

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GIOVANNA SCHIWINSKI VERUSSA

DESENVOLVIMENTO DO PROJETO ARQUITETÔNICO DE UMA
CÉLULA-TESTE PARA ESTUDOS DE CAMPO

CURITIBA

2022

GIOVANNA SCHIWINSKI VERUSSA

DESENVOLVIMENTO DO PROJETO ARQUITETÔNICO DE UMA
CÉLULA-TESTE PARA ESTUDOS DE CAMPO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de Ambiente Construído, no Setor de Tecnologia, na Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Carlos Fernandes.

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Verussa, Giovanna Schiwinski

Desenvolvimento do projeto arquitetônico de uma célula-teste para estudos de campo. / Giovanna Schiwinski Verussa. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Carlos Fernandes.

1. Projeto arquitetônico (Célula -teste). 2. Habitação – desempenho térmico. 3. Conforto ambiental. I. Fernandes, Leandro Carlos. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **GIOVANNA SCHIWINSKI VERUSSA** intitulada: **Desenvolvimento do projeto arquitetônico de uma célula-teste para estudos de campo**, sob orientação do Prof. Dr. LEANDRO CARLOS FERNANDES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 13 de Dezembro de 2022.

Assinatura Eletrônica

22/12/2022 09:37:43.0

LEANDRO CARLOS FERNANDES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

22/12/2022 08:36:01.0

ALÓISIO LEONI SCHMID

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

21/12/2022 21:46:02.0

WILSON FLÁVIO FELTRIM ROSEGHINI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*Ao Arquiteto-Mor e
aos meus pais arquitetos.*

AGRADECIMENTO

Agradeço ao professor Leandro Carlos Fernandes pelo excelente apoio e orientação oferecida ao longo de todo o mestrado.

Aos professores Dr. Aloisio Leoni Schmid e Dr. Wilson Flávio Feltrim Roseghini, que aceitaram participar da banca examinadora.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná e a todo o seu corpo docente por proporcionarem um ambiente de formação acadêmica e disseminação de conhecimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Aos colegas do curso de Mestrado e aos graduandos de Arquitetura e Urbanismo, por todo o apoio, assistência e amizade.

À minha família e amigos pela compreensão, suporte e incentivo durante o período de formação.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

É crescente a necessidade de projetar edificações que cumpram a função de abrigo das atividades humanas com um menor impacto ambiental. Entre as ferramentas para pesquisas com este objetivo estão as células-teste para estudos de campo (CTEC). As CTEC são edificações construídas para fins experimentais que possibilitam investigações no ambiente externo, sendo uma alternativa aos custos e dificuldades práticas para a realização de testes de desempenho térmico em edifícios convencionais. Apesar de seu potencial, a revisão bibliométrica realizada para três panoramas amostrais – internacional, latino-americano e brasileiro – verificou que as CTEC ainda são pouco utilizadas no Brasil, especialmente quando comparadas à Europa e aos Estados Unidos. Nestas localidades, o emprego do instrumento remonta à primeira metade do século XX, o que resultou no amadurecimento das pesquisas, na criação de redes de pesquisadores, no estabelecimento de padrões para as células-teste e na concepção de protocolos para os experimentos. Diante deste contexto, esta pesquisa tem como objetivo desenvolver o projeto arquitetônico de uma célula-teste para estudos de campo em desempenho de edificações e conforto ambiental que configure um possível padrão a ser replicado no território brasileiro. Para tanto, utiliza-se o método de pesquisa *Design Science* em uma abordagem exploratória para a coleta e análise de dados qualitativos e quantitativos aplicados como subsídio ao projeto arquitetônico da célula-teste. Foi realizado o estudo de quatro casos – dois europeus, um latino-americano e um brasileiro – cujas soluções de projeto (características físicas, equipamentos e método de investigação) podem contribuir com o desenvolvimento de um modelo adaptado à realidade nacional. Opta-se por um dimensionamento que seja compatível com a escala do edifício e com a escala humana, desta forma, o dormitório de solteiro é escolhido como ambiente a ser replicado. Sendo assim, são coletados e discutidos dados acerca do dimensionamento dos dormitórios a partir da NBR 15.575:2013 e dos critérios estabelecidos nas legislações municipais dos 100 municípios brasileiros mais populosos. A partir das informações coletadas são definidas diretrizes projetuais sobre os usos e aplicações, as características físicas, os materiais e o sistema construtivo, os sistemas complementares e o local de implantação. Por fim, são apresentados os desenhos que compõem o projeto arquitetônico desenvolvido em nível de anteprojeto, além dos equipamentos sugeridos e dos procedimentos de uso recomendados. Considera-se que, a pesquisa atendeu aos objetivos propostos, tendo como produto final um instrumento de suporte às pesquisas de campo nas áreas de conforto ambiental e desempenho de edificações que é passível de replicação no território nacional.

Palavras-chave: Célula-teste para estudos de campo. Desempenho térmico. Avaliação de componentes. Conforto ambiental.

ABSTRACT

There is a growing demand to design buildings that fulfill the function of sheltering human activities with a lower environmental impact. Among the tools for research with this objective are test cells for field studies. Test cells are buildings built for experimental purposes that allow investigations in the external environment, being an alternative to the costs and practical difficulties of carrying out thermal performance tests in conventional buildings. Despite its potential, the bibliometric review carried out for three sample scenarios – international, Latin American, and Brazilian – found that test cells are still little used in Brazil, especially when compared to Europe and the United States. In these locations, the use of the instrument dates back to the first half of the 20th century, which resulted in the maturation of research, the creation of researcher's networks, the establishment of standards for test cells, and the design of protocols for experiments. Given this context, this research aims to develop the architectural design of a test cell for field studies on building performance and environmental comfort that configures a possible standard to be replicated in the Brazilian territory. Therefore, the Design Science research method is used in an exploratory approach for the collection and analysis of qualitative and quantitative data applied as a subsidy to the architectural design of the test cell. A study of four cases was carried out – two Europeans, one Latin American, and one Brazilian – whose design solutions (physical characteristics, equipment, and research method) can contribute to the development of a model adapted to the national reality. We opted for a design that is compatible with the scale of the building and the human scale, so the single bedroom is chosen as the environment to be replicated. Therefore, data on the dimensioning of dormitories based on NBR 15.575:2013 and the criteria established in the municipal legislation of the 100 most populous Brazilian municipalities are collected and discussed. Based on the collected information, design guidelines are defined on the uses and applications, the physical characteristics, the materials, and the constructive system, the complementary systems, and the place of implantation. Finally, the drawings that make up the architectural project developed are presented, in addition to the suggested equipment and recommended procedures for use. It is considered that the research met the proposed objectives, having as a final product an instrument to support field research in the areas of environmental comfort and performance of buildings that can be replicated in the national territory.

Keywords: Test cell for field studies. Thermal performance. Component evaluation. Environmental comfort.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Gráfico do consumo energético do setor residencial	21
FIGURA 2 – Pesquisas por áreas de conhecimento	30
FIGURA 3 – Número de publicações por ano	31
FIGURA 4 – Número de publicações por país	32
FIGURA 5 – Número de publicações no continente europeu.....	32
FIGURA 6 – Uso de células-teste ao longo do tempo e parceriais entre países.....	33
FIGURA 7 – Emprego de palavras-chave ao longo do tempo.....	34
FIGURA 8 – Número de publicações na América Latina	36
FIGURA 9 – Número de publicações por ano na América Latina	37
FIGURA 10 – Células-teste por tamanho na América Latina (exceto Brasil)	39
FIGURA 11 – Exemplos de células-teste na América Latina	39
FIGURA 12 – Número de publicações por ano no Brasil	40
FIGURA 13 – Distribuição das publicações por Estado entre 2005-2022	42
FIGURA 14 – Distribuição das publicações por Estado entre 2005-2014 e 2015-2022	43
FIGURA 15 – Tema ou elemento investigado nas células-teste do Brasil	45
FIGURA 16 – Células-teste por tamanho no Brasil	46
FIGURA 17 – Exemplos de células-teste no Brasil	46
FIGURA 18 – Material principal das células-teste no Brasil	47
FIGURA 19 – Quantidade de células-teste por experimento no Brasil.....	48
FIGURA 20 – Células-teste do CRHEA, Itirapina/SP	49
FIGURA 21 – Células-teste da UNICAMP	49
FIGURA 22 – Posicionamento interno dos sensores de temperatura	51
FIGURA 23 – Importância dos temas de pesquisa utilizando células-teste nos três universos amostrais (base scopus, América Latina exceto Brasil, e Brasil).....	53
FIGURA 24 – Zoneamento bioclimático brasileiro.....	69
FIGURA 25 – Exemplo da variação da temperatura interna (T_{in}) em função da diferença entre a temperatura externa (T_{ex}) e a temperatura interna (T_{in})	74
FIGURA 26 – Mapa mental	78
FIGURA 27 – Etapas de pesquisa	79
FIGURA 28 – Componentes da análise de dados.....	80

FIGURA 29 – Distribuição geográfica das cidades da amostra.....	86
FIGURA 30 – Célula-teste PASLINK.....	91
FIGURA 31 – Modificações da célula-teste Paslink	93
FIGURA 32 – Sistema de sombreamento com lona na célula-teste Paslink.....	93
FIGURA 33 – Células-teste gêmeas (a) e célula-teste unitária (b).....	94
FIGURA 34 – Célula-teste de Florença, Itália	97
FIGURA 35 – Célula-teste de Florença em planta	97
FIGURA 36 – Detalhe do envelope vertical da célula-teste de Florença.....	98
FIGURA 37 – Placa de revestimento medidora do fluxo de calor	99
FIGURA 38 – Célula-teste para o Alto Andino, Peru.....	102
FIGURA 39 – Temperatura do ar e radiação solar coletados ‘in situ’	103
FIGURA 40 – Localização na região metropolitana (a) e na sede ecoville (b)	105
FIGURA 41 – Implantação dos módulos ME e MC	105
FIGURA 42 – Corte (a) e detalhe (b) da envoltória CBBC	108
FIGURA 43 – Mecanismos de rotação avaliados.....	109
FIGURA 44 – Localização típica do dormitório de solteiro em edifícios residenciais	116
FIGURA 45 – Diagrama comparativo das dimensões internas	120
FIGURA 46 – Área mínima do dormitório segundo as legislações municipais.....	122
FIGURA 47 – Dimensão e pé-direito mínimos do dormitório segundo as legislações municipais	123
FIGURA 48 – Ventilação e iluminação mínimos do dormitório segundo as legislações municipais	124
FIGURA 49 – Comparativo entre pés direitos e áreas mínimas da NBR 15.575 e das legislações municipais.....	125
FIGURA 50 – Comparativo entre larguras e profundidades mínimas da NBR 15.575 e das legislações municipais	126
FIGURA 51 – Comparativo entre áreas e volumes mínimos da NBR 15.575 e das legislações municipais.....	127
FIGURA 52 – Área de implantação (vermelho) no campus Centro Politécnico (amarelo).....	133
FIGURA 53 – Estação metereológica UFPR.....	133
FIGURA 54 – Isométrica frontal e posterior	134
FIGURA 55 – Isométrica explodida dos componentes.....	135

FIGURA 56 – Implantação	136
FIGURA 57 – Processo industrial de montagem de painéis em wood frame	137
FIGURA 58 – Planta.....	138
FIGURA 59 – Corte transversal AA.....	139
FIGURA 60 – Corte longitudinal BB	140
FIGURA 61 – Detalhe camadas das paredes	141
FIGURA 62 – Detalhe camadas do piso	142
FIGURA 63 – Detalhe camadas da cobertura	143
FIGURA 64 – Perspectiva da célula-teste	144
FIGURA 65 – FieldLogger: Data Logger industrial multicanais	146
FIGURA 66 – Confortímetro SENSU.....	147
FIGURA 67 – Testes com elementos de piso	148
FIGURA 68 – Testes com elementos de cobertura.....	149
FIGURA 69 – Testes com elementos de vedação vertical	150

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Municípios contemplados na amostra	87
QUADRO 2 – Dormitório mínimo: planta tipo A.....	118
QUADRO 3 – Dormitório mínimo: planta tipo B.....	118
QUADRO 4 – Dormitório mínimo: planta tipo C	119
QUADRO 5 – Dormitório mínimo: planta tipo D	119

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Temas de pesquisa	35
TABELA 2 – Áreas de pesquisa	35
TABELA 3 – Temas de pesquisa e palavras-chave na América Latina	38
TABELA 4 – Temas de pesquisa e palavras-chave das publicações brasileiras	44
TABELA 5 – massa específica (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de alguns materiais de construção	57
TABELA 6 – Valores médios de resistência térmica superficial	60
TABELA 7 – Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas)	64
TABELA 8 – Transmitância térmica (u), capacidade térmica (c) e atraso térmico (ϕ) de algumas paredes padrão	65
TABELA 9 – Transmitância térmica (u), capacidade térmica (c) e atraso térmico (ϕ) de algumas coberturas padrão	66
TABELA 10 – Comparação entre as câmaras climáticas LOBSTER e CBBC	106
TABELA 11 – Critérios para sala de uso múltiplo segundo SESA nº 318/2002	106
TABELA 12 – Critérios construtivos para a ZB1 segundo a NBR 15.220-3/2005 ...	107
TABELA 13 – Caracterização da envoltória da CBBC	108
TABELA 14 – Características principais das edificações estudadas	114
TABELA 15 – Elementos recomendados pela NBR 15.575 para o dormitório de solteiro	117
TABELA 16 – Síntese das dimensões do dormitório mínimo segundo a NBR 15.575	120
TABELA 17 – Análise estatística das dimensões mínimas dos dormitórios segundo a legislação municipal	122
TABELA 18 – Análise estatística da ventilação e iluminação mínimas dos dormitórios segundo a legislação municipal	123
TABELA 19 – Propriedades físicas e térmicas das camadas de parede	141
TABELA 20 – Propriedades físicas e térmicas das camadas de piso	142
TABELA 21 – Propriedades físicas e térmicas das camadas de cobertura	143
TABELA 22 – Síntese das características físicas da célula-teste	144

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	PROBLEMA	17
1.2	OBJETIVO	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
1.3	JUSTIFICATIVA	18
1.3.1	Aspectos econômicos	19
1.3.2	Aspectos sociais	20
1.3.3	Aspectos ambientais	20
1.3.4	Aspectos tecnológicos	21
1.4	CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UFPR	22
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1.1	Conceituação	24
2.1.2	Estudos pioneiros	26
2.1.3	Estudo de campo <i>versus</i> simulação computacional	27
2.2	ESTADO DA ARTE	28
2.2.1	Panorama Internacional	29
2.2.2	Panorama Latino-Americano	35
2.2.3	Panorama Brasileiro	39
2.2.4	Considerações	52
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	54
3.1	FLUXO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA TÉRMICA	54
3.1.1	Fluxo de energia térmica	54
3.1.2	Condução	55
3.1.3	Convecção	55
3.1.4	Radiação	55
3.2	PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS	55
3.2.1	Calor específico	55
3.2.2	Condutividade térmica	56
3.2.3	Massa específica	56

3.2.4	Valores de referência	57
3.3	PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS COMPONENTES	57
3.3.1	Capacidade térmica.....	57
3.3.2	Resistência térmica	59
3.3.3	Resistência térmica superficial	60
3.3.4	Transmitância térmica	60
3.3.5	Atraso térmico	61
3.3.6	Emissividade e absorvância	63
3.3.7	Fator solar	63
3.3.8	Valores de referência	64
3.4	PROPRIEDADES TÉRMICAS DAS EDIFICAÇÕES	67
3.4.1	Fator decremental	67
3.4.2	Inércia térmica.....	67
3.4.3	Nível de inércia térmica (NIT)	69
3.5	OUTROS ASPECTOS MONITORADOS EM CÉLULAS-TESTE NO BRASIL	70
3.5.1	Amplitude térmica.....	70
3.5.2	Percepção térmica.....	71
3.6	MÉTODOS ESTIMATIVOS DAS TEMPERATURAS INTERNAS DO AR.....	71
3.7	CONSIDERAÇÕES	75
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	76
4.1	PROCEDIMENTOS GERAIS.....	76
4.1.1	Unidade de análise.....	76
4.1.2	Delimitação do trabalho	76
4.1.3	Justificativa da escolha da estratégia de pesquisa	77
4.1.4	Seleção de caso ou amostra	79
4.1.5	Protocolo de coleta de dados	80
4.1.6	Método de análise de dados.....	80
4.1.7	Teste de validade	81
4.2	PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS	84
4.2.1	Estudos de caso.....	84
4.2.2	Dimensionamento	85
4.2.3	Diretrizes projetuais.....	87
4.2.4	Célula-teste para estudos de campo	87
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
5.1	ESTUDOS DE CASO	88
5.1.1	Estudo 01 – Programa europeu Passys-Paslink.....	88

5.1.2	Estudo 02 – Célula-teste de Florença, Itália	95
5.1.3	Estudo 03 – Célula-teste para a região do Alto Andino, Peru	100
5.1.4	Estudo 04 – Câmara Bioclimática de Baixo Custo, Brasil	104
5.1.5	Síntese	112
5.2	DIMENSIONAMENTO CONSIDERANDO UM DORMITÓRIO	115
5.2.1	NBR 15.575.....	116
5.2.2	Leis Municipais.....	121
5.2.3	Comparação dos resultados.....	124
5.2.4	Síntese	128
5.3	DIRETRIZES PROJETUAIS	129
5.3.1	Usos e aplicações	129
5.3.2	Características físicas	130
5.3.3	Materiais e sistema construtivo	130
5.3.4	Sistemas complementares	131
5.3.5	Local de implantação.....	132
5.4	CÉLULA-TESTE PARA ESTUDOS DE CAMPO	134
5.4.1	Projeto arquitetônico.....	134
5.4.2	Equipamentos	145
5.4.3	Procedimentos de uso.....	148
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	153
	REFERÊNCIAS.....	156
	ANEXO A.....	171
	ANEXO B.....	182
	ANEXO C.....	186

1 INTRODUÇÃO

A crescente pressão por edificações que cumpram a função de abrigo das atividades humanas de maneira mais eficiente e com menor impacto ambiental motiva pesquisas na área de desempenho térmico de novos materiais, componentes e sistemas construtivos. Contudo, a efetiva validação de tais elementos depende de testes de performance realizados, preferencialmente, nas condições dinâmicas dos ambientes externos. Neste sentido, as células-teste para estudos de campo são uma alternativa diante dos custos e das dificuldades práticas de executar experimentos em edifícios convencionais. No entanto, a aplicação das células-teste na área de desempenho térmico ainda é pouco difundida no Brasil quando comparada com o que ocorre em outros países (FERNANDES *et al.*, 2015), principalmente europeus, que constituíram grandes redes de trabalho em torno de modelos padronizados do equipamento (DIJK; LINDEN; 1993).

1.1 PROBLEMA

O uso de células-teste em estudos de campo permite avaliar o desempenho térmico de coberturas, vedações, componentes, materiais e dispositivos para condicionamento passivo (FERNANDES *et al.*, 2015) nas condições reais de uso. Todavia, não existe um padrão para o artefato, o que dificulta a comparação dos resultados obtidos em experimentos realizados por diferentes pesquisadores e limita as investigações a localidades com aspectos geoclimáticos específicos que não podem ser generalizados. Outros aspectos são a fragilidade e a efemeridade das estruturas, em sua maioria, de pequenas dimensões, fixas, não desmontáveis e projetadas para um único uso. Além disso, os procedimentos de avaliação do desempenho térmico a partir de células-teste também carecem de padronização mais detalhada. Diante do exposto, pergunta-se, a) qual tipo de célula-teste é mais utilizado no Brasil? b) quais são os tipos de experimentos mais realizados? c) quais são os requisitos mínimos para que uma célula-teste atenda às necessidades dos experimentos nacionais e configure um padrão a ser replicado?

1.2 OBJETIVO

Nesta subseção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos que norteiam o trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral desenvolver o projeto arquitetônico de um modelo de célula-teste para estudos de campo em desempenho de edificações e conforto ambiental que configure um possível padrão a ser replicado no território brasileiro.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o estado da arte da aplicação de células-teste em pesquisas da área de engenharia civil e arquitetura utilizando um método de revisão bibliométrica;
- Relacionar as propriedades térmicas de materiais, componentes e edificações com o emprego de células-teste;
- Realizar estudo de casos com características pertinentes ao contexto do trabalho;
- Avaliar critérios para dimensionamento de uma célula-teste;
- Definir diretrizes projetuais para um projeto padrão de célula-teste;
- Desenvolver um projeto de célula-teste em nível de anteprojeto.

1.3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de uma célula-teste padronizada para estudos de campo facilita a comparação dos resultados de pesquisas realizadas em diferentes períodos e locais, movidas por diferentes pesquisadores; incentiva estudos de caráter exploratório com grau de sofisticação variável e de baixo custo; e contribui para o incremento das pesquisas brasileiras na área do desempenho de edificações e seus componentes. Tais fatores favorecem a replicação do equipamento no território

brasileiro, estendendo o alcance dos estudos de desempenho térmico às diferentes regiões bioclimáticas, beneficiando pesquisadores, fabricantes de produtos e órgãos normativos que encontram na célula-teste um espaço adequado para a realização de seus experimentos. O projeto colabora ainda com o aprimoramento de aspectos econômicos, sociais, ambientais e tecnológicos apresentados abaixo.

1.3.1 Aspectos econômicos

A indústria da construção civil tem participação significativa no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, respondendo em média por cerca de 5% do PIB – segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o período de 2000 a 2021. O setor também é um dos grandes geradores de empregos sendo responsável, em média, por 7,5% das pessoas ocupadas entre 2000-2019 (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO - CBIC, 2022a). Os bons resultados da construção civil costumam ainda impulsionar a economia mesmo em períodos de crise e retração, registrando um crescimento de 9,7% em 2021, contra a alta de 4,6% do PIB total, demonstrando uma alta capacidade de recuperação, impulsionada principalmente pelo incentivo de acesso à casa própria. Além disso, a indústria da construção civil investiu 19,2% dos seus rendimentos em máquinas, equipamentos e inovação em 2021 (CBIC, 2022b). Contudo, tais investimentos concentram-se principalmente na aquisição de bens e não no incremento de tecnologia ou na qualificação da mão de obra.

Esta pesquisa busca demonstrar que investimentos em tecnologia da construção voltados para a melhora do ambiente construído realizados com pouco recurso podem produzir resultados significativos a curto, médio e longo prazo, configurando excelente custo-benefício. De maneira especial, o emprego de célula-testes pode beneficiar ainda diversas áreas da construção, como o desenvolvimento de novos materiais e a análise de novas técnicas construtivas.

1.3.2 Aspectos sociais

Apesar do incentivo à produção de unidades residenciais, o déficit habitacional brasileiro permanece alto, estimado em 5,9 milhões de habitações em 2019 (Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021). Mesmo a grande produtividade dos programas habitacionais *Minha Casa Minha Vida* e *Casa Verde Amarela* não tem sido suficiente para sanar o problema e especialistas apontam que a preocupação demasiada com a quantidade e não com a qualidade dos empreendimentos pouco beneficia a população ao desconsiderar aspectos estéticos ou ligados ao conforto ambiental dos usuários.

Neste sentido, pesquisas voltadas ao incremento do desempenho térmico de edificações podem beneficiar a população que se encontra nas faixas de renda mais baixas e, portanto, tem menor acesso a equipamentos de climatização. O emprego de células-teste permite avaliar soluções para novas edificações como também de adequação das moradias existentes visando maior eficiência. Além disso, se as dimensões da célula-teste forem compatíveis com ambientes residenciais é facilitada a transposição dos resultados para esta tipologia construtiva.

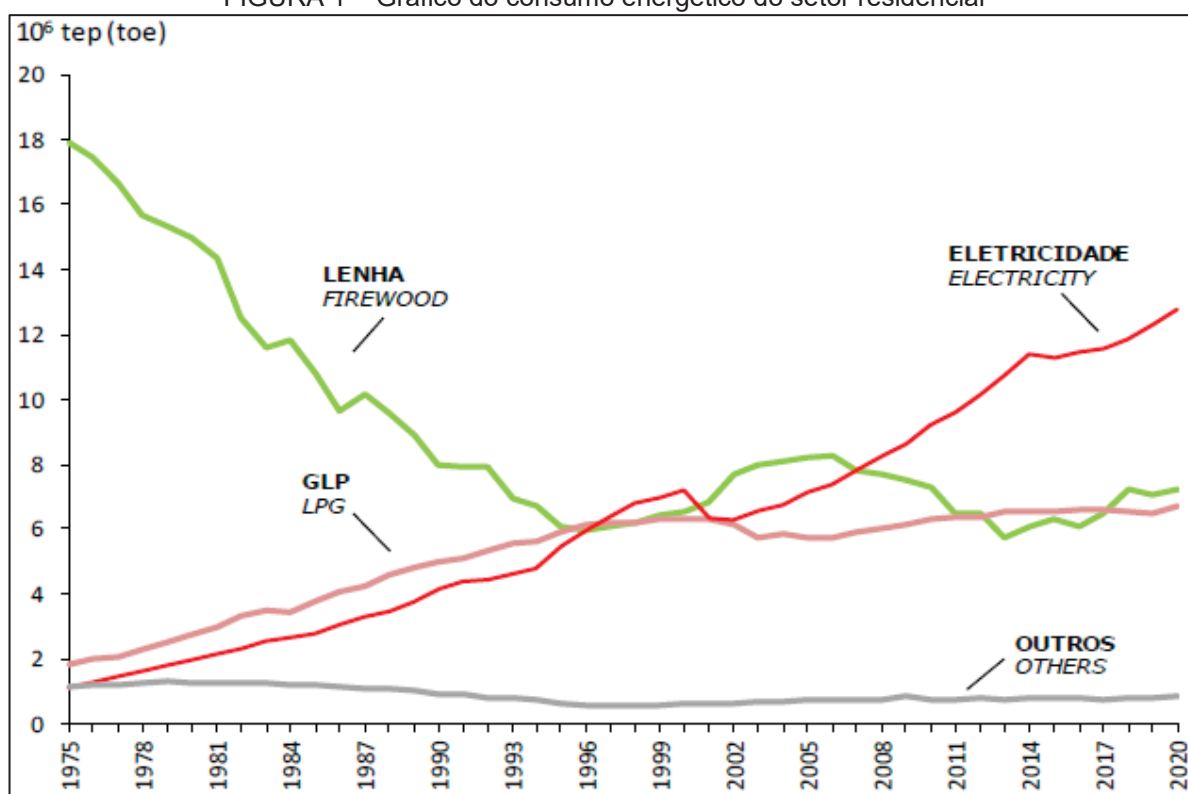
1.3.3 Aspectos ambientais

Segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021a) o setor residencial é o segundo maior consumidor de energia, com 31,2% do consumo, ficando atrás apenas do setor industrial com 35% no ano de 2020. Analisando as fontes energéticas mais utilizadas nas residências (FIGURA 1), percebe-se um aumento consolidado do consumo de energia elétrica impulsionado principalmente pelo uso de aparelhos com alta potência, como os condicionadores de ar (EPE, 2021b). Além disso, a análise da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017) sobre a projeção da demanda de energia elétrica para o período entre 2016-2026 indica um incremento médio de consumo anual total de 3,5%, com uma expectativa de crescimento do setor residencial de 4,0% a cada ano.

Neste contexto, é crescente a pressão por edificações, em especial residenciais, que cumpram a função de abrigo das atividades humanas de forma mais

eficiente e com menor impacto ambiental. Tal pressão estimula pesquisas sobre o desempenho térmico de materiais ou componentes de edifícios, e a aplicação de estratégias bioclimáticas voltadas ao condicionamento térmico passivo. Já as análises do comportamento térmico demandam, por sua vez, testes conduzidos nas condições dinâmicas dos ambientes externos. Para tanto, as células-teste voltadas para estudos de campo são uma alternativa diante dos custos e dificuldades práticas de medições em edifícios existentes.

FIGURA 1 – Gráfico do consumo energético do setor residencial



Fonte: Balanço Energético Nacional (2019).

1.3.4 Aspectos tecnológicos

Além da indústria da construção civil e do usuário final, o desenvolvimento de novas tecnologias traz benefícios também para criadores de novos produtos com interesses acadêmicos ou comerciais. No caso da célula-teste proposta, os primeiros, representados pelos pesquisadores, ganham com a possibilidade de comparação dos resultados e a expansão de suas pesquisas para diferentes regiões climáticas

brasileiras. Já os segundos, que incluem fabricantes e órgãos normativos, encontram na célula-teste uma ferramenta adequada para testes iniciais e avançados visando à regulamentação de produtos.

1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UFPR

Neste tópico, são apresentadas as pesquisas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPR que possuem alguma afinidade com o presente trabalho por estarem vinculadas ao tema desempenho térmico de edificações, ao uso de protótipos de componentes de edifício, ou ao estudo de técnicas e materiais tipicamente avaliados em ensaios com células-teste.

Dentre os estudos relacionados ao desempenho térmico de edificações ressaltam-se Leitner (2019) que avaliou o desempenho térmico de uma habitação de interesse social em *wood frame*, Alves (2014) que pesquisou o potencial de climatização por dutos subterrâneos nas diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, Martins (2017) que explorou o tratamento da resistência térmica superficial nas normas brasileiras, Blasius (2020) que estudou o desempenho térmico de sistemas de envoltórias acopladas a um trocador de calor e Kramel (2021) que pesquisou sobre o impacto de diferentes sistemas construtivos no nível de inércia térmica de edificações.

Quanto ao uso de protótipos de componentes de edifício, citam-se as pesquisas sobre telhados verdes de Casagrande (2020), Bär (2019), Lopes (2018), Savi (2015) e Baldessar (2012) que utilizaram artefatos semelhantes a células-teste de pequenas dimensões para simular a cobertura de edificações. Bem como o trabalho de Forlin (2022) que realizou um estudo experimental em células-teste com a aplicação de módulos fotovoltaicos em fachadas.

