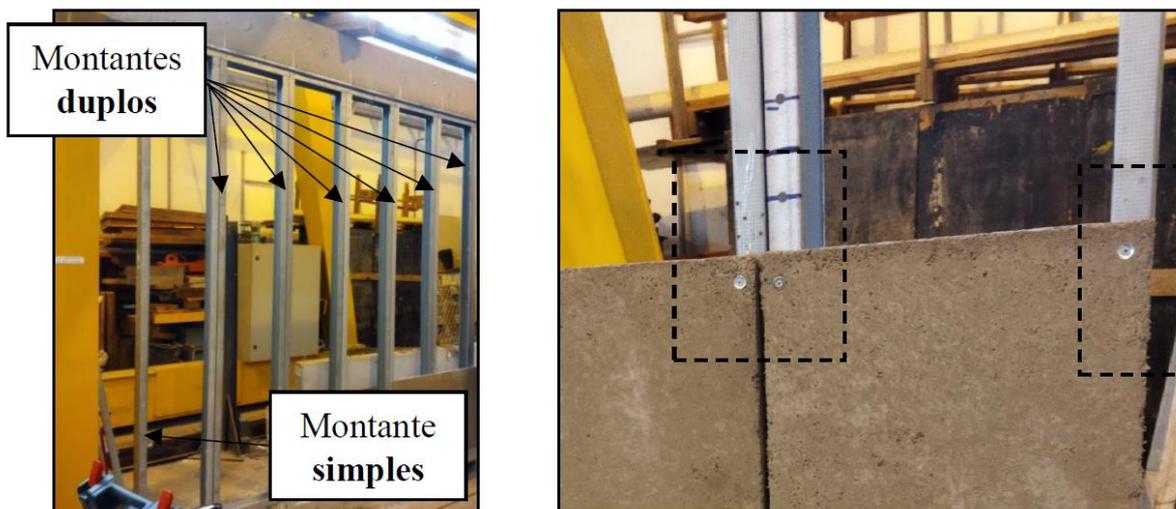
Foram utilizadas placas em diferentes dimensões, sendo estas: 1,20 m x 0,60 m/ 0,40 m x 0,60 m/ 0,40 m x 0,10 m. As placas menores (0,40 m x 0,10 m) foram utilizadas apenas na região superior do corpo de prova para completar o pé direito mínimo exigido pela normativa (ver Figura 59 e Figura 60).

Figura 57 – Placas de gesso na face não ensaiada



Fonte: Elaboração própria

Figura 58 – a) Estrutura metálica; (b) Fixação das placas de concreto celular com CA



(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria

Durante a montagem, observou-se que as placas com CA apresentaram certa fragilidade às deformações inerentes ao processo, bem como, a ausência de planicidade nas bordas dificultou o encaixe, sendo necessário realizar o lixamento da região em contato com os perfis (ver Figura 61). Ademais, durante tais etapas, isto é, manuseio, transporte, lixamento e fixação, algumas placas fissuraram (ver Figura 62).

Figura 59 – Aparafusamento das placas



Fonte: Elaboração própria

Figura 60 – Montagem das placas do Corpo de Prova 1



Fonte: Elaboração própria

Figura 61 – (a) Região de lixamento na face externa; (b) Face lateral das placas

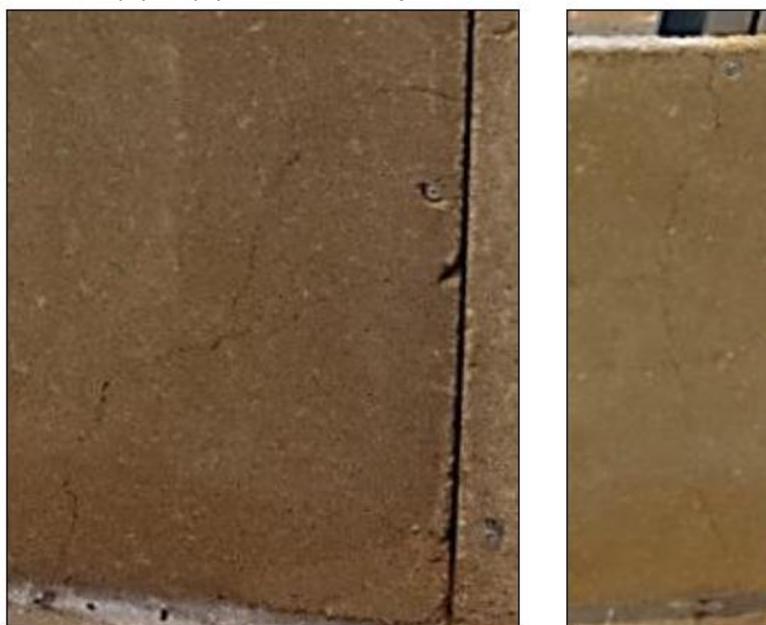


(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria

Figura 62 – (a) e (b) Danos nas placas em razão da montagem



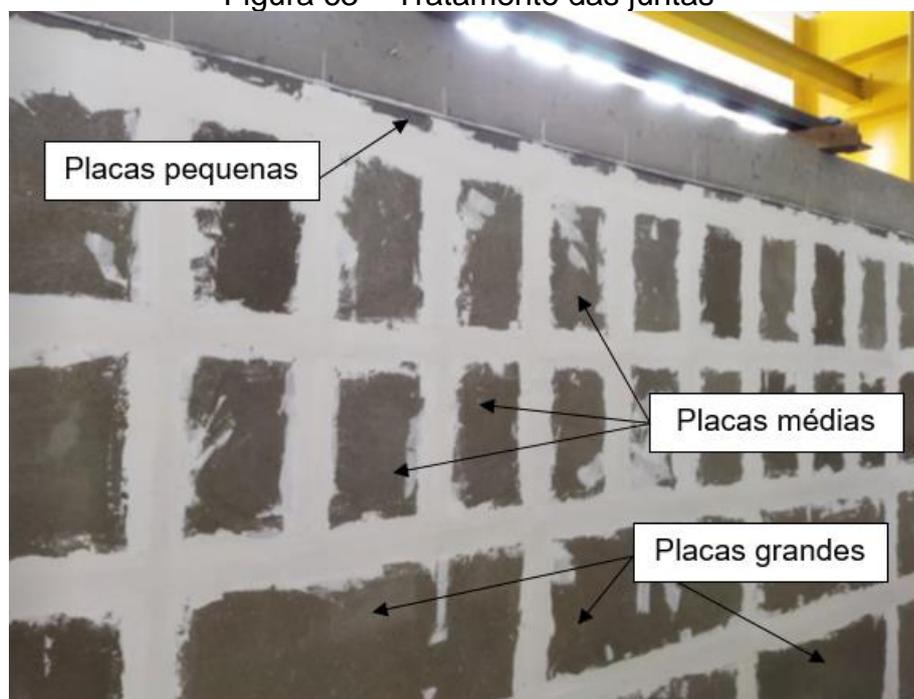
(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria

O tratamento das juntas foi realizado por meio de fita para juntas e massa única para placas cimentícias, conforme ilustram a Figura 63 e Figura 64. A última etapa consistiu na pintura da face ensaiada (ver Figura 65).

Figura 63 – Tratamento das juntas



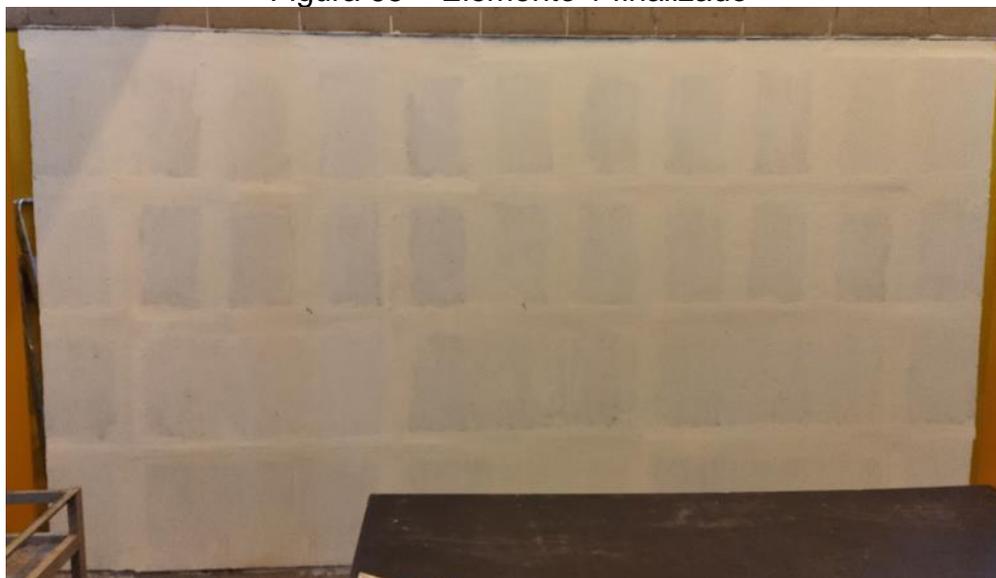
Fonte: Elaboração própria

Figura 64 – Produtos para tratamento das juntas: (a) fita; (b) massa única



Fonte: Elaboração própria

Figura 65 – Elemento 1 finalizado



Fonte: Elaboração própria

É importante pontuar que também foram produzidas placas de concreto celular sem CA para fins de comparação, contudo, não foi possível realizar a montagem, pois essas rompiam com demasiada facilidade, demonstrando, portanto, uma acentuada fragilidade.

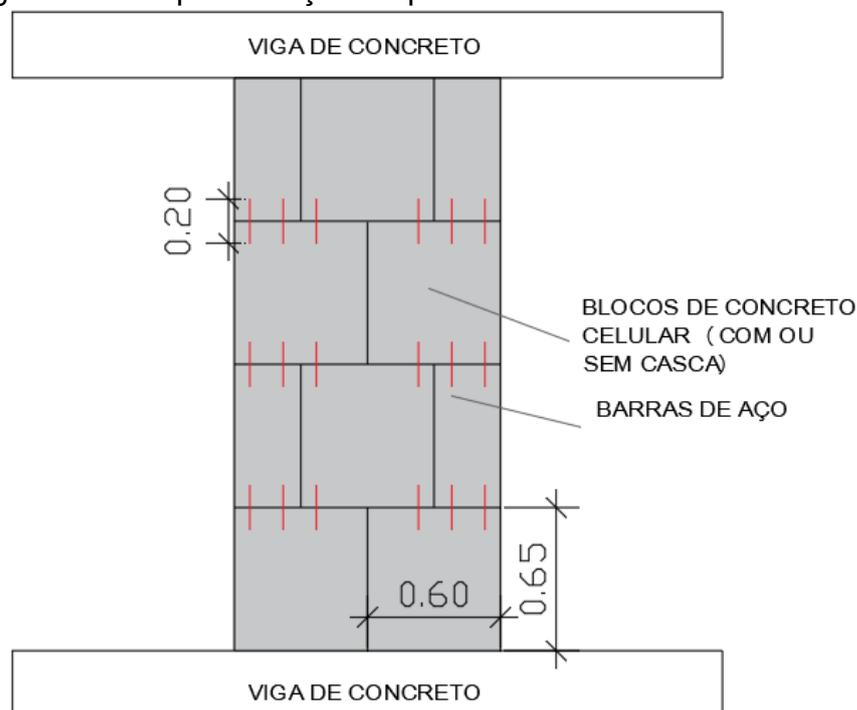
3.3.2 ELEMENTOS 2 e 3: Alvenaria com blocos leves

Para simular um Sistema de Vedação Vertical Interno (SVVI) inovador, sem função estrutural, classificado como pesado, uma vez que apresentou $G = 67,00 \text{ kg/m}^2$ e a NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) classifica sistemas leves somente quando $G \leq 600$

N/m², foram utilizados dois corpos de prova com blocos maciços de concreto celular travados com barras de aço de 5,0 mm de diâmetro, juntas de argamassa polimérica, revestimento em ambas as faces de argamassa industrializada (Votomassa massa pronta) e acabamento de duas demãos de tinta acrílica branca. A união bloco-barras foi realizado com a utilização de adesivo epóxi bi componente.

O primeiro destes, isto é, o Elemento 2, era composto por blocos com casca de arroz, enquanto o Elemento 3 por blocos de concreto celular sem casca de arroz. As dimensões e características dos blocos utilizados foram mencionadas com mais detalhes, anteriormente, no item 3.2.3.2. A dimensão final dos Elementos 2 e 3 foi de 1,20 m de comprimento por 2,60 m de altura cada, sendo, portanto, utilizados blocos inteiros e meio-blocos. A Figura 66 ilustra um desenho esquemático dos Corpos de Prova 2 e 3.

Figura 66 – Representação esquemática dos Elementos 2 e 3



Fonte: Elaboração própria

As Figura 67 e Figura 68 representam, respectivamente, o processo executivo de montagem dos corpos de prova e o protótipo em escala real antes da aplicação do revestimento de argamassa e do acabamento. Para montagem dos elementos, foi utilizado um pórtico de apoio e os blocos foram previamente furados com o auxílio de um gabarito nos pontos em que as barras de aço seriam inseridas.

Figura 67 – Processo executivo dos elementos 2 e 3: (a) esquema de encaixe dos blocos e barras e (b) zoom na disposição das barras



(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria

Figura 68 – Elemento 2 antes da aplicação do revestimento de argamassa e acabamento



Fonte: Elaboração própria

3.4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DOS ELEMENTOS

Neste tópico, são apresentados os ensaios experimentais de desempenho (EED) selecionados a partir da NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) Edificações habitacionais

– Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE) para avaliar os diferentes elementos mencionados anteriormente. O capítulo foi dividido de modo que cada subitem se refere a um ensaio específico, englobando os procedimentos que foram adotados.

A Tabela 19 apresenta um resumo dos parâmetros normativos adotados para a avaliação experimental de desempenho dos elementos desenvolvidos, isto é, a classificação da exigência do usuário em questão, o item correspondente na ABNT NBR 15.575-4 (ABNT, 2021), o requisito (parâmetro qualitativo) traduzido em seu correlato critério (parâmetro quantitativo) e o método de ensaio utilizado.

Tabela 19 – Parâmetros normativos utilizados na avaliação experimental de desempenho

Exigência do usuário	Item da norma	Requisito	Critério	Método de avaliação
Segurança	7.3	Resistir às solicitações originadas pela fixação de peças suspensas.	Os SVVIE da edificação habitacional, com ou sem função estrutural, sob ação de cargas devido a peças suspensas, não pode apresentar fissuras, deslocamentos horizontais instantâneos ou residuais, lascamentos ou rupturas, nem permitir o arrancamento dos dispositivos de fixação nem seu esmagamento	Anexo A da ABNT NBR 15.575-4 (ABNT, 2021)
Segurança	7.4	Resistir aos impactos de corpo mole.	Sob ação de impactos progressivos de corpo mole, os SVVIE não podem: a) sofrer ruptura ou instabilidade, que caracterize o estado-limite último, para as energias de impacto correspondentes. b) apresentar fissuras, escamações, delaminações ou qualquer outro tipo de falha que possa comprometer o estado de utilização, observando-se, ainda, os limites de deslocamentos instantâneos e residuais. c) Provocar danos a componentes, instalações ou aos acabamentos acoplados aos SVVIE.	ABNT NBR 11.675
Segurança	7.6	Resistir aos impactos de corpo duro.	Sob a ação de impactos de corpo duro, as paredes verticais externas (fachadas) e as vedações verticais internas não podem: a) apresentar fissuras, escamações, delaminações ou qualquer outro tipo de dano, sendo permitidas moças localizadas. b) apresentar ruptura ou	Anexo B da ABNT NBR 15.575-4 (ABNT, 2021)

			transpassamento sob ação dos impactos.	
Habitabilidade	10.2	Não permitir a infiltração de água, através de suas faces, quando em ambientes de áreas molháveis e molhadas.	A quantidade de água que penetra não pode ser superior a 3 cm ³ , por um período de 24h, em uma área exposta com dimensões de 34 cm x 16 cm.	Anexo D da ABNT NBR 15.575-4 (ABNT, 2021)
Habitabilidade	10.1	Ser estanques à água proveniente de chuvas incidentes ou de outras fontes	Permanecer estanques e não apresentar infiltrações que proporcionem borrifamentos, escorrimentos ou formação de gotas de água aderentes na face interna.	Anexo C da ABNT NBR 15.575-4 (ABNT, 2021)
Sustentabilidade	14.1	Devem ser limitados deslocamentos, fissuras e falhas nas paredes externas, incluindo seus revestimentos, em função de ciclos de exposição ao calor e resfriamento que ocorrem durante a vida útil do edifício.	As paredes externas, incluindo seus revestimentos, submetidas a dez ciclos sucessivos de exposição ao calor e resfriamento por meio de jato de água, não pode apresentar: - deslocamento horizontal instantâneo, no plano perpendicular ao corpo de prova, superior a $h/300$, em que h é a altura do corpo de prova. - ocorrência de falhas, como fissuras, destacamentos, empolamentos, descoloramentos e outros danos que possam comprometer a utilização do SVVE.	Anexo E da ABNT NBR 15.575-4 (ABNT, 2021)

Fonte: Adaptado de NBR 15.575 (ABNT, 2021)

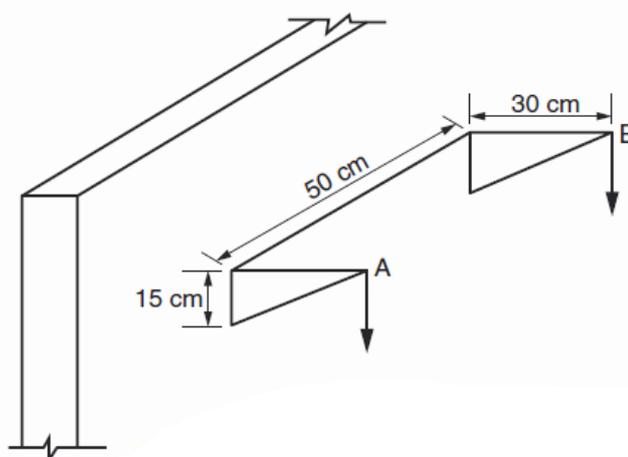
3.4.1 Resistência às solicitações de peças suspensas

O critério 7.3.1 da NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) diz que os SVVIE, sejam estes empregados com ou sem função estrutural, submetidos à ação de cargas provenientes de peça suspensas, não poderá apresentar fissuras, deslocamento horizontal instantâneos (d_h) ou deslocamentos horizontais residuais (d_{hr}) fora dos limites estabelecidos, lascamentos ou rupturas, nem mesmo possibilitar que os dispositivos de fixação sejam arrancados ou esmagados. Desse modo, os SVVIE devem ser submetidos a solicitações de esforços fletores e de cisalhamento por meio de equipamentos de carga compatíveis com a peça que será ensaiada.

A norma recomenda que se tratando de peças suspensas, tais como armários e prateleiras, deve-se empregar mãos-francesas padronizadas para a aplicação da carga, a Figura 69 ilustra o esquema. Além disso, também podem ser considerados outros tipos de peças suspensas, como cantoneira L e outros dispositivos recomendados pelo fabricante que está propondo a tecnologia em si.

A Figura 70 (a) ilustra o suporte para aplicação de cargas (mão-francesa) utilizada nos ensaios experimentais de desempenho do presente trabalho, a qual segue as recomendações da ABNT NBT 11678/2016 – Divisórias leves internas moduladas, norma esta recomendada pela própria norma de desempenho.

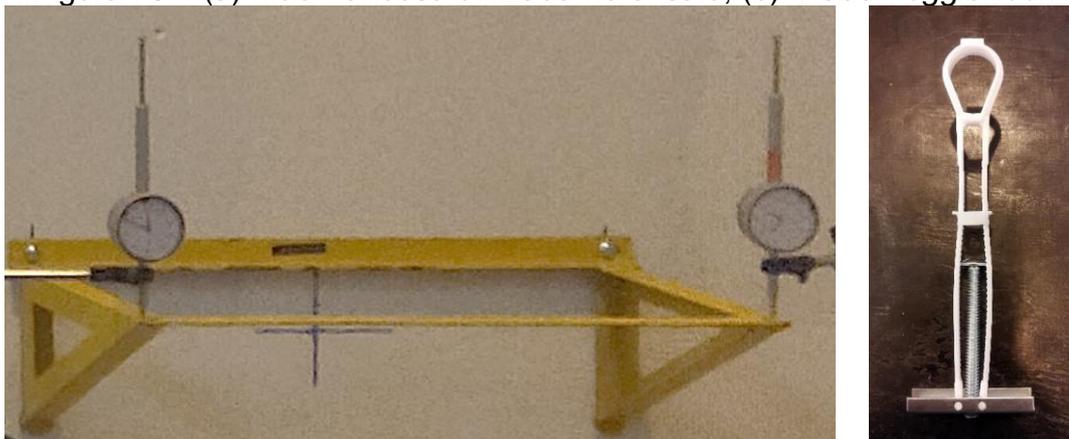
Figura 69 - Esquema de mão-francesa para ensaios de peças suspensas



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15.575-4 (ABNT, 2013)

A fixação do equipamento no Elemento 1 foi realizada por meio de um par de fixadores *toggler bolt* $\frac{1}{4}$ " com furação de $\frac{1}{2}$ ", tal qual a Figura 70 (b) ilustra. Nos demais Corpos de Prova (Elemento 2 e 3), utilizou-se um conjunto de buchas e parafusos (ver Figura 71). No Elemento 2, o conjunto era formado por buchas de diâmetro de 10 mm e parafuso de 6 mm, enquanto, no Elemento 3, além deste primeiro conjunto, uma segunda configuração também foi avaliada, isto é, buchas de diâmetro de 8 mm e parafuso de 5 mm.

Figura 70 – (a) Mão-francesa utilizada no ensaio; (b) fixador *toggler bolt*



(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria

Figura 71 – Dispositivo de fixação utilizado no Elemento 2



Fonte: Elaboração própria

O ensaio consiste em montar o SVVIE com os dispositivos laboratoriais ou em protótipo, de modo a reproduzir as condições de contorno. As cargas deverão ser aplicadas em patamares de 50N com intervalos de 3 minutos entre um patamar e outro, sem golpes e atender as particularidades de cada caso, como especificado a seguir:

- Caso 1 (peças suspensas suportadas por mão-francesa padrão): a carga deverá ser elevada até a carga de ensaio (0,8 kN; 1,0 kN ou 1,2 kN) e mantida por 24h;
- Caso 2 (outros dispositivos de fixação quando a carga de serviço é desconhecida): elevar a carga até a ruptura do SVVIE ou arrancamento ou deslocamento, de modo a produzir a instabilidade do sistema de

fixação. Os arrancamentos e as rupturas/deslocamentos deverão ser registrados.

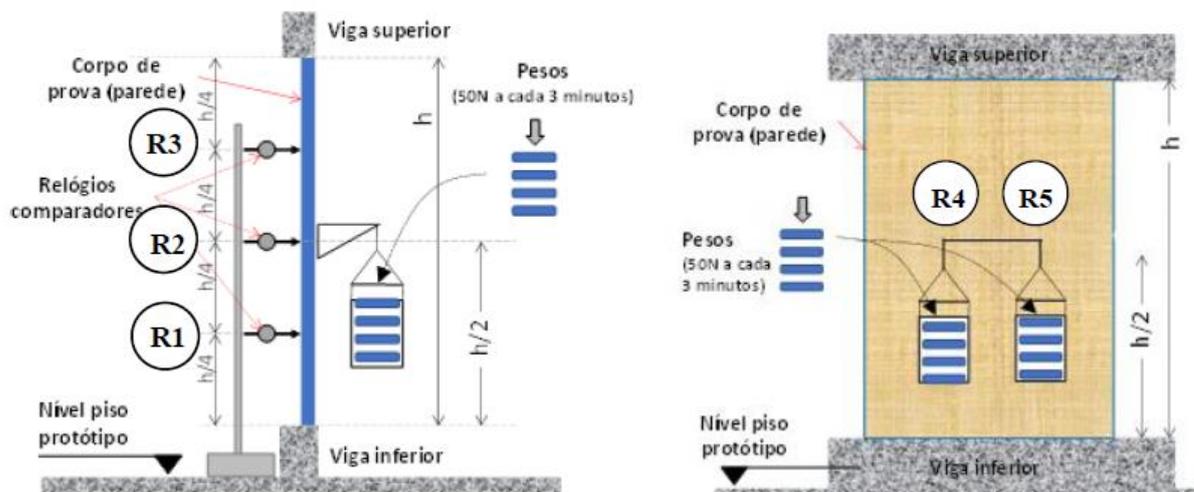
Considera-se que o caso 1 seja o ensaio de longa duração (24 h), portanto, é possível considerar-se que a carga de ensaio contemple um coeficiente de segurança da ordem de dois. Em relação ao caso 2 (cargas de curta duração), de modo geral, a carga de uso deverá ser o menor valor entre: 1/3 da carga de ruptura e a carga que gerar um $d_h > h/500$.