Entre os materiais e técnicas comumente presentes em ensaios com células-teste, destacam-se as dissertações de Pons (2017) e Silva (2017). A primeira por ter estudado o potencial dos materiais com mudança de fase (*Phase Change Materials - PCM*) e a segunda por ter investigado a tecnologia de resfriamento evaporativo,

ambas com enfoque no conforto térmico do ambiente construído. Estes dois temas são bastantes relevantes nas pesquisas com células-teste no mundo e na América Latina respectivamente.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No presente capítulo – INTRODUÇÃO – são apresentados a delimitação do tema, o problema, os objetivos, as justificativas, a contextualização no programa e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – está dividido em duas partes. A primeira aborda a conceituação e o referencial teórico ligado ao tema, e a segunda avalia o estado da arte das pesquisas mais recentes que empregam células-teste.

O terceiro capítulo – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – apresenta as principais propriedades térmicas empregada no estudo do desempenho térmico dos materiais, dos componentes e da edificação como um todo.

No quarto capítulo – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS – são descritos os procedimentos gerais e específicos adotados ao longo deste trabalho.

No quinto capítulo – RESULTADOS E DISCUSSÃO – os tópicos estudo de casos e dimensionamento apresentam os subsídios para a definição de diretrizes projetuais a partir das quais é consolidado o projeto arquitetônico.

Por fim, no sexto e último capítulo – CONSIDERAÇÕES FINAIS – espera-se verificar se o objetivo inicial foi alcançado, além de avaliar melhorias futuras e indicar caminhos para a continuidade da linha de pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo é dividido em duas partes: referencial teórico e estado da arte. A primeira parte reúne referências introdutórias ao tema e a segunda apresenta o estado atual das pesquisas no panorama internacional, latino-americano (exceto Brasil) e brasileiro.

2.1 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico são reunidos artigos clássicos sobre o conceito de célula-teste, seu emprego na análise do desempenho térmico em estudos pioneiros e a integração do artefato com simulações computacionais.

2.1.1 Conceituação

Células-teste são definidas por Hitchin (1993) como edifícios simplificados construídos com o objetivo de auxiliar a compreensão de processos e interações presentes em edificações mais complexas. Diferentemente de construções em escala reduzida, as células-teste são projetadas especificamente para atender as demandas de determinado experimento a ser realizado sob condições controladas. As células-teste para estudos de campo são um elemento intermediário entre os testes estacionários realizados em laboratórios e os estudos com edificações convencionais (STRACHAN; BAKER; 2008). Os experimentos com células-teste, sejam elas internas ou externas, garantem uma qualidade superior dos sistemas de instrumentação e condições ambientais internas mais homogêneas (CATTARIN *et al.*, 2016).

Uma das diferenças entre as quatro categorias de edifícios para experimentos, a) réplicas de construções convencionais, b) construções em escala reduzida, c) células-teste de campo e d) células-teste de laboratório está no nível de controle das variáveis ambientais externas, tais como temperatura ambiente, umidade relativa e velocidade do ar. É menor nas edificações dos tipos a e c (células-teste para estudos de campo) e maior nas do tipo c e d. Por outro lado, em se tratando do controle das variáveis ambientais internas, as células-teste para estudos de campo

apresentam as mesmas possibilidades de controle que as células-teste para estudos no interior de laboratórios.

As células-teste são artefatos versáteis que podem ser projetados de acordo com o objetivo da pesquisa e o tipo de componente a ser investigado. Podem, por exemplo, ser operadas como calorímetros possibilitando medições das trocas de calor através do envelope. Funcionam também como espaços com condições internas controladas fornecendo condições de contorno fixas para um lado do elemento em teste e outros parâmetros físicos de interesse medidos diretamente no componente. São empregadas ainda como réplica de ambientes, usualmente de escritórios, permitindo testes de conforto visual, eficácia da ventilação ou conforto térmico (CATTARIN *et al.*, 2016).

Dentre os temas de pesquisa que comumente recorrem ao equipamento, encontram-se as pesquisas sobre desempenho térmico de edifícios e seus componentes. Segundo Strachan e Baker (2008) a maior parte dos estudos com célula-teste em desempenho térmico se concentra em dois aspectos: 1) avaliar o desempenho de um componente em condições climáticas dinâmicas, e 2) utilizar a célula-teste externa como validação de modelos utilizados em simulações computacionais. Além destes, os autores apontam um terceiro interesse emergente vinculado à compreensão de processos físicos específicos.

As características físicas das células-teste para estudos de campo são: geometria e construção simplificada, projeto preciso, emprego de materiais com propriedades térmicas conhecidas e dimensionamento compatível com a escala humana. Sendo este último importante para a redução dos efeitos da escala ao se aproximar das dimensões do ambiente para o qual o envelope e/ou componente em avaliação foi desenvolvido (HITCHIN, 1993). Apesar disto, observa-se na literatura uma variedade de tamanhos para o artefato, que apresenta arestas com comprimento variando entre aproximadamente 1,00 m e 3,00 m, a depender da finalidade para a qual foi construído.

Dentre os beneficiados pelo uso de células-teste, segundo Cattarin *et al.* (2016), destacam-se projetistas e fabricantes, pesquisadores e usuários. Os projetistas e fabricantes conseguem otimizar projetos e viabilizar o desenvolvimento

de produtos, os pesquisadores pode analisar e modelar fenômenos físicos que ocorrem sob condições específicas, e os usuários tem o desempenho dos produtos que consome incrementado.

2.1.2 Estudos pioneiros

Os primeiros experimentos sobre desempenho térmico de edifícios com o uso de células-teste de campo foram desenvolvidos para a avaliação de propriedades dos materiais incorporados às edificações, a análise do fluxo de calor através de componentes do edifício e o estudo do condicionamento térmico passivo. Sendo este último precursor do emprego de células-teste como instrumento de análise, em substituição aos edifícios convencionais construídos para outros fins.

Para Balcomb (1984) aplicações de técnicas de condicionamento passivo em edifícios são observadas nas mais diversas civilizações ao longo da história. Todavia, o interesse moderno pelo tema data da década de 1970, concentrando-se nos Estados Unidos e no continente europeu. As pesquisas iniciais foram respostas diretas à construção de edificações passivas pioneiras que atraíram o interesse de pesquisadores quanto ao seu comportamento térmico dinâmico. É o caso da escola Wallasey na Inglaterra, da Casa Trombe na França e da casa Atascadero na Califórnia. Entretanto, até o momento, os trabalhos estavam limitados à investigação de edifícios específicos, inseridos em climas particulares, impossibilitando a comparação e generalização dos resultados.

A primeira *Passive Solar Conference* (1976) marca uma mudança na trajetória das pesquisas sobre o tema ao revisar os estudos anteriores e direcionar os posteriores para o desenvolvimento de modelos matemáticos, a validação destes modelos por comparação com resultados de testes e o uso de modelos para investigar a influência de diferentes parâmetros na performance do edifício. Neste novo formato, as pesquisas iniciam pelos resultados obtidos em células-teste ou em edifícios monitorados, a partir dos quais é possível desenvolver e validar modelos analíticos. Estes modelos utilizam dados climáticos (especialmente temperatura do ar e radiação solar), o que permite prever o desempenho térmico de um edifício e possibilita a

variação de fatores como a localidade, o clima e o projeto arquitetônico (BALCOMB, 1984).

Dentro do estudo e desenvolvimento de células-teste voltadas à análise do desempenho térmico de edificações e seus componentes, destaca-se o programa europeu PASSYS (*Passive Solar Components and Systems Testing*, 1986-1992). Isso pois, muito mais do que um modelo eficiente e calibrado de célula-teste, o projeto consolidou uma rede de 10 países e cerca de 60 pesquisadores, possibilitando o efetivo intercâmbio de conhecimento e a comparação direta dos experimentos realizados em diferentes condições climáticas.

Além de conceber um modelo de célula-teste padrão, o programa PASSYS também se preocupou com o desenvolvimento de um método de coleta de dados que fosse comum, coerente e acessível a todos os participantes do grupo. Após uma série de testes foi escolhido como método o chamado princípio de identificação de parâmetro. Em seguida, as investigações se concentraram na definição de um modelo adequado, na seleção de um software de identificação e na concepção de rotinas de pós-processamento (DIJK; LINDEN; 1993).

2.1.3 Estudo de campo *versus* simulação computacional

Ainda na década de 1990, ganhou força o argumento de que os métodos de pesquisa baseados em experimentos utilizando células-teste estão desatualizados, especialmente no que tange os estudos de desempenho térmico. Defende-se que as células-teste podem ser empregadas muito mais como instrumento de suporte da validação e calibragem de modelos computacionais, do que elemento de análise propriamente dito. John Littler (1993, p.221) cita como pontos negativos das células-teste e/ou modelos em escala reduzida a impossibilidade de realizar alterações ou atualizações uma vez construídos, a limitação de transporte, o custo vinculado à replicação e a dificuldade em trabalhar em equipe. Outro aspecto negativo é o foco dado pelos estudos, em especial do projeto PASSYS, em testes de produtos em detrimento de testes do edifício. E, ainda, a limitação destes testes apenas aos produtos já existentes.

As células-teste não podem ser usadas para investigar o valor dos componentes que ainda não estão disponíveis. Por exemplo, é possível simular o desempenho do vidro fotocromático altamente transmissor, mas este ainda não existe (LITTLER, 1993, p. 227, Tradução da autora).

Por fim, a exemplo de outras áreas que já migraram ou estão em migração para a simulação computacional (caso da indústria automotiva), Littler (1993) reitera que a construção de células-teste para análises de desempenho térmico permanece essencial apenas para o refinamento de algoritmos específicos.

Anos mais tarde, Strachan (2008) reconhece a importância do uso de células-teste como suporte a simulação computacional em estudos do desempenho térmico, uma vez que os módulos de teste, isoladamente, não são suficientes para determinar o comportamento de um edifício, ou componente deste, em diferentes localidades, sob variadas condições climáticas. Diante do impasse, o autor desenvolve um procedimento para validação de um modelo voltado à simulação computacional a partir de uma célula-teste. A metodologia proposta é composta por três elementos: calibração, escalonamento e replicação, descritos na seção de estudos de caso.

2.2 ESTADO DA ARTE

Buscando compreender o estado atual das pesquisas na área de desempenho térmico de edifícios – que fazem uso de células-teste – foi realizada no início de 2020 uma revisão sistêmica na base de dados *Scopus*, da editora *Elsevier*, a partir do Portal de Periódicos da CAPES. Para tanto, foram escolhidas para compor o *string* de busca as palavras-chave que melhor representam o tema. Definiu-se primeiro uma grande área composta por edificações ou arquitetura, somou-se a esta o objeto de pesquisa, juntamente com os termos comumente associados ao artefato. A fim de excluir publicações das áreas de biologia, saúde e aerodinâmica foram desconsiderados trabalhos que mencionam determinados vocábulos frequentemente empregados nestes campos. Desta forma, o *string* final de pesquisa é: (build* OR architect*) AND ("test cell*" OR "test building" OR "outdoor facilit*" OR "test box") AND (energy OR temperature* OR envelope OR "thermal performance" OR cooling OR heating OR insulation OR roof OR wall) AND NOT (cytology OR medicine OR "wind

tunnels” OR aerodynamics OR “aerodynamic loads”). A busca é ainda limitada às áreas: Engenharia, Energia, Ciências Ambientais, Ciência dos Materiais, Ciências Sociais, Ciência da Computação, Física e Astronomia, Matemática, Artes e Humanidades e Multidisciplinar.

Os dados obtidos foram organizados em planilhas por ano de publicação, subárea de conhecimento, tipo de publicação (trabalho acadêmico, artigo de revista ou publicação em evento), autores, instituições e países. Para a análise das temáticas de pesquisa foram utilizadas as palavras-chave indicadas pelos autores com determinada ocorrência. A partir destas foi possível classificar os estudos em dois grupos: áreas ou campos de pesquisa (situando os trabalhos em um universo mais amplo da produção científica); e temas (indicando recortes específicos dentro deste universo). Ressalta-se, porém, que as áreas e temas não são estanques e algumas palavras-chave podem se encaixar em mais de uma categoria. As informações coletadas foram ainda analisadas sob outros aspectos com o auxílio do programa *VOSviewer*. Neste, foi possível visualizar o emprego das palavras-chave ao longo do tempo, o número de publicações por país e o vínculo dos autores, o que permitiu identificar a existência de parcerias internacionais.

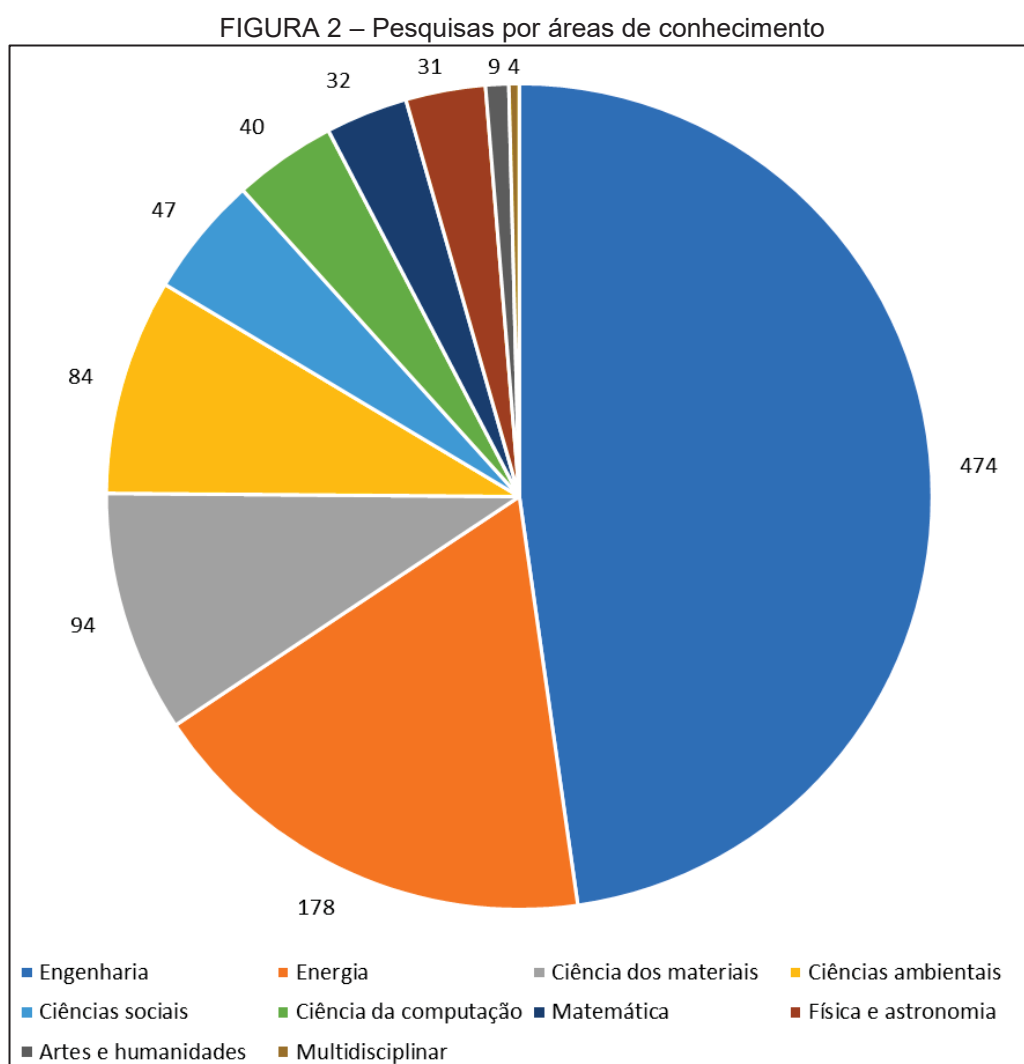
Por fim, foi observado que a base *Scopus* não é própria para localizar dissertações ou teses, nem para procurar publicações redigidas em português ou espanhol. Dessa forma, almejando obter um panorama mais realista do Brasil e da América Latina, novas buscas são movidas com enfoque nestes dois panoramas amostrais. Nesta etapa, além da base de dados *Scopus*, foram consultados sites de revistas e eventos da área, como a *Conference on Passive and Low Energy Architecture* (PLEA) ou o *Solar World Congress*, de alcance internacional; bem como as revistas *Ambiente Construído*, *Pesquisa em Arquitetura e Construção* e *Arquitetura IMED* de base nacional. Foram ainda acessadas as bibliotecas de programas de pós-graduação e do Centro de Referência e Informação em Habitação (InfoHAB).

2.2.1 Panorama Internacional

Considerando o método apresentado anteriormente, obteve-se uma amostra de 650 documentos publicados segundo as áreas de conhecimento indicadas na

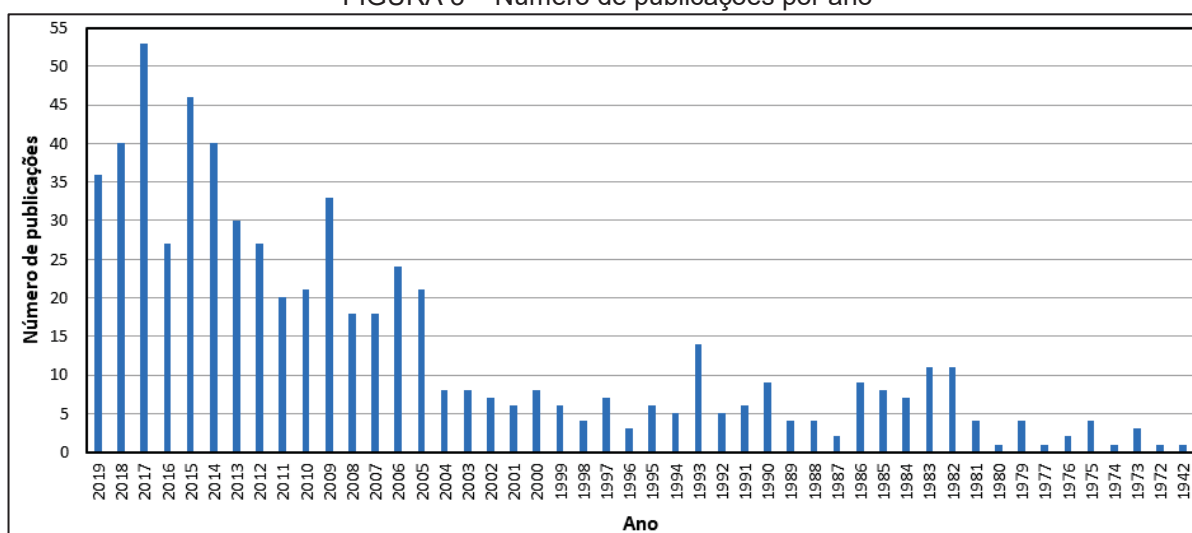
FIGURA 2. Observa-se que alguns trabalhos são enquadrados pela base de dados em mais de uma área, ainda assim, predominam pesquisas em Engenharia e Energia.

Quanto ao tipo de publicação, a maior parte das pesquisas foi publicada em periódicos (380), seguidos pelos trabalhos publicados em anais de eventos (247). As revistas mais recorrentes foram: *Energy and Buildings* (76); *Solar Energy* (40); *Building and Environment* (37); *ASHRAE Transactions* (30); *Energy Procedia* (25); e *Applied Energy* (11). As duas primeiras revistas, tradicionais em se tratando de desempenho de edificações e de métodos para condicionamento térmico, indicam que os termos utilizados no levantamento eram adequados.



Quanto ao número de publicações ao longo do tempo, observa-se um aumento nas pesquisas utilizando células-teste, especialmente após 2005. Anteriormente os números indicam menos de 10 publicações anuais e posteriormente consolidam-se mais de 15 publicações por ano, com ápice em 2017 com 53. Tais dados indicam uma possível popularização do equipamento entre os pesquisadores (FIGURA 3). Ainda assim, ressalta-se que a base *Scopus* não abrange todo o universo de trabalhos e que grande parte das pesquisas anteriores à virada do século podem não estar acessível para a busca por não terem sido digitalizadas.

FIGURA 3 – Número de publicações por ano

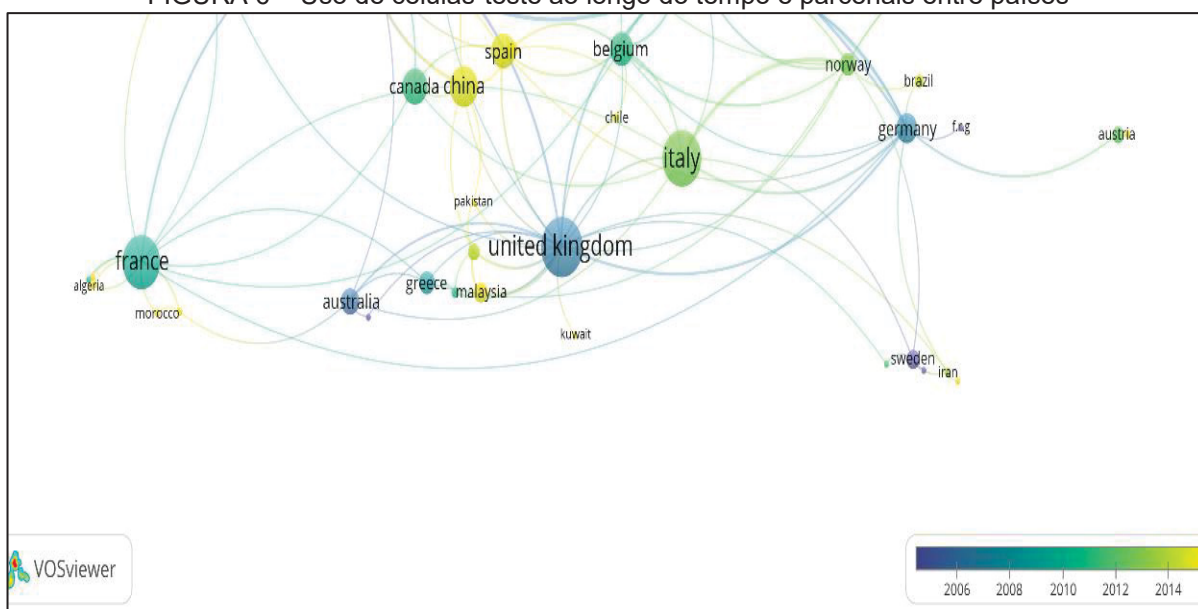


Fonte: Autora (2020).

A distribuição geográfica das pesquisas, ilustrada na FIGURA 4, destaca a produção dos Estados Unidos (129), Reino Unido (55), Itália (48), França (46), China (31), Coreia do Sul (28) e Canadá (25). Todavia, quando considerada a produção por região, percebe-se que as células-teste são utilizadas principalmente na Europa, continente para o qual ocorreram 354 vinculações dentre as publicações levantadas (FIGURA 5). No caso da América Latina, as pesquisas na base *Scopus* indicam vínculos com apenas quatro países: México (10), Brasil (6), Chile (3) e Venezuela (1). O baixo número de trabalhos identificados na região pode ser explicado pelo emprego do idioma inglês na busca. Diante disso, optou-se por realizar um segundo

A análise dos dados no *VOSviewer* sugere ainda que alguns países possuem posição protagonista tendo ao seu redor redes de países colaboradores, com os quais ocorrem trocas mais intensas (FIGURA 6). São exemplos desses núcleos: Estados Unidos, Reino Unido, Itália e França. O Brasil é apontado como um país com poucos laços, com parcerias preferenciais com a Europa (Alemanha e Noruega) e sem vínculo com países vizinhos da América Latina. Em se tratando do número de pesquisas ao longo do tempo, Estados Unidos e Austrália aparecem como usuários tradicionais de células-teste, enquanto China, Espanha, Malásia e Brasil aparecem como usuários mais recentes do artefato.

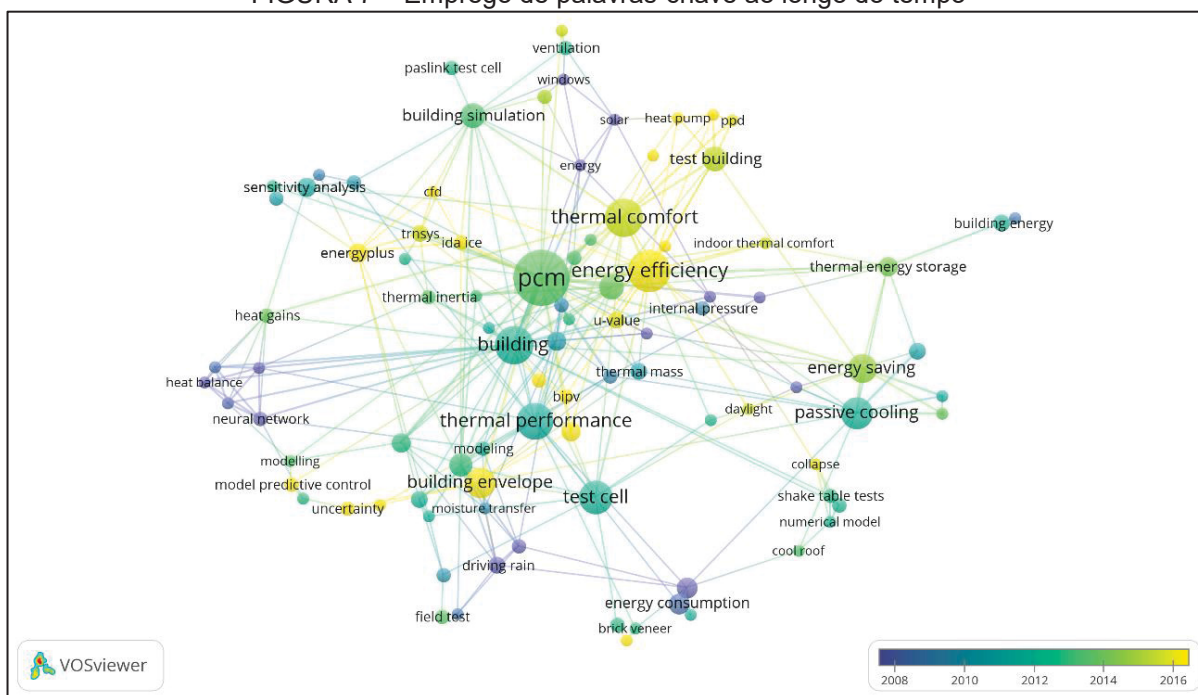
FIGURA 6 – Uso de células-teste ao longo do tempo e parceriais entre países



Fonte: Autora (2020).

A análise do emprego das palavras-chave (FIGURA 7) demonstra que a palavra-chave com maior ocorrência foi PCM (*Phase Change Materials*, materiais de mudança de fase, em tradução livre). Observa-se também que as pesquisas com células-teste tendo como foco a eficiência energética foram relativamente numerosas nos últimos anos, assim como *EnergyPlus* e envelope da edificação, indicando vínculo com a área de simulação. Outras palavras-chave relevantes em termos de ocorrências são: conforto térmico, desempenho térmico, edificação, resfriamento passivo, economia de energia e simulação de edificações.

FIGURA 7 – Emprego de palavras-chave ao longo do tempo



Fonte: Autora (2020).

Quando analisadas as palavras-chave utilizadas pelos autores, é possível agrupá-las em temas e áreas de pesquisa (TABELA 1 e TABELA 2, respectivamente). Entende-se que as áreas de pesquisa visam situar o trabalho em um universo mais amplo da produção científica, enquanto que os temas indicam um recorte específico dentro deste universo. Quantificando o número de repetições/ocorrências das palavras-chave, pode-se ter uma estimativa da dimensão da área de pesquisa e da importância do tema. Observa-se que os temas não são estanques, pois algumas palavras-chave podem se encaixar em mais de uma categoria (por exemplo, aquecimento solar pode ser encaixado tanto em Energia Solar quanto em Aquecimento). De maneira geral, a análise do número de ocorrências de palavras-chave de cada tema indica que as células-teste são utilizadas principalmente em pesquisas sobre “Propriedades térmicas de materiais e dos componentes” e “Eficiência energética”.

TABELA 1 – Temas de pesquisa

TEMA	PALAVRAS-CHAVE	OCORRÊNCIAS
Propriedades térmicas de materiais e dos componentes	Materiais de mudança de fase, isolamento térmico, armazenamento de calor, transferência de calor, fluxo térmico, perdas de calor, propriedades termodinâmicas, condutividade térmica, massa térmica, resistência térmica, calor específico, análise térmica.	302
Eficiência energética	Conservação de energia, economia de energia, consumo de energia, desempenho energético e energia do edifício.	300
Simulação computacional	Simulação computacional, simulação da edificação, <i>EnergyPlus</i> , simulação da dinâmica de fluidos, algoritmos, simulação.	180
Energia solar	Energia solar, radiação solar, edifícios solares.	141
Resfriamento	Resfriamento, resfriamento passivo, sistemas de resfriamento evaporativo, sistemas de resfriamento e ar condicionado.	139
Ventilação	Ventilação, ventilação mecânica, fluxo de ar e ventilação natural.	126
Modelagem matemática de processos físicos	Modelos matemáticos, modelos numéricos, método dos elementos finitos, validação de modelo e modelagem.	121
Aquecimento	Aquecimento, aquecimento solar, aquecedor de ambiente e equipamento de aquecimento.	118
Desempenho térmico	Performance térmica, avaliação de desempenho, comportamento térmico.	86
Qualidade do ar	Qualidade do ar, ar, ar interior, poluição do ar interior e dióxido de carbono.	65

Fonte: Autora (2020)

TABELA 2 – Áreas de pesquisa

ÁREA DE PESQUISA	PALAVRAS-CHAVE	OCORRÊNCIAS
Edificações	Edificações, engenharia civil, indústria da construção, células-teste, habitação, edificações residenciais, edificações-teste, edificações para testes.	423
Componentes de edificações	Janelas, coberturas, fachadas, paredes, envelope da edificação e pisos.	233
Materiais de construção	Madeira, vidro, gesso, esmaltes, concretos, concreto reforçado, edifícios de madeira, materiais de construção, componentes de construção e edifícios de concreto.	145

Fonte: Autora (2020).