No ensaio experimental de desempenho em questão, após a fixação da mão-francesa, aplicou-se a carga de 100 N (50 N em cada recipiente), aferindo o deslocamento dos relógios comparadores a cada 3 minutos da aplicação da carga, até que fossem atingidos os 800 N iniciais. Decorridas 24 h, realizou-se a leitura dos 800N mantidos pelo período de 24h e, então, aplicou-se mais carga, em patamares de 100 N, até que a carga de 1000 N fosse alcançada.

Após a marca de 1000 N ter sido alcançada, esta foi mantida, de modo semelhante à etapa anterior, por um período de 24h, até que pudesse ser feita a leitura dos relógios comparadores. O mesmo processo foi realizado para a carga de 1200N e, então, o ensaio foi interrompido, sendo, portanto, obtidos os deslocamentos instantâneos de cada patamar de carga. Após 15 minutos que o ensaio havia sido interrompido, e as cargas haviam sido removidas, uma nova leitura dos relógios foi realizada, de modo a coletar o deslocamento horizontal residual (dhr).

É válido destacar também que, simultaneamente, com a coleta da leitura de deslocamento é realizada a inspeção visual do corpo de prova, verificando-se a presença de possíveis danos. A Figura 72 ilustra um esquema da posição da mão-francesa (dispositivo de aplicação de cargas utilizado) e os cinco relógios comparadores mecânicos utilizados (R1, R2, R3, R4 e R5). E a Figura 73 ilustra as instalações reais utilizadas no ensaio.

Figura 72 – (a) Posição da mão-francesa e dos relógios R1, R2 e R3; (b) vista frontal da mão-francesa e dos relógios R4 e R5



(a)

(b)

Fonte: (LORENZI, 2013)

Figura 73 – (a) Face oposta à aplicação de carga - R1, R2 e R3; (b) face da aplicação de cargas - R4 e R5



(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria

3.4.2 Resistência a impactos de corpo mole

O critério de resistência a impactos de corpo mole deriva-se do requisito que traduz a resistência dos SVVIE à energia de impactos acidentais, que podem ocorrer durante a utilização da edificação ou mesmo por meio de tentativas de intrusão ou vandalismo. Nesse aspecto, a NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) diz que a ação progressiva de impactos de corpo mole, para as energias de impacto apontadas pela norma em Joules ($J = N \cdot m$), não pode provocar nos SVVIE as seguintes ocorrências:

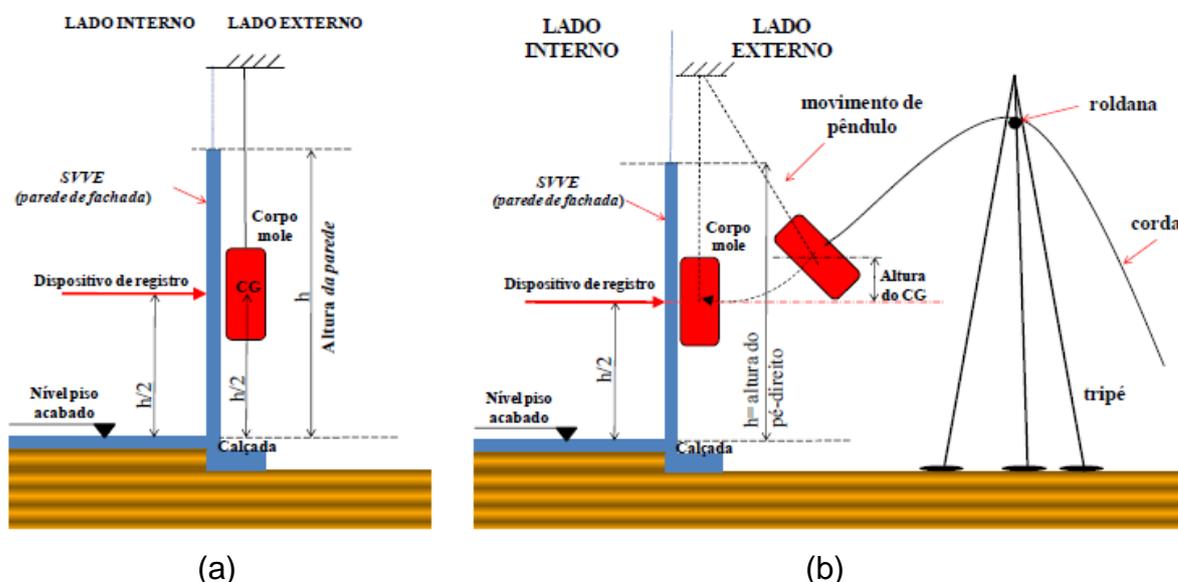
- ruptura ou instabilidade que caracterize o estado limite último (impacto de segurança);
- fissuras, escamações, delaminações ou outros tipos de falha que comprometam o estado de utilização (impacto de utilização), observando-se, ainda, os limites de deslocamentos instantâneos e residuais;
- danos aos componentes, às instalações ou aos acabamentos que porventura estejam acoplados ao SVVIE.

O ensaio deve respeitar as recomendações da ABNT NBR 11675:2016 – Divisórias leves internas moduladas – e ABNT NBR 15.575-2:2021 – Requisitos para os sistemas estruturais, consistindo, basicamente, em lançar um corpo mole em pêndulo livre a partir de alturas pré-definidas (em razão da energia de impacto necessária) nos pontos mais desfavoráveis (em geral, no centro de gravidade) e determinar, por meio de medições na face oposta à aplicação do impacto, o deslocamento horizontal instantâneo (d_h), o deslocamento residual (d_{hr}), além de identificar, por meio de inspeção visual, possíveis degradações.

A Figura 74 faz uma ilustração do esquema de ensaio. Nota-se que a projeção do centro de massa do saco de couro deve ser coincidente com o ponto de impacto. Por sua vez, a Figura 75 apresenta as energias de impacto que carecem de avaliação em vedações verticais internas sem função estrutural e seus respectivos critérios de desempenho para o nível mínimo.

Para a realização do ensaio, foi utilizado como corpo mole um saco de couro cilíndrico de 35 cm de diâmetro e 90 cm de altura com interior preenchido de areia e serragem (totalizando um peso de 400 ± 4 N ou massa de $40,79 \pm 0,40$ kg). Além disso, foram necessários um sistema pendular e um cabo de aço para sustentação do saco de couro sintético (ver Figura 76).

Figura 74 – Desenho esquemático do ensaio: (a) localização do corpo mole, facetando o corpo de prova; (b) detalhe do movimento pendular livre do corpo mole



(a) Fonte: Lorenzi (2013)

(b)

Figura 75 – Impacto de corpo mole para vedações verticais internas sem função estrutural

Elemento	Energia de Impacto de corpo mole J	Critérios de desempenho
Vedações sem função estrutural	120	Não ocorrência de ruína (estado-limite último) São permitidas falhas localizadas
	60	Não ocorrência de falhas (estado-limite de serviço). Limitação da ocorrência de deslocamento: $d_h \leq h/125^a$ $d_{hr} \leq h/625$
<p>^a Para paredes leves ($G \leq 600 \text{ N/m}^2$), sem função estrutural, os valores do deslocamento instantâneo (d_h) podem atingir o dobro do valor indicado nesta Tabela.</p> <p>NOTA Aplica-se também a casas térreas e sobrados.</p>		

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15.575-4, p.24

Uma vez que o corpo mole utilizado (saco de couro) com um peso equivalente a 400 N, para que o impacto alcance as energias de 60 J e 120 J, as alturas utilizadas foram, respectivamente, de 15 cm ($400 \text{ N} \cdot 0,15 \text{ m} = 60 \text{ J}$) e de 30 cm ($400 \text{ N} \cdot 0,30 \text{ m} = 120 \text{ J}$).

O corpo de prova foi submetido a impactos em dois pontos distintos, ponto A, no vão entre o montante, e ponto B, no montante, como ilustra a Figura 77. O dispositivo empregado para aferição dos deslocamentos horizontais foi o Lápis Marcador, o qual

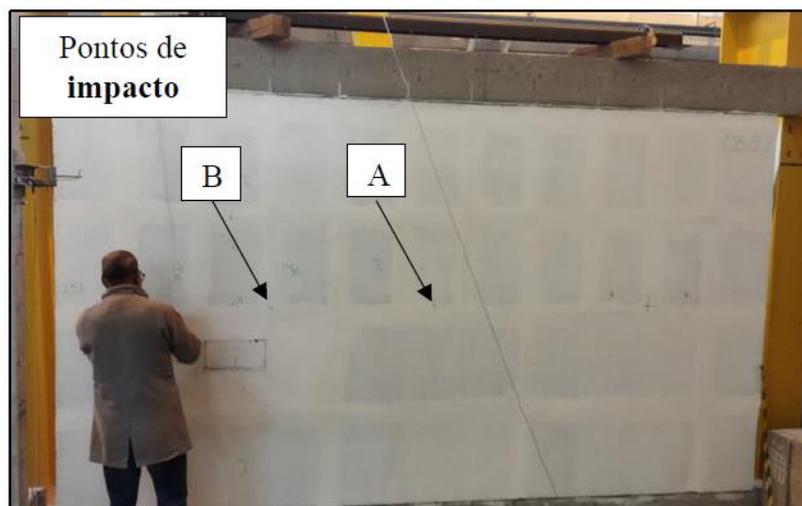
foi posicionado na face oposta àquela em que foram realizados os impactos, em posições coincidentes com os pontos A e B (ver Figura 78).

Figura 76 – Saco de couro cilíndrico em repouso e tangenciando o Elemento 1

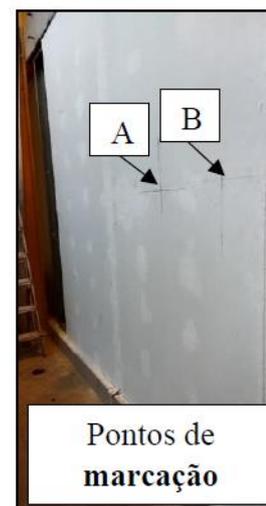


Fonte: Elaboração própria

Figura 77 – (a) Pontos de impacto; (b) Pontos de marcação dos deslocamentos



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

Figura 78 – Lápis marcador



Fonte: Elaboração própria

3.4.3 Resistência a impactos de corpo duro

O ensaio de resistência a impactos de corpo duro baseia-se nas mesmas premissas que o ensaio de corpo mole, isto é, avaliar o comportamento do componente ou elemento sob a ação de choques acidentais oriundos da utilização da edificação e outros atos como possíveis invasões. Pode-se dizer que determina a resistência pontual do SVVIE nas regiões mais desfavoráveis do corpo de prova.

O corpo de prova utilizado para a realização do ensaio deve ser fidedigno das condições reais de projeto. A execução em si consiste em suspender o elemento de impacto (esfera maciça de aço) por meio de um cabo e soltá-lo em movimento pendular, produzindo a energia de impacto necessária. Os impactos devem ocorrer em locais aleatórios e distintos entre si, sem repiques.

Durante o procedimento, devem ser registrados os deslocamentos e possíveis falhas observadas. A Figura 79 apresenta as energias de impacto (utilização e

segurança) e os critérios de desempenho relativos ao desempenho mínimo para vedações verticais internas.

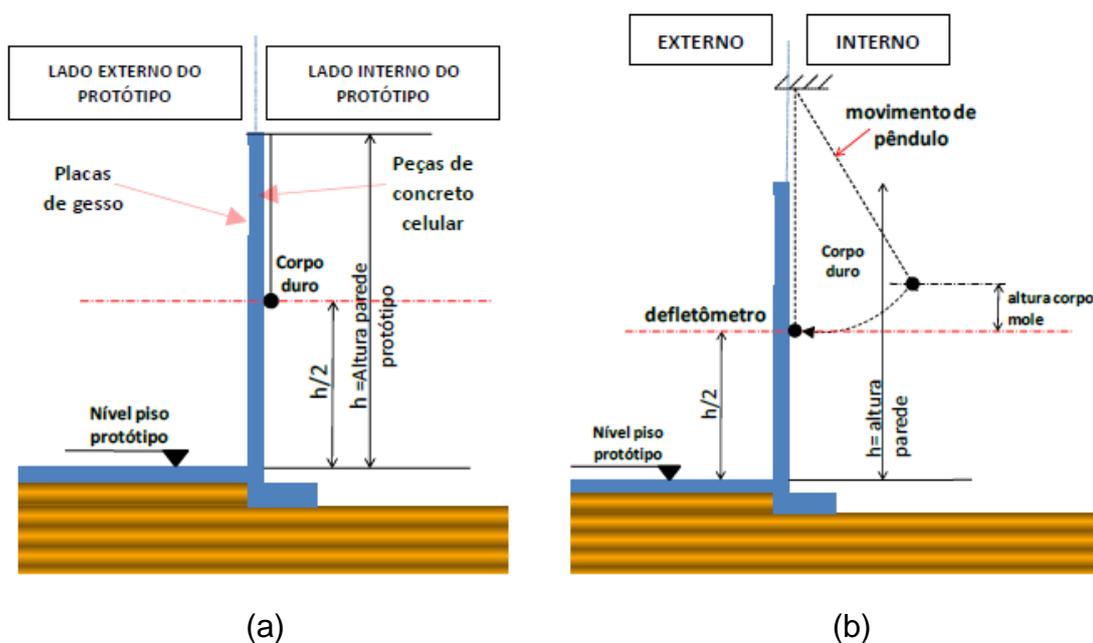
Figura 79 - Impactos de corpo duro para vedações verticais internas

Sistema	Energia de impacto de corpo duro J	Crítérios de desempenho
Vedação vertical com ou sem função estrutural	2,5	Não ocorrência de falhas que comprometam o estado-limite de serviço
	10	Não ocorrência de ruína, caracterizada por ruptura ou traspassamento (estado-limite último)

Fonte: Adaptado de NBR 15.575-4 (ABNT, 2013)

A norma recomenda que dez impactos sem repiques sejam realizados em pontos aleatórios e distintos, sendo o corpo de prova visualmente inspecionado após cada impacto de modo a identificar a presença ou não de danos. Caso ocorram mossas, sua profundidade deve ser medida. A Figura 80 ilustra o esquema de realização do ensaio.

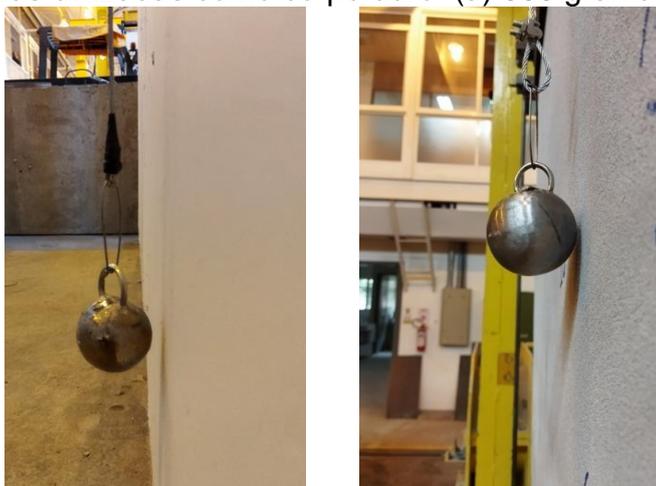
Figura 80 - Desenho esquemático do ensaio de corpo duro: (a) localização do corpo duro, face externa do corpo de prova e (b) detalhe do movimento pendular livre da esfera para realização do ensaio



Fonte: Lorenzi (2013)

Para a realização do ensaio, foram usadas duas esferas metálicas (utilizadas como corpo duro), sendo uma de massa de 500 g ($\cong 5$ N) e outra de massa de 1000 g ($\cong 10$ N), ilustradas na Figura 81. De forma análoga ao ensaio de corpo mole, as alturas foram determinadas com base na necessidade de produzir as energias de impacto normativas, isto é, para a energia de 2,5 J foi necessária uma altura de 50 cm ($5 \text{ N} \cdot 0,5 \text{ m} = 2,5 \text{ J}$) e para 10 J foi necessária uma altura de 100 cm ($10 \text{ N} \cdot 1,0 \text{ m} = 10 \text{ J}$).

Figura 81 – Esferas utilizadas como corpo duro: (a) 500 gramas; (b) 1000 gramas



(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria

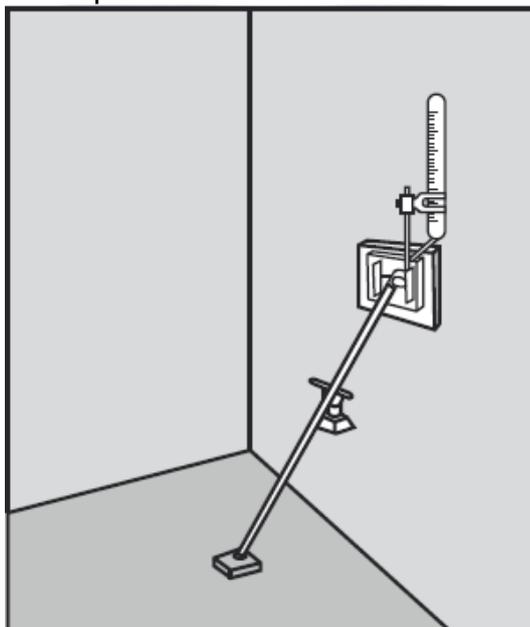
3.4.4 Permeabilidade à água

O intuito do presente ensaio é avaliar o atendimento ao requisito: umidade nas vedações verticais externas e internas decorrentes da ocupação do imóvel, cujo foco está em impedir a infiltração de água através das faces das vedações verticais no que diz respeito a ambientes de áreas molháveis e molhadas.

Nesse sentido, o critério 10.2.1 da NBR 15.575-4 (ABNT, 2013) diz que, considerando-se uma região exposta de 34 cm x 16 cm e um período de 24h, a quantidade de água que penetra não pode ultrapassar 3cm³.

Para realizar esta aferição, deve-se realizar, portanto, o ensaio de verificação da permeabilidade à água do SVVIE, que se baseia em sujeitar um certo trecho de parede à presença de água com pressão constante por meio do acoplamento de uma câmara com formato de caixa com dimensões internas de 16 cm x 34 cm que possui uma moldura em seu perímetro própria para a união com a parede, como ilustra a Figura 82.

Figura 82 - Acoplamento de câmara de ensaio à parede



Fonte: NBR 15.575-4 (ABNT, 2021)

A bureta graduada em centímetros cúbicos, responsável pela manutenção da pressão constante no interior da câmara e pela aferição do volume de água eventualmente infiltrado na parede, deve ser posicionada de modo que sua boca tangencie o nível d'água em seu interior. Havendo infiltração de água, o mesmo volume deverá ser repostado pela água contida na bureta, de forma que o nível de água no interior da câmara mantenha-se constante, possibilitando a determinação da quantidade de água infiltrada.

Inicialmente, deve-se, então, acoplar a câmara na região selecionada da parede e selar as bordas com mastique ou outro material semelhante. Em seguida, a câmara e a bureta devem ser preenchidos com água e o nível inicial registrado. Após isso, também devem ser registrados os níveis de água na bureta nos períodos a seguir: 30min, 1h, 2h, 4h, 6h e 24h. Fazendo-se um comparativo entre o nível inicialmente registrado e os valores obtidos nas leituras de cada período, é possível calcular o volume de água infiltrado.

3.4.5 Ação do calor e choque térmico para SVVE

O ensaio de ação do calor e choque térmico visa, por meio da aplicação de dez ciclos consecutivos de calor (originário de fonte radiante com capacidade de atingir temperatura igual a $80\pm 3^{\circ}\text{C}$) e resfriamento (jatos d'água), avaliar o comportamento

do SVVE. O intuito é retratar o estresse provocado pela variação de temperatura e umidade provocada pela ação das chuvas sobre os elementos aquecidos no decorrer da vida útil da edificação exposta a intempéries (LORENZI, 2013).

Os ciclos são espaçados em 24 horas e os corpos de prova deverão ser formados por uma fração da parede acabada – incluindo detalhes construtivos e juntas – com largura mínima de 1,20 m.

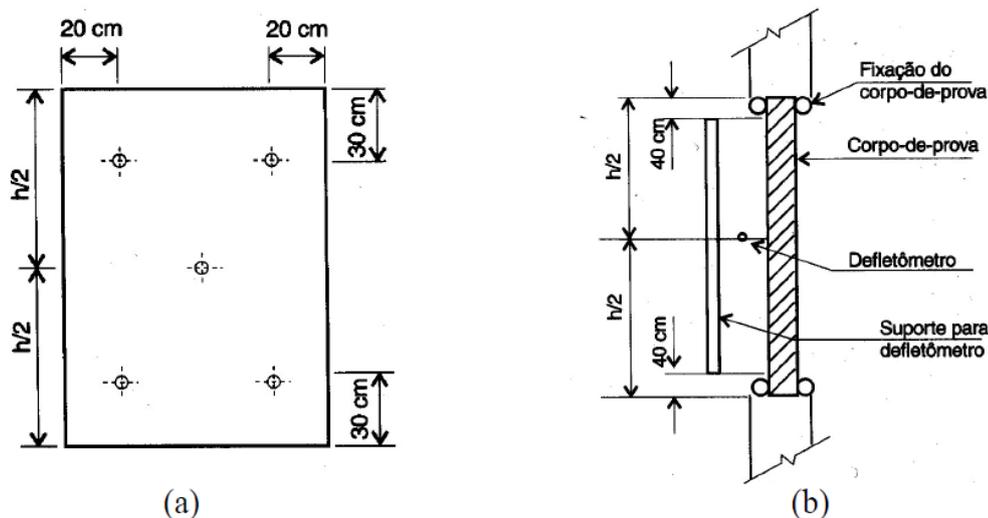
Durante cada um dos ciclos, a temperatura deverá ser monitorada por meio de cinco termopares posicionados na face do corpo de prova exposta ao aquecimento/resfriamento, como ilustra a Figura 83 (a). Os corpos de prova deverão ser fixados na vertical e o deflectômetro de haste (com resolução de 0,02 mm) instalado centralizado na face oposta à fonte radiante, como ilustra a Figura 83 (b).

O painel, fonte da radiação, deverá ser disposto defronte ao corpo de prova, distanciados de forma que a temperatura superficial da face sujeita ao calor permaneça uniforme e igual a 80 ± 3 °C durante 1 h. Depois deste período, a radiação deverá ser encerrada e a face externa do corpo deverá ter toda sua superfície resfriada por meio da aspersão de jatos d'água até que temperatura alcance a faixa de 20 ± 5 °C. O registro do deslocamento horizontal deverá ocorrer em dois momentos (em cada ciclo), decorridos 45 minutos da estabilização da temperatura superficial (80 ± 3 °C) e, logo após a etapa de resfriamento, devendo esse ser expresso em milímetros.

Ademais, durante sua ocorrência e ao seu término, deverá ser observado o surgimento de fissuras, trincas, descolamentos ou outros tipos de deteriorações em ambas as faces do corpo de prova com a indicação do período em que estes foram identificados.

Configura-se como parâmetro de aceitabilidade a ausência no plano perpendicular aos corpos de provas representativos do SVVE de deslocamento horizontal instantâneo (d_h) acima de $h/300$, sendo h a altura destes em milímetros. Além disso, a presença de falhas tais como: fissuras, destacamentos, empolamentos e descolamentos que porventura venham a comprometer seu uso são vetadas.

Figura 83 - Posicionamento dos (a) termopares na superfície do corpo de prova e (b) do defletômetro



Fonte: Lorenzi (2013)

3.4.6 Estanqueidade à água da chuva

O critério 10.1.1 da NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) aponta que, sob certas condições de exposição e de acordo com as regiões de exposição ao vento, o SVVE, inclusive a junção entre a janela e a parede, deve permanecer estanque e sem a apresentação de infiltrações que gerem borrifamentos, escorrimentos ou formação de gotas de água aderentes na face interna. A ocorrência de pequenas manchas de umidade, com limitação de área, é permitida.

Uma vez que os ensaios foram realizados em Porto Alegre – RS – as condições de exposição enquadram-se na região V (apontada pela normativa), correspondendo à vazão de água de 3 L/min/m², que produz uma película homogênea e contínua na parede, simultaneamente à aplicação da pressão estática de 50 Pa.

A Figura 84 ilustra os parâmetros a serem utilizados para a realização do ensaio conforme a destinação final da vedação, isto é, o tipo de edificação. Como pode ser observado, o ensaio tem duração total de 7 horas ininterruptas e os percentuais máximos da área de manchas permitido é de, respectivamente, 10% para edificações térreas e 5% para edificações com mais de um pavimento.

O ensaio foi conduzido antes e após a realização do ensaio de ação do calor e choque térmico.

Figura 84 - Parâmetros para o ensaio de estanqueidade à água da chuva

Edificação	Tempo de ensaio h	Percentual máximo da soma das áreas das manchas de umidade na face oposta à incidência da água, em relação à área total do corpo de prova submetido à aspersão de água, ao final do ensaio
Térrea (somente a parede, seja com ou sem função estrutural)	7	10
Com mais de um pavimento (somente a parede, seja com ou sem função estrutural)	7	5
Esquadrias	Devem atender à ABNT NBR 10821-2	
O Anexo F contém recomendações relativas a outros níveis de desempenho.		