2.2.2 Panorama Latino-Americano

A pesquisa inicial na base de dados *Scopus* indicou 14 resultados para a América Latina, excluindo-se o Brasil. O levantamento foi complementado com uma coleta “manual”, totalizando 34 documentos, dos quais 17 são artigos publicados em periódicos e 17 são artigos divulgados em anais de eventos disponibilizados até o

início de 2020. O periódico com maior número de publicações é o *Energy and Buildings* (5). Dentre os eventos, destaca-se a *Conference on Passive and Low Energy Architecture – PLEA* (7).

A distribuição geográfica das pesquisas (FIGURA 8) aponta o protagonismo dos pesquisadores mexicanos quando considerados os países de língua espanhola (México - 20, Venezuela - 6, Chile - 4, Peru - 3, Argentina - 1). Além disso, ressalta-se que na amostra analisada, onze publicações são fruto de parcerias internacionais figurando os seguintes países: Bélgica, Brasil, Espanha, Estados Unidos, França, Israel, Malásia, Reino Unido.

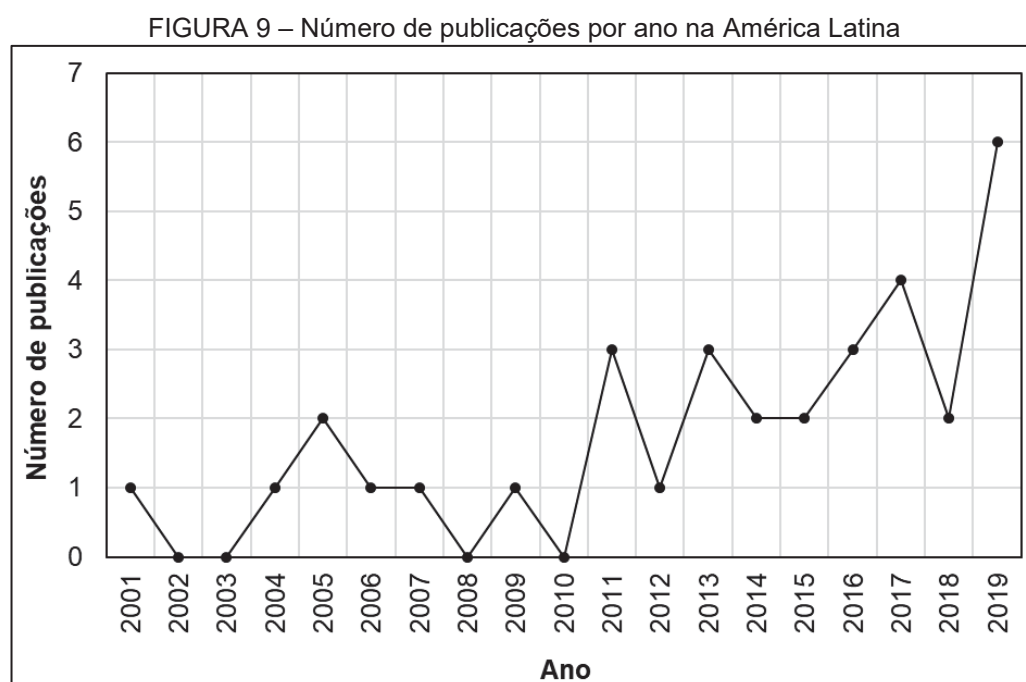
FIGURA 8 – Número de publicações na América Latina



Fonte: Autora (2020).

Dentre os autores mais recorrentes em publicações na região, destacam-se o arquiteto israelense Baruch Givoni (com participação em 6 publicações) presente em parcerias com o México, a Venezuela e o Brasil; os pesquisadores mexicanos J. Xamán (6), José García Chávez (5), I. Hernández-Peréz (5), E. Simá (3), E. V. Macías-Melo (3) e I. Zavala-Guillén (3) e ainda o professor Eduardo González (5) vinculado a uma instituição venezuelana, mas também com parceria com autores brasileiros.

A distribuição das publicações ao longo do tempo nos países de língua espanhola (FIGURA 9) mostrou uma concentração maior nos últimos dez anos. No período de 2011 até 2019 ocorreram cerca de 79 % das publicações, variando de um a seis trabalhos ao ano, contrapondo-se ao período de 2000-2010, com 21 % das publicações, variando de nenhum a dois trabalhos anuais.



Fonte: Autora (2020).

Quanto às palavras-chave, a amostra apresentou heterogeneidade de termos, sendo a maior parte com ocorrência única. Os termos foram agrupados em torno de temas, conforme apresentado na TABELA 3. Dentre estes destacam-se: “propriedades térmicas de materiais e dos componentes” e “resfriamento”. As palavras-chave com mais repetições foram: resfriamento passivo (7), cobertura verde

(4), conforto térmico (4), economia de energia (3), ganho de calor (3) e desempenho térmico (3). O agrupamento por temas mostrou diferenças em se tratando das prioridades de pesquisa comparativamente ao levantamento dito internacional, especialmente em relação aos temas eficiência energética, simulação computacional e energia solar, que não aparecem nos estudos latino-americanos como prioritários.

TABELA 3 – Temas de pesquisa e palavras-chave na América Latina

TEMA	PALAVRAS-CHAVE	OCORRÊNCIAS
Propriedades térmicas de materiais e dos componentes	Materiais frios, coberturas frias, isolantes, revestimentos reflexivos, materiais reflexivos, materiais de mudança de fase, acumulador térmico, atraso térmico, massa térmica, condutividade térmica, armazenamento de energia térmica, calor específico, isolamento térmico e fluxo térmico.	24
Resfriamento	Resfriamento evaporativo, resfriamento passivo, resfriamento de cobertura, resfriamento passivo radiante-evaporativo, resfriamento radiante e resfriamento evaporativo indireto.	14
Conforto térmico	Conforto, saúde e conforto e conforto térmico.	8
Desempenho térmico	Desempenho térmico, comportamento térmico e avaliação térmica.	7
Eficiência energética	Consumo de energia, eficiência energética e economia de energia.	7
Modelagem matemática de processos físicos	Estimativa de temperaturas.	4
Coberturas e paredes verdes	Cobertura verde.	4
Simulação computacional	Programação evolutiva, <i>EnergyPlus</i> , simulação e <i>machine learning</i> .	4
Energia solar	Estratégias passivas solares, radiação solar e parede solar.	4

Fonte: Autora (2020).

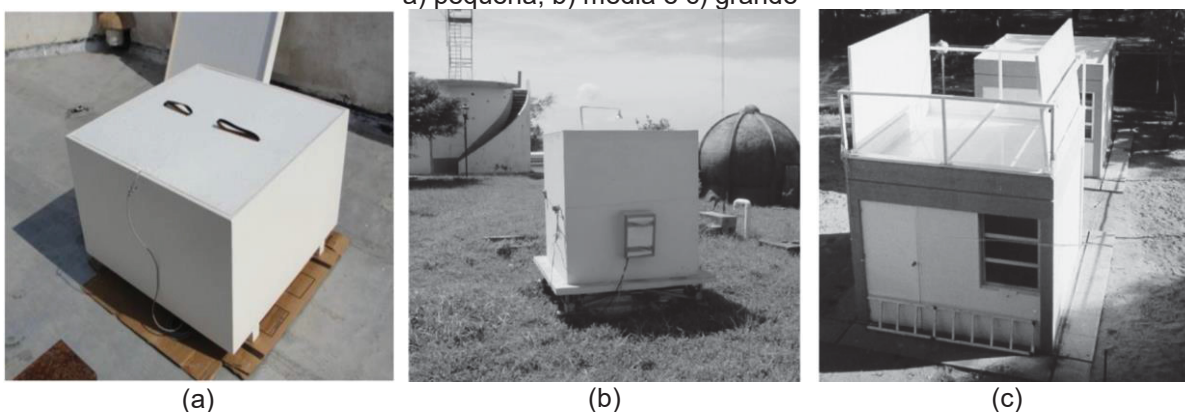
Em relação às dimensões das células-teste utilizadas em pesquisas latino-americanas, predominam as de tamanho grande (FIGURA 10). A FIGURA 11 apresenta exemplos das células-teste utilizadas. As publicações da amostra não indicaram nenhuma iniciativa para a padronização de experimentos nem para a comparação de resultados entre diferentes pesquisas. Também não foram identificadas redes de pesquisa que poderiam conectar pesquisadores em localidades distintas.

FIGURA 10 – Células-teste por tamanho na América Latina (exceto Brasil)



Fonte: Autora (2020).

FIGURA 11 – Exemplos de células-teste na América Latina
a) pequena, b) média e c) grande



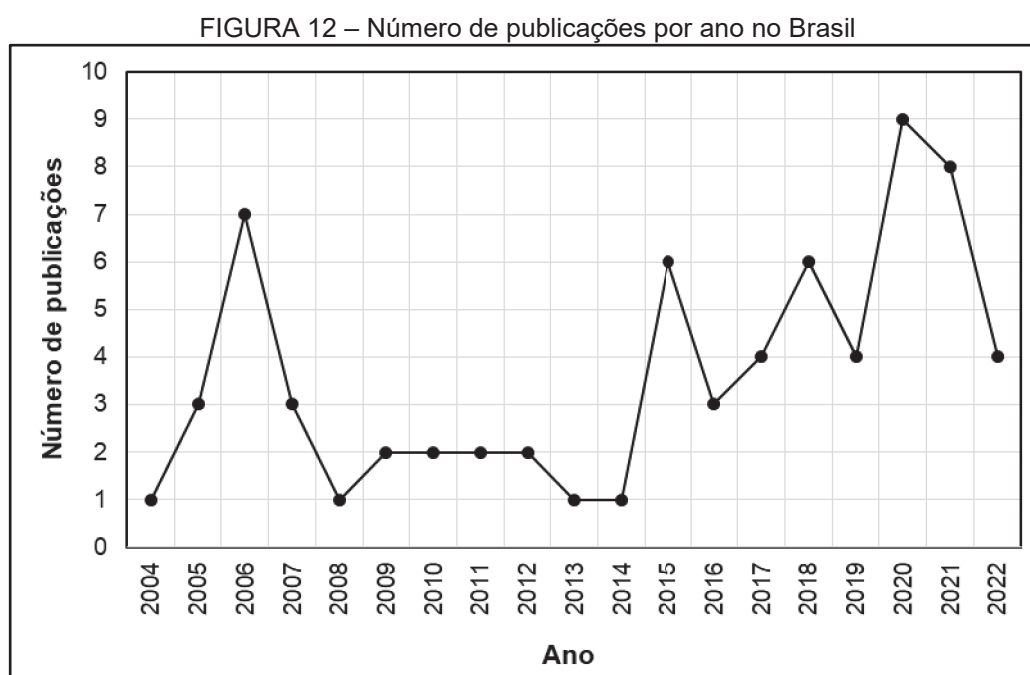
Fonte: a) González-Cruz; González-García (2013), b) García Chávez; Givoni; Viveros (2009), c) González-Cruz; Givoni (2004).

2.2.3 Panorama Brasileiro

A busca por pesquisas brasileiras, realizada em julho de 2022, encontrou 69 publicações, cujas informações principais são apresentadas no quadro síntese contido no Anexo A. Observa-se que, o número levantado superou bastante os seis trabalhos inicialmente listados na base *Scopus*. Do total de publicações, 7 são trabalhos de conclusão de curso, 15 são dissertações, 3 são teses, 24 são artigos em anais de eventos e 20 são artigos em periódicos. No entanto, apenas onze trabalhos foram publicados em periódicos ou anais internacionais (*Construction and Building Materials*

(2), *Energy and Buildings* (4), *Frontiers of Architectural Research* (1), *Building and Environment* (1), *Passive and Low Energy Architecture - PLEA* (4), evidenciando a falta de internacionalização das pesquisas.

A análise do número de publicações ao longo do tempo (FIGURA 12) permite visualizar um primeiro pico de publicações de pesquisas que empregam células-testes no ano de 2006, um segundo pico em 2015 e uma tendência de crescimento entre 2016-2021. Nota-se que o baixo número de publicações registrado em 2022 é decorrente da limitação temporal da pesquisa que se restringe ao primeiro semestre deste ano.



Fonte: Autora (2022).

Considerando a amostra coletada, a primeira pesquisa encontrada foi um artigo publicado no Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), com o título de “O uso de protótipos experimentais de baixo custo para avaliação de materiais de vedação quanto ao seu desempenho térmico”, sob a autoria de Eduardo Krüger, Estelamaris Rodrigues, Geísa Kobay, José Cerri e Maiara Nakamura, todos vinculados ao CEFET-PR, atual Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Os pesquisadores compararam o desempenho térmico durante

o inverno de três células-teste com 1,00m³ de volume constituídas por blocos cerâmicos com seis furos, blocos de concreto vazado e blocos de concreto celular autoclavado (KRÜGER *et al.*, 2004).

O trabalho seguinte localizado foi a dissertação de mestrado “Avaliação do desempenho quanto aos aspectos da inércia térmica e pintura externa de *test-cells* de blocos de concreto com entulho nos furos: estudo de caso realizado em Brasília” por Márcio Hissashi Komeno, na Universidade de Brasília (UnB), com orientação de Rosa Sposto e co-orientação de Eduardo Krüger. A pesquisa teve como objetivo analisar a influência do preenchimento de blocos de concreto com entulho, bem como da pintura de cor cinza ou branca, no desempenho térmico de três células-teste de pequeno porte. Os resultados medidos foram transpostos para a simulação computacional de habitações de interesse social com as mesmas características construtivas das células-teste (KOMENO, 2005).

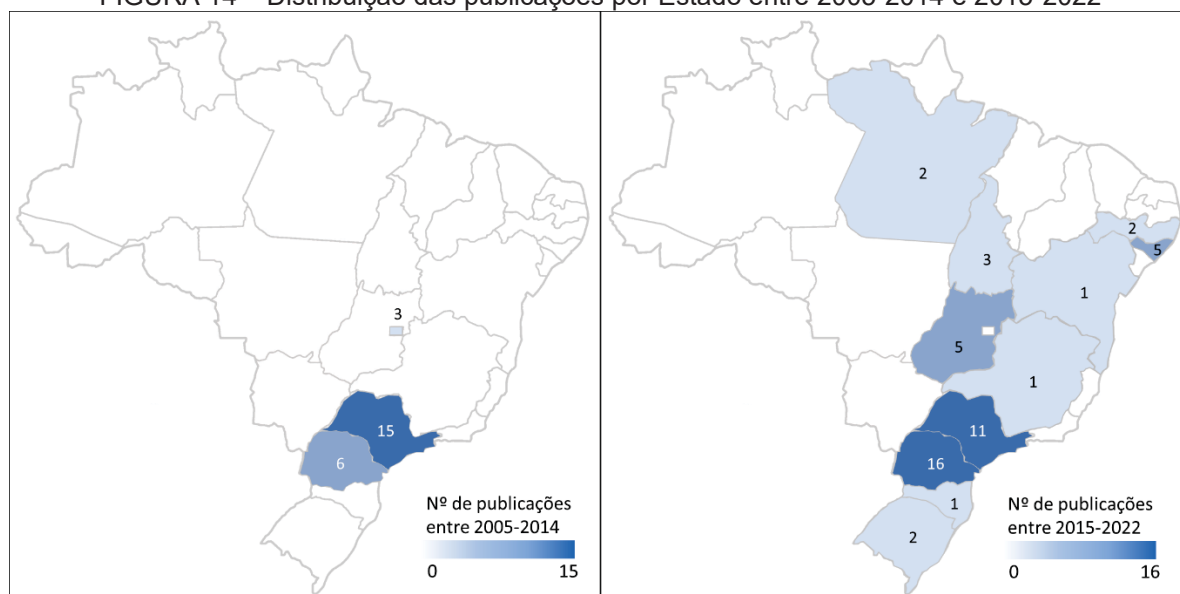
Também em 2005 foi publicado o artigo “Avaliação de desempenho térmico de três tipologias de *brise-soleil* fixo” de autoria de Grace Gutierrez e Lucila Labaki, vinculadas à Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A pesquisa avaliou o desempenho térmico de *brises* horizontais, verticais e combinados a partir de medições das variáveis ambientais, das temperaturas internas do ar e das temperaturas superficiais (GUTIERREZ; LABAKI, 2005).

Na sequência foi publicada a dissertação desenvolvida por Anna Christina Miana, com orientação da professora Rosana de Assis, na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), defendida em 2005 e intitulada “Avaliação do desempenho térmico de *brises* transparentes: ensaios em células-teste”. A pesquisa consistia em avaliar comparativamente o desempenho térmico e lumínico de diferentes conjuntos de *brise-soleil* e vidros com características variáveis, posicionados em aberturas de seis células-teste (MIANA, 2005).

A distribuição geográfica das pesquisas levantadas (FIGURA 13) demonstra que estas estão bastante concentradas nos estados de São Paulo (26) e do Paraná (23), que juntos somam 70% dos trabalhos. Dentre as instituições, destacam-se a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) com 22 trabalhos, a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP) com 11

permanente protagonismo dos estados de São Paulo e do Paraná, os recentes números indicam uma forte tendência de disseminação do equipamento pelo território nacional.

FIGURA 14 – Distribuição das publicações por Estado entre 2005-2014 e 2015-2022



Fonte: Autora (2022).

Quanto à autoria das pesquisas, percebe-se também um número restrito de pesquisadores com as maiores recorrências. Destacam-se: Eduardo Krüger (UTFPR) com 18 autorias; Leandro Carlos Fernandes (UFPR) com 8; Lucila Labaki (UNICAMP) e Francisco Vecchia (EESC-USP) com 6; Márcia Adriazola (UTFPR), Núria Gallardo (Unifesspa), Ricardo Barbosa (UFAL) e Wellington Silva (UFAL), com 4.

Quanto às palavras-chave, a exemplo do que ocorreu com as pesquisas internacionais, parte foi utilizada para informar uma grande área de pesquisa, com termos como edificações, célula-teste, componentes de edificações e materiais de construção. Uma segunda parte foi empregada para indicar temas específicos de estudo (TABELA 4), destacando-se “desempenho térmico” e seus sinônimos (com 34 ocorrências), “coberturas e paredes verdes” (19), “diferentes formas de “resfriamento” (16), “conforto térmico” (16) e “propriedades térmicas de materiais e dos componentes” (12). Chama atenção ainda o fato de que o tema “eficiência energética” ter pouca representatividade entre as palavras-chave, em contraste com o verificado

nas pesquisas internacionais, quando o tema foi o segundo mais citado. Também foram poucas as referências à simulação computacional ou energia solar.

TABELA 4 – Temas de pesquisa e palavras-chave das publicações brasileiras

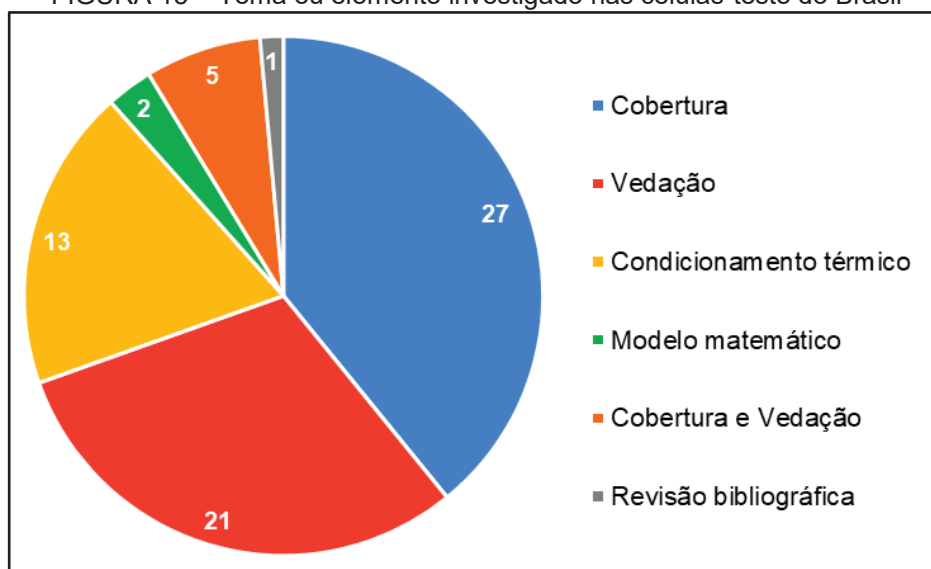
TEMA	PALAVRAS-CHAVE	OCORRÊNCIAS
Desempenho térmico	Avaliação do desempenho térmico, comportamento, desempenho térmico e monitoramento térmico	34
Coberturas e paredes verdes	Cobertura, fachada, parede e teto verde, telhado verde leve.	19
Resfriamento	Resfriamento evaporativo, evaporativo indireto, passivo e radiante.	16
Conforto térmico	Conforto, conforto térmico, conforto ambiental, conforto humano e percepção térmica.	16
Propriedades térmicas dos materiais e dos componentes	Inércia térmica, isolamento térmico, materiais isolantes térmicos, massa térmica, Medição do fluxo térmico e transmitância térmica.	12
Modelagem matemática de processos físicos	Dia típico, episódio representativo, equações preditivas, estimativa de temperaturas internas e internas horárias, temperatura, temperatura interna, temperatura superficial.	9
Aquecimento	Aquecimento solar, ganho solar de calor e parede trombe.	6
Eficiência energética	Consumo de energia, consumo energético, eficiência energética, sistema de baixa energia.	6
Energia solar	Condicionamento térmico ambiental, condicionamento térmico passivo, energia solar, estratégias passivas de condicionamento.	4
Simulação computacional	EnergyPlus, simulação computacional, simulação numérica, simulação térmica.	3

Fonte: Autora (2022).

Observa-se que as palavras-chaves também fazem referência à finalidade da investigação. Neste sentido, foi possível dividir as pesquisas em seis categorias quanto ao tema ou elemento de investigação (FIGURA 15): cobertura (27), vedação (21), condicionamento térmico (13), cobertura e vedação (5), modelo matemático (2) e revisão bibliográfica (1). Como exemplo de elementos de cobertura testados encontram-se principalmente comparações entre diferentes tipos de telhas (BRANDÃO; SANTOS, 2017; MAGALHÃES, 2018; PEREIRA; SIQUEIRA, 2019; GONÇALVES, 2020) e variações de telhados verdes (ANDRADE; RORIZ, 2015; ROCHA, 2020; DI NÚBILA, 2020). Dentre os elementos de vedação destacam-se a avaliação de diferentes tipos de alvenaria (KRÜGER *et al.*, 2004; RODRIGUES, 2022), diversos tipos de vidros (MIANA, 2005; CASTRO, 2006) ou ainda estratégias bioclimáticas como, paredes vegetadas ou fachada dupla ventilada (MORELLI, 2009;

SOUZA *et al.*, 2018). As pesquisas envolvendo condicionamento térmico investigam sistemas de resfriamento/aquecimento passivos com o emprego de diferentes técnicas como o teto-reservatório (KRÜGER *et al.*, 2016; FERNANDES, 2018) ou estratégias bioclimáticas como parede trombe e ventilação natural (NEVES e RORIZ, 2012; SUZUKI, 2012).

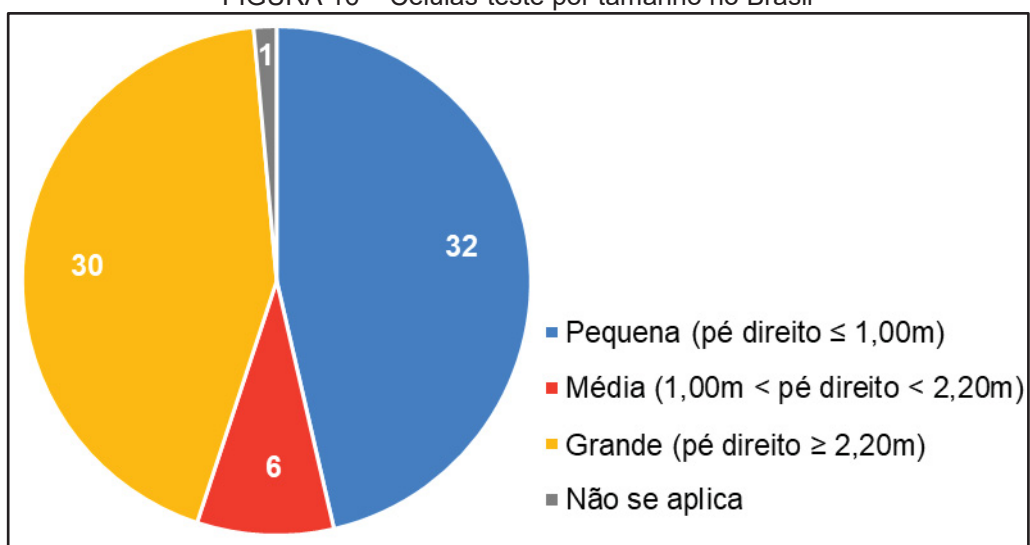
FIGURA 15 – Tema ou elemento investigado nas células-teste do Brasil



Fonte: Autora (2022).

Quando analisadas as dimensões das células-teste (FIGURA 16), observa-se que a maioria das pesquisas utiliza artefatos de tamanho pequeno (normalmente pesquisadores do estado do Paraná) e grande (geralmente pesquisadores do estado de São Paulo). O emprego de células-testes médias é pouco expressivo com apenas seis exemplares. Um dos trabalhos realizou uma revisão bibliográfica sobre o tema, não se enquadrando na classificação proposta. A FIGURA 17 ilustra exemplos do equipamento com os três tamanhos. A área interna média das células-teste equivale a 2,61m², o volume médio interno é de 5,69m³ e as dimensões 1,00m x 1,00m x 1,00m as mais recorrentes.

FIGURA 16 – Células-teste por tamanho no Brasil



Fonte: Autora (2022).

FIGURA 17 – Exemplos de células-teste no Brasil

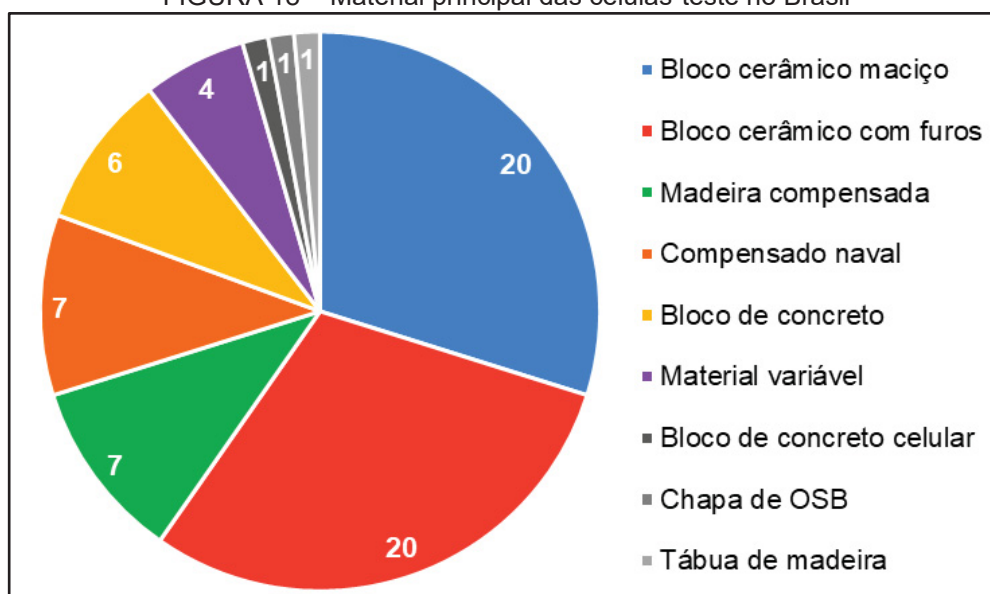
a) pequena, b) média e c) grande



Fonte: a) Krüger (2006); b) Gonçalves (2020), c) Suzuki (2012).

Quanto ao material principal que compõem o fechamento das células-teste (FIGURA 18), prevalece o uso do bloco cerâmico maciço (20) e com furos (20), seguido pelo emprego de chapas de madeira compensada (7), compensado naval (7) e bloco de concreto (6). Quatro pesquisas utilizaram células-testes com materiais variáveis entre cada unidade. Também foram empregados bloco de concreto celular, chapas de OSB e tábuas de madeira.

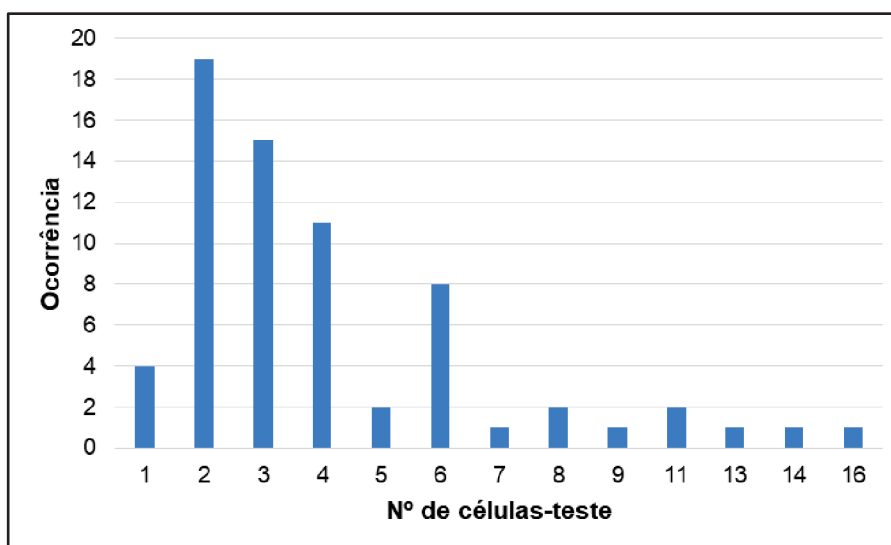
FIGURA 18 – Material principal das células-teste no Brasil



Fonte: Autora (2022).