Fonte: NBR 15.575-4 (ABNT, 2021)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico apresenta os resultados determinados por meio dos ensaios para caracterização em nível de material, componentes e elementos (Ensaio Experimentais de Desempenho).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

Durante os estudos para definição da dosagem ótima, foi aferida a massa específica no estado fresco (imediatamente após a mistura) e no estado endurecido (aos 28 dias de cura, sendo 27 destes de cura em câmara úmida e 1 dia em forno a 105°C a fim de eliminar completamente a água presente), além de serem determinados a fluidez da mistura pelo Cone de Marsh (dosagem de referência), o índice de consistência pelo Mini Slump e a resistência mecânica (tração na flexão em três pontos e compressão simples) aos 7 e aos 28 dias de cura.

A Tabela 20 apresenta os resultados da MEF e da MEE. A determinação da MEF é necessária, em termos tecnológicos, para assegurar que essa se encontra dentro da faixa almejada. Nota-se que, em todas as formulações, houve uma redução na massa específica após a etapa de cura, e que a perda de massa foi menor conforme houve a incorporação de CA e de areia.

Tabela 20 - MEF e MEE aos 28 dias de cura das diferentes dosagens

Traço	MEF (kg/m ³)	MEE (kg/m ³)	Perda de massa (%)	D.P. (kg/m ³)	C.V. (%)
Referência	707,00	569,34	19,47	15,75	3%
20%CA	790,00	666,02	15,69	6,77	1%
20%CA-10%AR	852,00	730,96	14,21	15,49	2%
Otimizado	737,00	646,12	12,33	13,92	2%

Fonte: Elaboração própria

Como apresentado na revisão da literatura, as fibras proporcionam mais estabilidade à mistura no estado fresco, além de reterem água e retardarem sua evaporação, o que pode ter contribuído para essa perda de massa menos acentuada. Além disso, conforme Nambiar e Ramamurthy (2002), alterações de volume no caso do concreto celular estão relacionadas à modificação do volume da pasta de cimento hidratada sem restrições em razão da extração da água adsorvida presente na

superfície dos poros do gel formado. Esse fato associado à elevada restrição proporcionada pela areia também explica tal diminuição.

Além disso, quanto maior a proporção de agregado presente na mistura, maior foi a MEE, o que está em conformidade com a literatura (RAMAMURTHY; KUNHANANDAN NAMBIAR; RANJANI, 2009). A MEE foi determinada a partir de quatro amostras representativas e, como pode ser observado na Tabela 20, todos os coeficientes ficaram abaixo dos 3%, o que confere mais confiabilidade aos resultados.

Para avaliar a fluidez do traço referência, foi realizado o teste de Cone de Marsh, para o qual foi obtida uma vazão de 190 ml em 20 segundos considerando-se um volume de 1000ml de concreto fresco, obtendo-se, portanto, um fluxo (em percentual) igual a 19%. De acordo com a classificação apresentada no capítulo de revisão, esse percentual representa um concreto de fluxo muito baixo e, conseqüentemente, pode implicar na necessidade de realizar adensamento com auxílio de equipamentos mecânicos.

Contudo, desde que a mistura alcance a densidade alvo sem visualmente apresentar exsudação/segregação, apresente aspecto homogêneo e consistência cremosa (quase fluida), diz-se que esta mistura é estável, podendo ser empregada normalmente. Atenção especial deverá ser dada nesses casos para densidades inferiores a 500 kg/m³, que não é o caso das misturas em questão (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015; RAJ; SATHYAN; MINI, 2019).

Após a caracterização do traço referência, realizou-se, também, o ensaio de índice de consistência por meio do Mini Slump para as demais dosagens contendo CA e areia. A Tabela 21 apresenta os resultados encontrados, sendo importante destacar que esses são relativos à média dos dois diâmetros ortogonais medidos após a remoção do molde.

Nota-se que a introdução de CA na mistura provocou um acréscimo no espalhamento em comparação ao traço referência, o que pode estar relacionado ao formato da casca em si, isto é, esse ter atuado como um fator positivo para a consistência, contudo, isto só foi observado até o teor de 20%, ou seja, para os outros percentuais avaliados (30%, 40%, 50%), observou-se um decréscimo no espalhamento. Essa redução no espalhamento em teores mais elevados, provavelmente, está relacionada ao fato de a casca ter sido adicionada *in natura* (seca) e, portanto, tende a absorver mais água, reduzindo a consistência da mistura.

Em relação à areia, comparando-se a dosagem “20%CA-10%AR” com a dosagem “20%CA”, observa-se uma leve redução do espalhamento, mas ainda foi superior ao traço referência. Essa redução no índice de consistência reflete um aumento no teor de finos da mistura.

Tabela 21 - Índice de consistência das diferentes dosagens

Traço	Índice de Consistência (mm)
Referência	144,75
20%CA	180,50
20%CA-10%AR	179,50
Otimizado	165,25

Fonte: Elaboração própria

As Tabela 22 e Tabela 23 apresentam, respectivamente, a resistência mecânica aos 7 e aos 28 dias de cura. Para melhor interpretação dos resultados, traçaram-se, também, os gráficos das Figura 85 e Figura 86.

Tabela 22 - Resistência mecânica das diferentes dosagens aos 7 dias de cura

Traço	R_c Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R_{TF} Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Referência	1,85	0,24	13%	0,71	0,08	11%
20%CA	2,87	0,29	10%	1,23	0,15	12%
20%CA-10%AR	2,47	0,19	8%	1,20	0,17	14%
Otimizado	1,52	0,21	14%	0,77	0,18	23%

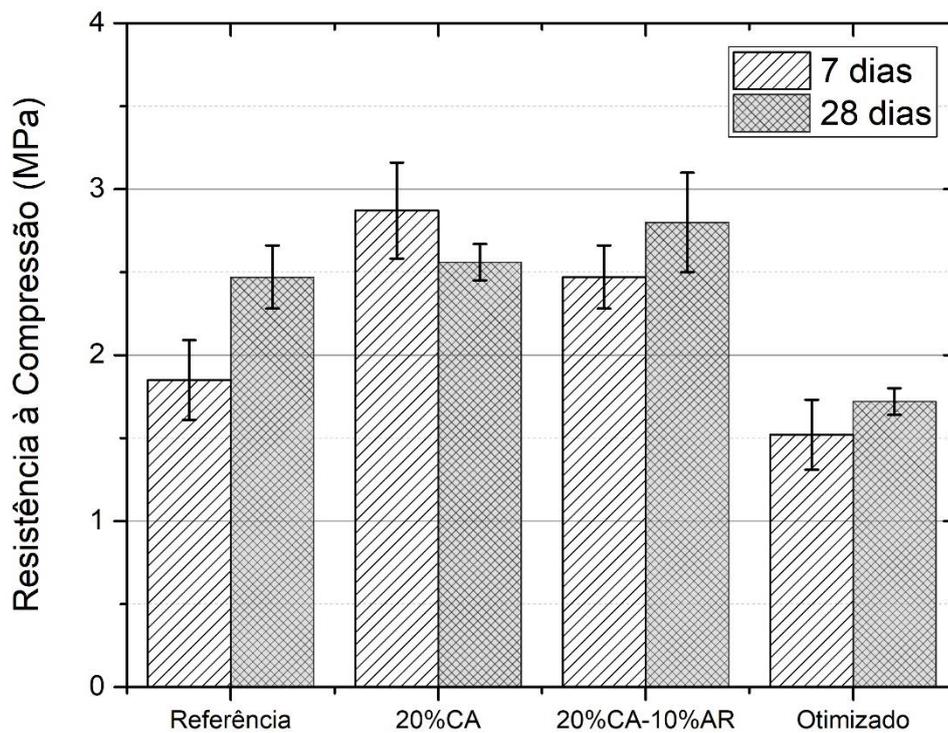
Fonte: Elaboração própria

Tabela 23 - Resistência mecânica das diferentes dosagens aos 28 dias de cura

Traço	R_c Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R_{TF} Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Referência	2,47	0,19	8%	1,06	0,11	11%
20%CA	2,56	0,11	4%	1,33	0,13	10%
20%CA-10%AR	2,80	0,30	11%	1,44	0,16	11%
Otimizado	1,72	0,08	4%	0,92	0,05	5%

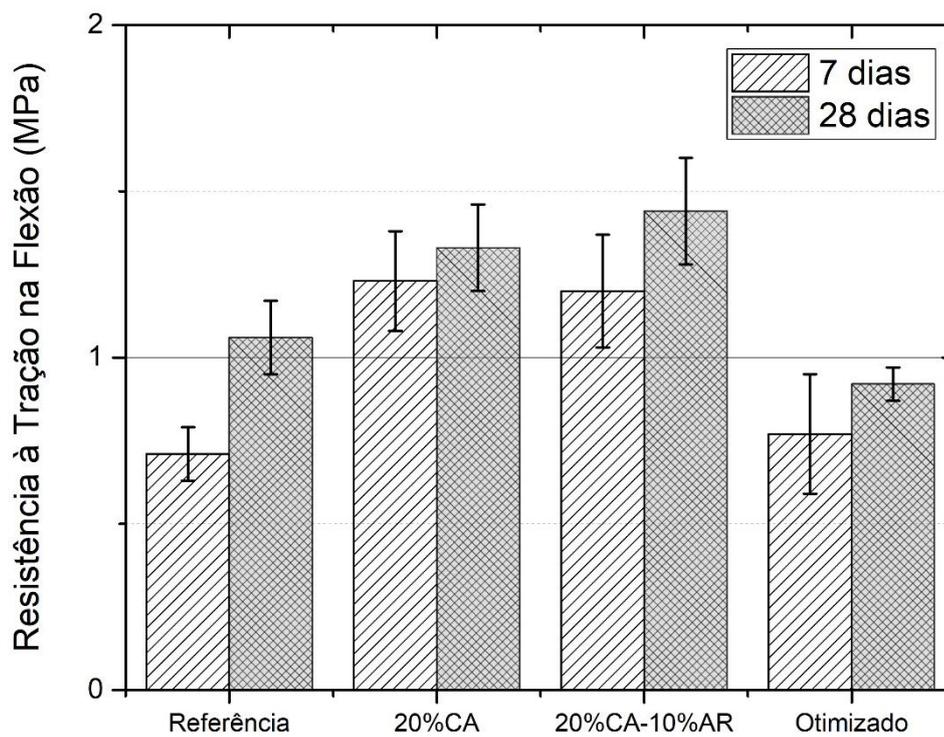
Fonte: Elaboração própria

Figura 85 - Comparação da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de cura



Fonte: Elaboração própria

Figura 86 - Comparação da resistência à tração na flexão aos 7 e aos 28 dias de cura



Fonte: Elaboração própria

Analisando, inicialmente, a Figura 85, nota-se que houve diferença estatística somente nos resultados do traço referência, para os demais, não é possível dizer que aconteceram alterações na resistência à compressão dos 7 para os 28 dias de cura. Da mesma forma, observando a Figura 86, observa-se que houve um acréscimo de resistência à tração na flexão, com significância estatística, somente no traço referência.

A Tabela 24 traça um paralelo entre diferentes normativas, uma referência da literatura e a dosagem selecionada, no que tange as propriedades do concreto celular espumoso para fins de utilização em painéis/paredes e blocos.

Tabela 24 - Comparação do traço selecionado com os dados da literatura

Fonte	MEE (kg/m³)	R_{TF} (MPa)	R_c (MPa)
NBR 12.646	1300-1900	-	2,50
NBR 13.438	< 500	-	1,50
ACI 523.2R-96	800	-	2,07
Aravind; Sathyan; Mini (2020)	1100	1,46	2,84
20%CA-10%AR	730,96	1,44	2,80
Otimizado	646,12	0,92	1,72

Fonte: Elaboração própria

A NBR 12.646 (ABNT, 1992) refere-se à execução de paredes de concreto celular moldadas no local e define que a densidade desse material deve ser mantida entre 1300-1900 kg/m³, além de ser assegurada uma resistência à compressão mínima (R_c) de 2,50 MPa aos 28 dias de cura para o lote ensaiado (pelo menos, 8 amostras cilíndricas com a altura sendo o dobro do diâmetro). A NBR 13438 (ABNT, 2013) apresenta várias classes de blocos de concreto celular autoclavado, sendo o valor mostrado relativo aos blocos classificados como C15.

Por sua vez, o guia do ACI 523.2R (1997) para concretos celulares abaixo de 800 kg/m³ aponta que essa resistência à compressão mínima deverá ser equivalente a 2,07 MPa (ASTM C 495: amostras cilíndricas com diâmetro de 7,5 cm e altura de 15 cm, ASTM C796/C796M ou, ainda, ASTM C 513, ambas amostras cúbicas).

Ademais, Aravind; Sathyan; Mini (2020) desenvolveram painéis de concreto celular espumoso com 15% de casca de arroz para fins de isolamento térmico e alcançaram MEE de 1100 kg/m^3 , resistência à compressão de 2,84 MPa (cubos de 5 cm de aresta) e resistência à tração na flexão de 1,46 MPa (painéis de 45 cm x 30 cm x 1,8 cm).

Com base na Tabela 24, é possível observar que o traço antes da otimização apresentava resistência à compressão superior a todas as normativas, tanto as nacionais quanto a internacional. Além disso, apresentava resistência mecânica muito similar à do material produzido por Aravind; Sathyan; Mini (2020), com a vantagem de apresentar menor MEE e um percentual superior de casca de arroz.

Todavia, como o intuito era reduzir ainda mais a massa específica de modo a aproximar-se da NBR 13438, o traço otimizado atendeu bem, uma vez que a norma é balizada pela cura em autoclave e, no presente estudo, a cura se deu em temperatura ambiente.

4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPONENTES

Não existe um consenso na literatura acerca das amostras ideais para ensaio do concreto celular espumoso quanto à tração na flexão (prismático/placas) e compressão (cilíndrica, cúbica, metade das amostras prismáticas ensaiadas à flexão), sendo, inclusive, uma lacuna passível de publicação. Neste sentido, optou-se pela realização da análise adicional da resistência à compressão também das amostras cúbicas.

A Tabela 25 apresenta os resultados da resistência à compressão aos 28 dias de cura das amostras cúbicas, relativas aos blocos de concreto celular (traço referência). Por sua vez, a Tabela 26 apresenta os resultados da resistência à compressão aos 28 dias de cura das amostras cúbicas, relativas aos blocos de concreto celular com casca de arroz (traço otimizado).

Os blocos de concreto celular apresentaram resistência média à compressão aos 28 dias igual a 3,00 MPa, valor equivalente à classe C 25 especificada pela NBR 13438 (ABNT, 2013b), isto é, com valor médio mínimo de 2,5 MPa e menor valor isolado igual a 2,0 MPa.

Por outro lado, os blocos de concreto celular com CA apresentaram uma resistência média equivalente a 1,86 MPa. Esse valor se enquadra na classe C 15 da NBR 13438 (ABNT, 2013b), isto é, com valor médio mínimo de 1,5 MPa e menor valor

isolado igual a 1,2 MPa. Dessa, forma ambos os materiais atingiram as demandas normativas, com todos os coeficientes de variação abaixo dos 10%.

É importante destacar que, como mostra a Figura 43, para a classe C 15, a norma aponta BCCA com massa específica inferior a 500 kg/m³, valor este inferior ao determinado para o presente trabalho, contudo, isso se justifica em razão da cura se dar em temperatura ambiente, isto é, sem passar por cura em autoclave, como no caso dos concretos celulares autoclavado.

Tabela 25 - Resistência à compressão das amostras cúbicas aos 28 dias de cura (Traço Referência)

Traço	R _c (MPa)	R _c Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Referência	2,90	3,00	0,26	8,80
	3,30			
	2,80			

Fonte: Elaboração própria

Tabela 26 - Resistência à compressão das amostras cúbicas aos 28 dias de cura (Concreto celular com CA)

Traço	R _c (MPa)	R _c Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Otimizado	1,90	1,86	0,05	3,00
	1,88			
	1,80			

Fonte: Elaboração própria

Fazendo um contraponto com os valores de resistência à compressão determinados a partir das metades das amostras prismáticas (ver Tabela 23), nota-se que não houve grandes discrepâncias, sendo, portanto, viável a obtenção por ambas as metodologias.

4.3 EED – PERFIS METÁLICOS COM FECHAMENTO EM PLACAS LEVES

4.3.1 Resistência às solicitações de peças suspensas

A Tabela 27 apresenta o resultado do ensaio de resistência às solicitações de peças suspensas para o Elemento 1. É importante elucidar que o parâmetro R2 é uma exigência da NBR 11.678 (ABNT, 2016), enquanto R1 e R3 são as recomendações

da NBR 15.575 (ABNT, 2021) e R4 e R5 são recomendações do protocolo para revisão da norma de desempenho (atualmente em sua versão de 2021).

Tabela 27 – Resultado do ensaio de resistência do Elemento 1 às solicitações de peças suspensas

Peso (N)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)	Observações
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Nenhuma ocorrência
100	0,01	0,00	-0,01	-1,48	-0,45	Nenhuma ocorrência
200	0,01	0,00	-0,02	-2,69	-1,26	Nenhuma ocorrência
300	0,01	-0,02	-0,05	-4,10	-2,72	Nenhuma ocorrência
400	0,01	-0,07	-0,10	-6,48	-5,68	Fissuração partindo dos dois pontos de fixação até a parte central da mão-francesa e iminência de ruína
500	-	-	-	-	-	O ensaio foi interrompido com 400N.
600	-	-	-	-	-	O ensaio foi interrompido com 400N.
700	-	-	-	-	-	O ensaio foi interrompido com 400N.
800	-	-	-	-	-	O ensaio foi interrompido com 400N.
Após 24h	-	-	-	-	-	O ensaio foi interrompido com 400N.
900	-	-	-	-	-	O ensaio foi interrompido com 400N.
1000	-	-	-	-	-	O ensaio foi interrompido com 400N.
Após 24h	-	-	-	-	-	O ensaio foi interrompido com 400N.
1100	-	-	-	-	-	O ensaio foi interrompido com 400N.
1200	-	-	-	-	-	O ensaio foi interrompido com 400N.
15 min s/carga (dhr)	-0,02	-0,03	-0,01	-	-	Face da aplicação da carga retorna ao estado original, fissuração não perceptível à inspeção visual. Não foi possível verificar os deslocamentos horizontais residuais dos relógios R4 e R5 em virtude da retirada dos relógios pelo risco de queda da mão-francesa.

Fonte: Elaboração própria

Para o Elemento 1, o ensaio prosseguiu somente até a aplicação da carga de 400 N, uma vez que, após a aplicação desta, verificaram-se fissuras, surgindo a partir dos pontos de fixação no sentido oposto à mão-francesa, como ilustra a

Figura 87, avançando no seu sentido central até a interrupção do ensaio (ver Figura 88).

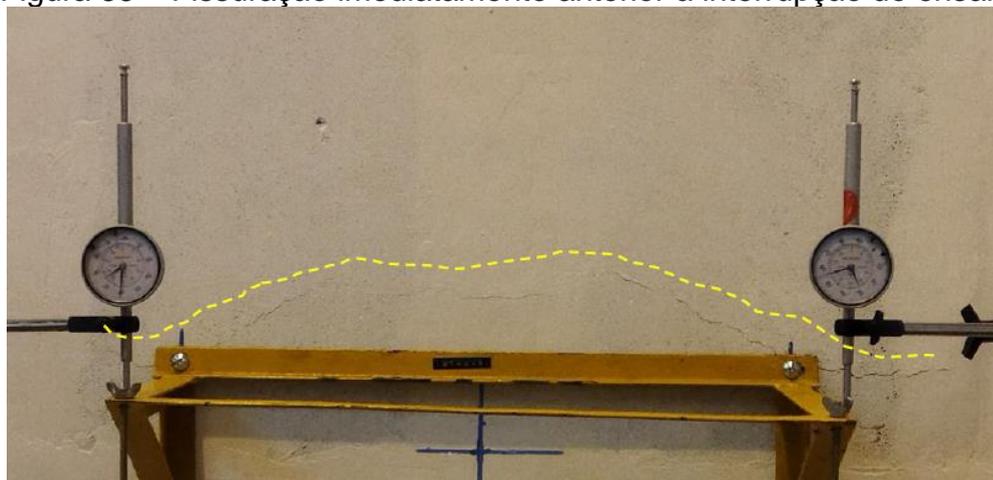
A interrupção do ensaio e remoção dos aparatos foi, então, a medida adotada no momento, de modo que estes não fossem danificados se, porventura, a placa viesse a se projetar para frente causando uma possível queda dos dispositivos.

Figura 87 – Primeira ocorrência de fissura (carga de 400 N)



Fonte: Elaboração própria

Figura 88 – Fissuração imediatamente anterior à interrupção do ensaio



Fonte: Elaboração própria

Uma vez que o critério da norma determina que, quando carregado o sistema não pode apresentar fissuras, deslocamentos horizontais instantâneos (d_{hi}), deslocamentos horizontais residuais (d_{hr}), lascamentos ou rupturas, nem permitir o arrancamento do dispositivo de fixação e seu esmagamento; nota-se que o resultado não foi compatível com o critério, uma vez que, com a carga de 400 N, se iniciou a fissuração da placa de concreto celular com CA.

Pode-se dizer, portanto, que o Elemento 1 não possui resistência à solicitação de peças suspensas acima de 300N ou 150N por ponto, apresentando desempenho insatisfatório para a carga de 800N (carga apontada pela normativa para o desempenho mínimo). Entretanto, a fim de manter um coeficiente de segurança, a carga estimada às placas de concreto é de 200N ao todo ou 100N por ponto (limite para um desempenho satisfatório do produto).

4.3.2 Resistência a impactos de corpo mole

4.3.2.1 Aplicação no ponto A (vão entre os montantes)

No ponto A, o ensaio avançou somente até a energia de impacto de 120 J, uma vez com esta energia houve a ruptura dos componentes. Ademais, já na primeira energia de impacto (60 J), houve o surgimento da primeira fissura (ver Figura 89).

A Tabela 28 apresenta os deslocamentos horizontais instantâneos (d_{hi}) e residuais (d_{hr}) aferidos para cada uma das energias de impacto utilizadas. Nota-se que, para a energia de 60 J, os valores de d_{hi} e d_{hr} foram, respectivamente, de 7,90 mm e 0,00 mm, ambos os valores inferiores ao limite estabelecido pela NBR 15.575-4 ($d_{hr} \leq 40$ mm e $d_{hr} \leq 4$ mm). Todavia, além de atender a tais critérios de deslocamento, também não pode haver a ocorrência de falhas (estado-limite de serviço), fato este que não foi observado em razão do surgimento de fissuras. Ademais, de maneira análoga, a ruína também não é permitida, fato este observado para a energia de impacto de 120 J.

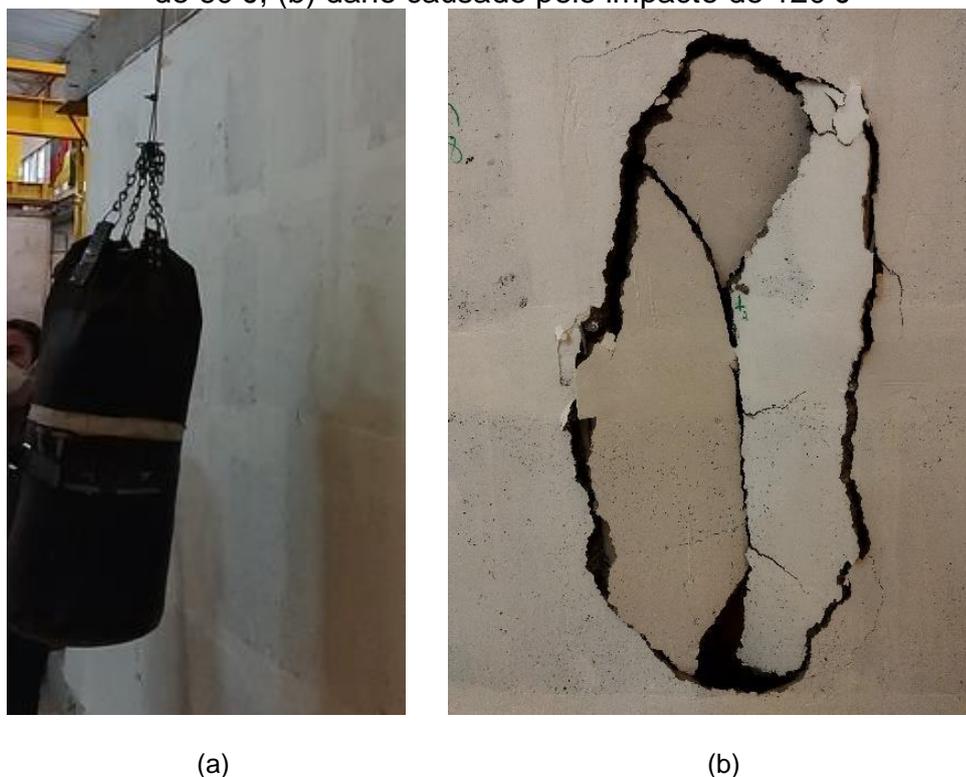
É importante destacar que os valores utilizados para comparação foram aqueles relativos aos sistemas classificados como leves, isto é, $G < 600$ N/m², casos estes em que a normativa é menos conservadora (ver Figura 75). Portanto, para o ponto A (impacto entre os montantes, solicitando apenas a placa de concreto celular com CA), o desempenho do elemento foi insatisfatório.