Segundo Cattarin *et al.* (2016) pode-se empregar as células-teste para estudos de campo em dois tipos de testes: absolutos e comparativos. Testes absolutos (TA) são aqueles que avaliam o desempenho de um componente em termos absolutos usando um ou mais índices de desempenho, sem comparação direta com outro elemento do mesmo tipo, sendo necessário controlar e/ou minimizar os fluxos de calor através do envelope da célula-teste. Testes comparativos (TC) analisam o desempenho de um componente em relação a outro elemento que esteja sendo testado ao mesmo tempo. Em termos gerais, os testes absolutos podem ser realizados com apenas uma célula-teste, enquanto que os testes comparativos utilizam duas ou mais unidades, adotando comumente uma destas como célula de controle enquanto as outras são configuradas como células de teste. Analisando o contexto brasileiro (FIGURA 19), observou-se que apenas 5,8% das pesquisas utilizaram apenas uma célula-teste para a realização de testes absolutos (NEVES, RORIZ, 2012), ou para comparações com simulação computacional (SOUZA *et al.*, 2018), ou ainda para o desenvolvimento de métodos de investigação preditivos (FERNANDES *et al.*, 2015; KRÜGER *et al.*, 2017). Os demais trabalhos empregaram de duas a dezesseis configurações diferentes para fins comparativos, sendo o emprego de duas unidades o mais recorrente.

FIGURA 19 – Quantidade de células-teste por experimento no Brasil



Fonte: Autora (2022).

A predominância dos testes comparativos, a consequente necessidade de utilizar várias unidades, os custos de execução das edificações e a preferência pelo emprego de materiais com maior durabilidade (blocos cerâmicos), favorecem a instalação de conjuntos permanentes de células-teste que são utilizadas em diversos estudos das instituições as quais pertencem, bem como em parcerias com outros pesquisadores.

É exemplo disto o conjunto de quinze células-teste (FIGURA 20) instalado no Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA), localizado na cidade de Itirapina/SP (KAYANO *et al.*, 2018). Estas células-teste foram construídas em bloco cerâmico maciço, tem dimensões internas de 2,20m x 1,90m x 2,40m, com área interna de 4,18m² e volume 10,03m³, e são utilizadas principalmente por pesquisadores vinculados a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), mas também foram usadas por pesquisadores da Universidade de Campinas (UNICAMP), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), da Universidade Federal do Sul e do Sudeste do Pará (UNIFESSPA) e do Instituto Federal Goiano.

FIGURA 20 – Células-teste do CRHEA, Itirapina/SP



Fonte: Kayano *et al.* (2018).

Outro conjunto relevante está implantado na área experimental da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Estadual de Campinas (FIGURA 21). Ao todo são nove células com dimensões internas de 2,00m x 2,50m x 2,40m, totalizando 5,00m² de área e 12,00m³ de volume. As edificações foram construídas e equipadas em 1999 no âmbito da pesquisa “Sustentabilidade e eficiência energética: avaliação do desempenho térmico de coberturas e do comportamento de materiais transparentes em relação à radiação solar”, com financiamento da FAPESP, em uma parceria entre a UNICAMP e a EESC-USP, sob a coordenação dos professores Dra. Lucila C. Labaki, Dr. Osny P. Ferreira e Dra. Rosana M. C. de Assis.

FIGURA 21 – Células-teste da UNICAMP



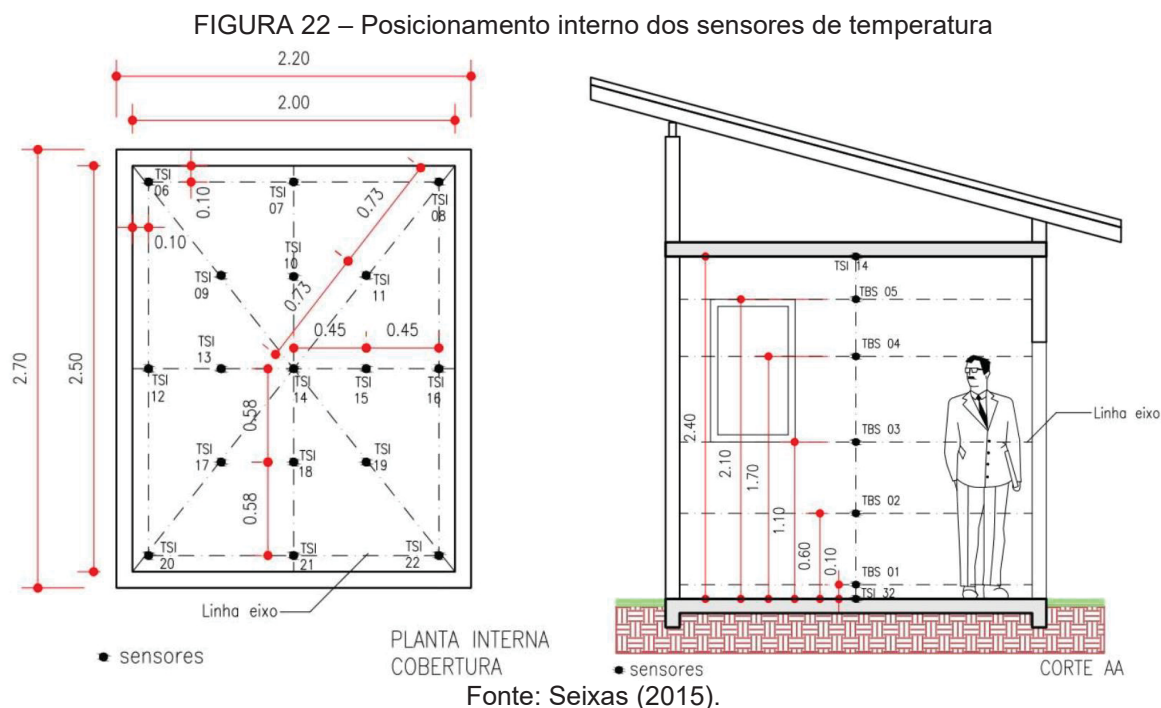
Fonte: Teixeira (2013).

Quanto aos equipamentos empregados, a maioria das pesquisas realizou o monitoramento das condições ambientais externas como temperatura do ar, umidade

relativa, velocidade e direção do vento, radiação solar e índice pluviométrico. Para a aquisição destes dados foram utilizadas estações meteorológicas instaladas nas proximidades da célula-teste – sendo as estações meteorológicas *Campbell Scientific CR10x* e *HOBO H21-001* os modelos mais recorrentes – ou ainda dados fornecidos por instituições como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR). Também foram coletadas informações relevantes para o contexto de cada investigação sendo a temperatura interna do ar e a temperatura superficial dos elementos testados os principais aspectos monitorados. Para tanto, foram utilizados principalmente termopares do tipo *T cobre-constantan* conectados a *dataloggers* para armazenamento dos dados. De maneira geral, os medidores foram posicionados no centro geométrico dos elementos testados e do volume das células-teste. Além destes, outros aspectos como o fluxo de calor e a refletância também foram verificados em alguns trabalhos.

Em relação aos protocolos de pesquisa, cerca de metade dos trabalhos fizeram uso de normas nacionais e/ou internacionais como referência para parte da investigação. Dentre as normativas mais citadas encontram-se a NBR 15.220:2005 empregada para o cálculo das propriedades térmicas de materiais e sistemas construtivos e verificação das características de cada zona bioclimática; a NBR 15.575:2013 para verificação do nível de eficiência térmica ou lumínica do elemento investigado; a ISO 7726:1998 sobre instrumentos para medir grandezas físicas; a ISO 7243:2017 para avaliação do estresse térmico; a ISO 7730:2005 sobre o conforto térmico; e a ASHRAE 55:2004 acerca das condições térmicas ambientais para a ocupação humana. Observa-se que as normatizações empregadas possuem um caráter mais genérico ao discorrer sobre temas relacionados ao desempenho térmico de edifícios, não se propondo a estabelecer protocolos de pesquisas para o uso de células-teste. Desta forma, cada pesquisador desenvolveu os seus procedimentos de maneira individualizada sem a preocupação com a padronização. A exceção é o trabalho de Cardoso e Vecchia (2014) e Seixas (2015) que verificam qual seria o melhor posicionamento dos sensores térmicos no interior da célula-teste (FIGURA 22). E os estudos de Fernandes *et al.* (2015b) e Krüger *et al.* (2017) que desenvolvem um modelo de equações preditivas para as temperaturas internas horárias, permitindo

ampliar a quantidade de configurações testadas sem aumentar a quantidade de células-teste construídas, visto que são feitas comparações diretas para condições climáticas idênticas.



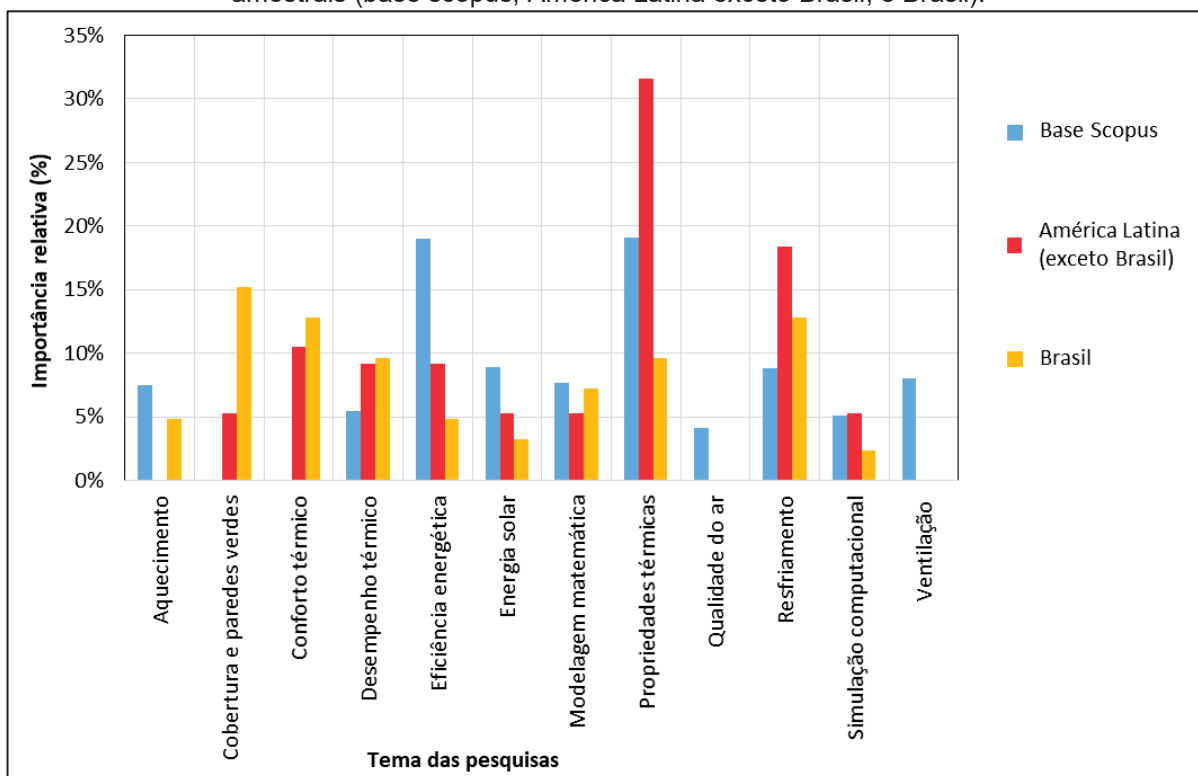
Por fim, observar-se que apesar da expansão do emprego das células-teste no território brasileiro ao longo dos últimos anos, da existência de alguns conjuntos relevantes, e da ocorrência de parcerias entre as instituições não foi possível identificar a existência de uma rede de pesquisadores com efetivo intercâmbio de conhecimento. A falta de normatização acerca de investigações em células-teste e a consequente falta de padronização dos protocolos de pesquisa parece ser um dos fatores que dificulta a comparação dos resultados e inibe a replicação dos testes em localidades com condições climáticas diferentes. Ainda assim, o levantamento realizado demonstrou que o emprego de células-teste para o estudo do desempenho térmico de edificações é bastante vantajoso, visto que, por ser um equipamento composto por materiais de baixo custo, o investimento financeiro é pequeno comparado com as possibilidades de investigação oferecidas, dada a versatilidade do artefato que possibilita a avaliação de diferentes elementos e sistemas construtivos.

2.2.4 Considerações

A partir da revisão realizada foi possível identificar um certo atraso das pesquisas com células-teste no panorama brasileiro e latino-americano comparativamente ao quadro americano e, principalmente, ao europeu. A América Latina, incluindo o Brasil, não dispõe de redes de pesquisa consolidadas, de protocolos padrões para testes ou de células-teste padronizadas. Os estudos levantados são realizados predominantemente de modo isolado, utilizando métodos singulares que dificultam a comparação direta dos resultados com outras investigações. Especialmente no Brasil, o uso de células-teste em pesquisas na construção civil é recente e ainda restrito a poucos estados, instituições e pesquisadores.

A análise das palavras-chave agrupadas em torno de temas apontou diferenças entre as pesquisas dos três universos (FIGURA 23). O tema “propriedades térmicas de materiais e componentes” é relativamente importante nas três amostras, mas principalmente na América Latina (exceto Brasil) e na Europa. Diferentemente do que se verificou no panorama internacional, temas como “eficiência energética”, “simulação computacional” e “energia solar” são menos relevantes no contexto latino-americano. Por outro lado, o tema “resfriamento” aparece com destaque em toda a América Latina, o que pode ter relação com as demandas da arquitetura passiva na região.

FIGURA 23 – Importância dos temas de pesquisa utilizando células-teste nos três universos amostrais (base scopus, América Latina exceto Brasil, e Brasil).



Fonte: Autora (2022).

A distribuição geográfica dos trabalhos apontou que, na América Latina, o protagonismo vem sendo exercido pelos pesquisadores mexicanos e brasileiros. Embora o número de publicações do México seja menor (20) que o número de publicações do Brasil (69), as pesquisas mexicanas apresentam maior internacionalização, com 10 publicações em periódicos internacionais de língua inglesa, contra 8 publicações internacionais de origem brasileira. Também foram localizadas mais pesquisas mexicanas (8) em eventos internacionais de língua inglesa do que brasileiras (4). Além disso, os estudos do México ainda apresentam mais parcerias com pesquisadores de outros países, tais como Brasil, Estados Unidos, França, Israel e Malásia.

Diante deste contexto, acredita-se que o objeto deste trabalho, que é o desenvolvimento de um modelo de célula-teste padronizada vinculada a adoção de um procedimento padrão, oferece a possibilidade de incremento das pesquisas nacionais, tendo como referência as redes e os protocolos internacionais.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo procura apresentar os conceitos físicos envolvidos no estudo do desempenho térmico de edificações. São abordados o fluxo e a transmissão de energia térmica, bem como as propriedades térmicas dos materiais, dos componentes do envelope e da edificação como um todo. Também são feitos paralelos entre os conceitos teóricos e sua aplicabilidade nas pesquisas brasileiras com células-teste.

3.1 FLUXO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA TÉRMICA

Compreender o conceito de fluxo de energia térmica e suas formas de transmissão – condução, convecção e radiação – é essencial para a interpretação dos fenômenos envolvidos nas trocas térmicas entre uma edificação e o meio no qual ela se insere.

3.1.1 Fluxo de energia térmica

O fluxo de energia térmica (Φ) – também conhecido por taxa de fluxo de calor, ou fluxo térmico – é a taxa de calor que transita em determinada superfície. Seu cálculo equivale ao quociente entre a quantidade de calor que atravessa a superfície por um intervalo de tempo, cujo resultado é expresso em Watts, segundo a equação (1) (ABNT, 2005a). Esta é uma propriedade passível de medição em células-teste, conforme demonstrado por Krüger e Andriazola (2008), Krüger *et al.* (2009), Krüger e Andriazola (2010). Todavia, como requer o emprego de equipamento específico e com maior grau de sofisticação o monitoramento do fluxo de calor não ocorre com frequência nas pesquisas brasileiras.

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad (1)$$

Na qual:

Φ = fluxo de calor (W);

Q = quantidade de calor (J);

Δt = intervalo de tempo (s);

3.1.2 Condução

A transmissão por condução necessita de contato molecular. Quando envolve líquidos ou gases apresenta fenômenos convectivos que alteram o processo original (LABEEE, 2016). Na construção civil, é abordada principalmente em objetos em estado sólido (componentes construtivos).

3.1.3 Convecção

A convecção é verificada quando dois corpos apresentam contato molecular e pelo menos um deles é um fluido. Pode-se dividir o processo de transmissão de calor em duas fases, a primeira ocorrendo por condução e a segunda por convecção, uma vez que, “a alteração sofrida pela temperatura do fluido modifica sua densidade provocando o movimento convectivo” (LABEEE, 2016, p. 90).

3.1.4 Radiação

Na transmissão de energia térmica por radiação ocorre uma transformação dupla de energia. Uma parte do calor do elemento com maior temperatura é convertido em energia radiante que atinge o elemento com menor temperatura, onde é absorvida numa proporção que depende da emissividade da superfície receptora, sendo novamente transformada em calor (LABEEE, 2016).

3.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

Neste tópico, são descritos os conceitos de calor específico, condutividade térmica e massa aparente.

3.2.1 Calor específico

Segundo a NBR 15.220-1 calor específico (c), ou capacidade térmica específica, é uma propriedade física do material que equivale ao quociente da capacidade térmica pela massa, resultando em um valor expresso em J/kgK (ABNT,

2005a). Podendo também ser entendido como a quantidade de energia térmica necessária para variar em 1 K a temperatura de 1 kg de material. Como exemplo, o calor específico do concreto é 1,00 kJ/kgK e do poliestireno expandido (EPS) é 1,42 kJ/kgK, o que significa que para elevar em um Kelvin a temperatura do EPS é necessário utilizar 42% mais energia térmica do que no caso do concreto. Esta característica explica o emprego do EPS como isolante térmico, sendo bastante utilizado na composição da vedação das células-teste brasileiras, estando presente em cerca de um quinto da amostra levantada.

3.2.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica (λ) expressa a quantidade de energia térmica que atravessa o material por unidade de tempo. Na prática, esta propriedade mede a eficácia de um material na condução de calor, o que permite comparar a performance de diferentes materiais e/ou sistemas de fechamento (HOMOUD, 2005). É uma propriedade física característica de um material homogêneo e isotrópico, verificada por um “fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m², quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro”, cuja unidade é W/mK (ABNT, 2005a, p. 2). Como exemplo, a condutividade térmica da lã de rocha é 0,045 W/mK, enquanto a do concreto é 1,75 W/mK, desta forma, a lã de rocha é menos condutora do que o concreto, sendo uma excelente opção de isolamento térmico.

3.2.3 Massa específica

A massa específica (ρ) é a divisão da massa pelo volume aparente de determinado material, dado em kg/m³ (ABNT, 2005a). Observa-se que, alguns materiais podem apresentar diferentes densidades a depender de sua composição, neste caso algumas propriedades podem variar. Como é o caso da chapa de madeira compensada disponível comercialmente com densidades entre 450-550 kg/m³ e 350-450 kg/m³, o que implica em uma variação no valor da condutividade térmica que corresponde a 0,15 W/mK e 0,12 W/mK, respectivamente.

3.2.4 Valores de referência

A TABELA 5 indica os valores mais usuais de massa aparente, condutividade térmica e calor específico para diversos materiais de construção.

TABELA 5 – massa específica (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de alguns materiais de construção

MATERIAL	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	c (kJ/kgK)
Argamassa comum	1800-2100	1,15	1,00
Cerâmica (tijolos e telhas de barro)	1000-1300	0,70	0,92
	1300-1600	0,90	0,92
	1600-1800	1,00	0,92
	1800-2000	1,05	0,92
Chapa de madeira aglomerada com partículas de madeira (OSB)	650-750	0,17	2,30
	550-650	0,14	2,30
Chapa de madeira compensada	450-550	0,15	2,30
	350-450	0,12	2,30
Concreto	2200-2400	1,75	1,00
Espuma rígida de poliuretano (PU)	30-40	0,030	1,67
Lã de rocha	20-200	0,045	0,75
Lã de vidro	10-100	0,045	0,70
Placa de fibro-cimento	1800-2200	0,95	0,84
	1400-1800	0,65	0,84
Placas de gesso ou gesso cartonado	750-1000	0,35	0,84
Poliestireno expandido (EPS)	15-35	0,040	1,42
Poliestireno extrudido (XPS)	25-40	0,035	1,42
Vidro comum	2500	1,00	0,84

Fonte: Adaptado de ABNT (2005a).

3.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS COMPONENTES

As propriedades térmicas dos componentes do envelope listadas nesta seção incluem capacidade, resistência, transmitância e atraso térmicos, além de emissividade, absorvância e fator solar.

3.3.1 Capacidade térmica

Capacidade térmica (C) é uma propriedade proporcional à quantidade de massa presente em determinado corpo, ou seja, corpos do mesmo material, porém com densidades diferentes apresentam diferentes capacidades térmicas. Define-se como a “quantidade de energia térmica necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema”, com valor dado em J/K, conforme equação (2) (ABNT,

2005a, p. 2). Outra determinação possível para a capacidade térmica é o produto da massa pelo calor específico, segundo equação (3).

$$c_T = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2)$$

$$c_T = m \cdot c \quad (3)$$

Na qual:

C_T = capacidade térmica (J/K);

Q = quantidade de energia térmica (J);

ΔT = variação de temperatura (K);

m = massa (Kg);

c = calor específico (J/kgK).

A capacidade térmica dos componentes de camadas homogêneas pode ser determinada pela equação (4) (ABNT, 2005b).

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (4)$$

Na qual:

C_T = capacidade térmica (J/K);

λ_i = condutividade térmica do material da camada i (W/mK);

R_i = resistência térmica da camada i (m²K/W);

e_i = espessura da camada i (m);

c_i = calor específico do material da camada i (J/kgK);

ρ_i = densidade de massa aparente do material da camada i (kg/m³).

No âmbito das edificações, apresentar uma elevada capacidade térmica contribui para manter as temperaturas internas mais estáveis mesmo com grandes variações nas temperaturas externas. É uma propriedade passível de medição em células-teste, especialmente em testes de materiais inovadores, cujas propriedades térmicas são desconhecidas, como ocorrido na pesquisa de Rodrigues (2022). No

caso de sistemas construtivos convencionais, cujos valores da capacidade térmica são amplamente conhecidos, os pesquisadores recorreram à determinação teórica da grandeza e não ao cálculo a partir da medição *in loco*. Todavia, observa-se que apenas sete dos trabalhos brasileiros levantados comentaram sobre a capacidade térmica em seus estudos.

3.3.2 Resistência térmica

A resistência térmica (R) mede a oposição do fluxo de calor como resultado da ausência de condução, convecção e radiação. O valor da resistência térmica depende da condutividade térmica, da espessura e da densidade do material (HOMOUD, 2005). Define-se como o “quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário”, cuja unidade é m^2K/W (ABNT, 2005a, p. 2). A resistência térmica pode ser obtida pela equação (5). A mesma equação pode ainda ser empregada para o cálculo da resistência superficial interna ou externa de um componente – o que equivale a resistência da camada de ar adjacente, interna ou externamente, ao elemento que transfere calor por radiação e/ou convecção.

$$R_T = \frac{e}{\lambda} \quad (5)$$

Na qual:

R_T = resistência térmica (m^2K/W);

e = espessura (m);

λ = condutividade térmica (W/mK);

Além do cálculo da resistência térmica de componentes, pode-se calcular também resistência térmica total de um conjunto construtivo. Neste caso, a resistência térmica resultante é obtida pela soma das resistências térmicas de cada uma das camadas envolvidas, conforme equação (6) (ABNT, 2005b).

$$R_{T \text{ total}} = R_{T1} + R_{T2} + \dots + R_{Tn} \quad (6)$$

Na qual:

$R_{T \text{ total}}$ = resistência térmica total do conjunto (m^2K/W);

R_{Tn} = resistência térmica das n camadas integrantes do sistema.

Assim como a capacidade térmica, a resistência térmica também pode ser verificada com o auxílio de células-teste, contudo nas pesquisas brasileiras verifica-se a preferência pela determinação por cálculos segundo as fórmulas disponibilizadas pelas normas e não por medições. Quatro trabalhos da amostra apresentaram discussões acerca da resistência térmica de seus envelopes.

3.3.3 Resistência térmica superficial

A resistência térmica superficial, é definida como a “resistência da camada de ar adjacente à superfície interna ou externa de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção” (ABNT, 2005a, p.2). Seu valor é dado em m^2K/W e varia em função da direção do fluxo de calor, da emissividade e da temperatura da superfície, bem como das características do ar e das demais superfícies próximas. A TABELA 6 expressa os valores médios recomendados pela NBR 15.220-2.

TABELA 6 – Valores médios de resistência térmica superficial

RESISTÊNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL INTERNA (m^2K/W)			RESISTÊNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL EXTERNA (m^2K/W)		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: Adaptado de ABNT (2005a).

3.3.4 Transmitância térmica

Transmitância térmica (U), também chamada de coeficiente global de transferência de calor, equivale ao inverso da soma das resistências de todas as camadas que compõem aquele componente (HOMOU, 2005). É definida como a

“taxa de fluxo de calor através de uma unidade de área de material, de uma das faces do material até a outra, para uma unidade de diferença de temperatura entre as duas faces, em condição de estado de equilíbrio”, dada em W/m^2K (PEREIRA, 2009, p. 22). Pode ser calculada pela equação (7).

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{\frac{e}{\lambda}} \quad (7)$$

Na qual:

U = transmitância térmica (W/m^2K);

R_T = resistência térmica (m^2K/W);

e = espessura do material (m);

λ = condutividade térmica (W/mK).

Assim como a resistência térmica, a transmitância térmica também pode ser obtida para um conjunto de camadas, conforme a equação (8).

$$U_{total} = \frac{1}{R_{T1}} + \frac{1}{R_{T2}} + \dots + \frac{1}{R_{Tn}} \quad (8)$$

Na qual:

U_{total} = transmitância térmica total do conjunto (W/m^2K);

U_n = transmitância térmica das n camadas integrantes do sistema.

No caso das células-teste, conhecer a transmitância térmica dos componentes é essencial para a compreensão dos fenômenos que serão medidos, o que novamente é feito principalmente por cálculos teóricos. Dez pesquisas, cerca de 15% do total, calcularam a transmitância térmica do envelope.

3.3.5 Atraso térmico

Segundo a NBR 15.220-1 atraso térmico (ϕ) é o “tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um

componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor”, expresso em horas. O atraso térmico depende da capacidade térmica do sistema e da disposição das camadas construtivas (ABNT, 2005a, p. 2), podendo ser calculado pela equação (9) ou (10) para elementos homogêneos.

$$\varphi = 1,382 \cdot e \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot c}{3,6 \cdot \lambda}} \quad (9)$$

$$\varphi = 0,7284 \cdot e \cdot \sqrt{R_T \cdot C_T} \quad (10)$$

Na qual:

φ = atraso térmico (h);

e = espessura do material (m);

c = calor específico (J/kgK);

λ = condutividade térmica (W/mK);

R_T = resistência térmica (m²K/W);

C_T = capacidade térmica (J/K).

No caso de elementos dispostos em camadas o cálculo é feito pelas equações (11), (12), (13) e (14).

$$\varphi = 1,382 \cdot R_T \cdot \sqrt{B_1 + B_2} \quad (11)$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_T} \quad (12)$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{\text{ext}}}{R_T} \right) \cdot \left(R_{\text{ext}} - \frac{R_T - R_{\text{ext}}}{10} \right) \quad (13)$$

$$B_0 = C_T - C_{T \text{ ext}} \quad (14)$$

Na qual:

φ = atraso térmico (h);

R_T = resistência térmica de superfície a superfície do componente (m²K/W);

R_{ext} = resistência térmica da camada externa (m²K/W);

λ_{ext} = condutividade térmica da camada externa (W/mK);

ρ_{ext} = densidade de massa aparente do material da camada externa (kg/m³);

C_T = capacidade térmica total do componente (J/K);

$C_{T \text{ ext}}$ = capacidade térmica da camada externa do componente (J/K).

Apesar da relevância do atraso térmico para o estudo do desempenho de uma edificação, na amostra de células-teste do Brasil esta propriedade foi calculada em apenas três trabalhos.

3.3.6 Emissividade e absorptância

A emissividade (ϵ) é dada pelo “quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície, pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura” (ABNT, 2005, p. 3). A absorptância à radiação solar (α) equivale ao “quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície” (ABNT, 2005, p. 3). Segundo o LABEEE (2016, p. 90) a emissividade está relacionada às fontes de baixa temperatura (ondas longas), enquanto que as fontes de alta temperatura (ondas curtas) estão relacionadas com a absorptância do material.

As propriedades de emissividade e absorptância são mais relevantes em pesquisas cujo principal elemento de teste é o vidro (8 trabalhos) ou quando está sendo avaliada a pintura com cor clara ou reflexiva de determinado componente (6 trabalhos).

3.3.7 Fator solar

O fator solar (FS), ou fator de ganho de calor solar, equivale a quantidade de calor solar que efetivamente atravessa determinado elemento. A NBR 15.220-1 diferencia a definição de fator solar para elementos transparentes e opacos. O fator de ganho solar de elementos transparentes equivale ao “quociente da taxa de radiação solar diretamente transmitida através de um componente transparente ou translúcido, sob determinado ângulo de incidência, mais a parcela absorvida e posteriormente retransmitida para o interior, pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo”. O fator de ganho solar de um elemento opaco é entendido como o “quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo” (ABNT, 2005a, p. 3).

Da amostra avaliada, sete pesquisas realizaram medições e/ou cálculos quanto ao ganho solar observado em determinado componente.