Tabela 28 – Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole com impactos no ponto A

Energia (J)	Altura equivalente (cm)	d_{hi} (mm)	d_{hr} (mm)	Descrição dos danos
60	15	7,90	0,00	Fissura vertical próxima ao ponto A
120	30	9,70	0,00	Ruína dos componentes de concreto celular com CA

Fonte: Elaboração própria

Figura 89 – Elemento 1 após impactos no ponto A: (a) face do sistema após impacto de 60 J; (b) dano causado pelo impacto de 120 J



Fonte: Elaboração própria

4.3.2.2 Aplicação no ponto B (montante)

Para o ponto B, embora a NBR 15.575-4 indique a avaliação somente das energias de impacto de 60 J e 120 J para vedações internas sem função estrutural, optou-se por dar prosseguimento no ensaio para mais outras duas energias (180 J e 240 J), uma vez que não foram observados danos nas energias de impacto iniciais, conforme aponta a Tabela 29.

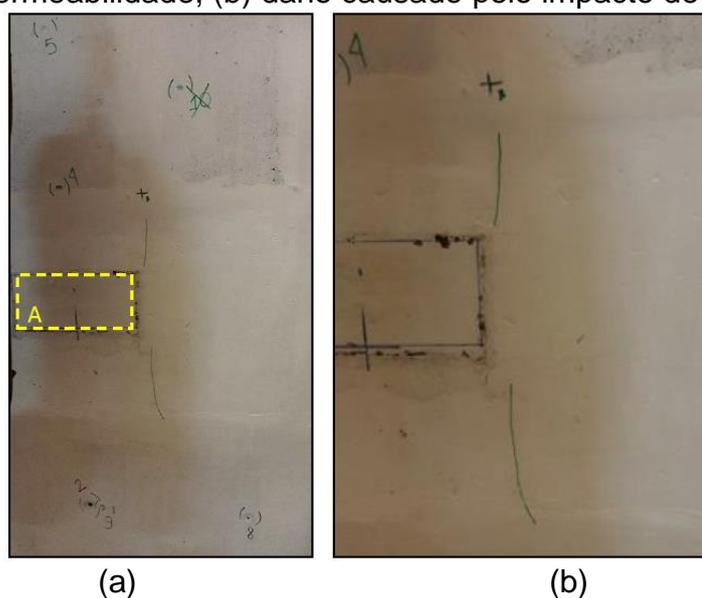
Tabela 29 – Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole com impactos no ponto B

Energia (J)	Altura equivalente (cm)	d_{hi} (mm)	d_{hr} (mm)	Descrição dos danos
60	15	8,10	0,00	Sem danos
120	30	15,30	1,10	Sem danos
180	45	18,80	2,95	Fissuras verticais próximas da região na qual houve a tentativa de realizar o ensaio de permeabilidade.
240	60	21,00	3,25	Abertura das fissuras existentes.

Fonte: Elaboração própria

Para a energia de 180 J, foram observadas as primeiras fissuras (ver Figura 90), tendo estas ocorrido justamente a partir dos vértices da região na qual, inicialmente, tentou-se realizar o ensaio de permeabilidade, isto é, no ponto de acoplamento do aparato (detalhe A). Notou-se, ainda, que, após o impacto de 240 J, houve um aumento da espessura de tais fissuras.

Figura 90 – Elemento 1 após impactos no ponto B: (a) região fragilizada pelo ensaio de permeabilidade; (b) dano causado pelo impacto de 180 J



Fonte: Elaboração própria

No que tange as energias de impacto de 60 J e 120 J (aquelas que, originalmente, carecem de avaliação para o tipo de elemento avaliado – SVVI) tanto os deslocamentos ficaram abaixo dos limites ($d_{hi} \leq 40$ mm e $d_{hr} \leq 4$ mm) quanto o critério de não ocorrência de falhas ou ruína também foi atendido. Portanto, para o ponto B (impacto no montante, não solicitando diretamente a placa de concreto celular com CA), o desempenho foi satisfatório, isto é, o nível mínimo foi atendido.

4.3.3 Resistência a impactos de corpo duro

A Tabela 30 apresenta os resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para a energia de 2,5 J. Como pode ser observado, foi possível coletar a profundidade de todas as mossas (ver Figura 91) e nenhum tipo de falha foi detectada.

Tabela 30 – Resultado do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para energia de 2,5 J

Corpo duro (g)	Altura equivalente (cm)	Impactos	Profundidade das mossas (mm)	Descrição de sinais de falhas
500	50	1	1,35	Nenhuma ocorrência
		2	1,60	Nenhuma ocorrência
		3	1,50	Nenhuma ocorrência
		4	1,15	Nenhuma ocorrência
		5	1,80	Nenhuma ocorrência
		6	2,00	Nenhuma ocorrência
		7	2,25	Nenhuma ocorrência
		8	1,00	Nenhuma ocorrência
		9	1,90	Nenhuma ocorrência
		10	1,70	Nenhuma ocorrência

Fonte: Elaboração própria

Figura 91 – Aspecto das mossas para energia de 2,5J (cor verde)



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 31 apresenta os resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para a energia de 10,0 J.

Tabela 31 – Resultado do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para energia de 10,0 J

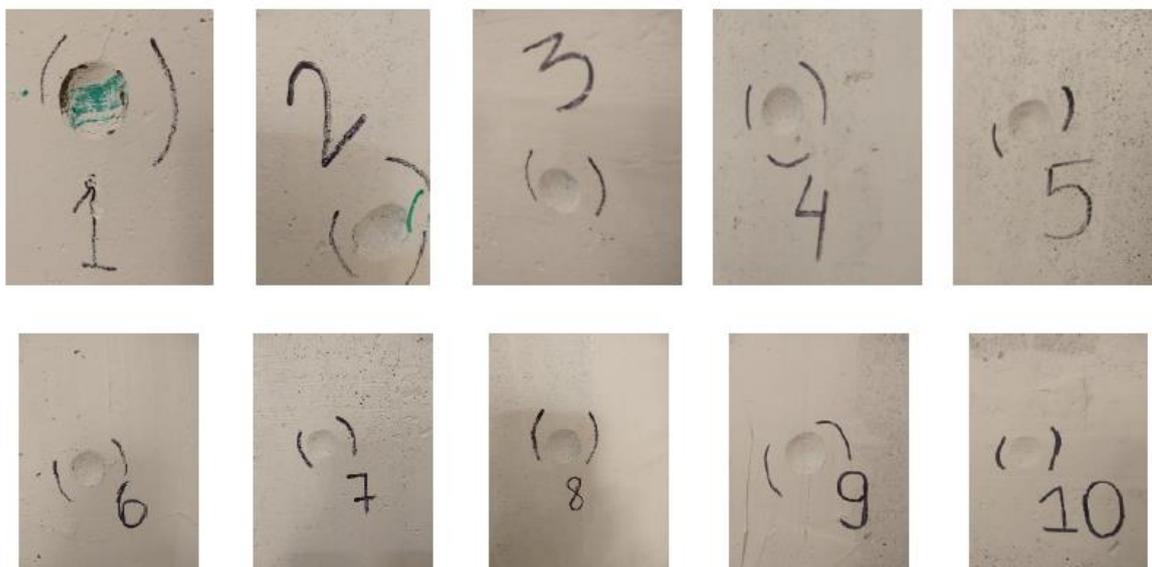
Corpo duro (g)	Altura equivalente (cm)	Impactos	Profundidade das mossa (mm)	Descrição de sinais de falhas
1000	100	1	-	Traspasse
		2	-	Traspasse
		3	-	Traspasse
		4	-	Traspasse
		5	-	Traspasse
		6	5,30	Traspasse
		7	4,50	Fissuras atrás da placa
		8	-	Traspasse
		9	5,10	Sem danos
		10	2,60	Sem danos

Fonte: Elaboração própria

Como pode ser observado, sob a ação de impactos de corpo duro para a energia de 10J, houve o traspasse (rompimento da placa). Contudo, inicialmente, mesmo havendo o rompimento no local de impacto, a camada de pintura permaneceu até um dado momento (ver Figura 92). Porém, posteriormente, tal camada foi perfurada, fato este que impediu a medição das mossa nestes pontos, como ilustra a Figura 93 (a).

Com a finalidade de coletar mais informações acerca do comportamento do elemento frente ao ensaio, instalou-se uma janela de inspeção no lado oposto ao ensaiado (lado externo), a qual possibilitou verificar a fissuração das placas, como ilustra a Figura 93 (b). Ademais, dois pontos (impactos 9 e 10) não apresentaram danos, estando estes localizados sobre as juntas de união das placas, região que apresentava uma maior quantidade de massa única que o restante do elemento.

Figura 92 – Aspecto das mossas para energia de 10,0J (cor preta)



Fonte: Elaboração própria

Por comparação, então, às características técnicas apresentadas pela normativa em questão, pode-se notar que, para a energia de impacto de 2,5 J, o elemento apresentou desempenho satisfatório para o nível mínimo, por sua vez, para a energia de impacto equivalente a 10 J, este desempenho foi insatisfatório.

Figura 93 – (a) Mossas perfuradas pela ponta do paquímetro; (b) Fissuração do lado externo do Elemento 1



(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria

4.3.4 Permeabilidade à água

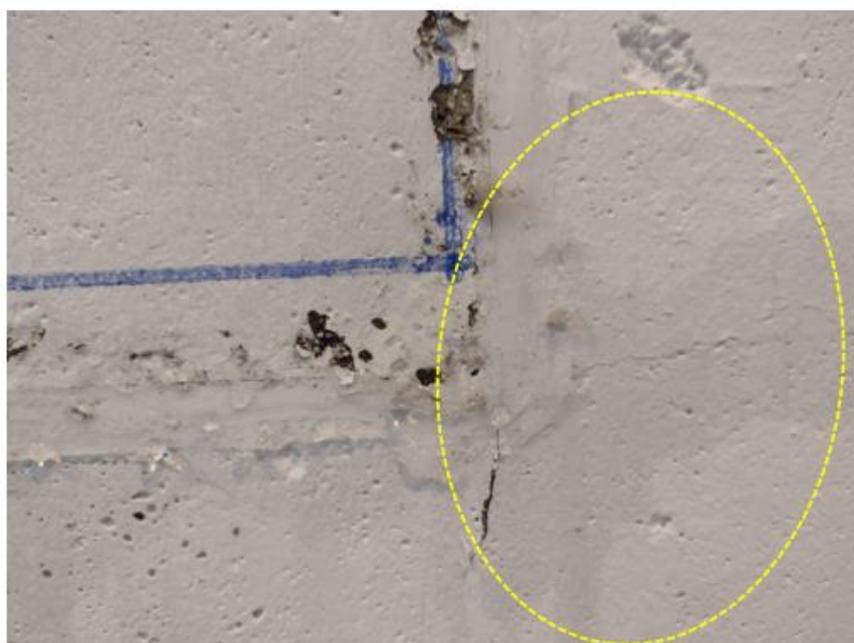
Para o Elemento 1, não foi possível realizar o ensaio de permeabilidade à água, uma vez que, após a fixação do aparado necessário (câmara com formato de caixa contendo, no seu perímetro, uma moldura de acoplamento), a placa cimentícia fissurou, acarretando no fluxo de água direto para a outra face, como pode ser observado na Figura 94, Figura 95 e Figura 96.

Figura 94 – Ponto de acoplamento da câmara (linha na cor azul)



Fonte: Elaboração própria

Figura 95 – Zoom fissura canto esquerdo com destaque para ponto de encharcamento no local da fissura



Fonte: Elaboração própria

Figura 96 – Zoom fissura canto direito com destaque para ponto de encharcamento no local da fissura



Fonte: Elaboração própria

É necessário pontuar que todos os ensaios foram realizados previamente à publicação da norma de Light Steel Framing, a saber NBR 16.970 (ABNT, 2022), período este então em que o sistema ainda era considerado inovador.

4.4 EED – ALVENARIA COM BLOCOS LEVES

4.4.1 Blocos leves com CA

4.4.1.1 Resistência às solicitações de peças suspensas

Por se tratar de um sistema inovador, o carregamento foi mais conservador no início do ensaio. Em cada etapa, era feita a mediação do deslocamento horizontal instantâneo logo após o carregamento e após 24 horas carregado.

À primeira carga foi de 600 N, após 24 horas, foram carregados mais 200 N, atingindo os 800 N. Decorridas 24 horas com 800 N, carregou-se mais 200 N, atingindo 1000 N. Esperou-se mais 24 horas com carga de 1000N, a carga foi retirada e, após 15 minutos, descarregado, mediu-se o deslocamento horizontal residual (d_{hr}).

A Tabela 32 apresenta o resultado peso x etapa de carregamento, os deslocamentos horizontais instantâneo (d_{hi}) para cada relógio comparador e as observações em cada etapa de carregamento. É válido lembrar que o resultado do R2 é o parâmetro de análise quanto aos limites de deslocamentos horizontais instantâneo (d_{hi}) e residual (d_{hr}).

De acordo com os resultados métricos e de inspeção no protótipo, constatou-se que o deslocamento horizontal instantâneo (d_{hi}) máximo no relógio “R2” foi igual a 0,29 milímetros e o deslocamento horizontal residual (d_{hr}) foi de 0,15 milímetros. Ambos os resultados ficam abaixo do estabelecido pela ABNT NBR 15.575-4:2021 ($d_{hi} \leq h/500$ e $d_{hr} \leq h/2500$), em que, para uma altura do SVVI de 2500 milímetros, tem-se que $d_{hi} \leq 5$ mm e $d_{hr} \leq 1$ mm como limites de aceitabilidade dos deslocamentos para o sistema.

Ademais, na inspeção geral do SVVI, após cada carregamento até o final do ensaio, não foi observada a ocorrência de danos. Dessa forma, o sistema obteve o desempenho mínimo preconizado pela ABN NBR 15.575-4:2021 no que tange a resistência às solicitações de peças suspensas.

A posição referencial é aquela do relógio comparado posicionado no corpo de prova antes do carregamento. A partir do carregamento, os relógios avançam ou retornam a sua posição inicial. Dessa forma, avanços são registrados com sinal negativo e retornos com sinal positivo.

Tabela 32 – Resultado do ensaio de resistência do Elemento 1 às solicitações de peças suspensas

Peso (N)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)	Observações
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Nenhuma ocorrência
100	0,00	0,00	-0,01	-0,03	-0,03	Nenhuma ocorrência
200	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,08	Nenhuma ocorrência
300	0,00	0,00	-0,01	-0,10	-0,13	Nenhuma ocorrência
400	0,00	-0,02	-0,04	-0,14	-0,19	Nenhuma ocorrência
500	0,00	-0,03	-0,05	-0,18	-0,25	Nenhuma ocorrência
600	0,00	-0,04	-0,07	-0,22	-0,31	Nenhuma ocorrência
Após 24 h	-0,04	-0,08	-0,14	-0,30	-0,36	Nenhuma ocorrência
700	-0,03	-0,07	-0,12	-1,34	-0,38	Nenhuma ocorrência
800	-0,04	-0,07	-0,12	-0,37	-0,41	Nenhuma ocorrência
Após 24h	-0,05	-0,10	-0,18	-0,44	-0,47	Nenhuma ocorrência
900	0,96	-0,09	-0,16	-0,48	-0,49	Nenhuma ocorrência
1000	0,96	-0,10	-0,17	-0,52	-0,52	Nenhuma ocorrência
Após 24h	-0,19	-0,29	-0,46	-0,86	-0,77	Nenhuma ocorrência
15 min s/carga (dhr)	-0,14	-0,15	-0,23	-0,47	-0,42	Nenhuma ocorrência

Fonte: Elaboração própria

4.4.1.2 Resistência a impactos de corpo mole

Os resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole foram registrados a partir de valores de deslocamentos horizontais instantâneos (d_{hi}) e residuais (d_{hr}), bem como, pela observação dos danos causados no corpo de prova em cada ponto de impacto.

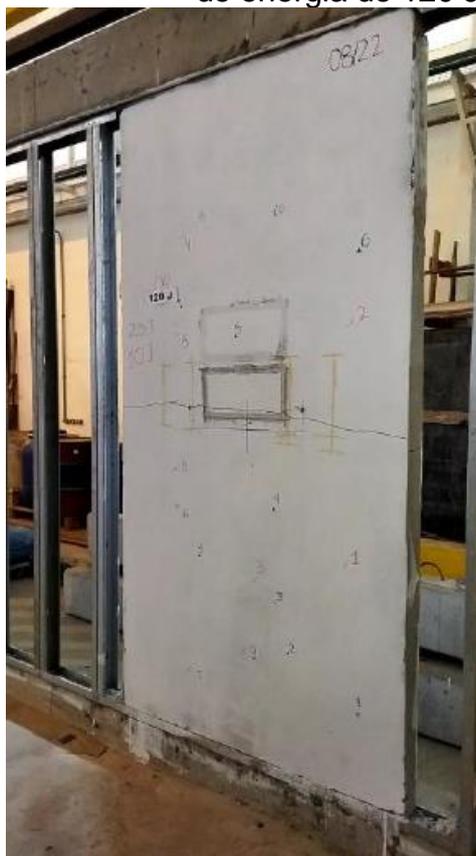
Foram realizados dois impactos (energias de 60 J e 120 J), sendo os deslocamentos horizontais apresentados na Tabela 34. A Figura 97 mostra o registro do dano no impacto com energia de 120 J.

Tabela 33 – Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole com impactos no ponto A

Energia (J)	Altura equivalente (cm)	d_{hi} (mm)	d_{hr} (mm)	Descrição dos danos
60	15	0,00	0,00	-
120	30	4,30	2,30	Fissura transversal

Fonte: Elaboração própria

Figura 97 – Elemento 2 após impactos no ponto A: (a) dano causado pelo impacto de energia de 120 J; (b) zoom do dano



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

De acordo com os resultados métricos e de inspeção no protótipo, constatou-se que, para energia de 60 J, tanto o deslocamento horizontal instantâneo (d_{hi}) quanto o deslocamento horizontal residual (d_{hr}) foram de 0,0 mm. Os resultados ficaram abaixo dos limites estabelecidos na ABNT NBR 15.575 – Parte 4:2021, em que $d_{hi} \leq (h/125) = 20$ mm e $d_{hr} \leq (h/625) = 4$ mm, sendo h a altura do corpo de prova.

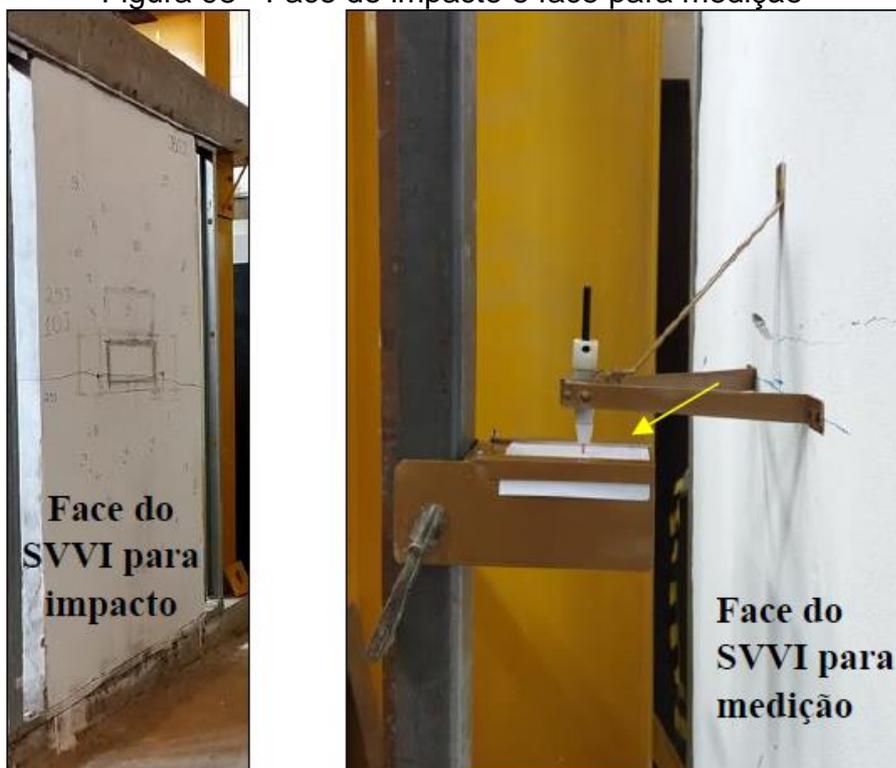
Todavia, para a energia de 120J, após o impacto, foi constatada, na inspeção visual, uma falha caracterizada por uma fissura transversal no centro do corpo de prova, que compromete a utilização do SVVI, causando instabilidade do SVVI quando submetido a essa energia.

Portanto, em relação à resistência a impactos de corpo mole, o sistema não obteve desempenho satisfatório, uma vez que houve uma falha que comprometeu a estabilidade do sistema para o impacto com energia de 120 J.

4.4.1.3 Resistência a impactos de corpo duro

O resultado do ensaio é por meio da mensuração das mossas e da inspeção do SVVI quanto a possíveis danos. A Figura 98 ilustra as faces de impacto e medição.

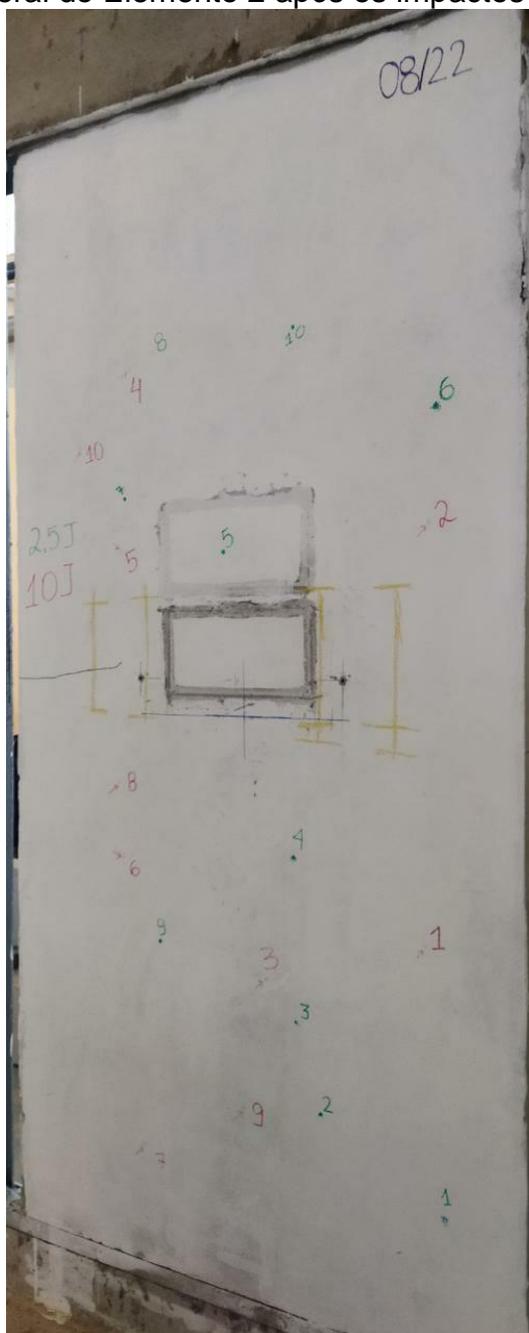
Figura 98 - Face de impacto e face para medição



Fonte: Elaboração própria

A Figura 99 ilustra uma visão geral do Elemento 2 com a identificação dos pontos de aplicação do ensaio e a Figura 100 ilustra o processo de medição da profundidade das mossas.

Figura 99 – Vista geral do Elemento 2 após os impactos de 2,5 J e 10 J



Fonte: Elaboração própria

Figura 100 – Exemplo de medição da profundidade das mossas



Fonte: Elaboração própria

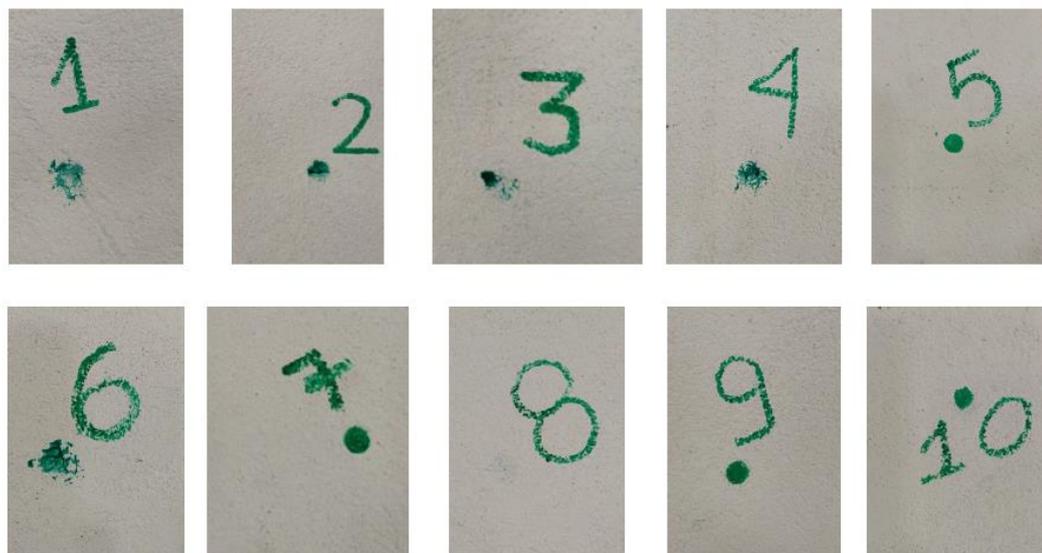
A Tabela 34 apresenta os resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para a energia de 2,5 J. Como pode ser observado, foi possível coletar a profundidade de todas as mossas (ver Figura 101) e nenhum tipo de falha foi detectada.

Tabela 34 – Resultado do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para energia de 2,5 J

Corpo duro (g)	Altura equivalente (cm)	Impactos	Profundidade das mossas (mm)	Descrição de sinais de falhas
500	50	1	0,80	Nenhuma ocorrência
		2	0,90	Nenhuma ocorrência
		3	0,70	Nenhuma ocorrência
		4	1,10	Nenhuma ocorrência
		5	0,90	Nenhuma ocorrência
		6	0,60	Nenhuma ocorrência
		7	0,90	Nenhuma ocorrência
		8	0,90	Nenhuma ocorrência
		9	1,15	Nenhuma ocorrência
		10	0,80	Nenhuma ocorrência

Fonte: Elaboração própria

Figura 101 – Aspecto das mossas para energia de 2,5J



Fonte: Elaboração própria

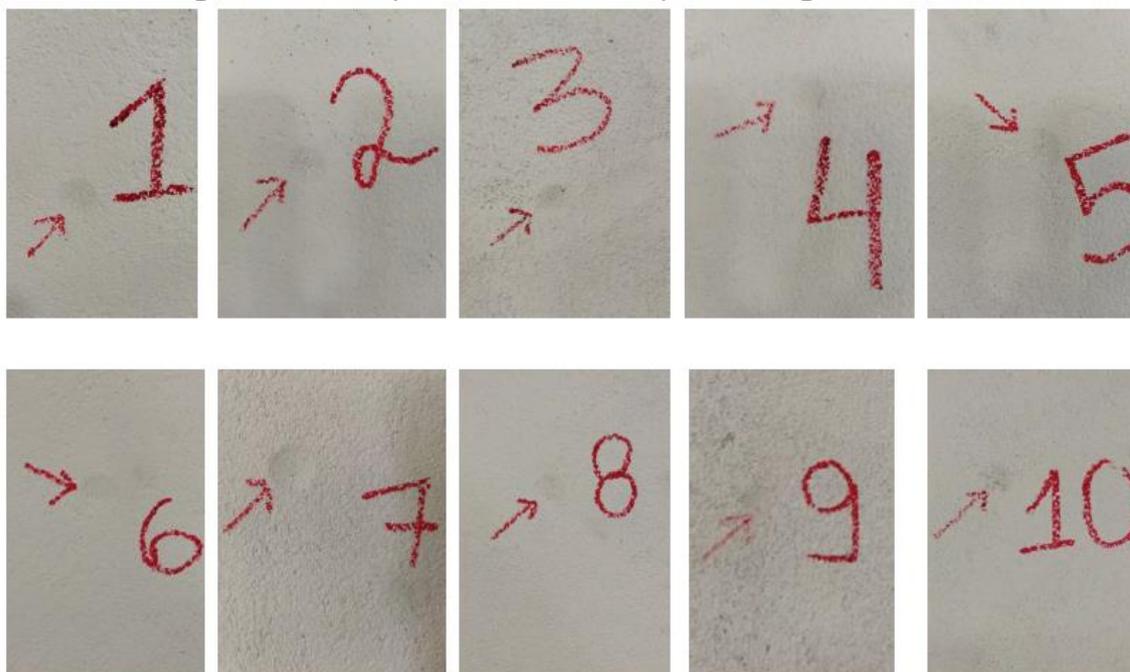
A Tabela 35 apresenta os resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para a energia de 10,0 J e a Figura 102 mostra o aspecto das mossas para a mesma energia de impacto.

Tabela 35 – Resultado do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro energia de 10,0 J para o Elemento 2

Corpo duro (g)	Altura equivalente (cm)	Impactos	Profundidade das mossas (mm)	Descrição de sinais de falhas
1000	100	1	1,10	Nenhuma ocorrência
		2	1,20	Nenhuma ocorrência
		3	1,35	Nenhuma ocorrência
		4	1,40	Nenhuma ocorrência
		5	1,55	Nenhuma ocorrência
		6	1,45	Nenhuma ocorrência
		7	1,95	Nenhuma ocorrência
		8	1,70	Nenhuma ocorrência
		9	1,70	Nenhuma ocorrência
		10	1,50	Nenhuma ocorrência

Fonte: Elaboração própria

Figura 102 – Aspecto das mossa para energia de 10,0J



Fonte: Elaboração própria

De acordo com os resultados métricos e de inspeção no protótipo, os resultados mostram que a profundidade de moessa máxima, para energia de 2,5 J, foi de 1,15 mm e, para energia de 10 J, foi de 1,95 mm. Ambos os resultados atendem o estabelecido pela ABNT NBR 15.575-4:2021, isto é, na energia de 2,5 J, não deve ter ocorrência de falhas e, na energia de 10 J, não deve ter ocorrência de ruína, como ruptura ou traspassamento. Ademais, na inspeção geral do sistema após cada energia (2,5 J e 10 J), não foi observada a ocorrência de danos. Em face de tais resultados, no que tange a resistência a impactos de corpo duro, o sistema atendeu ao desempenho mínimo.

Todavia, no anexo F da NBR 15.575-4 (ABNT, 2021), a normativa traz algumas informações adicionais quanto ao atendimento a outros níveis de desempenho, isto é, níveis intermediário e superior. A Figura 103 ilustra tais parâmetros.

Como pode ser observado na Figura 103, para atender ao nível superior, os parâmetros são a não ocorrência de falhas e profundidade da moessa inferior a 2,0 mm, para a energia de 2,5 J, e a não ocorrência de ruptura nem traspasse para a energia de 10,0 J. Uma vez que todos esses parâmetros foram atendidos, constata-se que, frente ao ensaio de impactos de corpo duro, o Elemento 2 alcançou o desempenho superior.

Figura 103 - Parâmetros para atendimento aos níveis intermediário e superior frente ao ensaio de impactos de corpo duro

Sistema	Energia de impacto de corpo duro J	Critérios de desempenho	Nível de desempenho
Vedação vertical com ou sem função estrutural	2,5	Não ocorrência de falhas	M
	10	Não ocorrência de ruptura nem traspasse	
	2,5	Não ocorrência de falhas Profundidade da moosa $p \leq 2,0$ mm	I; S
	10	Não ocorrência de ruptura nem traspasse	

Fonte: NBR 15.575-4 (ABNT, 2021)

4.4.1.4 Permeabilidade à água

A Figura 104 ilustra a configuração de ensaio do Elemento 2 frente à permeabilidade à água e a Tabela 36, os resultados coletados.

Figura 104 – Configuração de ensaio do Elemento 2 frente à permeabilidade à água



Fonte: Elaboração própria

Tabela 36 – Volume de água infiltrado durante a realização do ensaio de permeabilidade à água

Período	Volume infiltrado (cm³)
0 minutos	0
30 minutos	56
1 hora	42
2 horas	58
4 horas	65
6 horas	49

Fonte: Elaboração própria

Observando a Tabela 36, nota-se que, logo nos primeiros 30 minutos de ensaio, o volume de água infiltrado foi superior ao estipulado pelo critério 10.2.1 da NBR 15.575-4 (ABNT, 2021), que é de, no máximo, 3,0 cm³. Todavia, o ensaio foi prolongado a fim de serem coletados mais dados e conhecer-se melhor a vedação em análise.

Portanto, o elemento não alcançou o desempenho mínimo exigido em norma, não sendo capaz de impedir a infiltração de água, por meio de suas faces, simulando situações de sua inserção em ambientes de áreas molháveis e molhadas.

4.4.1.5 Estanqueidade à água

Embora os elementos avaliados possuam a aplicação como vedações verticais internas, optou-se por realizar os ensaios de Ação do Calor e Choque térmico, e Estanqueidade à Água (destinados aos SVVE) para avaliar o comportamento do produto frente a solicitações próprias de vedações presentes em ambientes externos e investigar as potencialidades de utilização.

A Figura 105 ilustra a configuração do ensaio de estanqueidade à água da chuva. As dimensões do corpo de prova eram de 1,20 de largura e 2,60 m de comprimento, totalizando uma área de 3,12 m².

Considerando a área de 3,12 m² e os percentuais normativos, a área máxima de manchas de umidade na face oposta após a incidência de água (conclusão do ensaio) deverá ser de 0,312 m², considerando-se a aplicação em edificações térreas e 0,156 m², considerando a aplicação em edificações com mais de um pavimento.

Figura 105 – Execução do ensaio de estanqueidade à água da chuva



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 37 apresenta os resultados coletados. Nota-se que, tratando-se de edificações térreas, o elemento apresentou comportamento satisfatório frente ao ensaio de Estanqueidade à água da chuva, ou seja, a área molhada na face interna foi menor que o percentual máximo permitido ($0,234 \text{ m}^2 < 0,312 \text{ m}^2$). Pode-se dizer que, uma vez que atendeu ao critério, contudo, apresentou manchas, obteve-se o desempenho mínimo no ensaio.

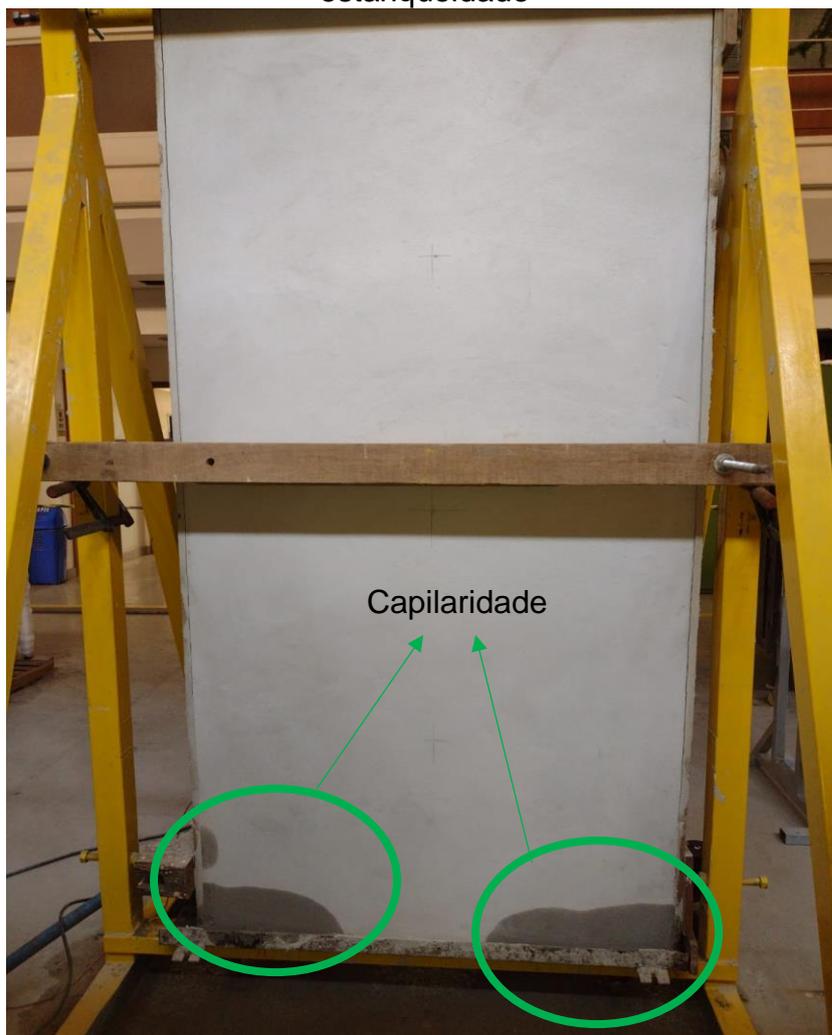
Tabela 37 - Resultado ensaio de estanqueidade à água da chuva

Ensaio	Área molhada na face interna (m ²)	Alterações observadas	Máxima área molhada permitida (m ²)		
			Edificação térrea	Edificação com mais de um pavimento	
Antes do Choque térmico	-	- Sem danos - Sem alterações significativas			
Depois do Choque térmico	0,234	07:00	- Fissuras em ambas as faces	0,312	0,156
		08:00	- Dois pontos de umidade da face oposta		
		09:00	- Pontos de umidade aumentando de tamanho		
		10:00	- Surgimento de novos pontos de umidade - Pontos existentes aumentando de tamanho		
		11:00	- Aumento da área dos pontos de umidade		
		12:00	- Aumento da área dos pontos de umidade		
		13:00	- Aumento da área dos pontos de umidade		
		14:00	- Encerramento do ensaio - Aferição da área da mancha de umidade		

Fonte: Elaboração própria

A Figura 106 ilustra a face interna do corpo de prova, isto é, a face oposta à incidência de água. Nota-se que foram observadas manchas somente na base do corpo de prova, ou seja, a água que traspassou o componente não foi decorrente de infiltração, mas de capilaridade. Tal circunstância é acarretada pela falta de impermeabilização da base, não de problemas dos elementos que compõem o Elemento 2.

Figura 106 – Face de verificação das manchas de umidade no ensaio de estanqueidade



Fonte: Elaboração própria

4.4.1.1 Ação do calor e choque térmico

A Tabela 38 apresenta os resultados coletados no ensaio de ação do calor e choque térmico. Para fins de nomenclatura, d_{hi} refere-se ao deslocamento horizontal instantâneo aferido após 45 minutos de estabilização da temperatura em $80\pm 3^{\circ}\text{C}$, d_{hr} é o deslocamento residual medido após a etapa de resfriamento até a temperatura de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ e, por fim, d_h é o deslocamento horizontal total sofrido pela parede em cada um dos ciclos. O tempo de resfriamento do corpo de prova variou entre 9 e 17 minutos.

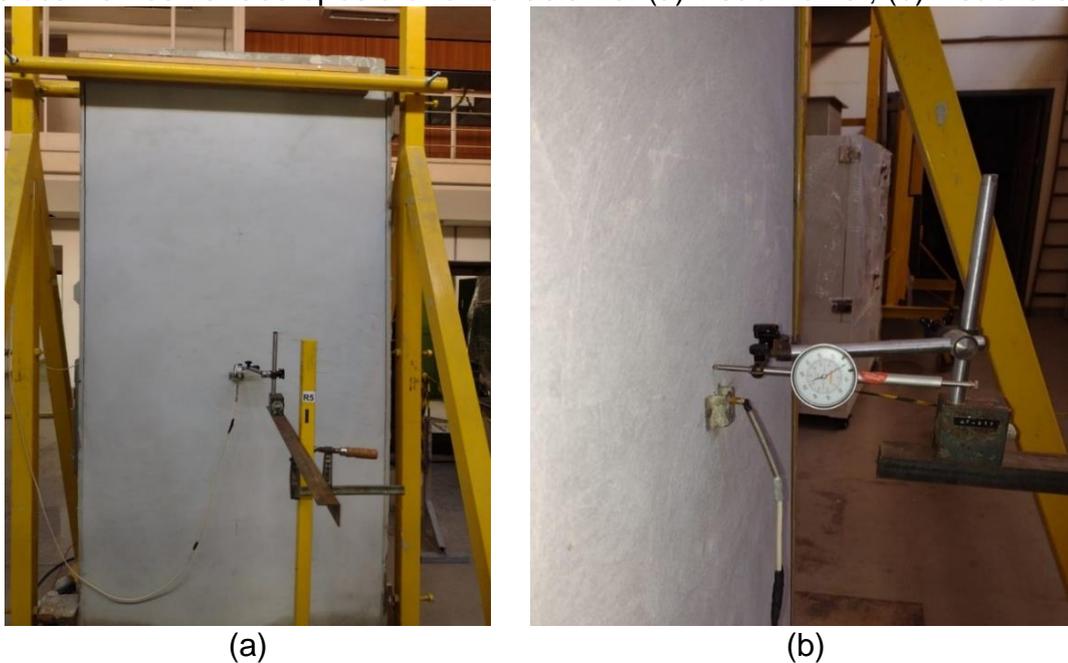
Tabela 38 - Resultados coletados no ensaio de ação de calor e choque térmico

CICLO	d_{hi} (mm)	d_{hr} (mm)	d_h (mm)	OBSERVAÇÕES
1	0,81	1,79	-0,98	-
2	2,58	2,20	0,38	-
3	2,05	1,80	0,25	- Surgimento de fissuras no lado esquerdo central em direção à parte debaixo do elemento;
4	2,12	1,71	0,41	- Avanço das fissuras existentes; - Surgimento de novas fissuras; - Vazamento para a face oposta;
5	2,15	1,60	0,55	- Surgimento de novas fissuras;
6	2,14	2,08	0,06	-
7	2,18	1,78	0,40	- Alongamento de fissuras pré-existentes;
8	1,63	1,60	0,03	- Alongamento de fissuras pré-existentes; - Surgimento de novas fissuras;
9	2,11	1,56	0,55	- Alongamento de fissuras pré-existentes;
10	1,93	1,38	0,55	- Alongamento de fissuras pré-existentes; - Surgimento de novas fissuras;
Altura do corpo de prova = 2600 mm			D_h limite < $h/300$ D_h limite < 8,67 mm	

Fonte: Elaboração própria

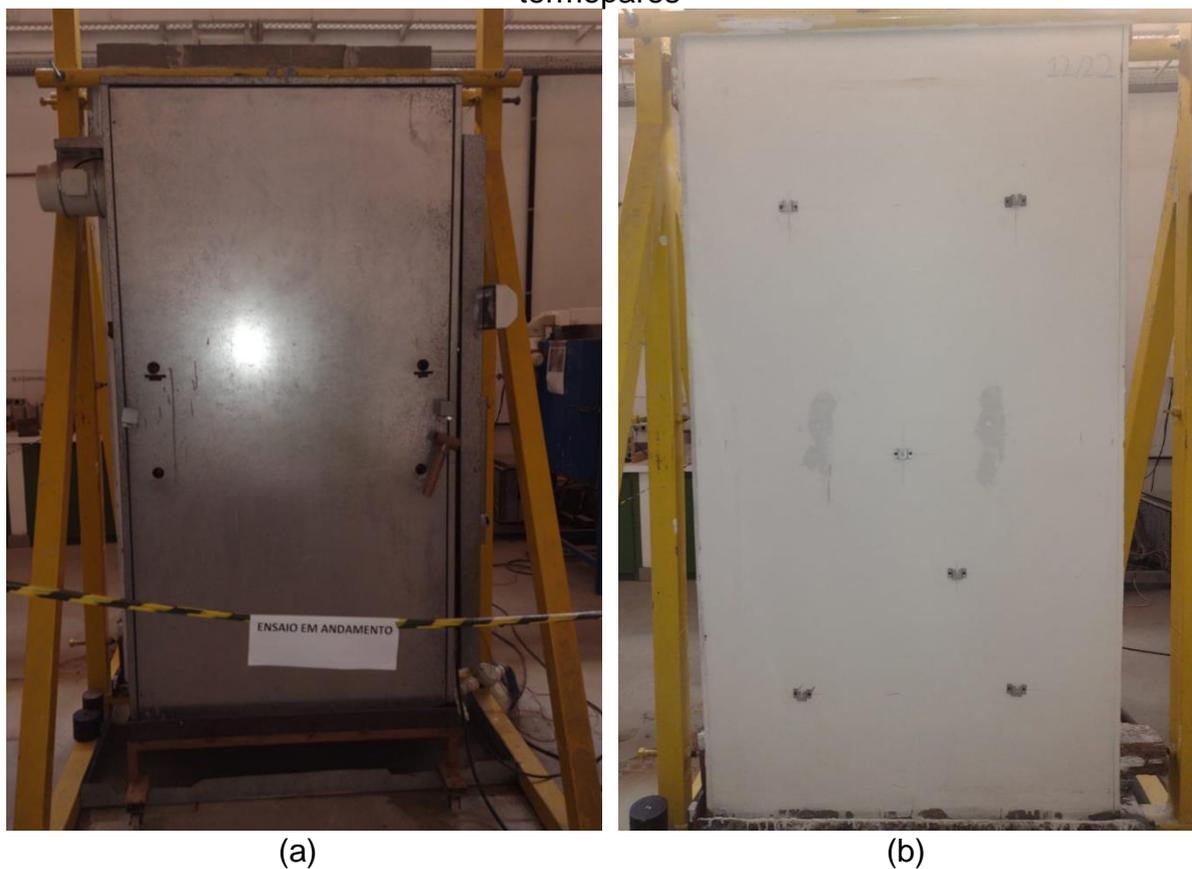
A Figura 107 ilustra o posicionamento do deflectômetro (face oposta à incidência de calor) utilizado para a aferição dos deslocamentos sofridos pelo corpo de prova no transcorrer do ensaio. A Figura 108 ilustra o equipamento utilizado para aquecimento e resfriamento, o qual foi exclusivamente desenvolvido pela equipe técnica do laboratório LEME/UFRGS.

Figura 107 - Posicionamento do defletoômetro utilizado para a coleta dos deslocamentos na face oposta à fonte radiante: (a) visão frontal; (b) visão lateral.



Fonte: Elaboração própria

Figura 108 – Configuração da face externa: (a) câmara utilizada para aquecimento e resfriamento posicionada defronte com o corpo de prova; (b) posicionamento dos termopares



Fonte: Elaboração própria

Como pode ser observado na Tabela 38, o maior deslocamento instantâneo aferido foi de 2,58 mm no segundo ciclo. O parâmetro para atendimento ao desempenho mínimo é que esse deslocamento não seja superior a $h/300$, sendo h a altura do corpo de prova utilizado na averiguação. Uma vez que o Elemento 2 possuía 2,60 m de altura, este parâmetro era de $2600/300$ que resulta em 8,67 mm, como $2,58 \text{ mm} < 8,67 \text{ mm}$, o parâmetro foi satisfeito com sucesso.

Ademais, questões ligadas a danos oriundos do ensaio também tinham que ser avaliadas. Porém, apesar da NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) solicitar que a ocorrência de fissuras, trincas, deslocamentos ou outras deteriorações em ambas as faces do corpo de prova sejam avaliadas durante o ensaio e ao seu término, ela traz tal parâmetro apenas de maneira subjetiva, isto é, não trazendo nenhum parâmetro quantitativo de aceitabilidade nesse sentido, exigindo apenas o registro de possíveis degradações que possam trazer prejuízos.

Nesse sentido, no decorrer do ensaio, foram observadas pequenas fissuras, contanto, não houve o deslocamento da camada de revestimento ou outros danos que, visualmente, fossem severos, bem como, não se identificou a infiltração de água no corpo de prova no ensaio de estanqueidade à água realizado após os 10 ciclos de choque térmico, mesmo havendo a fissuração. Essa avaliação da estanqueidade, após o ensaio de choque térmico, foi uma proposição de Lorenzi (2013) para que o sistema seja avaliado para além da inspeção visual.

4.4.2 Blocos leves sem CA

A fim de realizar uma análise comparativa com a vedação com blocos de concreto celular com CA, realizou-se, também, o ensaio de resistência às solicitações de peças suspensas no Elemento 3 (composto por blocos de concreto celular sem casca de arroz). Para isso, foram ensaiadas ainda duas situações distintas de dispositivos de fixação para a mão-francesa:

- Fixação tipo 1: bucha de expansão convencional com diâmetro de 10,0 mm e parafusos de diâmetro igual a 6,0 mm;
- Fixação tipo 2: bucha de expansão convencional com diâmetro de 8,0 mm e parafusos de diâmetro igual a 5,0 mm.

A fixação do tipo 1 é semelhante àquela utilizada no ensaio do Elemento 2.

4.4.2.1 Resistência às solicitações de peças suspensas

A Figura 109 ilustra a configuração utilizada para realizar o ensaio no Elemento 3, em que é possível observar tanto a face de aplicação da carga quanto a face oposta em que foram instalados os relógios comparadores.

Figura 109 – Configuração do ensaio de solicitações de peças suspensas para o Elemento 3



(a) Face de aplicação da carga



(b) Face oposta à aplicação da carga (relógios comparadores)

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 39 apresenta os resultados obtidos com a utilização do dispositivo de fixação do Tipo 1, informando o peso por etapa, os deslocamentos horizontais instantâneos (d_{hi}) para cada um dos relógios comparadores, bem como, as observações em cada etapa do carregamento.