3.3.8 Valores de referência

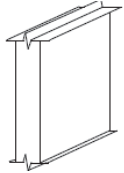
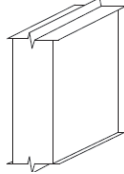
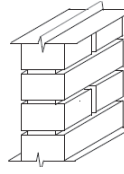

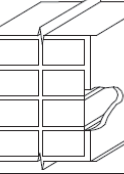
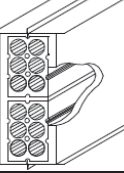
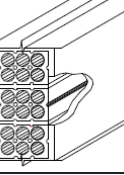
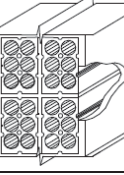
A TABELA 7 apresenta valores típicos para absorptância e emissividade de materiais de revestimento. A TABELA 8 indica os valores de transmitância, capacidade e atraso térmico para composições típicas de paredes, bem como para alguns sistemas de coberturas, expressos na TABELA 9.

TABELA 7 – Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas)

TIPO DE SUPERFÍCIE	α	ϵ
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25	0,25
Caiação nova	0,12 / 0,15	0,90
Concreto aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
Vidro incolor	0,06 / 0,25	0,84
Vidro colorido	0,40 / 0,80	0,84
Vidro metalizado	0,35 / 0,80	0,15 / 0,84
Pintura:		
Branca	0,20	0,90
Amarela	0,30	0,90
Verde clara	0,40	0,90
Alumínio	0,40	0,50
Verde escura	0,70	0,90
Vermelha	0,74	0,90
Preta	0,97	0,90

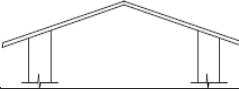
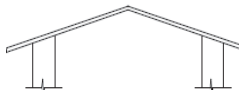
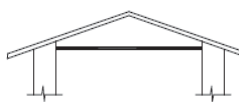
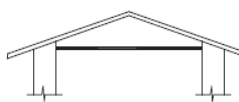




Fonte: ABNT (2005a).

TABELA 8 – Transmitância térmica (u), capacidade térmica (c) e atraso térmico (ϕ) de algumas paredes padrão

PAREDE	DESCRIÇÃO	U (W/m ² K)	C (KJ/m ² K)	ϕ (horas)
	Parede de concreto maciço Espessura total da parede: 5,0 cm	5,04	120	1,3
	Parede de concreto maciço Espessura total da parede: 10,0 cm	4,40	240	2,7
	Parede de tijolos maciços aparentes Dimensões do tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura total da parede: 10,0 cm	3,70	149	2,4
	Parede de tijolos maciços assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 15,0 cm	3,13	255	3,8
	Parede dupla de tijolos maciços assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 26,0 cm	2,30	430	6,6
	Parede de tijolos de 6 furos circulares assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 15,0 cm	2,28	168	3,7
	Parede de tijolos de 6 furos circulares assentados na maior dimensão Dimensões do tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 20,0 cm	1,92	202	4,8
	Parede dupla de tijolos de 6 furos circulares assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 26,0 cm	1,52	248	6,5

Fonte: Adaptado de ABNT (2005a).

TABELA 9 – Transmitância térmica (u), capacidade térmica (c) e atraso térmico (ϕ) de algumas coberturas padrão

PAREDE	DESCRIÇÃO	U (W/m ² K)	C (KJ/m ² K)	ϕ (horas)
	Cobertura com telha cerâmica s/ forro Espessura total da telha: 1,0 cm	4,55	18	0,3
	Cobertura com telha fibro-cimento s/ forro Espessura total da telha: 0,7 cm	4,60	11	0,2
	Cobertura com telha cerâmica e forro de madeira Espessura total da telha: 1,0 cm Espessura do forro: 1,0 cm	2,00	32	1,3
	Cobertura com telha fibro-cimento e forro de madeira Espessura total da telha: 0,7 cm Espessura do forro: 1,0 cm	2,00	25	1,3
	Cobertura com telha cerâmica e forro de laje mista Espessura total da telha: 1,0 cm Espessura da laje: 12,0 cm $R_{t(laje)} = 0,09$ (m ² .K/W) $C_T(laje) = 95$ kJ/(m ² .K)	1,92	113	3,6
	Cobertura com telha fibro-cimento e forro de laje mista Espessura total da telha: 0,7 cm Espessura da laje: 12,0 cm $R_{t(laje)} = 0,09$ (m ² .K/W) $C_T(laje) = 95$ kJ/(m ² .K)	1,93	106	3,6
	Cobertura com telha cerâmica e laje de concreto Espessura total da telha: 1,0 cm Espessura da laje: 20,0 cm	1,84	458	8,0
	Cobertura com telha fibro-cerâmica e laje de concreto Espessura total da telha: 1,0 cm Espessura da laje: 20,0 cm	1,99	451	7,9

Fonte: Adaptado de ABNT (2005a).

3.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS DAS EDIFICAÇÕES

Esta seção apresenta algumas das propriedades térmicas utilizadas na avaliação do desempenho térmico das edificações como um todo e incluem fator decremental, inércia e nível de inércia térmica.

3.4.1 Fator decremental

Fator decremental (F) é um índice que representa o grau de amortecimento térmico do ambiente interno quanto às variações térmicas externa, sendo bastante utilizado para mensurar a inércia térmica de determinado edifício. Este pode ser definido pela razão entre a amplitude térmica diária interna e a amplitude térmica diária externa, conforme equação (15), expresso em porcentagem (FERNANDES, 2020).

$$F = \frac{\Delta T_{d\text{ in}}}{\Delta T_{d\text{ ex}}} \quad (15)$$

Na qual:

F = fator decremental (%);

$\Delta T_{d\text{ in}}$ = amplitude térmica diária interna (°C);

$\Delta T_{d\text{ ex}}$ = amplitude térmica diária externa (°C).

Desta forma, quanto menor o fator decremental maior a capacidade de redução da variação da temperatura interna em relação ao exterior e maior a inércia da edificação caracterizando um melhor desempenho térmico (KRÜGER *et al.*, 2010; DI NÚBILA *et al.*, 2020). Das pesquisas levantadas, apenas cinco realizaram discussões envolvendo o fator decremental.

3.4.2 Inércia térmica

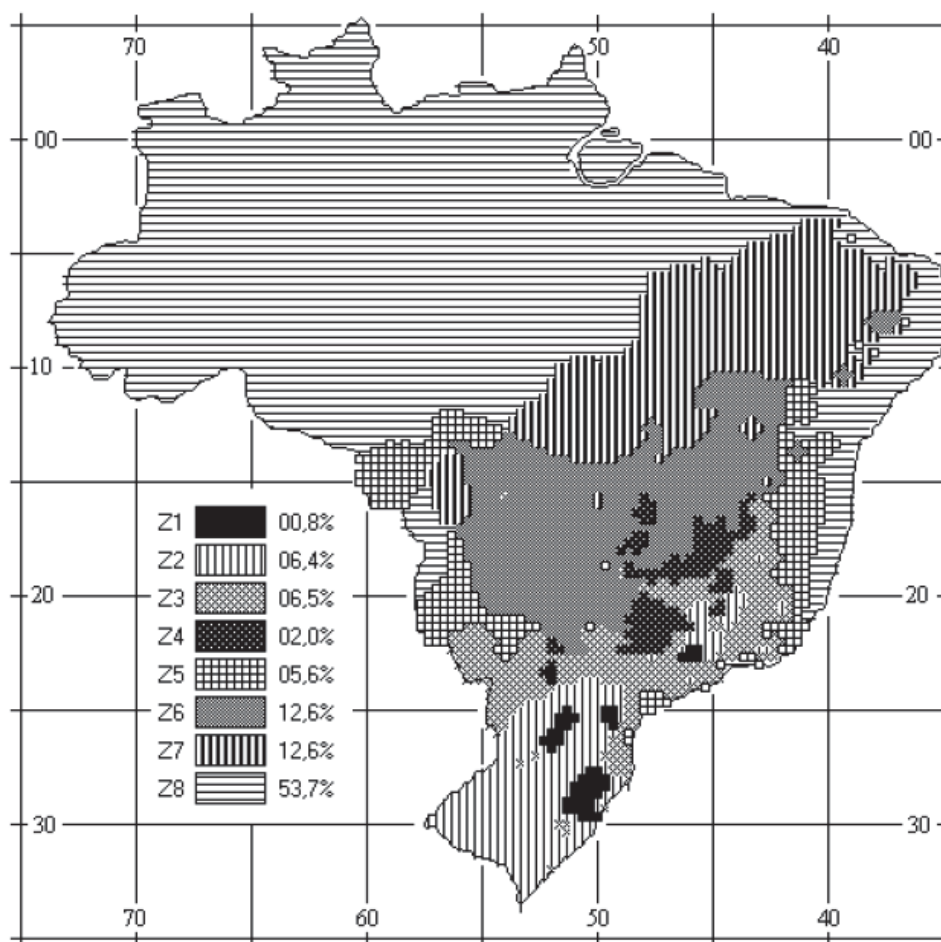
O conceito de inércia térmica está associado com a capacidade de determinado objeto de limitar as trocas térmicas com meio externo a fim de conservar sua condição térmica interna por um maior período de tempo. No caso de edificações,

tal propriedade é importante em regiões que apresentam uma grande amplitude térmica diária. Quanto maior a inércia térmica de um edifício, menor será sua amplitude térmica interna, uma vez que, em função da alta capacidade de armazenamento de calor da edificação ocorre uma defasagem do pico de temperatura interna em relação ao ambiente externo, fenômeno conhecido como atraso térmico (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2005).

A inércia térmica total de uma edificação depende dos materiais empregados no envelope, sendo que de maneira geral, materiais mais densos apresentam uma maior capacidade térmica. Componentes com alta inércia térmica conseguem barrar o calor durante o verão mantendo a temperatura interna confortável, enquanto que no inverno liberam o calor armazenado ao longo dia mantendo a construção aquecida (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2005).

Dentre as estratégias a serem adotadas para o aumento da inércia térmica de uma edificação destacam-se o sombreamento, a capacidade térmica, o isolamento térmico e o controle da ventilação (KRAMEL *et al.*, 2022). Além disso, a alta inércia térmica é recomendada pela NBR 15220-3 para as edificações localizadas nas zonas 1, 2, 3, 4, 5 e 6, o que corresponde a cerca de um terço do território nacional (FIGURA 24) (ABNT, 2005c).

FIGURA 24 – Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: ABNT (2005c).

Dentre a amostra levantada, quinze pesquisas, ou 22% do total, calcularam ou fizeram ponderações quanto a inércia térmica da célula-teste em relação a amplitude térmica da localidade onde está inserida.

3.4.3 Nível de inércia térmica (NIT)

Para um melhor aproveitamento da inércia térmica como estratégia passiva de conforto é necessário que os edifícios apresentem um nível de inércia térmica (NIT) compatível com o clima no qual estão implantados. O NIT expressa a capacidade do edifício de resistir às variações das temperaturas externas. É definido pela razão entre a amplitude térmica diária do ambiente externo e a amplitude térmica diária do ambiente interno, segundo a equação (16) (FERNANDES, 2020).

$$\text{NIT} = \frac{\Delta T_{d \text{ in}}}{\Delta T_{d \text{ ex}}} - 1 \quad (16)$$

Na qual:

NIT = nível de inércia térmica;

$\Delta T_{d \text{ in}}$ = amplitude térmica diária interna (°C);

$\Delta T_{d \text{ ex}}$ = amplitude térmica diária externa (°C).

Desta forma, “quando a amplitude térmica diária de uma edificação é igual à amplitude externa, seu NIT é zero (ela não possui inércia). Quando a amplitude interna é menor que a externa, o NIT será positivo. E quando a amplitude interna for maior que a externa, o NIT será negativo”. Em outras palavras, “quanto maior a amplitude térmica diária do local de implantação, maior deverá ser seu Nível de Inércia Térmica” (FERNANDES, 2020).

3.5 OUTROS ASPECTOS MONITORADOS EM CÉLULAS-TESTE NO BRASIL

Além das propriedades térmicas descritas anteriormente, foram identificados outros aspectos passíveis de monitoramento em células-teste, tais como as temperaturas internas do ar e as temperaturas superficiais de elementos de vedação e cobertura, medidas em praticamente em todos os experimentos da amostra. A partir destes dados podem ser calculados e comparados índices como a amplitude térmica ou o conforto térmico.

3.5.1 Amplitude térmica

A amplitude térmica é calculada pela diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima registradas em determinado local durante determinado intervalo de tempo. O cálculo da amplitude térmica diária permite verificar a variação de temperatura a qual está sujeita o edifício e possibilita a análise das estratégias projetuais que podem ser adotadas a fim de proporcionar períodos com maior conforto

para os ocupantes. Cerca de 20% dos trabalhos levantados analisaram a amplitude térmica em seus experimentos.

3.5.2 Percepção térmica

No campo das pesquisas sobre percepção térmica, um termo bastante utilizado, embora polêmico, é “conforto térmico”. Conforto térmico pode ser entendido como a “satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente” (ABNT, 2005a, p. 5). Este é influenciado por duas variáveis pessoais (atividade desempenhada, isolamento térmico das vestimentas) e quatro variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e pressão parcial do vapor de água no ar ambiente), conforme verificado em estudos realizados em câmaras climáticas (LAMBERTS; XAVIER, 2002).

No âmbito do desempenho térmico das edificações é comum a adoção de “modelos de conforto térmico adaptativos que utilizam a temperatura externa do ar como principal variável explicativa para a determinação das faixas de conforto” (FERNANDES, 2018, p. 63). Uma vez definidas as faixas de conforto, é possível calcular o número de horas com temperaturas internas do ar nos intervalos de conforto ou desconforto pelo calor ou pelo frio. Na amostra brasileira, 26 pesquisas avaliaram o conforto térmico das suas células-teste.

3.6 MÉTODOS ESTIMATIVOS DAS TEMPERATURAS INTERNAS DO AR

Ao observar que “as temperaturas do ar no interior de uma edificação pouco ventilada flutuam principalmente em função dos ganhos e perdas de energia térmica para a envoltória” e que “a temperatura dos elementos constituintes da edificação varia basicamente em função das trocas térmicas que ocorrem com o ambiente externo” diversos pesquisadores desenvolveram métodos preditivos para estimar as temperaturas internas de pequenas edificações ou células-teste (KRÜGER *et al.*, 2015). A vantagem do seu emprego está na obtenção de resultados em um curto espaço de tempo, a partir de um pequeno conjunto de dados de campo e com a possibilidade da aplicação dos testes para diferentes condições climáticas,

característica que é particularmente interessante para um país com grande variedade climática, como é o caso do Brasil. As equações podem ser desenvolvidas de diferentes formas a depender dos resultados esperados, sendo o foco deste trabalho a estimativa das temperaturas internas horárias, para a qual são verificados dois métodos brasileiros: Papst (2004) e Fernandes (2015).

Os métodos estimativos de temperaturas internas horárias são importantes para esta pesquisa porque dispensam a alternativa de construir diversas células-teste para fins de comparação de resultados.

3.6.1.1 Método estimativo Papst (2004)

É um método que foi desenvolvido a partir da análise da relação entre as temperaturas do ar interno e as temperaturas do ar externo de oito ambientes residenciais monitorados pelo período de um ano. A autora percebeu que as temperaturas do ar interno de um dado momento não apresentam uma relação forte com as respectivas temperaturas do ar externo. Porém, a pesquisa mostrou que a intensidade da relação aumenta quando a variável explicativa passa a ser a média móvel (considerando n horas) das temperaturas externas.

Em função disso, por análise de regressão linear simples é determinada uma equação da temperatura interna em função da média móvel das temperaturas externas para a estimativa de temperaturas internas. Essa equação foi chamada pela autora de “assinatura térmica” do ambiente por ser capaz de traduzir o comportamento térmico deste espaço frente a determinado clima, perfil de ocupação e aspecto construtivo.

Para sua aplicação, calculam-se diferentes médias móveis das temperaturas externas, conforme equação (17). Papst (2004) sugere calcular as médias móveis de duas horas anteriores até 72 horas anteriores. Em seguida, mede-se a correlação linear (correlação de Pearson) entre séries de temperaturas internas horárias e séries de médias móveis de temperaturas externas horárias (FERNANDES *et al.*, 2015). Para facilitar esta etapa, a autora sugere plotar os dados em gráficos chamados de correlogramas. A média móvel das temperaturas externas que apresentar a

correlação mais forte com as temperaturas internas horárias será utilizada como variável explicativa para determinação do modelo de regressão linear simples (18).

$$T_{\text{ex mms}} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} T_{\text{ex}}^k}{n} \quad (17)$$

Na qual:

$T_{\text{ex mms}}$ = média móvel simples das temperaturas externas horárias do ar;

T_{ex}^k = temperatura externa na hora k;

n = número de horas anteriores considerando para o cálculo da média móvel.

$$T_{\text{in}}^k = a \times T_{\text{ex mms}} + b \quad (18)$$

Na qual:

T_{in}^k = temperatura interna na hora k;

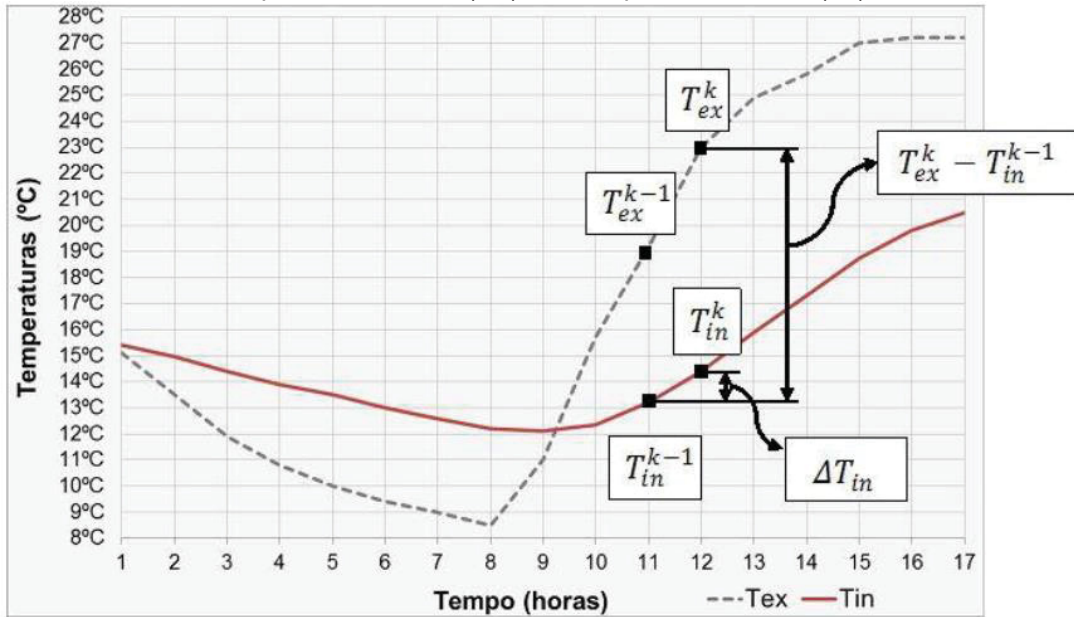
a = coeficiente angular;

b = coeficiente linear.

3.6.1.2 Método estimativo Fernandes (2015)

Este método busca traduzir a variação da temperatura interna em função da diferença entre as temperaturas externa e interna na forma de uma equação simples. Para tanto, baseia-se na ideia de que “temperatura interna na hora seguinte (hora k) é igual à soma da temperatura interna atual (hora k-1) com a variação que vier a ocorrer. E essa variação se dá proporcionalmente à diferença entre as temperaturas do ar dos dois ambientes, interno e externo” conforme FIGURA 25 e equação (19) (FERNANDES *et al.*, 2015).

FIGURA 25 – Exemplo da variação da temperatura interna (T_{in}) em função da diferença entre a temperatura externa (T_{ex}) e a temperatura interna (T_{in})



Fonte: Fernandes *et al.* (2015).

$$T_{in}^k = T_{in}^{k-1} + \alpha(T_{ex}^{k-n} - T_{in}^{k-1}) \quad (19)$$

Na qual:

T_{in}^k = temperatura interna estimada no instante k;

α = variação proporcional da temperatura interna em função da diferença entre T_{ex}^{k-n} e T_{in}^{k-1} ;

Os valores de α não são constantes e demonstram como a edificação se relaciona com a temperatura externa, sendo obtido pela equação (20), e assumindo valores maiores quando há exposição à radiação ao mesmo tempo que as temperaturas internas permanecem menores do que as externas (FERNANDES *et al.*, 2015).

$$a = \frac{\Delta T_{in}}{T_{ex}^{k-n} - T_{in}^{k-1}} \quad (20)$$

Na qual:

α = coeficiente variável;

ΔT_{in} = temperatura interna;

T_{ex}^{k-n} = temperatura externa no instante k-n;

T_{in}^{k-1} = temperatura interna no instante k-1.

3.7 CONSIDERAÇÕES

As propriedades térmicas dos principais materiais de construção são atualmente conhecidas pois já foram objeto de estudos que sistematizaram suas descobertas e desenvolveram procedimentos padrões de investigação, o que facilitou sua disseminação. Da mesma maneira, as propriedades térmicas dos componentes construídos, bem como os cálculos envolvidos nas trocas térmicas destes com o meio, também são bastante difundidos, sendo disponibilizados inclusive por documentos normativos nacionais (NBR 15220-2:2005 e NBR 15.220-3:2005) e internacionais (ASHRAE Standard 55-2004 e ASHRAE Standard 90.2-2018).

Por outro lado, as propriedades térmicas das edificações consideradas no todo são menos conhecidas, o que explica o enfoque das pesquisas brasileiras sobre este aspecto. Neste sentido, as células-teste são um equipamento essencial para a expansão e consolidação dos estudos brasileiros, como foi observado no levantamento bibliográfico. Todavia, a maneira desconexa com que as investigações têm sido conduzidas não favorece a disseminação do conhecimento. Desta maneira, o desenvolvimento de um modelo padrão de célula-teste juntamente com a proposição de protocolos de investigação pode facilitar o intercâmbio científico, ampliando as possibilidades de comparação dos resultados e replicação dos experimentos.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste tópico são apresentados os procedimentos gerais a serem aplicados ao longo de todo o trabalho, bem como os procedimentos específicos adotados em cada etapa da pesquisa.

4.1 PROCEDIMENTOS GERAIS

Este item procura, primeiramente, delimitar o escopo do trabalho e explicitar sua unidade de análise para, em seguida, apresentar o método, o caráter e a lógica de pesquisa adotados como estratégia, bem como seus desdobramentos no contexto deste trabalho. Os conceitos e definições que seguem baseiam-se, em sua maioria, na argumentação do professor Aguinaldo dos Santos transcrita em *Seleção do método de pesquisa: guia para pós-graduandos em design e afins* (2018). Empregam-se também os apontamentos de Colin Robson em seu livro *Real World Research* (2002) na discussão dos testes de validade em conjunto com os de Robert Yin contidos em *Estudo de caso – planejamento e métodos* (2001).

4.1.1 Unidade de análise

A unidade de análise deste trabalho é o artefato arquitetônico – célula-teste para estudos de campo – que responda satisfatoriamente aos problemas (falta de padronização do artefato, falta de padronização de procedimentos, dificuldade de comparação de resultados, ausência de uma rede de pesquisa nacional, entre outros) identificados nas pesquisas utilizando células-teste como instrumento de coleta de dados e/ou calibração de modelos digitais com foco no desempenho térmico de edificações e seus componentes.

4.1.2 Delimitação do trabalho

Este estudo visa principalmente a concepção de um modelo de célula-teste. No entanto, considera-se também a possibilidade de utilizar o artefato como câmara climática, entendendo a célula-teste como um instrumento de avaliação do

desempenho térmico de edificações e seus componentes, e a câmara climática como artefato para suporte para pesquisas sobre a percepção térmica de usuários.

Este trabalho busca, principalmente, identificar as características físicas – estruturais, funcionais e estéticas – e os equipamentos essenciais para a composição do projeto arquitetônico de um modelo de célula-teste capaz de atender as necessidades dos pesquisadores que estudam o desempenho térmico de edificações e seus componentes. O produto final (projeto) e o processo de descoberta destes aspectos construtivos são igualmente relevantes no contexto da pesquisa.

Esta pesquisa inicia sem a pretensão de executar o artefato dentro do período de execução da dissertação, considerando o curto prazo e a dificuldade de reunir recursos suficientes para tal. Todavia, pretende-se que a construção ocorra posteriormente à duração do mestrado.

4.1.3 Justificativa da escolha da estratégia de pesquisa

De acordo com Santos (2018, p. 72), quando o objetivo de um trabalho se concentra na criação de um produto, a metodologia escolhida se denomina *Design Science Research*, que é um “método de pesquisa onde são desenvolvidas e avaliadas a eficiência e eficácia de um artefato na solução de uma categoria de problema”. Para Myers e Venable¹ (2014, *apud* Santos, 2018, p. 72) este método se apoia na tradição do próprio design, no qual prevalece a ideia de criar artefatos para mudar e melhorar o mundo.

Ainda segundo Santos (2018, p. 28) outra classificação possível localiza o problema de pesquisa em relação ao estado de evolução do conhecimento classificando-o quanto ao caráter descritivo, explanatório ou exploratório, este último associado ao método do *Design Science Research*. O autor considera exploratórias pesquisas que apresentam conteúdo e estrutura do conhecimento ainda em evolução. Complementarmente, Gil (2002, p. 41) entende que pesquisas exploratórias têm como

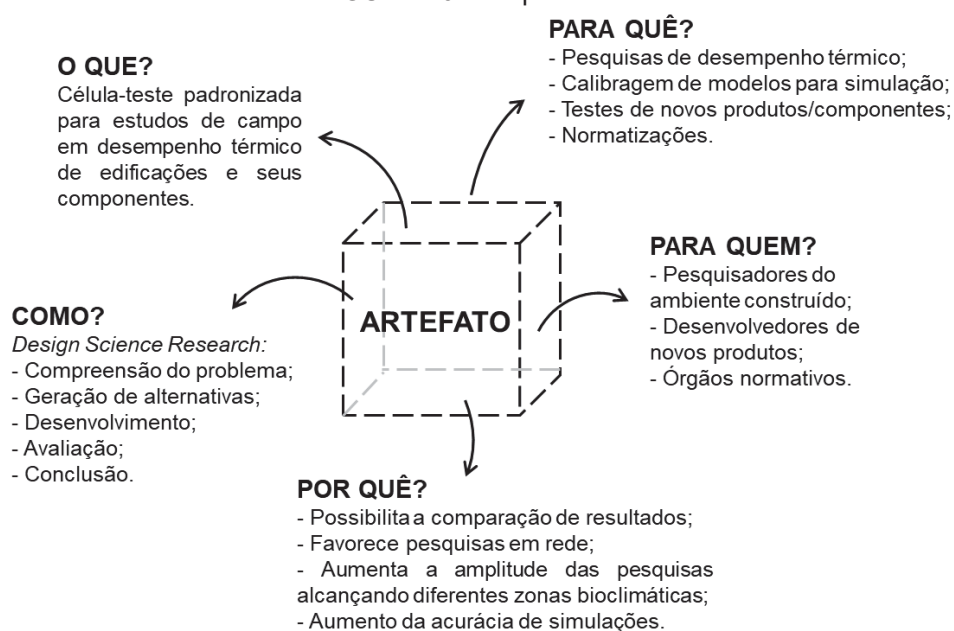
¹ MYERS, M. D.; VENABLE, J. R. **A set of ethical principles for design science research in information systems**. *Information & Management* 51 (2014) 801–809.

objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições através de uma busca por maior familiaridade com o problema.

Por conseguinte, “a natureza do problema é determinante na definição da lógica de análise predominante em um projeto de pesquisa” (SANTOS, 2018, p. 35). Para tanto, estudos na linha do *Design Science* adotam uma abordagem abductiva, que busca a solução de problemas convencionais através da concepção de um artefato, serviço ou sistema. O pensamento abductivo estrutura o raciocínio criativo iniciando com a identificação de problemas de difícil solução, passando pela geração de hipótese que quando verdadeira resolve o problema original (GONZALEZ; HASELAGER; 2002).

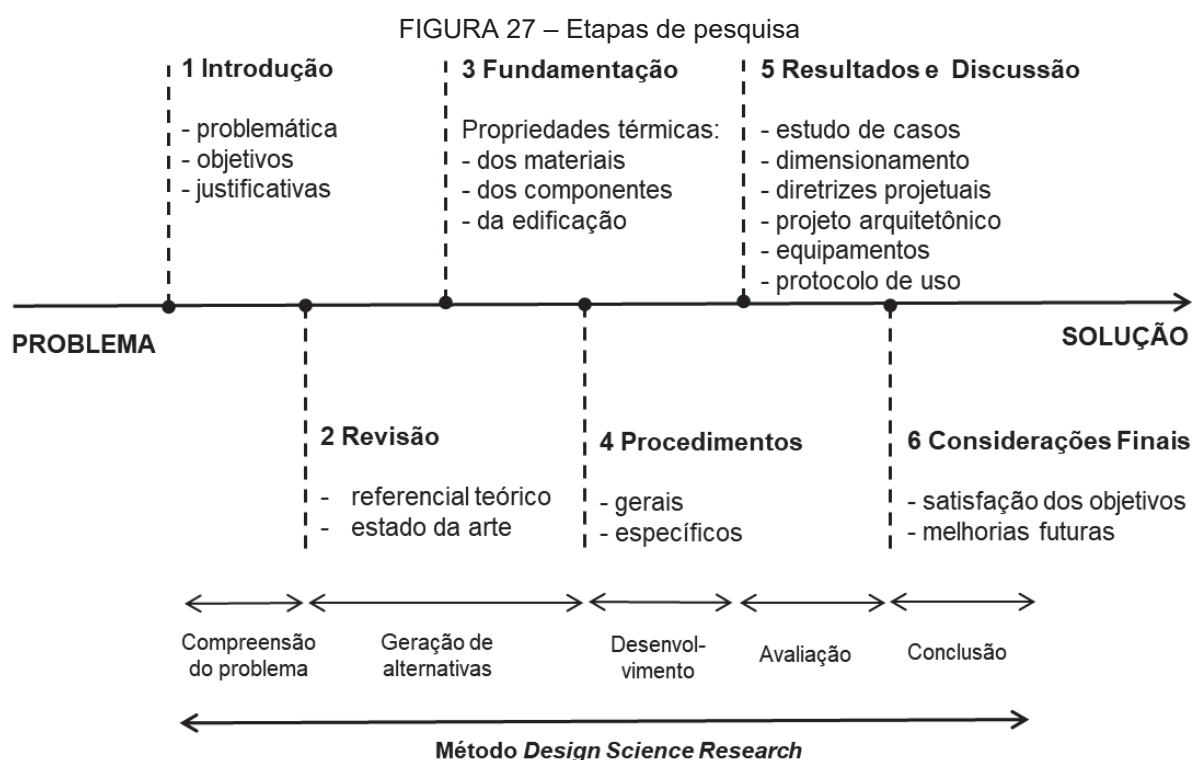
Em resumo, dado o objetivo desta pesquisa centrado no desenvolvimento de um artefato pode-se enquadrá-la com facilidade no método de pesquisa *Design Science*. Ao mesmo tempo que, visto a carência de trabalhos na temática de células-teste para estudos de desenvolvimento térmico com enfoque na padronização do artefato, é possível classificar a abordagem pretendida como exploratória sob a ótica do pensamento abductivo, típico do processo criativo. A FIGURA 26 apresenta o mapa mental desenvolvido a partir do objeto deste trabalho: o artefato. Artefato este que origina diversas questões de pesquisa cujas respostas norteiam a condução deste estudo.