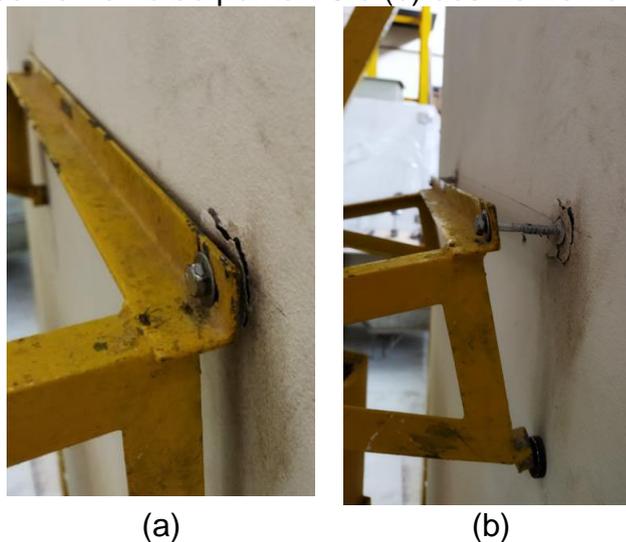
Tabela 39 – Resultado do ensaio de resistência do Elemento 3 às solicitações de peças suspensas para o dispositivo de fixação do Tipo 1

Peso (N)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)	Observações
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Nenhuma ocorrência
100	0,002	0,00	0,01	-1,29	-0,09	Nenhuma ocorrência
200	0,03	0,01	0,01	-1,35	-0,25	Nenhuma ocorrência
300	0,05	0,01	0,03	-1,44	-0,50	Nenhuma ocorrência
400	0,06	0,02	0,05	-1,53	-0,79	Nenhuma ocorrência
500	0,08	0,02	0,05	-1,63	-1,22	Nenhuma ocorrência
600	0,10	0,02	0,07	-1,77	-2,17	Interrupção do ensaio: - Ponto R5: deslizamento do parafuso e bucha permaneceu; - Ponto R4: deslizamento bucha e parafuso, logo após o deslizamento do ponto R5.
Após 24 h						-
700	-	-	-	-	-	-
800	-	-	-	-	-	-
Após 24h	-	-	-	-	-	-
900	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-
Após 24h	-	-	-	-	-	-
15 min s/carga (d _{hr})	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

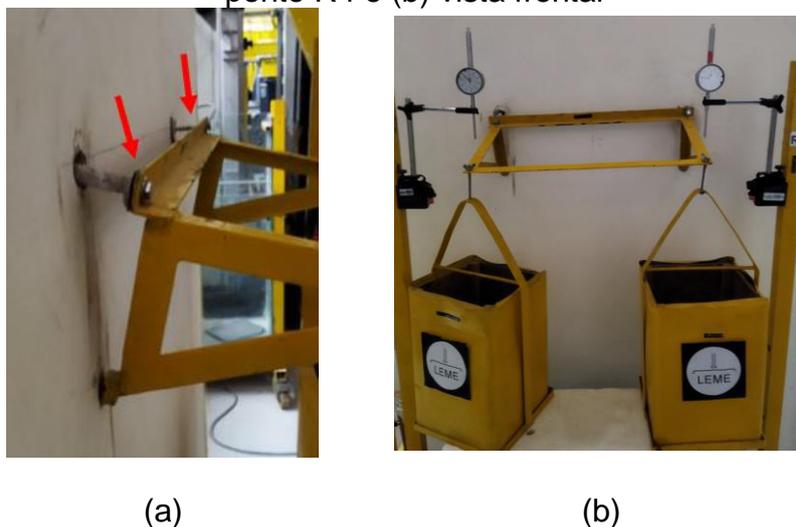
Após a aplicação da carga de 600N, notou-se que o relógio R5 evidenciou um acentuado deslocamento, indicando o início da falha na fixação da mão-francesa (ver Figura 110). O deslizamento ocorreu no ponto do relógio marcador R5, havendo o desprendimento do parafuso em relação à bucha. Em suma, a queda da mão-francesa aconteceu em razão do deslizamento dos dois pontos de fixação. A Figura 111 ilustra bem este momento, sendo que o deslizamento do ponto R4 foi visualmente mais evidente na imagem.

Figura 110 – Detalhes observados no ensaio do dispositivo de fixação do Tipo 1: (a) início do deslizamento do ponto R5 e (b) deslizamento do parafuso



Fonte: Elaboração própria

Figura 111 – Queda da mão-francesa: (a) deslizamento do parafuso e da bucha no ponto R4 e (b) vista frontal



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 40 apresenta os resultados obtidos com a utilização do dispositivo de fixação do Tipo 2, informando o peso por etapa, os deslocamentos horizontais instantâneos (d_{hi}) para cada um dos relógios comparadores, bem como, as observações em cada etapa do carregamento.

Tabela 40 – Resultado do ensaio de resistência do Elemento 3 às solicitações de peças suspensas para o dispositivo de fixação do Tipo 2

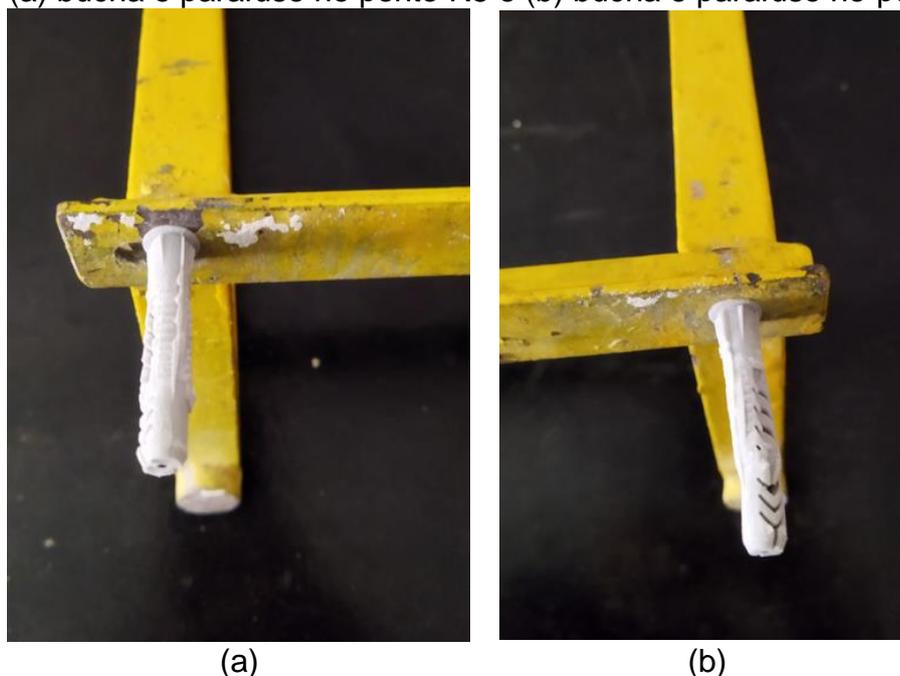
Peso (N)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)	Observações
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Nenhuma ocorrência
100	0,02	0,01	0,00	-1,64	-0,10	Nenhuma ocorrência
200	0,04	0,02	0,00	-1,73	-0,22	Nenhuma ocorrência
300	0,06	0,04	0,01	-1,84	-0,35	Nenhuma ocorrência
400	0,08	0,08	0,03	-1,96	-0,49	Nenhuma ocorrência
500	0,09	0,09	0,02	-2,10	-0,70	Nenhuma ocorrência
600						Interrupção do ensaio: - Ponto R5: deslizamento da bucha e parafuso; - Ponto R4: deslizamento bucha e parafuso, logo após o deslizamento do ponto R5.
700	-	-	-	-	-	-
800	-	-	-	-	-	-
Após 24h	-	-	-	-	-	-
900	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-
Após 24h	-	-	-	-	-	-
15 min s/carga (d _{hr})	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Após a aplicação da carga de 600 N, verificou-se, no ponto R5, um deslizamento do conjunto de fixação (bucha e parafuso). Na sequência, de modo semelhante, houve o deslizamento também do ponto R4, como ilustra a Figura 112.

Dessa forma, os resultados demonstraram que o elemento, com a utilização dos dispositivos de fixação do Tipo 1 e do Tipo 2, não apresenta resistência à solicitação de peças suspensas acima de 500N ou 250N por ponto de fixação. A fim de manter-se um coeficiente de segurança, a carga de uso (carga máxima estimada) deve ser de, no máximo, 250N (total) ou 125N por ponto de fixação, não atingindo, portanto, o desempenho mínimo estipulado pela normativa.

Figura 112 – Aspectos do dispositivo de fixação que levaram ao encerramento do ensaio (a) bucha e parafuso no ponto R5 e (b) bucha e parafuso no ponto R4.



Fonte: Elaboração própria

4.5 ANÁLISE DO DESEMPENHO GLOBAL DOS PRODUTOS DESENVOLVIDOS

Os Quadro 1, Quadro 2 e Quadro 3 apresentam um confronto entre os resultados obtidos e o atendimento ao nível mínimo de desempenho frente aos ensaios experimentais de desempenho para o Elemento 1, Elemento 2 e Elemento 3, respectivamente.

Quadro 1 – Resumo dos resultados obtidos para o Elemento 1

Peça Suspensa	Corpo Mole		Corpo Duro		Permeabilidade
Insatisfatório*	Entre montantes	Insatisfatório	2,5 J	Mínimo	Não foi possível realizar o ensaio para a configuração proposta
	Montante	Mínimo	10,0 J	Insatisfatório	

*Embora tenha apresentado desempenho insatisfatório para a carga de 800N, o SVVI ensaiado tem desempenho satisfatório para 200N ou 100N por ponto (carga de uso a ser especificada).

Fonte: Elaboração própria

Quadro 2 – Resumo dos resultados obtidos para o Elemento 2

Peça Suspensa	Corpo Mole	Corpo Duro	Permeabilidade	Ação do Calor e Choque Térmico	Estanqueidade
Mínimo	Insatisfatório	Superior	Insatisfatório	Mínimo *	Mínimo

*Para este critério não existem outros níveis de desempenho.

Fonte: Elaboração própria

Quadro 3 – Resumo dos resultados obtidos para o Elemento 3

PEÇA SUSPensa
Insatisfatório *
*Embora tenha apresentado desempenho insatisfatório para a carga de 800N, o SVVI ensaiado tem desempenho satisfatório para 250N ou 125N por ponto (carga de uso a ser especificada).

Fonte: Elaboração própria

Analisando, inicialmente, o Quadro 1, observa-se que o desempenho mínimo foi atendido em duas situações, isto é, no ensaio de impactos de corpo mole para o ponto B (no montante metálico) e para a energia de impacto de 2,5 J no ensaio de impactos de corpo duro.

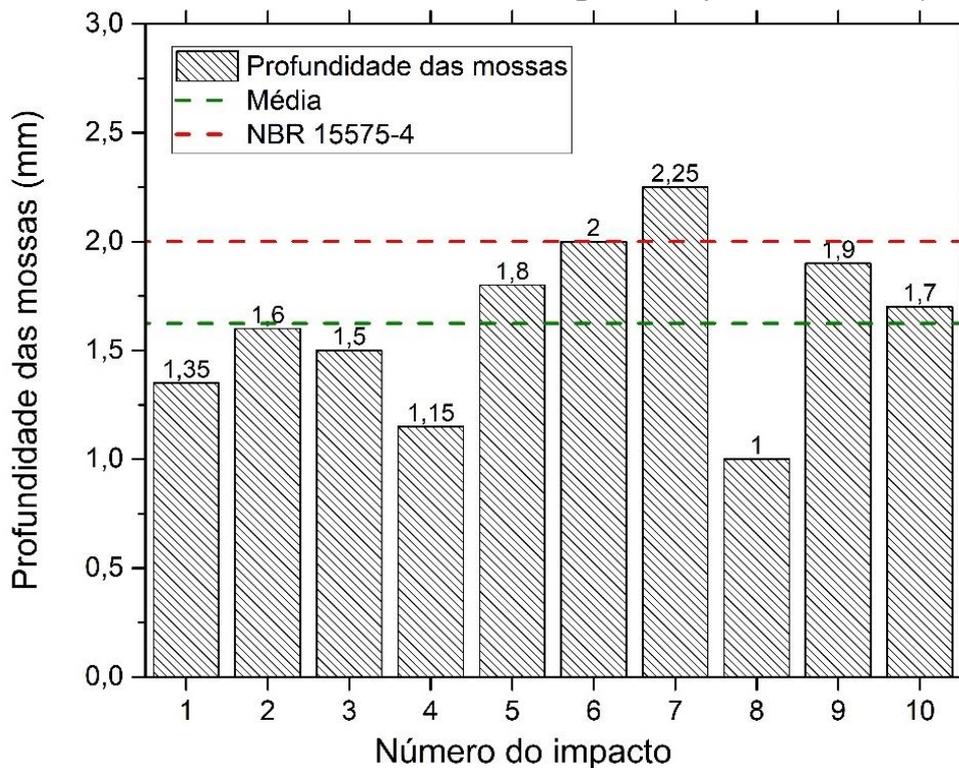
Em relação ao impacto de corpo mole, uma vez que o Elemento 1 atendeu ao desempenho mínimo somente quando este impacto foi realizado na região do montante, isto é, quando as placas de concreto celular com CA não foram diretamente solicitadas, constata-se, portanto, uma inadequabilidade do componente em si em resistir aos impactos. Provavelmente isso tenha ocorrido por questões ligadas à diminuta espessura das placas.

No ensaio de corpo duro para energias mais elevadas (10 J), os fatores que podem ter influenciado são a diminuta espessura das placas (2,0 cm) bem como a ausência da camada de revestimento, o que provocou o transpasse logo no primeiro impacto.

Além disso, embora o Elemento 1 não tenha atendido ao desempenho mínimo quanto às solicitações de peças suspensas, comprovou-se que esse tem resistência até cargas de 20 kg por peça ou 10 kg por ponto, sendo esta, portanto, sua carga máxima de uso (desde que as características de fixação utilizadas sejam mantidas). Uma alternativa adicional poderia ser a inclusão no sistema de elementos de reforço, como os da DATec nº 0,14b ou do Manual para Drywall (apresentados no item 2.1.4 da revisão) ou, ainda, a utilização de duas ou mais chapas para aumentar a resistência.

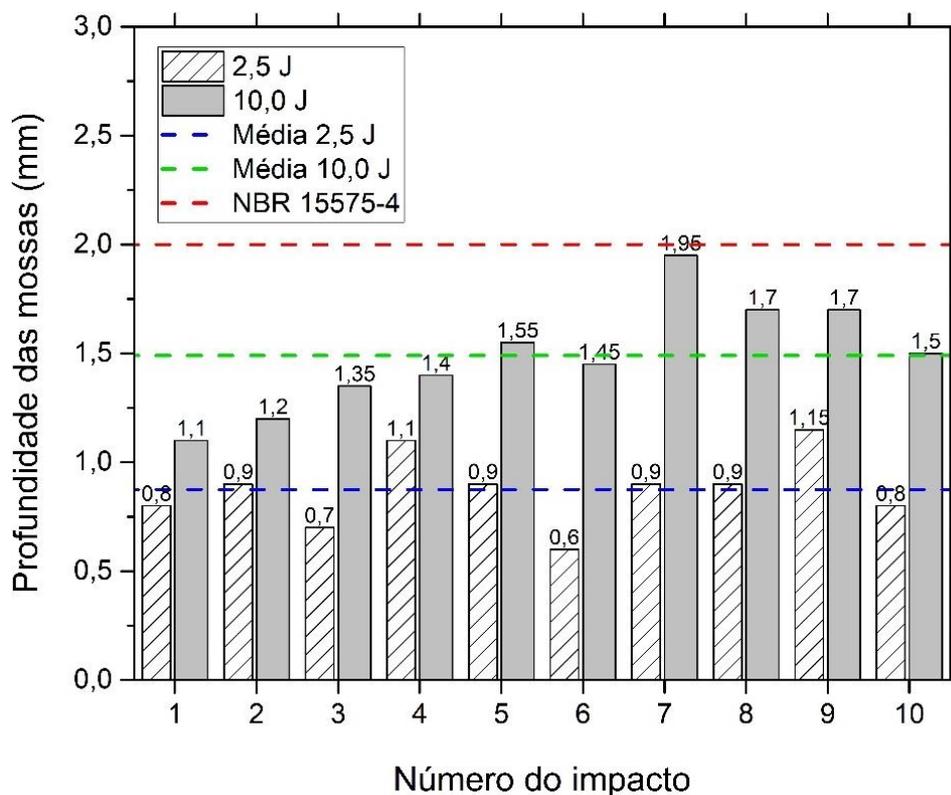
A Figura 113 e Figura 114 ilustram as profundidades das mossas determinadas para os Elementos 1 e 2. Especificamente no caso do Elemento 1, como para a energia de 10,0 J, houve o transpasse, os valores não foram considerados aqui.

Figura 113 - Profundidade das mossas da energia de impacto de 2,5 J (Elemento 1)



Fonte: Elaboração própria

Figura 114 - Profundidade das mossas relativas às energias de impacto de 2,5 J e 10,0 J (Elemento 2)



Fonte: Elaboração própria

Com base na Figura 113 e Figura 114, é possível observar que, para a mesma energia de impacto (2,5 J), o Elemento 2 apresentou mossa menores em todos os dez impactos.

A NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) não traz nenhuma limitação quanto à profundidade das mossa para o desempenho mínimo, apontando este valor apenas para o atendimento ao nível intermediário e superior de vedações verticais externas, isto é, que estas sejam inferiores a 2,0 mm. Observa-se, portanto, que apenas duas profundidades das mossa ficaram acima do valor mencionado, no caso das placas, e nenhum no caso dos blocos.

Quanto ao ensaio de permeabilidade, os problemas enfrentados para sua execução também foram vivenciados pelo pesquisador Hattge (2004), configurando-se, portanto, como uma limitação do sistema frente ao método de ensaio.

Ademais, apesar de aspectos ligados à construtibilidade não terem sido diretamente avaliados, notou-se que as placas, devido à ausência de rebaixo nas bordas, demonstraram ser de difícil exequibilidade. Portanto, para consolidação do sistema, esse ponto deve ser aprimorado.

Analisando o Quadro 2, nota-se que o desempenho mínimo foi alcançado frente ao ensaio de solicitações de peças suspensas, ação do calor e choque térmico, e estanqueidade à água. Ademais, frente ao ensaio de impactos de corpo duro, neste caso, para ambas as energias avaliadas, obteve-se o desempenho superior.

Observa-se, portanto, uma evolução em relação ao Elemento 1, que, provavelmente, ocorreu em razão dos blocos apresentarem uma maior espessura e da introdução da camada de revestimento argamassado, contribuindo para que não houvesse o transpasse e as mossa permanecessem inferiores aos 2,0 mm, tratando-se dos impactos de corpo duro.

Mesmo com o aumento da espessura em relação às placas (passando de 2,0 cm para 7,0 cm), o Elemento 2 também não conseguiu alcançar o desempenho mínimo frente ao ensaio de impactos de corpo mole. Todavia, pelas características da fissura apresentada na Figura 97, a falha ocorreu no ponto de união dos blocos, isto é, nas juntas de argamassa polimérica, não sendo, portanto, uma falha do componente em si, mas do sistema. Além disso, a fissura que ocasionou a reprovação no ensaio ocorreu transversalmente bem na região central do corpo de prova (ponto mais afastado dos apoios), provavelmente, em razão de não haver nenhum tipo de apoio no local, uma vez que o corpo de prova foi apoiado somente nas suas extremidades

superior e inferior, e isso ocorreu somente para a maior energia de impacto que foi de 120 J.

Frente ao ensaio de permeabilidade à água, o Elemento 2 também não alcançou o desempenho mínimo, contudo, como será abordado no tópico a seguir, a grande maioria dos blocos não atende ao critério estabelecido pela normativa.

Em relação aos outros critérios avaliados, isto é, ação do calor e choque térmico, e estanqueidade, o elemento atingiu ao desempenho mínimo, demonstrando, portanto, potencial para ser utilizado também como vedação vertical externa, sem função estrutural, requerendo, contudo, para sua efetiva aplicação, a avaliação dos demais critérios exigidos para SVVE. É extremamente importante ressaltar que o critério de ação do calor e choque térmico configura-se como uma tradução do requisito de Durabilidade e Manutenibilidade (Sustentabilidade), configurando-se, portanto, o atendimento ao desempenho mínimo frente a este aspecto uma importante informação sobre o comportamento do material no longo prazo.

Analisando o Quadro 3, nota-se que, frente ao ensaio de peça suspensa, os blocos de concreto celular com CA (resultados apresentados no Quadro 2) foram superiores aos blocos de concreto celular sem incorporação da casca. Este fato dá indícios de que a fibra atuou na mitigação da propagação de fissuras desenvolvidas tanto na etapa de fixação da mão-francesa nos blocos quanto durante a aplicação do carregamento. Dessa forma, os componentes contendo a CA foram mais resistentes frente ao momento oriundo da aplicação da carga, impedindo, inclusive, o deslizamento do conjunto de fixação (bucha e parafuso). É provável que os blocos com casca tenham fornecido uma melhor ancoragem ao sistema de fixação que o bloco sem casca.

4.6 ANÁLISE COMPARATIVA COM SISTEMAS EXISTENTES (CONVENCIONAIS E INOVADORES)

4.6.1 Elemento 1

Como mencionado anteriormente, as placas de concreto celular com casca de arroz (Elemento 1) demonstraram resistir somente a cargas de até 20 kg por peça ou 10 kg por ponto, estando, portanto, abaixo do mínimo normativo. Contudo, conforme apresentado na revisão da literatura (item 2.1.4 – Tabela 1), diversos fabricantes de placas destinadas ao fechamento do sistema LSF não atendem a norma em sua

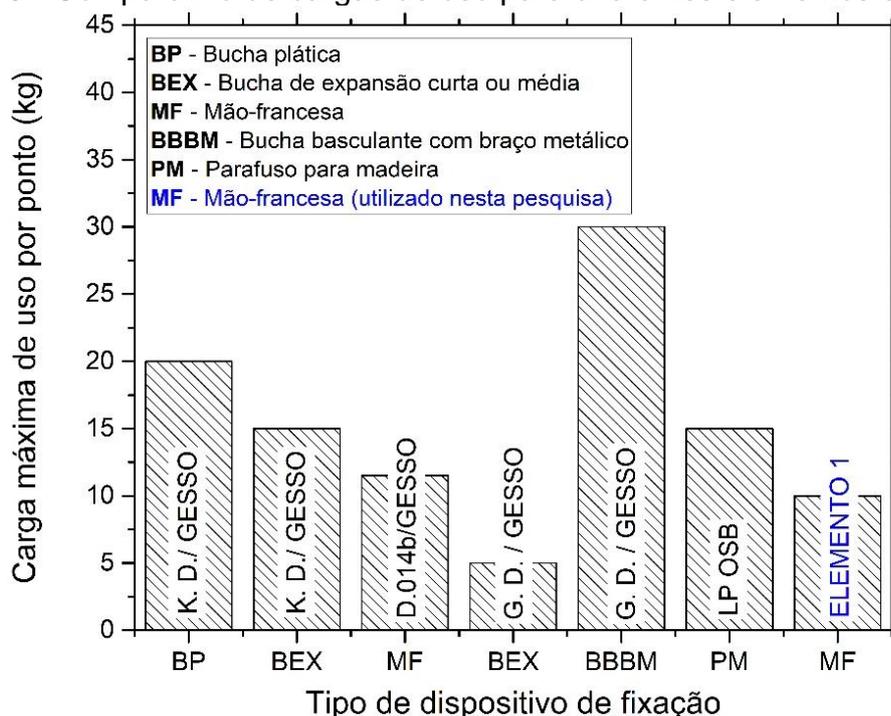
totalidade quanto à solicitação de peças suspensas, isto é, atendendo apenas parcialmente.

A Figura 115 traz um comparativo entre as cargas de uso alcançadas pelas placas de concreto celular com CA e outros fechamentos para LSF (apresentados na Tabela 1 da revisão da literatura), sendo especificada para cada placa/chapa o tipo de fixação empregado.

O único resultado em que é possível traçar uma comparação direta é o apresentado pela DATEC 014b, pois, neste caso, tal qual no presente estudo, foi utilizada apenas uma chapa com o dispositivo de fixação do tipo mão-francesa sem reforço, indicado na Figura 115 pela sigla MF, e o ensaio foi do tipo de longa duração.

Traçando um paralelo entre o valor encontrado para as placas de concreto celular com CA e essa chapa em questão, nota-se que os valores não ficaram muito distantes, isto é, sendo, respectivamente, 10 kg por ponto e 11,5 kg por ponto. Portanto, nota-se que, na configuração avaliada pela DATEC 014b, as chapas de gesso não atendem ao desempenho mínimo.

Figura 115 - Comparativo de cargas de uso para diferentes elementos de vedação



Fonte: Elaboração própria

Os demais dados não mencionam o tipo de ensaio realizado, isto é, se foi de longa ou curta duração, por isso que alguns deles dizem atender à normativa, mesmo não alcançando os 40 kg por ponto. De maneira sucinta, a NBR 15.575-4 (ABNT,

2021), como apresentado nos capítulos anteriores, possibilita que o ensaio seja realizado com aplicação contínua da carga até a ruptura do elemento e que se considere, então, a carga de uso como $1/3$ da carga de ruptura.

É importante destacar, ainda, que os 10,0 kg por ponto determinado como carga de uso para o Elemento 1 contempla um coeficiente de segurança de 1,5 e que a normativa recomenda que a carga de uso seja o menor dos valores entre $1/3$ da carga de ruptura e a carga que provocar um deslocamento horizontal superior a $h/500$. Nesse caso, considerando diretamente o que recomenda a normativa, pode-se dizer que o valor que provou deslocamento horizontal superior a $h/500$ foi a carga de 150 N por ponto, ou seja, as placas suportariam, em tese, cargas de até 15,0 kg (valor superior ao apresentado pela DATEC 014b).

É possível observar, também, na Figura 115, que o sistema GYPSUM DRYWALL (G.D.) foi o que obteve a maior carga de uso por ponto utilizando bucha basculante com braço metálico, contudo, é importante ressaltar que essa configuração utilizou duas chapas. Ademais, fica evidente que alterações no sistema de fixação mudam significativamente a carga de uso resultante.

Um ponto que merece destaque em relação ao resultado obtido frente ao ensaio de impactos de corpo mole diz respeito à forma de realização do ensaio. No presente trabalho, os impactos de corpo mole foram aplicados nos corpos de prova com estes apoiados em duas extremidades do pórtico, a saber, inferior e superior. Notou-se, entretanto, que não há um consenso entre os autores quanto a esta questão e, muitas vezes, este mesmo ensaio é realizado com o corpo de prova apoiado nas quatro extremidades (superior, inferior e ambas as laterais).

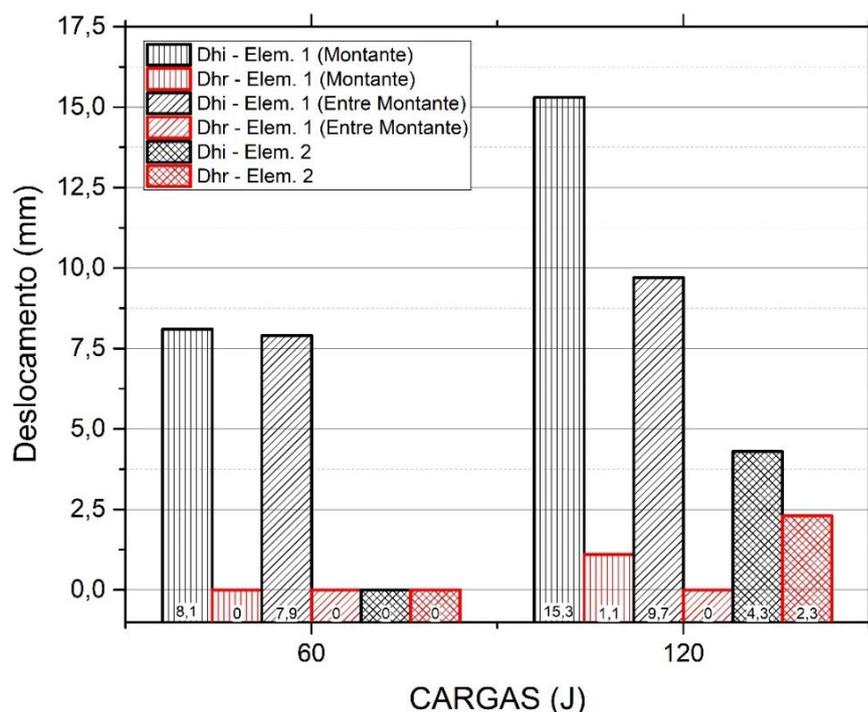
Essa alteração aparentemente simples implica em grande divergência entre os deslocamentos horizontais, sendo este fato também observado por Nogueira, Callejas e Durante (2018) por meio da comparação de seu sistema LSF com placas de madeira mineralizada, ensaiado apoiado em duas extremidade, e o LSF convencional, ensaiado apoiado nas quatro extremidades. Segundo os autores, isso ocorre pois o padrão de vibração diverge entre as duas situações, gerando, no caso do apoio apenas em duas extremidades, maior amplitude nos deslocamentos.

Além disso, Nogueira, Callejas e Durante (2018) ressaltam que a não existência de um apoio lateral no pórtico de ensaio de modo a fixar a lateral do elemento ensaiado corrobora para o surgimento das fissuras e, muitas vezes, inclusive para deslocamentos residuais negativos, sendo uma característica comum nos SVVIE

leves, em parte, em razão das características de elasticidade dos componentes construtivos, como os perfis estruturados em aço.

A Figura 116 ilustra os diferentes deslocamentos horizontais obtidos frente às energias de 60 J e 120J para os dois elementos propostos. Nota-se que, para ambas as energias, o Elemento 2 (classificado como pesado) apresentou menores deslocamentos horizontais que o Elemento 1 (classificado como leve). Comparando os pontos de aplicação no Elemento 1, isto é, ponto A (entre montantes) e o ponto B (montante), o ponto A apresentou menores deslocamentos que o ponto B para a energia de 120 J e, para a energia de 60J, esses deslocamentos foram muito semelhantes, demonstrando a baixa capacidade das placas de absorver energias maiores.

Figura 116 - Deslocamentos horizontais obtidos no ensaio de impactos de corpo mole



Fonte: Elaboração própria

Traçando um comparativo com os sistemas apresentados na Figura 9 para a energia de 120 J (energia que os sistemas têm em comum), observa-se que todos os elementos propostos no presente trabalho apresentaram deslocamentos horizontais superiores aos apresentados pelo painel em bloco cerâmico, parede de concreto e LSF convencional; sendo que a configuração que obteve resultados mais próximos de tais sistemas foi o Elemento 2, com deslocamentos de, aproximadamente, o dobro

dos demais sistemas. Todos os sistemas utilizados nesta comparação realizaram o ensaio com o corpo de prova apoiado nas quatro extremidades.

Em relação aos resultados de impacto de corpo duro, traçando um paralelo com os dados apresentados por Nogueira, Callejas e Durante (2018), e indicadas no item 2.1.4 do presente estudo, nota-se que o sistema LSF composto por placas de madeira mineralizada proposto pelos autores apresentou profundidade de moissas bem inferior às apresentadas pelo Elemento 1 composto por placas de concreto celular com CA. Os autores não apresentaram informações relativas à resistência mecânica do produto, portanto, não foi possível fazer tal correlação.

4.6.2 Elemento 2

Iniciando as análises comparativas do Elemento 2 com outros sistemas pelo ensaio de resistência às solicitações de peças suspensas, pode-se dizer que os resultados foram positivos, uma vez que o sistema composto por blocos de concreto celular autoclavado desenvolvidos por Varisco (2010) apresentaram uma resistência à compressão média de 2,5 MPa com 12,5 cm de espessura, ou seja, 5,5 cm a mais do que os blocos de concreto celular com CA e resistência mecânica bem superior, e não obtiveram o desempenho mínimo (tratando-se do sistema de fixação em mão-francesa). O autor obteve desempenho mínimo apenas na aplicação da carga utilizando cantoneira em L, buchas Fischer e parafusos do tipo Chipboard (Figura 19).

Além disso, o sistema desenvolvido por Chiele (2022) formado por blocos de concreto de RCD com resistência à compressão de 3,01 MPa atendeu ao critério de deslocamentos horizontais instantâneos, mas apresentou o deslizamento do sistema de fixação (sistema bucha-parafuso) sob o carregamento de 800 N, não obtendo, portanto, o nível mínimo de desempenho. Todavia, nenhum dos sistemas mencionados possuía nenhum tipo de travamento dos blocos, apenas o assentamento convencional.

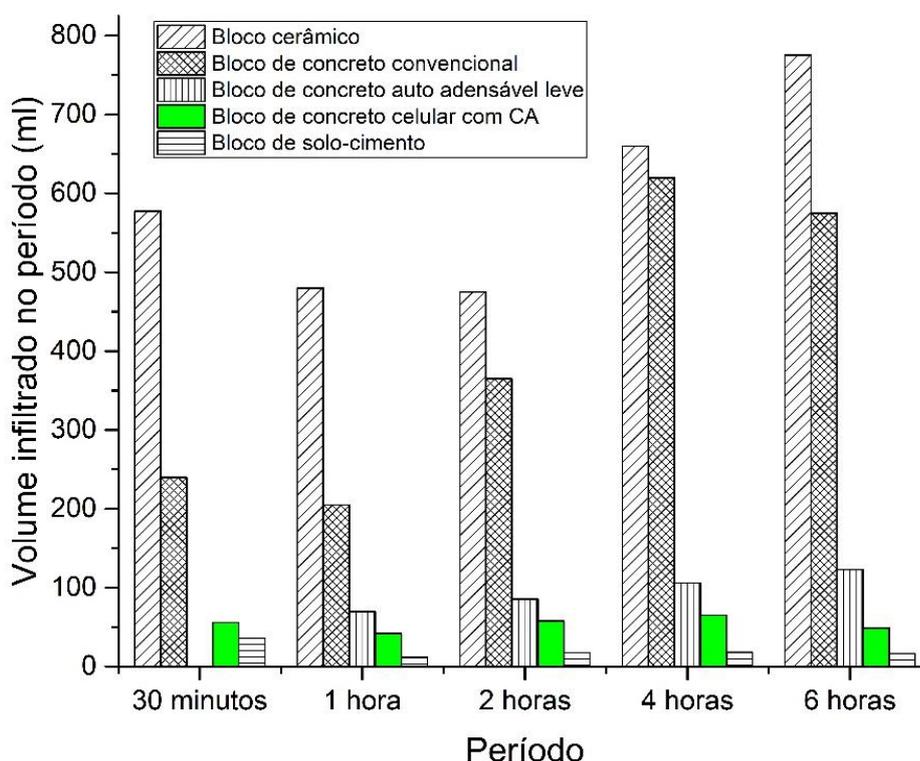
Embora os sistemas desenvolvidos por Chiele (2022) e Varisco (2010) não tenham obtido o desempenho mínimo frente ao ensaio de solicitações de peças suspensas, ambos atenderam ao critério de impactos de corpo mole, enquanto o sistema com os blocos de concreto celular com CA não. Isso, provavelmente, ocorreu em razão de os componentes desenvolvidos possuírem dimensões maiores, conseqüentemente, produzindo uma área de impacto maior e uma quantidade menor

de juntas de assentamento. Essa configuração implica em juntas que recebem maiores energias e, conseqüentemente, são propensas a romperem mais facilmente.

Todavia, para a energia de impacto de 480 J, o sistema de Chiele (2022) apresentou as mesmas fissuras transversais mencionadas no item 4.5, sendo que a configuração de ensaio foi a mesma do presente estudo, ou seja, parede apoiada somente nas extremidades superior e inferior.

A Figura 117 ilustra um comparativo entre resultados do ensaio de permeabilidade à água para diferentes blocos utilizados em SVVIE. Como pode ser observado, nenhum dos blocos atingiu ao critério mínimo especificado pela NBR 15.575-4 (ABNT, 2021).

Figura 117 - Comparativo de resultados do ensaio de permeabilidade à água para diferentes tipos de blocos de vedação



Fonte: Elaboração própria

Ademais, o bloco de concreto celular com CA apresentou desempenho inferior somente ao bloco de solo-cimento desenvolvido por (GIORGI, 2016), demonstrando, portanto, potencial frente ao impedimento da infiltração de água em áreas molhadas e molháveis.

De modo geral, dentre os blocos avaliados, os que apresentaram pior desempenho foram os blocos cerâmicos e de concreto convencional, sendo que, entre as vedações avaliadas, os compostos por blocos de solo-cimento e CAAL eram os únicos que não possuíam revestimento argamassado ou outro qualquer.

Um ponto importante a ser levantado é que, dentre todos os componentes investigados na revisão da literatura, nenhum bloco demonstrou atender ao desempenho mínimo, pelo contrário, como mostrado anteriormente, os valores de infiltração de água foram bem relevantes. O único componente encontrado que atendeu as especificações da normativa e obteve infiltração inferior aos 3,0 cm³ durante as 24 h de ensaio foi o Drywall com fechamento em chapas de gesso acartonado especificamente do tipo RU (resistente à umidade) e, ainda, revestidas com tinta epóxi (base solvente ou água) ou revestimento cerâmico tipo porcelanato aplicado com argamassa AC II e rejunte Tipo II.

Com base nessas características, fica nítido que os parâmetros normativos são bem conservadores, uma vez que, provavelmente, foi o conjunto de fatores que fez com que o SVVI mencionado atendesse aos valores estipulados, isto é, uma chapa com características propícias para resistir a ambientes úmidos e dois tipos de revestimento com baixa absorção de água.

5. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

Conforme apresentado no item 1.3.2 deste trabalho, o objetivo inicial da pesquisa era produzir componentes de fechamento para sistema LSF utilizando componentes na forma de placas de concreto celular espumoso e casca de arroz. Após a construção de um corpo de prova nas dimensões de 4,40 m x 2,50 m utilizando o traço otimizado (traço com a casca de arroz), foi verificado que houve atendimento apenas ao ensaio de resistência a impactos de corpo mole, quando este se deu diretamente nos montantes, e ao ensaio de impactos de corpo duro para a energia de 2,5 J.

É importante destacar que os elementos utilizando as placas de concreto celular espumoso convencional (sem casca de arroz) sequer puderam ser executados devido ao fato de quebrarem durante o transporte. Fato este que ocorreu devido à ausência de fibras para evitar a propagação de fissuras.

Em função do baixo desempenho gerado pelos componentes de fechamento para o LSF, tanto de concreto celular espumoso quanto de concreto celular espumoso com casca de arroz, é possível afirmar que o seu uso em sistemas de fechamento vertical em substituição às chapas de gesso acartonado, OSB e outras placas não é viável.

Desta forma, a primeira contribuição que esta pesquisa apresenta para a literatura, após a execução de mais de sessenta placas e três elementos construtivos completos em escala real (dada a dimensão do corpo de prova produzido), é que esses materiais, na configuração proposta, não são adequados para construção de sistemas de fechamento completos em se tratando de estruturas de LSF. No entanto, devido a características como bom desempenho térmico e acústico (CHICA; ALZATE, 2019), sugere-se o uso dessas placas para revestimento de alvenarias, fachadas ventiladas ou forros, sendo, mesmo assim, necessário fazer análises de desempenho específicas para esses sistemas.

Em função do não atendimento dos componentes leves na forma de placas para desenvolver um sistema adequado à norma de desempenho, foram produzidos, na sequência da pesquisa, 24 blocos para a construção de alvenarias classificadas como sistema pesado. Foram esses blocos os componentes utilizados no Elemento 2 e no Elemento 3 que geraram a mais importante contribuição científica desta pesquisa.

Primeiramente, deve-se destacar o fato de haver aprovação do Elemento 2 de maneira imediata em quatro das seis análises de desempenho realizadas. No entanto, mais importante que a aprovação do sistema produzido é a constatação do potencial

do material desenvolvido (concreto celular espumoso com casca de arroz) em gerar sistemas construtivos com desempenho elevado. Nesse sentido, seguem análises relevantes referentes a cada um dos critérios de desempenho analisados.

Os componentes, da maneira que foram instalados no sistema de vedação, obtiveram desempenho mínimo nas análises de peça suspensa, no entanto, com algumas modificações pontuais, é possível elevar esse desempenho até o nível superior com uma certa facilidade. Para melhorar a capacidade de carga em peça suspensa, seria suficiente utilizar parafusos e buchas com maior comprimento e diâmetro, por exemplo; fazendo a simples alteração do sistema de fixação já é possível alterar significativamente o desempenho nesse critério normativo.

Em relação ao impacto ao corpo mole, foi observado um desempenho insatisfatório, mesmo assim, houve deslocamentos instantâneos e residuais zerados para a primeira carga de impacto (discutido no item 4.4.1). Esse deslocamento já é um bom indicativo do potencial do componente desenvolvido, uma vez que sistemas similares já apresentam deslocamentos na energia de 60 J (CHIELE, 2022). Nas inspeções realizadas em laboratório e nas análises técnicas realizadas posteriormente, foi possível verificar alguns aspectos que podem gerar desempenhos melhores nesse critério, atendendo até níveis de desempenho superior.

A primeira situação que pode melhorar o desempenho é a configuração do ensaio, visto que, conforme já descrito no item 4.6.1, há divergência na literatura quanto à execução de apoios nas laterais das alvenarias. Desta forma, sugere-se que sejam realizados testes com apoios laterais na alvenaria, possibilitando, assim, a aprovação no critério de impacto de corpo mole. Salienta-se que o embasamento para realização de apoios deve-se ao fato de que, em construções convencionais, essa amarração ocorre por meio de pilares de concreto armado ou com a amarração da própria alvenaria.

Outra situação que pode melhorar o desempenho frente aos impactos de corpo mole é a realização de um corpo de prova exclusivamente para este ensaio, uma vez que esse foi o último ensaio a ser realizado, há fortes possibilidades de a alvenaria já ter perdas estruturais causadas, principalmente, pela análise de peça suspensa e de impacto ao corpo duro. Essas perdas estruturais, provavelmente, reduziram o desempenho obtido no ensaio de corpo mole.

Por fim, uma análise um pouco mais profunda que necessita de simulações numéricas e experimentais é a influência negativa pelas elevadas dimensões dos

blocos. Em comparação com alvenarias que utilizam blocos menores, os componentes utilizados no sistema desenvolvido nesta pesquisa têm áreas de impacto maiores e menos juntas de assentamento. Assim, as juntas acabam recebendo energias maiores e, por consequência, tendem a romper com maior facilidade (fato este constatado experimentalmente). Desta forma, outra opção para melhorar o nível de desempenho quanto ao critério de corpo mole é reduzir as dimensões do bloco e/ou aumentar sua espessura e a resistência da argamassa de assentamento.

Em relação ao impacto de corpo duro, o sistema executado foi aprovado com desempenho superior, portanto, mesmo com o revestimento argamassado sendo de apenas 15 mm, já ocorre excelente resistência a esse tipo de impacto.

O ensaio de permeabilidade foi classificado como insatisfatório no sistema analisado, no entanto, conforme referenciado na literatura, a norma é muito conservadora nesse critério. Mesmo assim, atingir níveis de desempenho superiores utilizando o componente desenvolvido nesta pesquisa seria possível ao realizar a aplicação de impermeabilizantes no revestimento, tintas plásticas com maior capacidade de reter água ou fazer uso de aditivos cristalizantes na argamassa do reboco.

Em relação à análise de durabilidade, realizada por meio do ensaio de ação de calor e choque térmico, é possível constatar que houve atendimento ao desempenho mínimo, que, neste caso, é o único desempenho apresentado na normativa para tal critério, não sendo, portanto, necessário apresentar qualquer alteração para proporcionar melhorias neste aspecto.

Para a durabilidade, mesmo com alterações no sistema construtivo ou nas geometrias dos componentes, é muito provável que o critério de ação de calor e choque térmico será atendido, haja vista a alta porosidade do material e sua boa capacidade frente a esse tipo de ação (CHICA; ALZATE, 2019).

Sobre a análise de desempenho frente à estanqueidade, mesmo tendo classificado o sistema com desempenho mínimo, pois teve a ocorrência de manchas, deve-se destacar que, possivelmente, houve problemas na configuração do ensaio. Conforme pode-se verificar na Figura 106, todas as manchas ocorreram na parte inferior da alvenaria, abaixo de 10 cm de altura. Ou seja, há indicativo de que a água que originou as manchas não foi por meio do mecanismo de infiltração pelos revestimentos e componentes do sistema, mas, sim, pelo escoamento da água para

a base da alvenaria (perfil U em chapa dobrada) e, com a formação de poças houve capilaridade pelo revestimento argamassado.

Portanto, possivelmente, o sistema poderia ser classificado com nível de desempenho superior se simulada a construção da alvenaria com impermeabilização na sua base, da mesma maneira que é indicada a impermeabilização da viga baldrame e das primeiras fiadas. Nesse sentido, esse trabalho também contribui para uma reanálise do processo de ensaio para desempenho de estanqueidade, com escoamento da água residual na base do aparato e com impermeabilização da estrutura que simula a fundação de suporte.

Por fim, cabe salientar que o não atendimento dos critérios de corpo mole e da permeabilidade não são problemas gerados pela característica do material aqui desenvolvido, mas, sim, por características geométricas das peças, e por configurações específicas e ordem de realização dos ensaios aplicados. Desta forma, fica evidenciado o desenvolvimento de um componente para sistemas de vedação que pode ser utilizado no sistema sugerido com algumas pequenas adaptações, ou que pode ser modificado geometricamente para construção de outros sistemas que porventura objetivam atingir níveis de desempenho intermediário e superior.

6. CONCLUSÃO

A concepção de novos SVVI é uma tarefa desafiadora, contudo, mostra-se como uma excelente oportunidade na busca por vedações que ofereçam propriedades aquém da simples separação dos ambientes e utilizem somente recursos naturais escassos.

Todavia, configura-se como uma necessidade de que a idealização da vedação vertical inovadora ocorra a partir de parâmetros físicos, visando extrair-se o melhor resultado possível, tanto de maneira individualizada do sistema construtivo quanto da totalidade da edificação.

Dessa forma, o presente estudo se propôs a avaliar experimentalmente o comportamento de elementos de vedação vertical internos, sem função estrutural, formados a partir de componentes em concreto celular espumoso com casca de arroz frente a requisitos de segurança, habitabilidade e sustentabilidade exigidos pela NBR 15.575-4 (ABNT, 2021). Em relação ao desempenho das novas configurações de vedação vertical interna propostas, pode-se concluir que:

ELEMENTO 1 (Componentes do tipo placa de concreto celular com CA):

Atingiu o desempenho mínimo especificado pela NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) frente aos ensaios de resistência a impactos de corpo mole no ponto em que estavam localizados os montantes metálicos e resistência a impactos de corpo duro para a energia de 2,5 J.

Apresentou desempenho insatisfatório frente aos ensaios de solicitação de peças suspensas, resistência a impactos de corpo mole na região entre montantes (atingindo diretamente as placas desenvolvidas) e resistência a impactos de corpo duro para a energia de 10,0 J.

Apresentou problemas de execução, principalmente devido à ausência de rebaixos nas bordas, o que dificultou o encaixe. Ademais, a configuração proposta não possibilitou a realização do ensaio de permeabilidade à água pela metodologia prevista.

Pelas características apresentadas pelos componentes no formato de placa, é provável que, idealmente, sejam mais aderentes com outras aplicações, como, por exemplo, revestimento de alvenarias, fachadas ventiladas e forros.

ELEMENTO 2 (Componentes do tipo bloco de concreto celular com CA):

Atingiu o desempenho mínimo frente aos ensaios de resistência às solicitações de peças suspensas, ação do calor e choque térmico e estanqueidade à água. Além de alcançar o desempenho superior tratando-se do ensaio de resistência a impactos de corpo duro para ambas as energias avaliadas (2,5 J e 10,0 J).

Demonstrou desempenho insatisfatório frente ao ensaio de resistência a impactos de corpo mole. No entanto, foram apresentados ajustes que possibilitam o atendimento a esse critério.

Apresentou comportamento superior ao Elemento 1 formado por placas, provavelmente, em razão da maior espessura dos componentes construtivos utilizados, bem como, pelo travamento empregado com barras de aço e a presença da camada de revestimento argamassado.

Ademais, sugere-se a unificação da forma de ensaio de impactos de corpo mole e corpo duro, isto é, em que conste a forma de vinculação do corpo de prova no pórtico de ensaio (apoiado em duas ou quatro extremidades), como é especificado, por exemplo, para o ensaio de Ação do Calor e Choque térmico, para possibilitar a correta comparação dos resultados obtidos por diferentes pesquisadores.

ELEMENTO 3 (Componentes do tipo bloco de concreto celular sem CA):

Não atingiu o desempenho mínimo frente ao ensaio de resistência às solicitações de peças suspensas para a mesma configuração do sistema que utilizou componentes com casca, sugerindo a atuação da fibra na mitigação da propagação de fissuras e no fornecimento de um melhor engastamento do sistema de fixação nos blocos e, conseqüentemente, numa maior resistência frente à ação mecânica do momento oriunda do carregamento aplicado.

De maneira geral, constatou-se que a hipótese inicialmente proposta foi validada, logo, os elementos desenvolvidos formados por placas e blocos de concreto celular espumoso com CA possuem potencial para serem utilizados como produtos construtivos sustentáveis em usos distintos conforme discutido no Capítulo 5.

Com base na análise experimental, os sistemas poderão ser otimizados e, possivelmente, aprovados em níveis de desempenho superior se forem realizadas algumas modificações como:

❖ LSF com Placas:

- Inserção de bordas rebaixadas;
- Inclusão de reforços nos vãos entre montantes;
- Uso de placas duplas.

❖ Alvenaria com blocos leves:

- Uso de revestimentos de baixa absorção d'água e/ou impermeabilizantes;
- Dar maior atenção às juntas, pois estas podem atuar como ponto frágil;
- Uso de blocos mais espessos;
- Uso de blocos menores;
- Uso de outros tipos de sistema de fixação para peça suspensa;
- Impermeabilizar a base do corpo de prova;
- Construir o corpo de prova apoiada nas quatro extremidades.