FIGURA 26 – Mapa mental



Fonte: Autora (2022).

Dentre as questões apontadas destaca-se o “como” cuja resposta indica as etapas do método *Design Science Research* descritas por Santos (2018): compreensão do problema, geração de alternativas, desenvolvimento, avaliação e conclusão. A partir delas é possível organizar as etapas de pesquisa a serem percorridas entre o problema e a solução almejada no âmbito deste trabalho (FIGURA 27).



Fonte: Autora (2022).

4.1.4 Seleção de caso ou amostra

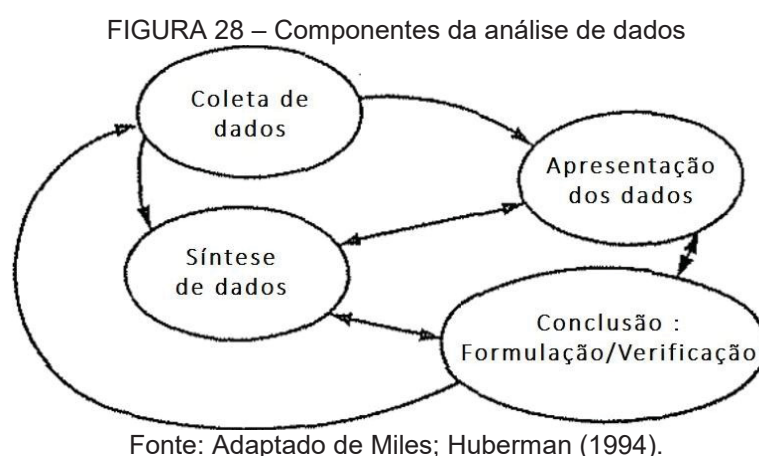
O presente trabalho tem o território brasileiro como destino do produto a ser desenvolvido, sendo este passível de uso nas oito diferentes zonas bioclimáticas definidas pela NBR 15220-3:2005. Todavia, na etapa de revisão bibliográfica o universo torna-se mais abrangente englobando no referencial teórico estudos clássicos irrestritamente quanto ao seu país de origem e organizando em três esferas de pesquisa uma revisão bibliográfica: mundo, América Latina (exceto Brasil) e Brasil. Desta forma é possível traçar um panorama dos trabalhos em cada esfera, além de situar as pesquisas brasileiras em relação a estas.

4.1.5 Protocolo de coleta de dados

No caso de pesquisas qualitativas, Robson (2001) explica que os métodos de coleta de dados mais empregados são: entrevista, observação e análise de documentos, sendo o último adotado no âmbito deste trabalho. Já Friedman² (2005, *apud* Santos, 2018) esclarece que para que uma abordagem via *Design Science* resulte em avanço de conhecimento, espera-se do pesquisador a adoção de um processo de reflexão sistemática para que tal avanço seja consistente. Retomando as etapas de pesquisa estabelecidas por Santos (2018) e seus desdobramentos propostos para este trabalho (FIGURA 27) percebe-se que a coleta de dados ocorre prioritariamente nas duas fases iniciais chamadas de compreensão do problema e geração de alternativas. No contexto deste estudo a primeira corresponde à revisão bibliográfica e a fundamentação teórica.

4.1.6 Método de análise de dados

Segundo Miles e Huberman (1994), a análise de dados qualitativos é composta por três partes: síntese de dados, apresentação dos dados e formulação/verificação de conclusões. Na visão dos autores, estas partes ocorrem de forma cíclica e em interação com a etapa de coleta dos dados, como expresso na FIGURA 28.



² FRIEDMAN, K. Building Theory. **What, How, and Why**. Keynote Presentation. Third International Conference on Design Research, Rio de Janeiro, Brazil, October, 2005.

Neste contexto, a coleta de dados acontece continuamente, enquanto que a síntese, a apresentação e as conclusões configuram sucessivos episódios de análise das informações coletadas (MILES; HUBERMAN, 1994).

A síntese, ou redução, de dados consiste em selecionar, enfatizar, simplificar e transformar as informações primárias. Este processo procede a coleta de dados e já configura uma primeira análise destes, pois recorre sobre o pesquisador as definições iniciais do que é mais ou menos relevante no contexto de sua pesquisa. Os autores também destacam que esta etapa permite a conversão dos dados de palavras para números, desde que guardem relação com as fontes originais (MILES; HUBERMAN, 1994).

A apresentação dos dados prevê a organização destes de maneira a facilitar a tomada de decisões e a formulação de conclusões. A forma mais comum de exposição das informações coletadas é através de texto, que muitas vezes se torna longo e cansativo. Dessa forma, os autores sugerem o uso de matrizes, gráficos, tabelas e esquemas o que torna os dados mais acessíveis, compactos e de fácil interpretação. A apresentação já é uma forma de análise, uma vez que as informações apresentadas passaram por um processo de filtragem (MILES; HUBERMAN, 1994).

Por fim, as conclusões estão presentes – mesmo que de forma superficial – ao longo do processo de coleta de dados e das etapas iniciais de análise destes. Todavia, o pesquisador alimenta e fortalece suas interpretações iniciais consolidando-as apenas nesta fase. As conclusões são ainda verificadas à medida que se avança com a análise a fim de testá-la quanto a validade (MILES; HUBERMAN, 1994). Nesta pesquisa, é crucial realizar conclusões parciais ao final de cada tópico, pois estas tornam-se subsídio para o projeto arquitetônico. Cabe ainda uma conclusão final quanto à satisfação do objetivo de pesquisa e a devida validação do artefato.

4.1.7 Teste de validade

Segundo Robson (2002) validade pode ser entendida como o status de verdade que determinado estudo reporta. Para tanto, existe grande diversidade de técnicas de atestação da validade – validade interna, validade externa e validade do

constructo – que variam de acordo com o caráter principal da pesquisa, podendo ser quantitativa ou qualitativa. No primeiro caso prevalece a coleta de dados na forma de números ou provenientes de medições. No segundo prioriza-se a coleta e organização de informações na forma de texto. A partir da identificação deste caráter inicial o autor propõe outra classificação sobre o projeto de pesquisa: fixo ou flexível, sendo fixo ao trabalhar com dados quantitativos e flexível com dados qualitativos, prioritariamente (ROBSON, 2002).

Neste contexto, esta pesquisa pode ser enquadrada como qualitativa e flexível. Estudos assim classificados tendem a incorporar dados ao longo do processo que contribuem com a estruturação da própria pesquisa, sendo esta flexibilizada e modificada no seu percurso (ROBSON, 2002). Os testes de validade neste formato são mais voltados à adoção de práticas de pesquisa cuidadosas e honestas, e à demonstração clara do emprego destas ao leitor, auditor ou avaliador (ROBSON, 2002).

4.1.7.1 Validade interna

A validade interna busca compreender “até que ponto um fator ou variável realmente causou o efeito encontrado e não foi causado por outros fatores” (ROBSON, 2002, p. 549). No caso de projetos de pesquisa fixos tal validade é mais facilmente atendida, por exemplo, através da replicação de determinado experimento conduzido por outro pesquisador que obtém resultados semelhantes aos originais. (ROBSON, 2002, p. 168). Já em projetos flexíveis Robson (2002, p. 166) defende que a validade está associada às características do “bom” projeto flexível, sintetizadas a seguir:

- 1) Adoção de procedimentos rigorosos de coleta de dados, utilizando variadas técnicas, resumindo corretamente as informações e fornecendo detalhes sobre os dados coletados;
- 2) Correto enquadramento da pesquisa com a abordagem de projeto flexível;
- 3) Compreensão e escolha do método de investigação mais adequado;
- 4) Emprego de mais métodos de investigação sempre que necessário;

- 5) Início do projeto a partir de um único problema para o qual se busca uma solução;
- 6) Descrição detalhada dos métodos adotados, para coleta, análise e apresentação criteriosas dos dados, sendo o pesquisador responsável pela precisão das informações fornecidas;
- 7) Análise de dados utilizando diferentes níveis de abstração agrupando estes, por exemplo, por temas ou analisando por camadas do particular para o geral;
- 8) Emprego de redação clara e envolvente para auxiliar o leitor a compreender as experiências do pesquisador ao longo do processo de pesquisa.

A adoção de tais medidas no curso deste trabalho colabora para que as decisões de projeto – como dimensionamento, diretrizes projetuais e especificação de materiais – sejam devidamente justificadas e embasadas pela pesquisa desenvolvida, afastando assim a subjetividade como critério destas escolhas.

4.1.7.2 Validade externa ou generalização

Enquanto a validade interna busca evidenciar o esforço do pesquisador para validar seu trabalho quanto aos procedimentos de coleta, análise e apresentação de dados e resultados, a validade externa verifica a possibilidade de aplicação destes mesmos procedimentos na solução de um problema semelhante. Segundo Yin (2002, p. 56) a validade externa “estabelece o domínio ao qual as descobertas de um estudo podem ser generalizadas”. Robson (2001, p. 547) emprega o termo generalização como equivalente à validade externa definindo-o como “característica dos resultados de pesquisas que permitem que sejam aplicados a outras situações”.

No âmbito deste trabalho espera-se alcançar tal nível de generalização ao ponto que a estratégia utilizada sirva de base para a criação de outros artefatos arquitetônicos de suporte à pesquisa científica. Além disso, almeja-se também que a célula-teste projetada possa ser construída e replicada no território brasileiro, seguindo-se à risca projeto e detalhamento apresentado.

4.1.7.3 Validade do constructo

Segundo Yin (2002, p.56) a validade do constructo busca “estabelecer medidas operacionais corretas para os conceitos que estão sob estudo”. Robson (2001) completa o conceito instigando o pesquisador a questionar se o procedimento adotado para determinada medição efetivamente mensura o desejado. Tal cuidado precisa ser considerado tanto no momento da coleta de dados quanto na escrita do relatório de pesquisa ou ainda, particularmente neste trabalho, no desenvolvimento do projeto arquitetônico.

Considerando o universo desta pesquisa, o projeto arquitetônico da célula-teste proposta por si só não é suficiente para assegurar que o artefato cumpre a função para a qual foi projetado, no caso auxiliar estudos de campo em desempenho térmico de edificações e seus componentes. Para tanto, duas medidas de validação do constructo – materializado pela célula-teste – são possíveis: medições *in loco* do desempenho da edificação após sua construção (a princípio fora do escopo da pesquisa) ou simulação computacional.

4.2 PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS

Neste item são descritos os procedimentos adotados nas etapas de pesquisa: estudos de caso, dimensionamento, diretrizes projetuais, anteprojeto, equipamentos e procedimentos de uso.

4.2.1 Estudos de caso

A partir dos dados levantados na revisão bibliográfica, foram selecionados quatro exemplos cujas soluções de projeto podem contribuir com o modelo de célula-teste a ser desenvolvido. Os casos são apresentados segundo um roteiro comum que finaliza com uma análise sintética destacando os aspectos mais relevantes.

4.2.2 Dimensionamento

Optou-se pelo desenvolvimento de uma célula-teste padrão com as dimensões de um dormitório de solteiro, ambiente de longa permanência com múltiplos usos e pequeno volume, o que também possibilita a instalação do layout de um escritório. Para tanto, foram coletados dados referentes ao dimensionamento mínimo de dormitórios na NBR 15.575:2013 e nas legislações municipais que regulamentam projeto e execução de edifícios. Os procedimentos adotados em cada caso são descritos a seguir.

4.2.2.1 NBR 15.575

A *Norma Brasileira 15.575 - Edificações habitacionais: desempenho* discute o dimensionamento mínimo de ambientes na Parte 1, item 16.1.1 quanto ao pé direito mínimo, no Anexo E item E.5.1 sobre a iluminação natural dos ambientes e no Anexo G quanto à circulação e o mobiliário, além do item 11.3 da Parte 4 que trata das aberturas para ventilação (ABNT, 2013).

Considerando o dormitório de solteiro, a norma prevê como mobília obrigatória uma cama de solteiro, uma mesa de cabeceira, um armário e uma mesa de estudo como item opcional (ABNT, 2013). Com estes dados foi possível desenvolver diferentes layouts para dormitórios mínimos a partir dos quais foram definidas áreas e volumes mínimos para o ambiente.

4.2.2.2 Leis municipais

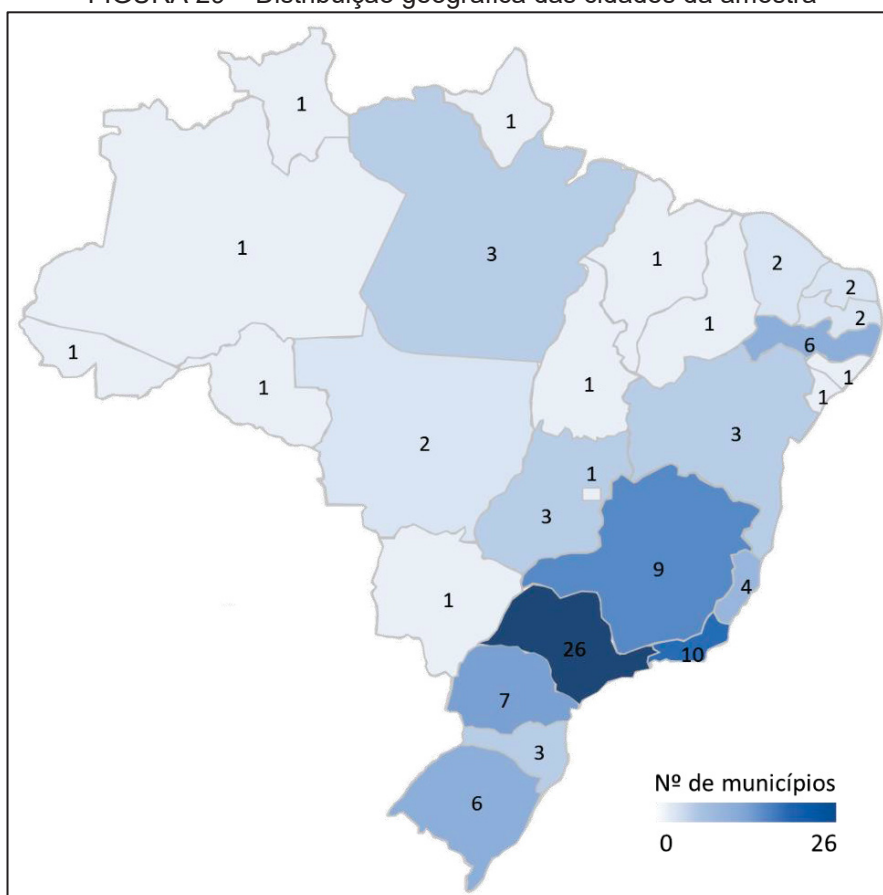
A coleta de dados referentes às características mínimas dos dormitórios determinadas pelas legislações municipais seguiu as etapas de escolha da amostra, definição dos critérios, coleta e tabulação de dados.

A amostra contemplou as 100 cidades mais populosas do Brasil (QUADRO 1), distribuídas geograficamente conforme indicado na FIGURA 29. Embora o número de municípios possa ser considerado pequeno diante dos 5.568 municípios brasileiros, as localidades escolhidas somam cerca de 75 milhões de pessoas, ou

seja, aproximadamente 35% da população nacional segundo o censo 2010, o que torna a amostra bastante representativa.

A definição dos critérios levantados foi orientada pelos atributos mais citados nos textos de lei, são eles: área mínima, dimensão mínima, pé direito mínimo e área ou proporção de ventilação e iluminação mínima. Estes dados foram coletados para cada uma das cidades em seus respectivos Códigos de Obras, Urbanismo ou Edificações, nas Leis Municipais ou Complementares e em seus Anexos. As informações obtidas foram organizadas em tabelas para análise posterior.

FIGURA 29 – Distribuição geográfica das cidades da amostra



Fonte: Autora (2022).

QUADRO 1 – Municípios contemplados na amostra

REGIÃO	Nº DE MUNICÍPIOS	MUNICÍPIO (UF)
Norte	9	Rio Branco (AC); Macapá (AP); Manaus (AM); Ananindeua, Belém e Santarém (PA); Porto Velho (RO); Boa Vista (RR); Palmas (TO).
Nordeste	19	Maceió (AL); Feira de Santana, Salvador e Vitória da Conquista (BA); Caucaia e Fortaleza (CE); São Luís (MA); Campina Grande e João Pessoa (PB); Caruaru, Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Paulista, Petrolina e Recife (PE); Teresina (PI); Mossoró e Natal (RN); Aracajú (SE).
Centro-Oeste	7	Brasília (DF); Anápolis, Aparecida de Goiânia e Goiânia (GO); Campo Grande (MS); Cuiabá e Várzea Grande (MT);
Sudeste	49	Cariacica, Serra, Vila Velha e Vitória (ES); Belo Horizonte, Betim, Contagem, Governador Valadares, Juiz de Fora, Montes Claros, Ribeirão das Neves, Uberaba e Uberlândia (MG); Belford Roxo, Campos dos Goytacazes, Duque de Caxias, Niterói, Nova Iguaçu, Petrópolis, Rio de Janeiro, São Gonçalo, São João de Meriti e Volta Redonda (RJ); Campinas, Carapicuíba, Bauru, Diadema, Franca, Guarujá, Guarulhos, Itaquaquecetuba, Jundiaí, Limeira, Mauá, Mogi das Cruzes, Osasco, Piracicaba, Praia Grande, Ribeirão Preto, Santo André, Santos, São Bernardo do Campo, São José do Rio Preto, São José dos Campos, São Paulo, São Vicente, Sorocaba, Suzano e Taubaté (SP).
Sul	16	Cascavel, Curitiba, Foz Iguaçu, Londrina, Maringá, Ponta Grossa e São José dos Pinhais (PR); Canoas, Caxias do Sul, Gravataí, Pelotas, Porto Alegre e Santa Maria (RS); Blumenau, Florianópolis e Joinville (SC).

Fonte: Autora (2022).

4.2.3 Diretrizes projetuais

A partir dos dados levantados na revisão bibliográfica, nos estudos de caso e do dimensionamento, são definidas algumas diretrizes projetuais divididas nos tópicos: usos e aplicações, características físicas, materiais e sistema construtivo, sistemas complementares e local de implantação.

4.2.4 Célula-teste para estudos de campo

A partir das diretrizes projetuais foi desenvolvido o projeto arquitetônico da célula-teste em nível de anteprojeto, para o qual são sugeridos equipamentos de monitoramento e procedimentos de uso.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e discutidos dados de embasamento projetual (nas seções de estudos de caso, dimensionamento e diretrizes projetuais) bem como o projeto final (nas seções de anteprojeto, equipamentos e instrumentação, e procedimentos de uso).

5.1 ESTUDOS DE CASO

Para uma análise mais aprofundada, foram selecionados três exemplos estrangeiros – dois europeus, um sul-americano – e um exemplar brasileiro, apresentados segundo um roteiro que contempla: o contexto em que foram desenvolvidos, as características físicas do artefato, os equipamentos e instrumentos contidos e o método de investigação aplicado. Por fim, foi realizada uma síntese das principais características das células-teste estudadas quanto aos aspectos de dimensionamento, orientação, distribuição interna, isolamento térmico, vedação, estrutura e método de investigação.

5.1.1 Estudo 01 – Programa europeu Passys-Paslink

Ao longo das décadas de 1970 e 1980 as edificações solares passivas ganharam destaque em função de seu potencial para a conservação de energia e consequente redução do uso de aquecimento e resfriamento em edifícios residenciais e comerciais. Neste contexto, novos componentes e sistemas foram desenvolvidos e com isso surgiu a necessidade de verificar as características térmicas, a interação resultante com a radiação solar e a performance destes quando aplicados em edificações. Para tanto, a Comissão Europeia, através de seu Programa de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia Solar lançou o projeto PASSYS (*Passive Solar Components and Systems Testing*, 1986-1992) (WOUTERS *et al.*, 1993).

O principal produto do programa foi o desenvolvimento de uma célula-teste padrão para caracterização térmica de componentes de edificações sob condições dinâmicas do ambiente externo. Todavia, muito mais do que um modelo eficiente e calibrado de célula-teste, o projeto consolidou uma rede de 10 países, cerca de 60

pesquisadores, 27 instituições e 35 células-teste instaladas em 12 locais distintos (WOUTERS *et al.*, 1993). Esta configuração em rede possibilitou o intercâmbio de conhecimento e a comparação direta dos experimentos realizados em diferentes condições climáticas, o que foi possível através da adoção de procedimentos metodológicos padronizados que podem ser aplicados independentemente do local da instalação, mantendo altos níveis de precisão e confiabilidade (GARCÍA-GÁFARO *et al.*, 2020).

O primeiro protótipo de célula-teste do programa foi projetado em 1983 buscando atender aos requisitos: localização em um clima externo realista, condições ambientais internas controláveis, dimensionamento realista, dois ambientes, não habitável, muito bem isolada e com a parede sul intercambiável. Em 1985, uma empresa alemã confeccionou duas células-teste iniciais, que foram entregues em abril de 1986. Após testes, um novo projeto foi desenvolvido e, em 1987, 17 unidades foram entregues às instituições participantes do projeto. Paralelamente, trabalhou-se nos sistemas de aquisição de dados, modelos de simulação, de exaustão e de condicionamento (GICQUEL, 1987).

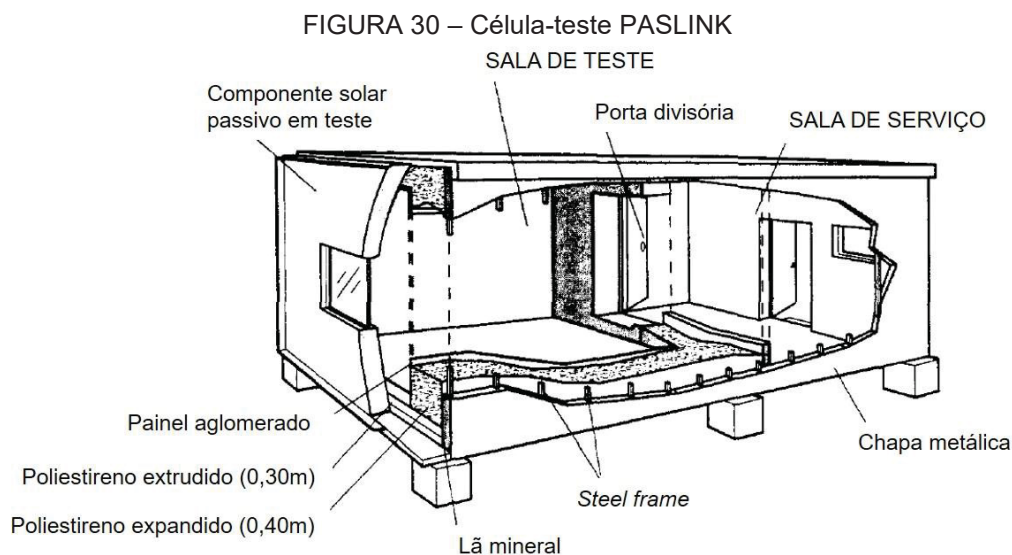
A primeira fase do programa (PASSYS I, 1986-1989) contou com sete países – Alemanha, Bélgica, Dinamarca, França, Holanda, Itália e Reino Unido – e tinha como objetivos: desenvolver procedimentos para testes das características térmicas e solares de componentes, aumentar a confiança nas simulações solares passivas, e ampliar a confiança nas ferramentas de design simplificado. A previsão inicial seria de um projeto com duração de 36 meses, de 1986 a 1989. Entretanto, após a primeira fase do projeto (PASSYS I), na qual foram alcançados progressos significativos, a Comissão Europeia decidiu apoiar uma segunda fase para a finalização das atividades de pesquisa, até o ano de 1992 (PASSYS II). Neste momento, também foi aprovada uma modificação do projeto original para permitir testes de componentes de coberturas. Na segunda fase (PASSYS II, 1989-1992) foram incluídos Espanha, Grécia e Portugal, e dois objetivos foram acrescentados ao escopo: expandir os experimentos para outros tipos de componentes de edifícios e não apenas os passivos ou solares, e estabelecer uma colaboração mais próxima com a indústria visando a padronização (WOUTERS *et al.*, 1993).

Em 1994, com o fim do projeto PASSYS teve origem a *European Economic Interest Grouping of Outdoor Test Centres* (PASLINK EEIG *network*) como uma empresa para dar suporte a uma rede (*LINK*) de pesquisa na área de testes de campo com células-teste. Neste momento, as células-teste do Projeto PASSYS foram aprimoradas e passaram a ser chamadas de células-teste PASLINK (PFLUGER; HAHNE, 1996). Em 2005, foi criada uma nova organização denominada *Dynamic Analysis, Simulation and Testing applied to the Energy and Environmental performance of buildings* (DYNASTEER). Em 2019, a *DYNASTEER Network* foi formalizada como um conjunto de organizações voltadas ao desenvolvimento e a aplicação de ferramentas e metodologias nos campos de análise, simulação, experimentação e desempenho energético-ambiental de edifícios (DYNASTEER, 2020).

5.1.1.1 Características físicas

O modelo original de célula-teste (FIGURA 30) era composto por uma sala de teste com dimensões 5,00m x 2,76m x 2,75m; 13,80 m² de área; e 38,00 m³ de volume de ar (CATTARIN *et al.*, 2016), e uma sala de serviço acoplada ao norte contendo os equipamentos de medição e climatização. A estrutura era formada por tubos de aço, de configuração semelhante ao sistema *steel frame*, situados na parte externa do edifício. O isolamento, localizado no lado interno do envelope, era composto por uma espessa camada de poliestireno extrudido (400 mm) e lã mineral posicionada entre os tubos de aço da estrutura. Internamente, as paredes foram revestidas por painéis de madeira aglomerada e chapas metálicas (2mm) pintadas na cor azul para garantir propriedades ópticas estáveis. Externamente, a vedação foi feita por chapas de aço inoxidável, a fim de garantir proteção contra intempéries. A transmitância térmica resultante do envelope é inferior a 0,1 W/m²K. A sala de teste e de serviço são separadas por uma parede muito isolada com uma porta de comunicação selada. Desta forma, a sala de teste era selada contra possíveis infiltrações naturais, com uma taxa normal de troca de ar menor do que 0,01 troca por hora. A parede sul da sala de teste tinha 7,60m² de área útil e era fixada em uma estrutura removível. Desta forma, qualquer tipo de vedação poderia ser incorporado ao sistema. Posteriormente, durante

a fase II do programa, células-teste com a opção de teto removível foram instaladas em cinco locais de teste (WOUTERS *et al.*, 1993). Segundo Strachan e Vandaele (2008), as células-teste podiam ainda ser instaladas sobre uma plataforma com trilhos, o que possibilitava sua rotação para diferentes orientações.



Fonte: Adaptado de Wouter (1993).

5.1.1.2 Equipamentos e instrumentação

As células-teste do programa PASSYS possuem um sistema próprio de aquecimento e resfriamento. Este sistema estava dividido em três subsistemas: sistema de arrefecimento, sistema de aquecimento e sistema de circulação de ar. A medição das condições climáticas locais era realizada por uma estação meteorológica padronizada, que registrava: velocidade e direção do ar a 10 metros de altura; radiação solar global em um plano vertical voltado para o sul; radiação solar difusa medida por piranômetros; radiação de onda longa; temperatura do ar; e umidade relativa. As temperaturas superficiais eram verificadas em 23 pontos distintos, incluindo internos e externos. A medição de temperatura era realizada por sensores tipo *Pt 100* ou *termopares*. Havia ainda, sensores de fluxo de calor para quantificar os fluxos nos componentes da célula-teste. As condições do ambiente interno eram registradas por: sete sensores de temperatura do ar; um anemômetro de fio quente; quatro medidores de infiltração de ar. Todos os dados eram medidos, computados e

armazenados pelo sistema de monitoramento que aceitava até 300 sensores (WOUTERS *et al.*, 1993).