Após todas as análises realizadas nos capítulos 4 e 5, observou-se que a maior contribuição da pesquisa foi a entrega do componente, que possibilita não só o aprimoramento do sistema desenvolvido para atendimento completo dos critérios avaliados, mas, também, o desenvolvimento de outros sistemas que visem atender a níveis superiores.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao trabalho desenvolvido, sugiro o avanço dos estudos nos seguintes itens:

- Avaliar para os mesmos elementos propostos no presente trabalho outros critérios de desempenho especificados pela NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) para vedações verticais;
- Avaliar blocos de concreto celular espumoso com CA de diferentes espessuras, densidades e, conseqüentemente, resistências mecânicas, de modo a averiguar o impacto de tais características no desempenho do elemento;
- Reproduzir o componente no formato de placa e investigar o desempenho de elementos formados pela montagem de placas na configuração dupla;

- No ensaio de resistência às solicitações de peças suspensas, avaliar o comportamento dos mesmos elementos utilizando-se diferentes dispositivos de fixação;
- Nos ensaios de resistência ao impacto de corpo duro e corpo mole, avaliar as duas configurações de apoio no pórtico de ensaio, isto é, corpo de prova apoiado em duas e nas quatro extremidades.
- Realizar uma avaliação intermediária, isto é, que encontra-se aquém da avaliação a nível de material contudo precede a avaliação em escala macro, como por exemplo aspectos ligados ao aparafusamento das placas e encaixe dos blocos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). Manual da construção industrializada. Brasília, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12.645 - Execução de paredes de concreto celular espumoso moldados no local. Rio de Janeiro, 1992a.

ABNT. NBR 12.646 - Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local. Rio de Janeiro, 1992b.

ABNT. 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, 2005.

ABNT. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. NBR NM 52 Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. NBR 14.762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010a.

ABNT. NBR 14.715-1: Chapas de gesso para drywall Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010b.

ABNT. NBR 13.438: Blocos de concreto celular autoclavado — Requisitos. Rio de Janeiro, 2013 b.

ABNT. NBR 13.440: Blocos de concreto celular autoclavado — Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013c.

ABNT. NBR 14956-1: Blocos de concreto celular autoclavado — Execução de alvenaria sem função estrutural Parte 1: Procedimento com argamassa colante industrializada. Rio de Janeiro, 2013d.

ABNT. NBR 14956-2: Blocos de concreto celular autoclavado — Execução de alvenaria sem função estrutural Parte 2: Procedimento com argamassa convencional. Rio de Janeiro, 2013e.

ABNT. NBR 12.644: Concreto leve celular estrutural — Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco. Rio de Janeiro, 2014a.

ABNT. NBR 15.253: Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações — Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2014. b.

ABNT. NBR 15.498: Placa de fibrocimento sem amianto — Requisitos e métodos de ensaio.. Rio de Janeiro, 2016a.

ABNT. NBR 13.276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. b.

ABNT. NBR 16.697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. NBR 15.575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos

gerais. Rio de Janeiro, 2021a.

ABNT. NBR 15.575-4 Edificações habitacionais - Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2021b.

AGRAWAL, D. et al. Utilization of industrial waste in construction material – A review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* (An ISO Certified Organization), [s. l.], v. 3297, n. 1, p. 8390–8397, 2007. Disponível em: <www.ijirset.com>

AHMAD, M. H. Durability Properties of Foamed Concrete with Fiber Inclusion. *International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering*, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 273–276, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Muhammad_Hafiz_Ahmad/publication/274848776_Durability_Properties_of_Foamed_Concrete_with_Fiber_Inclusion/links/552b5e070cf2779ab7930c6e/Durability-Properties-of-Foamed-Concrete-with-Fiber-Inclusion.pdf>

ALENCAR, L. et al. Sustainability in the Construction Industry: a Systematic Review of the Literature. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 289, p. 125730, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730>>

ALMEIDA, J. et al. Overview of mining residues incorporation in construction materials and barriers for full-scale application. *Journal of Building Engineering*, [s. l.], v. 29, n. October 2019, p. 101215, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101215>>

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI CT-13: Concrete Terminology. Farmington Hills, EUA.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Guide for Precast Cellular Concrete Floor, Roof, and Wall Units Manual of Concrete Practice. Farmington Hills, EUA.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 523.3R-14: Guide for Cellular Concretes above 50 lbft³ (800 kgm³). Farmington Hills, EUA.

AMRAN, Y. H. M.; FARZADNIA, N.; ALI, A. A. A. Properties and applications of foamed concrete; A review. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 101, p. 990–1005, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>>. Acesso em: 19 fev. 2021.

ANDERSSON, N.; LESSING, J. The Interface between Industrialized and Project Based Construction. *Procedia Engineering*, [s. l.], v. 196, n. June, p. 220–227, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.193>>

ANTÔNIO, J. et al. Application of rice husk in the development of new composite boards. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 176, p. 432–439, 2018.

ARAVIND, N. R.; SATHYAN, D.; MINI, K. M. Rice husk incorporated foam concrete wall panels as a thermal insulating material in buildings. *Indoor and Built Environment*, [s. l.], v. 29, n. 5, p. 721–729, 2020.

ARUNACHALAM, A. et al. Influence of polypropylene fibres on the mechanical and durability properties of high performance concrete. *Proceedings of the International Conference FIBRE CONCRETE*, [s. l.], v. 2015-Janua, n. April, p. 42–51, 2015.

ASDRUBALI, F.; D'ALESSANDRO, F.; SCHIAVONI, S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, [s. l.], v. 4, n. 2015, p. 1–17, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>>

ASTM I. ASTM C 796: Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete ASTM International, 1997. p. 1–5.

AZEVEDO, A. R. G. De. Desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas com incorporação do lodo primário da indústria de papel de celulose. 2018. [s. l.], 2018.

BARBIRATO, G. M. INTRODUÇÃO ARQUITETURA , URBANISMO E CONFORTO AMBIENTAL : [s. l.], 2020.

BHOSALE, A. et al. Mechanical and physical properties of cellular lightweight concrete block masonry. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 248, p. 118621, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118621>>

BISHT, N.; GOPE, P. C.; RANI, N. Rice husk as a fibre in composites: A review. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 147–162, 2020.

BORGES, C. A. de M. O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil. 2008. [s. l.], 2008.

BRITISH CEMENT ASSOCIATION. Foamed Concrete composition and properties 1994.

BRITO, A. C.; IKEDA, C. Y. K.; AKUTSU, M. O uso da habitação em tempos de pandemia conforto ambiental e salubridade.pdf. 2020.

BUKOWSKI, R. W.; FOLIENSTE, G. C. The role of standards in a performance-based building regulatory system. 4th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods., [s. l.], v. 50, n. 7–8, p. 2–11, 2003.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Desempenho das edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575:2013. [s.l.] : CBIC, 2013.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). Catálogo de inovação na construção civil. [s.l.: s.n.].

CAMPOS, P. F. Light Steel Framing: uso em construções habitacionais empregando a modelagem virtual como processo de projeto e planejamento. *Out. / Dez.*, [s. l.], p. 197, 2014.

CARDOSO, A. C. S. Avaliação das Propriedades Mecânicas das Placas Cimentícias e do Comportamento da Ligação entre as Placas Cimentícias e o Reticulado de Aço do Sistema Light Steel Framing. [s. l.], 2019.

CARDOSO, S. S. Tecnologia construtiva de fachada em chapas delgadas estruturadas em light steel framing. 2016. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

CHABANNES, M. et al. Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 70, p. 428–438, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.025>>

CHABI, E. et al. Study of cement composites on addition of rice husk. *Case Studies in Construction Materials*, [s. l.], v. 12, 2020.

CHABRIAC, P. A. et al. Agricultural by-products for building insulation: Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 112, p. 158–167, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.162>>

CHICA, L.; ALZATE, A. Cellular concrete review: New trends for application in construction. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 200, p. 637–647, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.136>>

CHIELE, G. S. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMA DE VEDAÇÃO VERTICAL DE BLOCOS DE CONCRETO DE RCD. Trabalho de conclusão de curso. UFRGS, 2022.

CHINDAPRASIRT, P.; RATTANASAK, U. Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash. *Materials and Design*, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 723–727, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.036>>

CRASTRO, R. C. M. DE. *Arquitetura E Tecnologia Em Sistemas Construtivos Industrializados: Light Steel Framing*. 2005. [s. l.], 2005.

DELAZERI, G. C. PARA CASAS TÉRREAS DE ACORDO COM A NORMA DE DESEMPENHO ABNT NBR 15575 PARA CASAS TÉRREAS DE ACORDO COM A NORMA DE Orientador : Rodrigo Scoczynski Ribeiro Guarapuava. 2018. [s. l.], 2018.

DUNN, T. P. A.; VAN ZIJL, G. P. A. G.; VAN ROOYEN, A. S. Investigating a reinforced lightweight foamed concrete walling system for low-rise residential buildings in moderate seismic regions. *Journal of Building Engineering*, [s. l.], v. 20, n. September, p. 663–670, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.09.011>>

FALLIANO, D. et al. Compressive and flexural strength of fiber-reinforced foamed concrete: Effect of fiber content, curing conditions and dry density. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 198, p. 479–493, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.197>>

FERREIRA, R. C. Estudo de verificação técnica do bloco de concreto para vedação confeccionados com agregados de resíduos de construção civil no município de varginha mg. [s. l.], 2016.

FONTENELLE, H. Sistema de fixação e juntas em vedações verticais constituídas por placas cimentícias: estado da arte, desenvolvimento de um sistema e avaliação experimental. 2012. [s. l.], 2012.

FU, Y. et al. Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review. *Advances in Materials Science and Engineering*, [s. l.], v. 2020, 2020.

GIORGI, P. Avaliação de desempenho de sistema de vedação vertical de bloco de solo-cimento conforme NBR 15575 referente à habitabilidade e sustentabilidade | Manancial - Repositório Digital da UFSM. [s. l.], p. 1–98, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7938?show=full>>

GOMES, A. P. Avaliação Do Desempenho Térmico De Edificações Unifamiliares Em Light Steel Framing. [s. l.], p. 172, 2007.

GOMES, A. P. Método de avaliação do desempenho térmico de edifícios comerciais e residenciais em light steel framing. 2012. [s. l.], 2012.

GOMES, A. P.; DE SOUZA, H. A.; TRIBESS, A. Impact of thermal bridging on the performance of buildings using Light Steel Framing in Brazil. *Applied Thermal Engineering*, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 84–89, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.015>>

HATTGE, A. F. Estudo Comparativo Sobre a Permeabilidade Das Alvenarias Em Blocos Cerâmicos E Alvenarias Em Blocos De Concreto. [s. l.], p. 138, 2004.

INTERNACIONAL COUNCIL FOR BUILDING RESEARCH STUDIES AND DOCUMENTATIO (CIB). CIB Report 64, Working with the Performance Approach in Building. [s.l: s.n.].

IRGA. Produtividades municipais - safra 2019/2020. Disponível em: <<https://irga.rs.gov.br/upload/arquivos/202008/19144808-boletim-de-resultados-da-lavoura-safra-2019-2020-irga.pdf>>. Acesso em 26 de maio de 2021.

JAUBERTHIE, R. et al. Properties of cement - Rice husk mixture. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 239–243, 2003.

JONES, M. R.; MCCARTHY, M. J.; MCCARTHY, A. Moving fly ash utilisation in concrete forward: A UK perspective. *Proceedings of International ash utilization symposium, center for applied energy research, University of Kentucky*, [s. l.], n. January, p. #113, 2003.

JUNAID, M. F. et al. Lightweight concrete from a perspective of sustainable reuse of waste byproducts. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 319, n. December 2021, 2022.

KEARSLEY, E. P.; WAINWRIGHT, P. the Effect of fly ash content on the compressive strength development of concrete. *Cement and Concrete Research*, [s. l.], v. 31, n. 31, p. 105–112, 2001.

LABOREL-PRÉNERON, A.; MAGNIONT, C.; AUBERT, J. E. Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials. *Waste and Biomass Valorization*, [s. l.], v. 9, n. 7, p. 1095–1112, 2018.

LAVARDE, V. et al. Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 340, n. May, 2022.

LIM, S. K. et al. Strength and toughness of lightweight foamed concrete with different sand grading. *KSCE Journal of Civil Engineering*, [s. l.], v. 19, n. 7, p. 2191–2197, 2014.

LORENZI, L. S. Análise Crítica e Proposições de Avanço nas Metodologias de Ensaio Experimentais de Desempenho à Luz da ABNT NBR 15575 (2013) para Edificações Habitacionais de Interesse Social Térreas. 2013. [s. l.], 2013.

LORENZI, L. S.; STEIN, K. J.; SILVA FILHO, L. C. P. Da. Critical analysis and innovation propositions to the heat and thermal shock test method of the Brazilian Standard NBR 15575 (2013). *Revista ALCONPAT*, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 364–376, 2020.

LUCA, C. R. De. RESISTÊNCIA MECÂNICA E FIXAÇÃO DE OBJETOS EM PAREDES DRYWALLSP Tel. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.drywall.org.br>.

MADHWANI, H.; SATHYAN, D.; MINI, K. M. Study on durability and hardened state properties of sugarcane bagasse fiber reinforced foam concrete. *Materials Today: Proceedings*, [s. l.], n. xxxx, p. 1–6, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.313>>

MADURWAR, M. V.; RALEGAONKAR, R. V.; MANDAVGANE, S. A. Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 38, p. 872–878, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011>>

MAHMOUD, A. et al. Synthesis of sustainable lightweight foamed concrete using palm oil fuel ash as a cement replacement material. *Journal of Building Engineering*, [s. l.], v. 35, n. December 2020, p. 102047, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102047>>

MALTA, G. S. Habitação de Interesse Social em Light Steel Framing no Brasil: avaliação da percepção do usuário sobre a moradia. *Journal of Chemical Information and Modeling*, [s. l.], p. 155, 2021.

MARCELO QUEIROZ VARISCO. Análise Do Desempenho De Blocos De Concreto Celular Autoclavado Em Um Sistema De Vedação Externa. *Director*, [s. l.], p. 2010–2010, 2010.

MARQUES, B. et al. Rice husk cement-based composites for acoustic barriers and thermal insulating layers. *Journal of Building Engineering*, [s. l.], v. 39, n. February, 2021.

MELO, A. B.; FILHO, M. R. F. L. Avaliação de desempenho estrutural de protótipo com paredes construídas com blocos EVA. *Ambiente Construído*, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 141–155, 2009.

MENDES, M. C. M.; FABRICIO, M. M.; IMAI, C. Sistemas Construtivos Inovadores no Contexto do SINAT: Normativas, Produção e Aplicações de Painéis de Vedação. Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Conforto Ambiental, Durabilidade e Pós-Ocupação, [s. l.], p. 169–194, 2017.

MENG, Y.; LING, T. C.; MO, K. H. Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, [s. l.], v. 138, n. July, p. 298–312, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.029>>

MEYER, C. Cement & Concrete Composites The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, [s. l.], v. 31, n. 8, p. 601–605, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>>

MILLER, D. P.; MOSLEMI, A. A. Wood-Cement Composites: Effect of Model Compounds on Hydration Characteristics and Tensile Strength. *Wood and Fiber Science*, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 472–482, 1991.

MUZZI, T. A. Métodos de avaliação da resistência e transmitância térmicas do sistema de fechamento em Light Steel Framing. 2014. [s. l.], 2014.

NAMBIAR, E. K. K.; RAMAMURTHY, K. Shrinkage Behavior of Foam Concrete.

Journal of Materials in Civil Engineering, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 58–61, 2002. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001044](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001044)>

NAMBIAR, E. K. K.; RAMAMURTHY, K. Influence of filler type on the properties of foam concrete. Cement & Concrete Composites, [s. l.], v. 28, p. 475–480, 2006.

NAMBIAR, E. K. K.; RAMAMURTHY, K. Shrinkage Behavior of Foam Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, [s. l.], v. 21, n. 11, p. 631–636, 2009.

NAMBIAR, E. K. K.; RAMAMURTHY, K.; ASCE, M. Fresh State Characteristics of Foam Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 111–117, 2008.

NAMSONE, E.; ŠAHMENKO, G.; KORJAKINS, A. Durability Properties of High Performance Foamed Concrete. Procedia Engineering, [s. l.], v. 172, p. 760–767, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.120>>

NANDI, S. et al. Cellular Concrete & its facets of application in Civil Engineering. International Journal of Engineering Research, [s. l.], v. ISSN, n. 1, p. 37–46, 2016. Disponível em: <<http://www.ijer.in/ijer/publication/v5si1/09.pdf>>

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. Structure and properties of aerated concrete: A review. Cement and Concrete Composites, [s. l.], v. 22, n. 5, p. 321–329, 2000.

NOGUEIRA, J. R. da S.; CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C. Desempenho de painel de vedação vertical externa em Light Steel Framing composto por placas de madeira mineralizada. [s. l.], p. 289–307, 2018.

NUNES, J. M. et al. O setor da Construção Civil no Brasil e a atual crise econômica. Research, Society and Development, [s. l.], v. 9, n. 9, p. e393997274, 2020.

OLIVEIRA, G. G. DE. Avaliação do desempenho térmico de sistemas de fechamento interno e externo em uma edificação estruturada em aço. 2019. [s. l.], 2019.

PACHLA, E. C. Desempenho Térmico-Acústico-Mecânico-Durabilidade de Compósitos de Matriz Cimentícia com Reduzida Massa Específica Reforçados por Casca e Palha do Arroz. 2017. Universidade Federal do Pampa, [s. l.], 2017.

PACHLA, E. C. ANÁLISE DA DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES COM INCORPORAÇÃO DE CASCA DE ARROZ. 2022. [s. l.], 2022.

POLETO, G. et al. Avaliação do desempenho de placas de concreto pré-fabricadas. [s. l.], n. October, p. 0–16, 2019.

PRUSTY, J. K.; PATRO, S. K.; BASARKAR, S. S. Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review. International Journal of Sustainable Built Environment, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 312–333, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijjsbe.2016.06.003>>

RAJ, A. et al. Heat transfer simulation across a building insulated with foam concrete wall cladding. Materials Today: Proceedings, [s. l.], v. 42, p. 1442–1446, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.242>>

RAJ, A.; SATHYAN, D.; MINI, K. M. Physical and functional characteristics of foam concrete: A review. Construction and Building Materials, [s. l.], v. 221, p. 787–799, 2019.

RAJ, B. et al. Mechanical and durability properties of hybrid fiber reinforced foam concrete. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 245, p. 118373, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118373>>

RAMAMURTHY, K.; KUNHANANDAN NAMBIAR, E. K.; INDU SIVA RANJANI, G. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, [s. l.], v. 31, n. 6, p. 388–396, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>>

RAMAMURTHY, K.; NARAYANAN, N. Influence of composition and curing on drying shrinkage of aerated concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, [s. l.], v. 33, n. 228, p. 243–250, 2000.

REZENDE, J. C. Estudo experimental da ligação de placas de compensado estrutural com perfis do sistema construtivo. 2019. [s. l.], 2019.

RIBAS, R. A. de J. Método para avaliação do desempenho térmico e acústico de edificações aplicado em painéis de fechamento industrializados. 2013. [s. l.], 2013.

RIPOLI FILHO, F.; RIPOLI, S. A. L.; BAESSO, M. H. Aplicação De Casca E Cinza Da Casca De Arroz Para Emprego Em Argamassa, Na Fabricação De Blocos Ecosustentáveis Para Alvenaria. *A Construção Civil: em uma perspectivas econômica, ambiental e social - Volume 2*, [s. l.], p. 41–62, 2022.

RODRIGUES, A. H. Estanqueidade De Alvenaria Revestida Com Diferentes Argamassas E Acabamentos : Aplicação Da Nbr 15575-4 / 2008. [s. l.], p. 73, 2010.

ROS, M. M. Barreiras setoriais para o desenvolvimento de fachadas leves estruturadas em light steel framing. 2019. [s. l.], 2019.

SABATINI, F. H. Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos - Formulação e aplicação de uma metodologia, 1989.

SABÃO, M. et al. The incidence of alternative minimum load values in masonry partition and lightweight partition systems with a cost analysis in Barranquilla, Colombia. *Case Studies in Construction Materials*, [s. l.], v. 9, 2018.

SAFIUDDIN, M. et al. Utilization of solid wastes in construction materials. *International Journal of Physical Sciences*, [s. l.], v. 5, n. 13, p. 1952–1963, 2010.

SALADO, G. de C. Painel de Vedação Vertical de Tubos de Papelão: Estudo , proposta e. [s. l.], 2011.

SANGMESH, B. et al. Development of sustainable alternative materials for the construction of green buildings using agricultural residues: A review. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 368, n. January, p. 130457, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130457>>

SANTIAGO, A. K.; FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. De. Steel Framing: Arquitetura. [s.l: s.n.].

SANTOS, B. M. C. PONTES TÉRMICAS LINEARES EM EDIFÍCIOS COM ESTRUTURA METÁLICA LEVE (LSF): LIGAÇÃO PAREDE-PAREDE. 2018. [s. l.], 2018.

SANTOS, L. O. C. S. M. D. S. et al. ANÁLISE DE PERMEABILIDADE EM PAINÉIS DE VEDAÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL LEVE. [s. l.], 2018.

SERRANO, T. et al. Lightweight mortars with rice husk: Mix design and properties evaluation. DYNA (Colombia), [s. l.], v. 79, n. 175, p. 128–136, 2012.

SHAFIGH, P. et al. Agricultural wastes as aggregate in concrete mixtures – A review. Construction and Building Materials, [s. l.], v. 53, p. 110–117, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.074>>

SHAH, S. N. et al. Lightweight foamed concrete as a promising avenue for incorporating waste materials: A review. Resources, Conservation and Recycling, [s. l.], v. 164, n. July 2020, p. 105103, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105103>>

SILVA, M. M. de A. Diretrizes para o projeto de alvenarias de vedação. Dissertação (mestrado). [s. l.], p. 167, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-01032004-150128/pt-br.php%0Ahttp://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-01032004-150128/>>

SISTEMA NACIONAL DE AVALIAÇÕES TÉCNICAS (SINAT). Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos - DIRETRIZ SINAT Nº 003 - Revisão 2. [s.l: s.n.].

SOARES, N. et al. Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [s. l.], v. 78, n. April, p. 194–209, 2017.

SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. de P. L. Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil. Ambiente Construído, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 309–326, 2018.

SOUZA, J. Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, [s. l.], 2008.

STEEL, S. L. Sistema construtivo a seco DATec Nº 014b. [s. l.], p. 1–21, 2020.

TEIXEIRA FILHO, F. J. Considerações sobre algumas Propriedades dos Concretos Celulares Espumosos. São Paulo.

TESIS. Avaliação Do Desempenho De Sistema De Vedação Vertical Interna – Svti Em Drywall Com Chapas De Gesso Em Relação À Nbr15 . 575 : 2013 – Edificações Habitacionais - Desempenho. [s. l.], 2015.

VELOSA, J. C.; FANGUEIRO, R.; MENDONÇA, P. Estudo das propriedades térmicas de materiais fibrosos aplicados em paredes divisórias leves. Ciencia e Tecnologia dos Materiais, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 50–56, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ctmat.2013.12.005>>

VIVAN, A. L. Projeto para Produção de Residências Unifamiliares em Light Steel Framing São Carlos. 2015. [s. l.], 2015.

WALISUNDARA, V. P. Behavior of Cellular Lightweight Concrete Wall Panels. [s. l.], n. May 2015, 2019.

WAN, K. et al. 3D full field study of drying shrinkage of foam concrete. Cement and Concrete Composites, [s. l.], v. 82, p. 217–226, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.001>>

WEI, S. et al. Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete. Construction and Building Materials, [s. l.], v. 47, p. 1278–1291,

2013. Disponible em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.027>>

XU, J. et al. A bi-level optimization approach for sustainable development and carbon emissions reduction towards construction materials industry: a case study from China. *Sustainable Cities and Society*, [s. l.], v. 53, n. September 2019, p. 15, 2020. Disponible em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101828>>

YANDZIO, E.; LAWSON, R. M.; WAY, A. G. J. Light Steel Framing in Residential Construction. [s.l: s.n.].

YERRAMALA, A.; RAMACHANDRUDU, C. Production and Properties of Foamed Magnesium. *Cellular Metals and Polymers*, [s. l.], n. February 2013, p. 1–4, 2004.

ZAMORA, J. J. R. Comportamiento de muros de concreto celular con diferentes cuantías de acero de refuerzo. 2007. [s. l.], 2007. Disponible em: <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1717/ramirezamora.pdf?sequence=1>>

ZHANG, Y.; GHALY, A. E.; LI, B. Physical properties of rice residues as affected by variety and climatic and cultivation conditions in three continents. *American Journal of Applied Sciences*, [s. l.], v. 9, n. 11, p. 1757–1768, 2013.

ZOU, Y.; ZHAN, Q.; XIANG, K. A comprehensive method for optimizing the design of a regular architectural space to improve building performance. *Energy Reports*, [s. l.], v. 7, p. 981–996, 2021. Disponible em: <<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.097>>