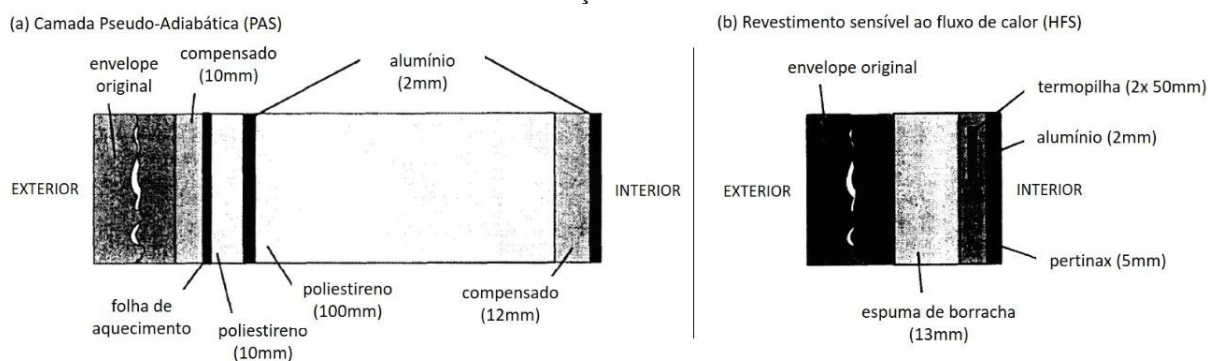
Após a consolidação da rede de pesquisa PASLINK, em 1994, diversas modificações foram propostas para incrementar a precisão e reduzir o tempo de teste, de oito para uma ou duas semanas (CATTARIN *et al.*, 2016). Dentre os equipamentos sugeridos estão: a adição de uma camada ativa pseudo-adiabática (*pseudo-adiabatic shell - PAS*); a utilização de revestimento sensível ao fluxo de calor (*heat flux sensitive tiles - HFS*); o emprego de caixas frias móveis em diferentes arranjos (PFLUGER; HAHNE, 1996); e o uso de um sistema proteção da radiação solar (MARTÍNEZ *et al.*, 2019).

O sistema de camada pseudo-adiabática (PAS) (FIGURA 31a) posicionado no interior da célula-teste é composto por uma folha de aquecimento seguida por uma sequência de materiais isolantes e condutores térmicos (CATTARIN *et al.*, 2016). O funcionamento ocorre a partir da medição da diferença de temperatura entre as duas chapas de alumínio por *termopilhas*, estas detectam o fluxo de calor através do envelope de células e compensam as perdas de calor acionando o dispositivo de aquecimento (JANSSENS; ROELS; VANDAELE, 2011).

O sistema de revestimento sensível ao fluxo de calor (HFS) (FIGURA 31b) funciona de forma semelhante ao anterior, com a vantagem de ser menos espesso e a desvantagem de ter processos de fabricação e instalação mais caros. Complementarmente aos dois sistemas, podem ser utilizadas caixas frias móveis posicionadas temporariamente no exterior da célula-teste, em frente a fachada de teste, a fim de obter condições climáticas estáveis e específicas ao longo de determinado experimento como: baixa temperatura, velocidade do vento constante e proteção contra a radiação solar (PFLUGER; HAHNE, 1996).

E mais recentemente, Martínez *et al.* (2019) propõem o emprego de um sistema simples de sombreamento com o emprego de lonas brancas como forma de proteger a célula-teste da incidência direta de radiação solar (FIGURA 32)

FIGURA 31 – Modificações da célula-teste Paslink



Fonte: Adaptado de Pfluger e Hahne (1996).

FIGURA 32 – Sistema de sombreamento com lona na célula-teste Paslink



Fonte: Martínez *et al.* (2019).

5.1.1.3 Método de investigação

Dentro do método estabelecido destaca-se o processo de calibragem da célula-teste. O procedimento é realizado através do fechamento da abertura de teste da face sul por uma peça opaca de isolamento (parede cega), seguido por uma sequência de testes de aquecimento ou resfriamento – a depender a natureza da investigação – e finalizado com a aplicação do método do princípio de identificação de parâmetro. Ao final do processo, a parede cega é eliminada do modelo, sendo substituída por um sensor de fluxo de calor posicionado na superfície interna da

parede de calibração. Por fim, durante a avaliação do teste real, os parâmetros no modelo que representam as demais paredes da sala de teste, incluindo a parede divisória entre esta e a sala de serviço, são mantidos constantes (DIJK; LINDEN; 1993).

Segundo Cattarin *et al.* (2016) as células-teste do programa PASSYS-PASLINK podem ser utilizadas tanto para experimentos comparativos quanto absolutos. Quando aplicadas em experimentos comparativos as células-teste são usadas em pares (células-teste gêmeas) na avaliação da eficiência de soluções e adaptações (FIGURA 33a), mantendo-se uma célula-teste como configuração controle (CE) e a outra como configuração experimental (CE). Neste tipo de experimento, pode-se, por exemplo, reproduzir as condições iniciais de um ambiente de uma moradia a fim de compará-lo com as condições propiciadas por uma reabilitação, ou verificar o impacto da alteração de algum elemento, como o tamanho de uma janela (LEÓN-RODRÍGUEZ *et al.*, 2017). Quando empregadas em investigações absolutas as células-testes são usadas de forma unitária (FIGURA 33b). Neste caso, o elemento em investigação posicionado na fachada de teste é submetido a uma série de procedimentos padronizados. Este método experimental é particularmente utilizado para testar sistemas de esquadrias envidraçadas quanto às propriedades térmicas, solares e visuais de seus componentes em contato direto com o ambiente externo (STRACHAN; VANDAELE, 2008).

FIGURA 33 – Células-teste gêmeas (a) e célula-teste unitária (b)



Fonte: (a) León-Rodríguez *et al.* (2017) e (b) Image Project (1998).

Mais recentemente, as células-teste do programa PASSYS-PASLINK passaram também a ser utilizadas como suporte a simulação computacional, uma vez que os módulos de teste isolados não são suficientes para determinar o comportamento de um edifício, ou componente deste, em diferentes localidades, sob variadas condições climáticas. Para tanto, foi desenvolvido um procedimento para a validação de um modelo a partir da célula-teste composto pelas fases de calibração, escalonamento e replicação.

A calibração é uma etapa posterior ao experimento de campo e consiste na modelagem do edifício (ou componente) em teste, e do ambiente em que este se insere. A partir destes, a simulação é executada utilizando os dados climáticos coletados durante o experimento. Em seguida, comparam-se os resultados simulados com as medições de campo. Quanto maior a aproximação dos valores obtidos, mais correto é o modelo proposto (STRACHAN, 2008).

O escalonamento é voltado ao estudo de partes ou componentes do edifício. Baseia-se na simulação de cenários que vão ora incluir e ora excluir o elemento em teste e na comparação dos resultados obtidos sob diferentes perspectivas: consumo de energia, conforto térmico, conforto visual, entre outros. O autor defende que esta técnica permite estimativas mais realistas da performance do componente já que utiliza a calibração anterior para extrapolar determinados aspectos (STRACHAN, 2008).

E a replicação é uma etapa facultativa que envolve a repetição das simulações utilizando diferentes bases de dados climáticos, para diversas localidades e em diferentes regimes operacionais (STRACHAN, 2008).

5.1.2 Estudo 02 – Célula-teste de Florença, Itália

A região italiana da Toscana prevê o emprego de células-teste externas para verificação da performance de componentes construtivos no clima mediterrâneo (ALCAMO, 2011a). Este caracteriza-se por verões quentes e invernos amenos (clima Csa segundo a classificação Köppen-Geiger), condição que dificulta a adoção de estratégias de conforto térmico adequadas a ambas as estações, o que impulsiona a

busca por novas soluções tecnológicas. Neste sentido, a administração regional acredita que facilitar o acesso a células-teste – instrumento que possibilita analisar o comportamento térmico e solar de elementos das edificações – estimula a indústria local a desenvolver produtos que promovam a conservação de energia e a sustentabilidade na construção (ALCAMO; DE LUCIA, 2013).

Para tanto, a Universidade de Florença desenvolveu, no âmbito do projeto *Abitare Mediterraneo* e com patrocínio do governo toscano, um modelo de célula-teste (FIGURA 34) pautado em dois objetivos: 1) elaborar procedimentos de qualidade para testes dinâmicos em grande escala e 2) desenvolver modelos para caracterizar o desempenho térmico de edificações e seus componentes (GALLO, 2014). O modelo foi idealizado como projeto de doutorado de Giuseppina Alcamo, sob a orientação do professor Marco Sala, do Departamento de Tecnologia em Arquitetura e Design. A célula-teste foi implantada no campus da universidade, onde são realizados testes sob as condições dinâmicas do ambiente externo, sendo prevista a integração do instrumento à rede de pesquisa internacional DYNASTE (ALCAMO, 2011a).

5.1.2.1 Características físicas

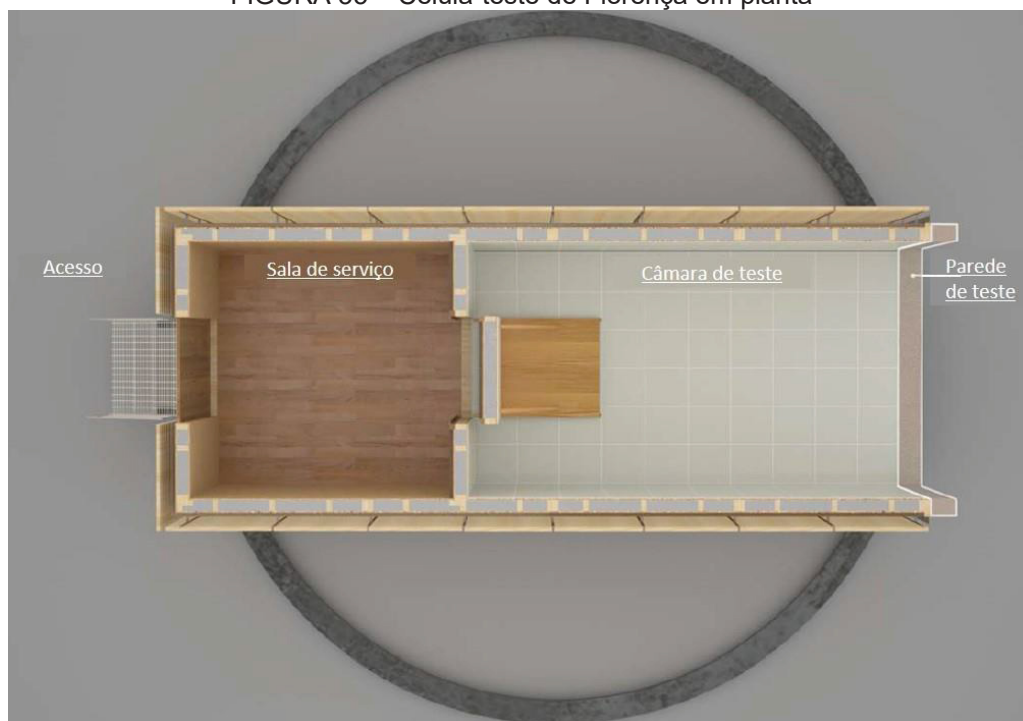
A célula-teste proposta foi inspirada nas células-teste PASLINK, sendo composta por dois ambientes: sala de serviço (2,80m x 2,82m x 2,82m) e câmara de teste (5,06m x 2,82m x 2,82m) contendo uma parede de ensaio de 2,80m x 2,80m (FIGURA 35). Optou-se por uma estrutura em madeira projetada para eliminar pontes térmicas, sendo o material escolhido por ser mais leve do que estruturas de concreto, facilitando a rotação do edifício que foi posicionado sobre rodas, o que possibilita assumir diferentes orientações favorecendo estudos de iluminação natural (ALCAMO, 2011b).

FIGURA 34 – Célula-teste de Florença, Itália



Fonte: Alcamo; de Lucia (2013).

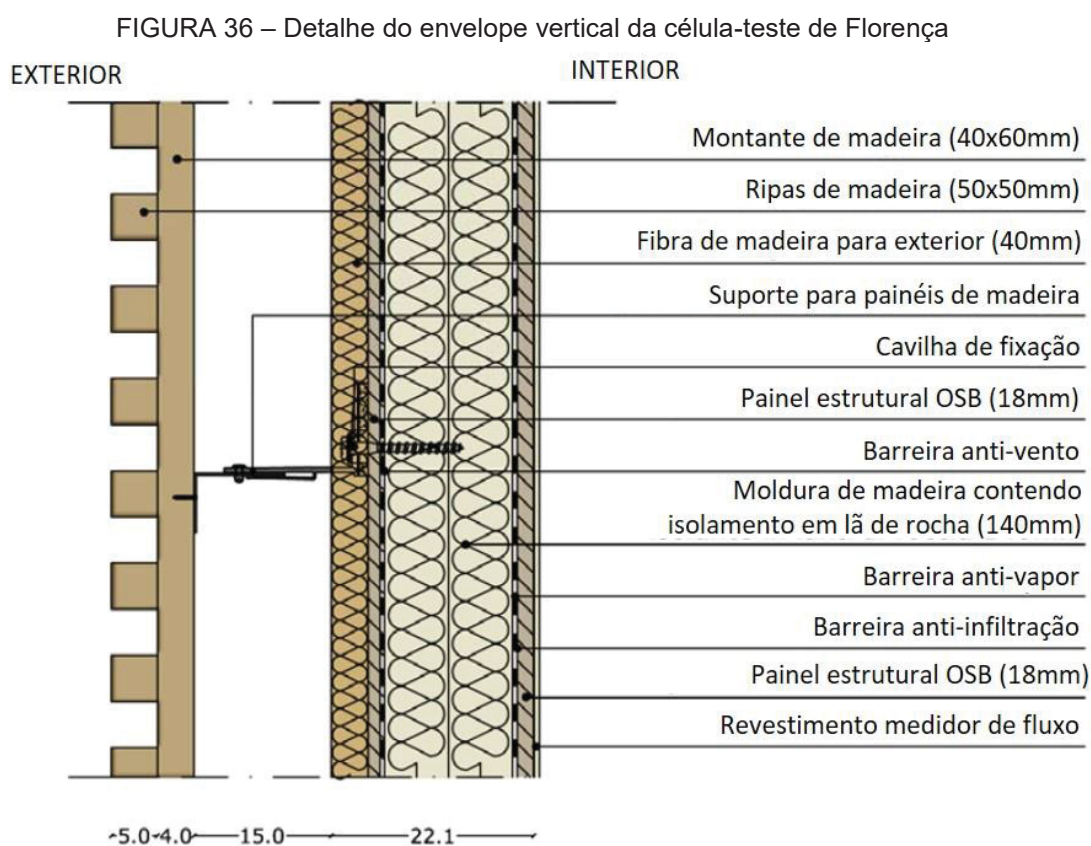
FIGURA 35 – Célula-teste de Florença em planta



Fonte: Adaptado de Alcamo (2011b).

O envelope vertical (FIGURA 36) é composto do exterior para o interior por: camada de isolamento em fibra de madeira (40mm) próprio para área externa, painéis estruturais em OSB (18mm), camada anti-vento, isolamento em lã de rocha (140mm), camada anti-vapor e anti-infiltração, chapas de OSB (18mm) e revestimento interno com placas medidoras de fluxo de calor. Externamente, as paredes são ainda protegidas por uma estrutura vazada em madeira que garante proteção solar e ventilação. A transmitância térmica alcançada é de $0,285 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ALCAMO, 2011b).

A cobertura e o piso têm configuração idêntica às paredes, com alguns acréscimos. A primeira, é completada por uma estrutura metálica triangular que serve de suporte para chapas de madeira (23mm) que são cobertas por telhas metálicas corrugadas (0,6mm). O segundo, teve a adição de chapas de madeira (25mm) logo abaixo do revestimento medidor de fluxo. Ambos têm transmitância resultante de $0,291 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ALCAMO, 2011b).



Fonte: Adaptado de Alcamo (2011b).

5.1.2.2 Equipamentos e instrumentação

A sala de serviço abriga equipamentos de análise de dados, enquanto que a sala de teste é completamente instrumentada com os medidores necessários para a boa condução dos ensaios. Dentre estes, destacam-se as placas de revestimento capazes de medir o fluxo de calor entre o ambiente interno e externo (FIGURA 37), desenvolvidas pelo Departamento de Engenharia Industrial da própria Universidade de Florença. Estas caracterizam-se como placas planas de 53cm x 53cm, compostas por diferentes camadas de materiais, sendo a mais externa de alumínio, e sensores de calor localizados em seu interior. Na comparação com o revestimento sensível ao fluxo de calor (HFS) das células-teste PASLINK, o novo revestimento tem desempenho cinco vezes superior, o que garante medições com sinais mais estáveis, especialmente em condições de baixo fluxo (ALCAMO; DE LUCIA, 2013).

FIGURA 37 – Placa de revestimento medidora do fluxo de calor



Fonte: Alcamo; de Lucia (2013).

Outro avanço em relação ao programa PASSYS-PASLINK é o entendimento de que o envelope não deve ser adiabático, pois este interfere nas temperaturas internas. Isto ocorre, pois, sistemas adiabáticos teóricos acabam sofrendo com o efeito de absorver energia do ambiente externo não sendo capazes de liberá-la com

eficiência, o que causa um superaquecimento do ambiente interno (ALCAMO; DE LUCIA, 2013).

A célula-teste conta ainda com um radiador dotado de ventilador para controle da temperatura interna. Este deve ser usado durante o inverno para avaliar o fluxo de calor invertido, ou seja, do interior para exterior (ALCAMO, 2011a).

5.1.2.3 Método de investigação

A investigação inicia com o posicionamento do elemento a ser testado, seja este opaco ou transparente, em uma moldura removível, desenvolvida para reduzir o efeito de canto (*corner effect*). O conjunto é posicionado na parede de teste, com área máxima para ensaio de 7,84m² (ALCAMO, 2011a). Ao longo da duração do experimento, as condições dinâmicas do ambiente externo são monitoradas por uma estação meteorológica, tal como as condições do ambiente interno são coletadas pela instrumentação presente. A partir dos dados coletados, e com auxílio de um software de análise próprio, são calculados valores como transmitância térmica (*U-value*), ganho solar (*g-value*), atraso térmico e fator de luz diária em diferentes condições de céu. Tais informações permitem caracterizar o comportamento físico, térmico e lumínico do elemento em teste (GALLO, 2014).

Outras análises, como a simulação computacional ou a avaliação do ciclo de vida do componente construtivo, podem ainda ser realizadas por outros departamentos da Universidade de Florença, visando a certificação de novos produtos e a coleta de dados para comparação com outros estudos (ALCAMO, 2011a).

5.1.3 Estudo 03 – Célula-teste para a região do Alto Andino, Peru

Em 2018, uma equipe de pesquisadores peruanos da *Universidad Nacional de Ingeniería*, localizada em Lima, desenvolveu um modelo de célula-teste com o objetivo de investigar o material de vedação mais adequado para edificações residenciais localizadas em regiões do alto andino. Nesta região é observada a predominância de casas construídas com grossas paredes (40-50 cm) feitas em adobe, taipa ou pedra empregados segundo técnicas vernaculares. Sabe-se de

antemão que estes materiais possuem propriedades térmicas que contribuem para manter a temperatura interior em níveis aceitáveis, face às baixas temperaturas externas. Todavia, não existiam, até aquele momento, estudos quantitativos acerca da transmitância térmica e do comportamento termoenergético dos materiais tradicionais sob condições climáticas reais (MOLINA; HORN; GÓMEZ, 2019).

O vilarejo de Imata (15°55'43" S e 71°06'31" W), situado na região de Arequipa, foi o local escolhido para posicionar a célula-teste por ser um dos pontos mais frios do país. A localidade está elevada 4500 m em relação ao nível do mar, pode apresentar temperaturas mínimas abaixo de -23°C, recebe energia solar média de 6 kWh por m² ao dia, valor relativamente alto dada a condição geográfica em função do clima seco e sem nebulosidade, sendo designada como ET clima de tundra segundo classificação Köppen-Geiger (MOLINA; HORN; GÓMEZ, 2019).

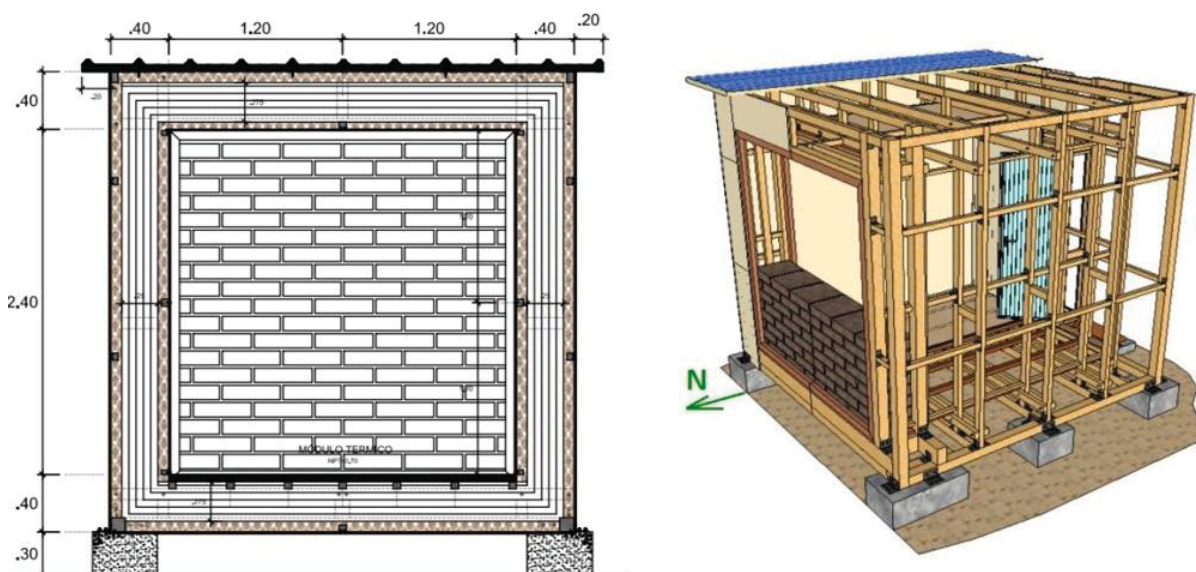
5.1.3.1 *Características físicas*

Opta-se por uma célula-teste (FIGURA 38) quase cúbica com 2,40m de arestas interiores e dimensões externas aproximadas de 3,20m x 3,30m x 3,30m, sendo tais medidas representativas do tamanho mínimo de um cômodo habitável. Das seis faces do edifício, cinco – fachadas leste, oeste, sul, piso e cobertura – são configuradas para limitar ao máximo as trocas de calor com o ambiente externo. A fachada norte foi escolhida como área de teste e comporta, portanto, diferentes materiais. A opção por esta orientação se deu em função da trajetória solar, predominante ao norte ao longo de todo o ano para a localidade, fazendo com que a face norte tenha mais exposição à radiação solar, sendo, portanto, a face que apresenta maior contribuição térmica para a temperatura interna (MOLINA; HORN; GÓMEZ, 2019).

O módulo é apoiado sobre seis blocos de concreto, com 0,30m de altura acima do solo, a fim de prevenir transferência de calor entre este e a célula. O envelope foi pensado para assegurar uma transmitância térmica da ordem de 0,0X W/m²°K. A estrutura é resolvida por um esqueleto de madeira pré-fabricada para construção, que é leve, desmontável e resistente a umidade, para evitar deformações e pontes térmicas. Esta é preenchida com uma combinação de materiais isolantes que inclui

poliestireno expandido, poliuretano expandido e fibra de vidro, cuja configuração e espessura varia para paredes, piso e cobertura. O fechamento das paredes é feito por placas de gesso (125mm), tanto interna quanto externamente. Para o fechamento interno do piso e da cobertura são utilizadas chapas de OSB (100mm), enquanto que o fechamento externo recebe uma camada para proteção contra as intempéries que consiste em um sanduíche de chapas metálicas de alumínio-zinco galvanizado com enchimento em poliuretano expandido (500mm). O acesso se dá por duas portas de madeira separadas por uma camada de ar, sendo cada porta formada por duas chapas de madeira compensada (4mm) com isolamento interno em poliuretano expandido (100mm) (MOLINA; HORN; GÓMEZ, 2019).

FIGURA 38 – Célula-teste para o Alto Andino, Peru
(a) Vista frontal parede sul (b) Perspectiva

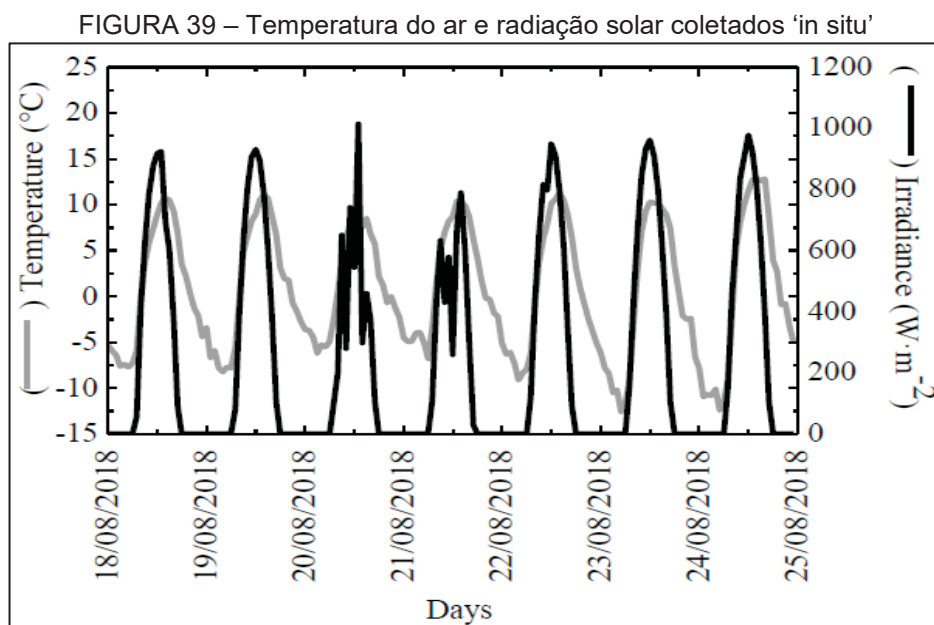


Fonte: Adaptado de Molina; Horn; Gómez (2019).

5.1.3.2 Equipamentos e instrumentação

A coleta dos dados meteorológicos *in situ* foi realizada entre os dias 18 e 24 de agosto de 2018, durante um período de *heladas*, caracterizado por temperaturas próximas ou abaixo de 0°C. Foi utilizada uma estação meteorológica do tipo *Davis (Vantage Pro2 Plus)*, cujos registros foram convertidos para o formato EPW (*EnergyPlus Weather Data*) com auxílio do programa *Element*. A radiação solar média

registrada foi de 6,1 kWh por m² por dia e a temperatura do ar média ficou em 0,7°C, com temperatura mínima observada de -12,6°C (FIGURA 39) (MOLINA; HORN; GÓMEZ, 2019).



Fonte: Molina; Horn; Gómez (2019).

5.1.3.3 Método de investigação

O método de investigação adotado foi a simulação computacional utilizando o *EnergyPlus* gerada a partir dos dados climáticos coletados *in situ*. Tal software foi escolhido pois, além das propriedades físicas e térmicas dos materiais considera também sua inércia térmica, entendida como a capacidade de conservação de calor específica de cada material. A investigação iniciou com a modelagem 3D da célula-teste desenvolvida no *SketchUp*, seguida pela criação de zonas térmicas com auxílio do *OpenStudio*, uma interface do simulador. Na sequência foram configuradas as variáveis de entrada e saída, considerando como variáveis de entrada os dados climáticos coletados, as propriedades físicas dos materiais e a emissividade térmica (absortividade 0,9). Foram definidas como variáveis de saída a temperatura do ar interior, a radiação solar incidente nas paredes externas e o fluxo de calor que entra ou sai das superfícies das paredes. Dois cenários foram simulados para o período de 18 a 24 de agosto de 2018. O primeiro de calibragem, considerou todas as paredes

iguais e desconsiderou a porta, pontos de infiltração, cargas internas de calor ou de operabilidade. O segundo de teste, manteve as configurações anteriores, porém aplicou blocos de adobe na fachada norte. Ao final, foram calculadas e comparadas as temperaturas internas, os valores de fluxo de calor e o consumo energético necessário para manter a temperatura interna uniforme em 15°C, em ambos os casos. A partir destes, conclui-se que o projeto de célula-teste desenvolvido, a ser construído em Imata, tem capacidade para avaliar o desempenho térmico de diferentes materiais de construção quando combinadas medições *in situ* com simulações no *EnergyPlus* para validação dos resultados (MOLINA; HORN; GÓMEZ, 2019).

5.1.4 Estudo 04 – Câmara Bioclimática de Baixo Custo, Brasil

Apesar de não ser diretamente enquadrada como uma célula-teste, a câmara bioclimática desenvolvida pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) permite a realização de estudos comparativos de arquitetura bioclimática e desempenho de edificações tal qual a maioria das células-teste brasileiras, além de ter características físicas compatíveis com o modelo a ser projetado, podendo assim ser objeto de estudo de caso.

No início de 2016, o projeto de pesquisa “Construção de câmara climática para experimentos nas áreas de conforto ambiental e arquitetura bioclimática” foi submetido ao Edital Universal MCTI/CNPq nº 01/2016 tendo sido aprovado no final do mesmo ano (TREVISSAN, 2019). Desta forma, o projeto começou a ser desenvolvido em 2017, como parte da pesquisa de doutorado da pesquisadora Livia Yu Iwamura Trevisan intitulada “Concepção, construção e verificação da aplicabilidade de uma câmara bioclimática de baixo custo em estudos de conforto ambiental”, sob orientação do professor Eduardo Krüger.

O local de instalação escolhido foi a gleba norte da sede Ecoville da UTFPR, localizada na região oeste de Curitiba (FIGURA 40). A cidade se enquadra na classificação climática de Köppen-Geiger como clima temperado marítimo úmido (Cfb), além de estar inserida na Zona Bioclimática 1 (ZB1) (ABNT, 2005c).

FIGURA 40 – Localização na região metropolitana (a) e na sede ecoville (b)



Fonte: Trevisan (2019) adaptado de COMEC (2017) e Google (2017).

5.1.4.1 Características físicas

A Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC) é composta por dois módulos idênticos de 3,00m x 2,44m x 2,89m (C x L X A) construídos a partir da adaptação de um container de 40 pés. Ao longo dos experimentos o módulo de controle (MC) não sofre alterações, ao passo que o módulo experimental (ME) pode ser modificado a depender da investigação em curso (FIGURA 41) (TREVISAN, 2019).

FIGURA 41 – Implantação dos módulos ME e MC



Fonte: Trevisan (2019).

A concepção foi realizada com base na câmara climática alemã localizada no *Laboratory for Occupant's Behaviour, Satisfaction, Thermal comfort, and Environmental Research* (LOBSTER), do Karlsruhe Institute of Technology (KIT). As principais diferenças entre as duas estão na redução da área construída, no emprego de recursos e materiais locais e na diminuição significativa do valor do investimento, conforme descreve a TABELA 10 (TREVISAN, 2019).

TABELA 10 – Comparação entre as câmaras climáticas LOBSTER e CBBC

CARACTERÍSTICAS	LOBSTER	CBBC
Localização	Karlsruhe, Alemanha (2013)	Curitiba, Brasil (2018)
Investimento	1,2 milhão de euros	100 mil reais
Ambientes	2 ambientes de 24,00m ²	2 ambientes de 5,40m ²
Posicionamento	2 módulos adjacentes	2 módulos independentes
Rotação	Sistema automatizado	Sistema manual e independente
Alterações	Não permitidas	Permitidas no módulo experimental
Esquadria	Hermética com vidro triplo	Vidro temperado 6mm
Temperatura	Controlada serpentina embutida	Regulada por ar condicionado

Fonte: Trevisan (2019).

Após verificação das diversas regulamentações que poderiam ser aplicadas à câmara climática, optou-se por basear o dimensionamento nas resoluções nº 318/2002 e nº 107/2018 da Secretaria Estadual de Saúde (SESA) que definem os critérios gerais para a construção de instituições de ensino, considerando o enquadramento da câmara climática como uma sala de uso múltiplo, segundo a TABELA 11. Dos parâmetros avaliados, apenas o pé direito mínimo não foi atendido em função da limitação de altura interna original do container, descontando-se ainda as camadas de piso e forro (TREVISAN, 2019).

TABELA 11 – Critérios para sala de uso múltiplo segundo SESA nº 318/2002

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO	CÁLCULO P/ MÓDULO	VALOR ADOTADO
Área	1,8 m ² / aluno	3 pessoas = 5,40m ²	5,40m ²
Pé-direito	2,80m	2,89 - 0,18 - 0,1 - 0,11	2,50m
Iluminação natural	20% da área do piso	5,4 x 20% = 1,08m ²	1,4 x 0,9 = 1,26m ²
Ventilação natural	10% da área do piso	5,4 x 10% = 0,54m ²	0,7 x 0,9 = 0,63m ²

Fonte: Trevisan (2019) adaptado de Paraná (2018).

Da mesma forma, para as diretrizes construtivas buscou-se atender às recomendações contidas na NBR 15.220-3:2005 e na NBR 15.575:2013, tendo em ambas a Zona Bioclimática 1 como referência, conforme TABELA 12. Dos critérios avaliados, a capacidade térmica (CT) ≥ 130 kJ/m²K não foi alcançada, bem como o atraso térmico (ϕ) da cobertura $\leq 3,3$ h. Todavia, em ambos os casos os valores atingidos foram bastante próximos dos exigidos sendo CT = 122,54 kJ/(m²K) e ϕ = 3,99 h.

TABELA 12 – Critérios construtivos para a ZB1 segundo a NBR 15.220-3/2005

DOCUMENTO	PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO	VALOR ADOTADO
NBR 15.220 (2005)	Aberturas	15-25% área do piso	5,39 x 15% = 0,81 < 1,26
	Sombreamento	Permitir sol no inverno	Acesso luz solar
	U parede	$U \leq 2,50$ W/(m ² K)	$U = 0,87$ W/(m ² K)
	CT parede	$CT \geq 130$ kJ/(m ² K)	$CT = 122,54$ kJ/(m ² K)
	U cobertura	$U \leq 2,50$ W/(m ² K)	$U = 0,87$ W/(m ² K)
	U piso	$U \leq 2,30$ W/(m ² K)	$U = 1,00$ W/(m ² K)
	Condicionamento térmico passivo (ZB1)	A: Aquecimento artificial	Ar condicionado
	B: Aquecimento solar	Janela	
	C: Massa térmica	Parede leve $G = 41,8$ kg/m ² < 60 kg/m ²	
	F: Desumidificação	Ar condicionado	
NBR 15.575 (2013)	T _{in} máxima verão	$\leq T_{ext}$ máxima	Ar condicionado
	T _{in} mínima inverno	$\geq T_{ext}$ mínima + 3°C	Ar condicionado
	Iluminância natural	≥ 60 lux	Janela
	Fator de luz diurna	$\geq 0,5\%$	Janela
	Iluminação artificial	≥ 100 lux	Philips HUE Ambiance
	Atraso térmico parede	$\phi \leq 4,3$ h	$\phi = 3,99$ h
	Ventilação	7% da área do piso	5,39 x 7% = 0,38 < 0,63
Atraso térmico cobertura	$\phi \leq 3,3$ h	$\phi = 3,99$ h	

Fonte: Trevisan (2019) adaptado de ABNT (2005c e 2013).

A escolha dos materiais considerou a disponibilidade nacional e a adaptabilidade construtiva para outras condições climáticas. Desta forma, optou-se por um método construtivo a seco com a sobreposição de camadas. A envoltória resultante é constituída por seis camadas que incluem aço corten (fechamento externo), poliuretano expandido (isolante térmico), painel wall, chapa de OSB, camada de ar e gesso acartonado (fechamento interno). A TABELA 13 descreve os materiais utilizados bem como as propriedades térmicas dos componentes, a transmitância térmica das paredes e cobertura equivale a 0,87 W/m²K, a capacidade térmica igual a 122,54 kJ/m²K e o atraso térmico de 3,99 horas. A FIGURA 42 apresenta a envoltória

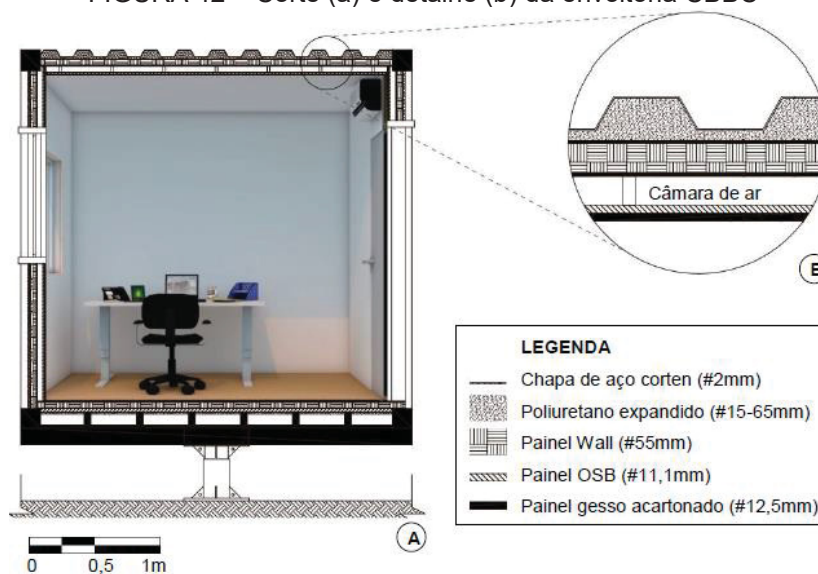
em corte juntamente com um detalhe construtivo no qual é possível observar a disposição das camadas.

TABELA 13 – Caracterização da envoltória da CBBC

ELEMENTO	COMPOSIÇÃO	ESPESSURA (mm)	TRANSMITÂNCIA TÉRMICA (W/m ² K)	CAPACIDADE TÉRMICA (kJ/m ² K)	ATRASO TÉRMICO (h)
Piso	Piso vinílico	3	1,00	121,95	-
	Painel Wall	55			
	Madeira naval	28			
	PU expandido	15			
Cobertura	Aço corten	2	0,87	122,54	3,99
	PU expandido	15			
	Painel Wall	55			
	OSB	11,1			
	Camada de ar	-			
	Gesso acartonado	12,5			
Parede	Aço corten	2	0,87	122,54	3,99
	PU expandido	15			
	Painel Wall	55			
	OSB	11,1			
	Camada de ar	-			
	Gesso acartonado	12,5			
Janela	Vidro temperado	6	166,67	12,6	0,1

Fonte: Trevisan (2019).

FIGURA 42 – Corte (a) e detalhe (b) da envoltória CBBC

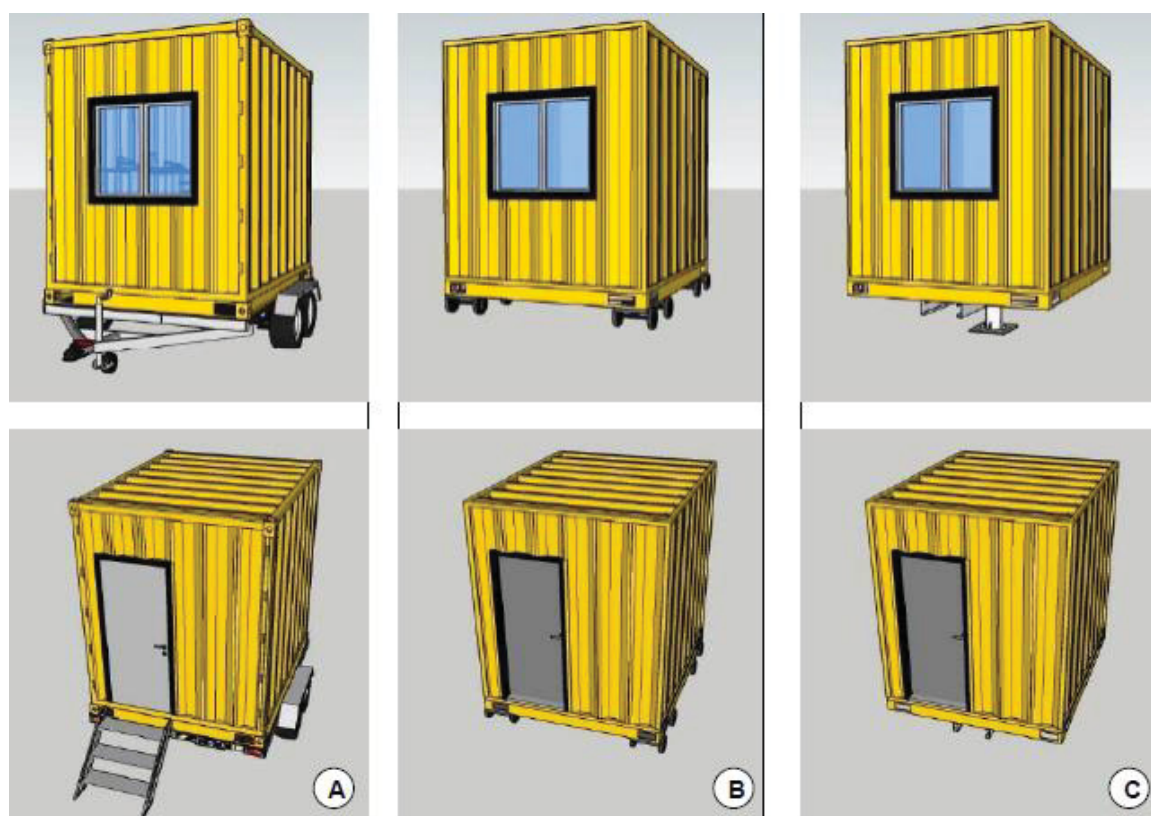


Fonte: Trevisan (2019).

5.1.4.2 Equipamentos e instrumentação

Um dos principais elementos da CBBC é o sistema de rotação que permite posicionar os módulos na orientação mais adequada para cada experimento. Foram avaliados três mecanismos diferentes (FIGURA 43): reboque com rodas (A), conjunto de tartarugas (B) e eixo central (C). A primeira opção envolve o pagamento anual do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA), despesa essa não considerada no orçamento original. A segunda, necessita que os módulos fossem instalados sobre um piso regularizado, o que também não estava previsto no orçamento. Finalmente, a rotação manual com um eixo central fixado sobre um bloco estrutural foi a opção escolhida, sendo o alinhamento feito com a auxílio de uma estação total e um prisma (TREVISSAN, 2019).

FIGURA 43 – Mecanismos de rotação avaliados



Fonte: Trevisan (2019) adaptado de Gomes (2018).

A climatização é feita por meio de equipamentos de ar condicionado do tipo *split*, instalados em cada um dos módulos com o objetivo de regular a temperatura do ar. Os aparelhos escolhidos são da marca Philco, modelo PH9000TQFM5, com ciclo de ar frio e quente variando entre 16 °C e 31 °C, capacidade de 9.000 BTU/h e vazão de ar de 500 m³/h (TREVISAN, 2019).

Observa-se que os equipamentos de monitoramento das variáveis ambientais internas e externas não são fixos e podem variar conforme o experimento. Todavia, logo após a instalação da CBBC foram realizadas verificações da adequação térmica, acústica e lumínica, do desempenho da climatização e da percepção dos usuários analise por uma avaliação pós-ocupação.

A exemplo destes testes iniciais a verificação do mecanismo de regulação do ar ocorreu com o monitoramento das temperaturas internas realizado com o auxílio de sensores da marca Novus, modelo TagTemp-NFC, posicionados no centro da câmara nas alturas de 0,10m, 1,10m e 1,70m com a ajuda de um suporte. De maneira complementar, também foram verificadas as temperaturas superficiais com a utilização de termografia infravermelha, que permite identificar possíveis locais de pontes térmicas, que são pontos de “perda ou ganho de calor entre superfícies e interfaces, decorrentes do desencontro de homogeneidade de materiais” (TREVISAN, 2019, p. 73).

5.1.4.3 Método de investigação

As pesquisas realizadas na Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC) que já foram publicadas se dividem em duas temáticas: avaliação pós-ocupação (APO) das condições iniciais da câmara (SHIBATA *et al.*, 2019; SHIBATA *et al.*, 2020; TREVISAN *et al.*, 2020) e análise do efeito de orientação de abertura nas condições térmicas, lumínicas e de satisfação dos usuários (TRENTO *et al.*, 2019; KRÜGER *et al.*, 2020).

No caso da avaliação pós-ocupação, toma-se como exemplo o procedimento realizado em agosto/2018 descrito por Trevisan *et al.*, (2020) cuja “ideia foi traçar um diagnóstico da infraestrutura original e elencar sugestões de melhorias a serem implementadas na CBBC, tanto no modelo existente quanto no caso de replicações”.

Primeiramente foi calculada a população amostral mínima, em seguida foi elaborado o questionário que aborda questões relativas ao grau de satisfação dos ocupantes quanto ao conforto ambiental (térmico, lumínico, acústico, ergonômico e em relação ao ambiente físico), por fim realizou-se o experimento com estudantes voluntários, bem como o monitoramento das variáveis ambientais internas e externas a fim de subsidiar a análise da percepção dos usuários.

A temperatura do ar externo foi verificada por sensores instalados em um abrigo sobre tripé a 2,00m de altura. As condições internas de temperatura do ar foram registradas por dois sensores Novus, modelo TagTemp Stick, a 0,10m e 1,70m; um sensor Hobo, modelo Temp U10-001 a 1,10m, em uma esfera plástica; e um sensor Hobo, modelo 12-Bit S-THB-M002 a 1,10m que também verificou a umidade relativa. A velocidade do ar foi verificada por um anemômetro, marca Omega, modelo HHF-SD1, a 1,10m (TREVISAN *et al.*, 2020).

O experimento iniciou com a explicação do procedimento aos participantes, a assinatura do termo de consentimento livre e esclarecido, a medição de peso e altura, o registro da vestimenta utilizada e da condição de céu observada naquele momento. Após adentrar na câmara, os voluntários responderam a um teste psicológico durante o período de aclimação no curto prazo e em seguida responderam ao questionário APO. A duração total do procedimento foi de 30 minutos. Os resultados da APO realizada com 136 voluntários, sob condições de ventilação forçada, porém sem interferência de climatização artificial, apontam para 84,6% de conforto com a temperatura interna do ar e 19,1% de muita insatisfação ou 2,2% de insatisfação com o nível de ruído na CBBC (TREVISAN *et al.*, 2020).

Durante o experimento descrito acima também foi verificado o efeito da orientação da abertura nas condições térmicas do ambiente e na percepção do usuário, conforme descrito por Krüger *et al.*, (2020). Desta forma, além dos procedimentos mencionados adotou-se a seguinte orientação solar: módulo de controle com a janela voltada para norte e módulo experimental com a janela orientada para sul. Em ambos os módulos, as janelas estavam fechadas com as persianas até a metade sendo permitido o ajuste de ambos. O sistema de climatização foi ativado no modo ventilação com velocidade alta na função swing sem a possibilidade de

ajuste. E a iluminação artificial estava ligada com iluminância maior ou igual a 500 lux sem permitir alterações.

Os resultados de agosto/2018 foram comparados com medições das condições térmicas realizadas em julho/2018 quando os dois módulos estavam com a mesma orientação. Observou-se que, a orientação da janela implicou em alterações na temperatura do ar e das superfícies internas, “com efeitos no perfil vertical de temperatura e nos níveis de desempenho, mesmo para condições de uso de persiana, ou seja, sem ganhos de calor solar diretos no ambiente” (KRÜGER et al., 2020, p.79). Nota-se ainda que, a diferença da temperatura do ar alcançou 5,9 °C em função do maior aporte solar direto. Traçando um paralelo com os questionários da APO, o módulo controle (norte) em dias com maior nebulosidade e temperaturas mais baixas apresentou maior percentual de conforto, ao passo que o módulo experimental (sul) obteve maior conforto em dias de céu claro, o que é explicado pelas condições de inverno pouco rigorosas observadas no período do experimento e consequente chance de superaquecimento oriundo da janela voltada para o norte.

5.1.5 Síntese

Os modelos de células-teste e câmara climática estudados apresentam semelhanças e diferenças, a depender do aspecto avaliado, não cabendo classificações quanto a eficiência de um em relação ao outro. Pode-se, contudo, pontuar características particulares de cada caso que sejam relevantes, e aplicáveis ao projeto a ser desenvolvido.

As células-teste PASLINK (estudo 01) foram idealizadas pelo maior programa de células-teste para estudos de campo já implementado (CATTARIN *et al.*, 2016). Neste sentido, destacam-se não só pelas características físicas do objeto, como também pelos protocolos de investigação adotados e pela inserção dos estudos em uma ampla rede de pesquisa. Observa-se ainda, os importantes aprimoramentos realizados ao longo do tempo, tanto em aspectos projetuais quanto metodológicos, com a integração do instrumento às simulações computacionais.

A célula-teste de Florença (estudo 02) atualiza o projeto anterior, assumindo uma nova abordagem (não-adiabática) e compensando os maiores fluxos de calor com medidores de alta eficiência. A elevada confiança na instrumentação possibilita resultados satisfatórios a partir de testes absolutos, sem a necessidade de simulações computacionais. Ressalta-se também o incentivo do governo regional ao emprego do instrumento e ao desenvolvimento de componentes construtivos mais sustentáveis.

A célula-teste para o Alto andino do Peru (estudo 03) apresenta um projeto menor e de metodologia simplificada, aspectos que facilitam a replicação. Sobressai, ainda pela localização no continente sul-americano, com pouca tradição no uso de células-teste, por alcançar baixo valor de transmitância térmica média para o envelope ($0,082 \text{ W/m}^2\text{K}$) e por considerar a possibilidade de montagem e desmontagem do objeto.

Apesar de não ser enquadrada como uma célula-teste, a câmara climática de baixo custo desenvolvida no Brasil (estudo 04) reafirma o interesse dos pesquisadores pelas temáticas de conforto, percepção e desempenho térmicos além de considerar a replicação no território nacional. Destaca-se também por possibilitar a realização de diversos experimentos a partir de uma edificação que funciona como um protótipo base. Todavia, apresenta limitações quanto às alterações permitidas no módulo experimental que se resumem a variação de orientação e a adição ou supressão de elementos junto à janela.

Por fim, a TABELA 14 sintetiza as principais características das edificações estudadas nesta seção.

TABELA 14 – Características principais das edificações estudadas

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	ESTUDO 01 PROGRAMA EUROPEU PASSYS- PASLINK	ESTUDO 02 CÉLULA-TESTE DE FLORENÇA, ITÁLIA	ESTUDO 03 CÉLULA TESTE DO ALTO ANDINO, PERU	ESTUDO 04 CÂMARA BIOCLIMÁTICA DE BAIXO CUSTO, BRASIL
Volume de ar interno (m^3)	38,00	40,24	13,82	13,50
Área do piso (m^2)	13,80	14,27	5,76	5,40
Área de teste (m^2)	7,60	7,84	5,76	1,26
Pé direito (m)	2,75	2,82	2,40	2,50
Transmitância térmica média (W/m^2K)	< 0,100	0,290	0,082	0,87
Ambiente	Sala de serviço e Câmara de teste	Sala de serviço e Câmara de teste	Único	Único
Orientação da fachada para teste	Sul ou Variável	Variável	Norte	Variável
Estrutura	Metálica	Madeira	Madeira	Container
Fechamento externo	Chapas de aço inoxidável	Fibra de madeira e Chapas de OSB	Sanduíche de chapa metálica com enchimento em poliuretano	Aço corten
Isolamento térmico	Lã mineral, Poliestireno expandido, Poliestireno extrudido	Fibra de madeira, Lã de rocha	Fibra de vidro, Poliestireno expandido, Poliuretano expandido	Poliuretano expandido e Camada de ar
Fechamento interno	Madeira aglomerada e chapas metálicas cor azul	Chapas de OSB e Revestimento medidor do fluxo de calor	Chapas de OSB	Gesso acartonado
Método de investigação	Comparativo e Absoluto, com ou sem simulação computacional	Absoluto, com possibilidade de simulação computacional	Simulação computacional (<i>EnergyPlus</i>) com dados climáticos coletados <i>in situ</i>	Comparativo com a instrumentação variando a cada experimento

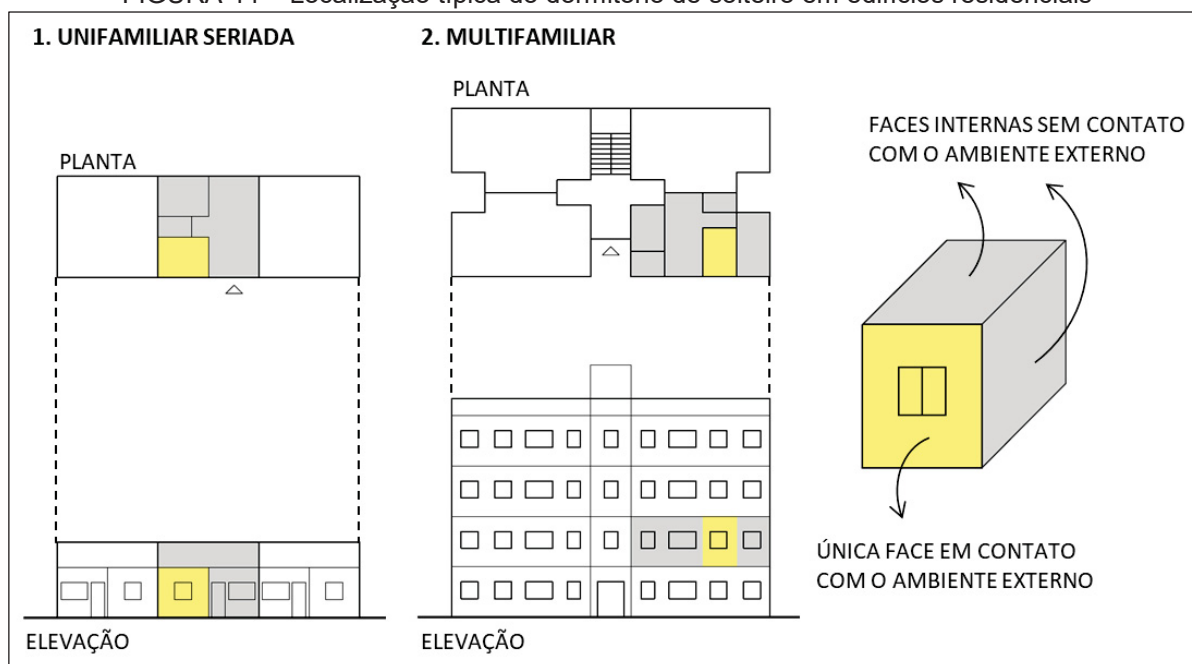
Fonte: Autora (2022).

5.2 DIMENSIONAMENTO CONSIDERANDO UM DORMITÓRIO

Células-teste podem ser projetadas com diversos tamanhos a depender do tópico em estudo e do grau de sofisticação almejado. Considerando a área de desempenho térmico de edificações e a impossibilidade de testar construções no todo, é importante buscar uma referência para o dimensionamento do artefato que seja compatível com a escala do edifício, bem como com a escala humana (HITCHIN, 1993). Segundo Cattarin *et al.* (2016) o emprego de células-teste como réplicas de ambientes permite ensaios de conforto visual, acústico, lumínico e térmico. Dessa maneira, é plausível associar as medidas do objeto com as dimensões mínimas de um ambiente de permanência prologada. Tais ambientes são comumente definidos nas legislações municipais brasileiras como sendo “quartos, salas, estúdios, bibliotecas, consultórios, escritórios, salas de aula, lojas comerciais, entre outros” (PREFEITURA DE CURITIBA, 2013, p. 218).

Neste sentido, o dormitório de solteiro foi escolhido como o ambiente a partir do qual foi dimensionado o projeto de uma célula-teste padrão. Isto pois, dos ambientes residenciais de longa permanência, o dormitório é aquele com dimensões regulares de menor volume e que apresenta, na maior parte dos casos, apenas uma face em contato direto com o ambiente externo. No contexto da célula-teste, esta face receberia a área de teste e os demais lados seriam dotados de características adiabáticas, assumindo que estariam com a mesma temperatura do ambiente interno (FIGURA 44). Além disso, é no dormitório que o ser humano permanece grande parte de seu tempo de vida (KLEPEIS *et al.*, 2001) sendo um espaço que congrega diversas atividades como repousar, estudar e trabalhar, versatilidade que assumiu particular importância no contexto da pandemia e do isolamento social imposto pelo Covid-19. Destaca-se ainda que as dimensões do dormitório também permitem a instalação do layout de outros ambientes, por exemplo, de um escritório.

FIGURA 44 – Localização típica do dormitório de solteiro em edifícios residenciais



Fonte: Autora (2022).

5.2.1 NBR 15.575

Visando obter as dimensões gerais do dormitório de solteiro, a partir das recomendações da NBR 15.575 quanto ao mobiliário (TABELA 15), foram propostas quatro plantas baixas. Para cada planta foram elaboradas três disposições possíveis, o que resultou em 12 configurações diferentes. Observa-se que, a posição das janelas e as suas dimensões são apenas representativas nesta fase do estudo e serão revisadas posteriormente. Nota-se que, de acordo com o item 16.1.1 da Parte 1 da norma, o pé direito mínimo não pode ser inferior a 2,50m, valor adotado como padrão para o cálculo do volume interno. Ressalta-se ainda, que a espessura de 15cm das paredes foi escolhida pois representa o sistema mais comum de construção no Brasil, composto por blocos de alvenaria e revestimento argamassado.

TABELA 15 – Elementos recomendados pela NBR 15.575 para o dormitório de solteiro

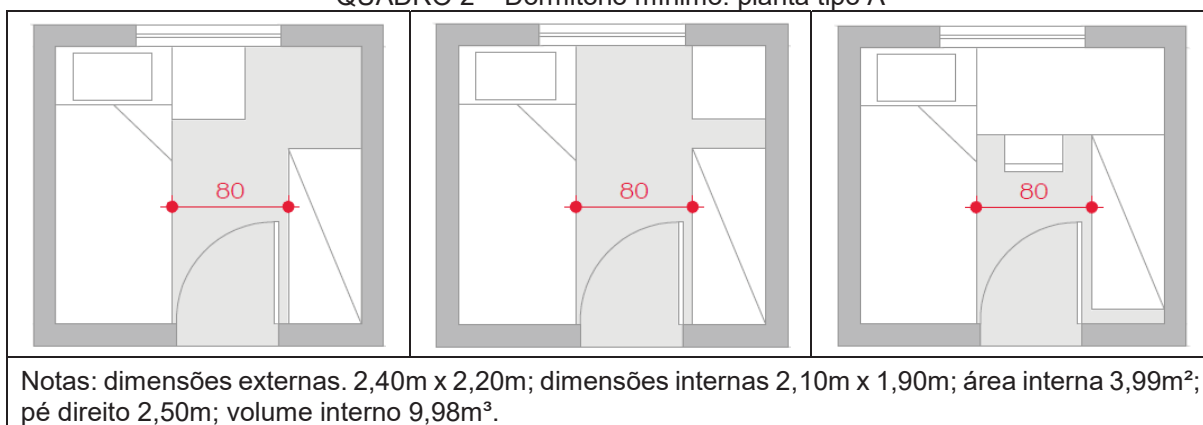
ELEMENTO	DIMENSÕES	OBSERVAÇÕES
Cama de solteiro	0,80m X 1,90m	Obrigatório
Mesa de cabeceira	0,50m X 0,50m	Obrigatório
Armário	1,20m X 0,50m	Obrigatório
Mesa de estudo	0,80m X 0,60m	Opcional
Circulação	≥ 0,50m	-

Fonte: ABNT (2013).

A planta baixa Tipo A (QUADRO 2) foi obtida pelo posicionamento da cama longitudinalmente à uma das paredes laterais, de forma perpendicular à janela e à porta. Na parede oposta se encontra o armário e no espaço remanescente podem ser acomodados, ora a mesa de cabeceira, ora a mesa de estudo. O formato resultante, praticamente quadrado com dimensões internas de 2,10m X 1,90m, pode conferir economia para o executor, contudo apresenta problemas quanto ao desempenho do cômodo. Exemplo disso é posição da cabeceira da cama, localizada sob a janela, o que pode causar desconforto em climas frios devido à maior movimentação do ar junto à abertura. A posição da mesa de cabeceira também não é muito satisfatória. Na primeira configuração, o móvel está próximo da cama o que implica um espaço sem uso no canto superior direito. Na segunda, a mesa de cabeceira se distancia da cama em detrimento da otimização do espaço. E na terceira uma mesa de estudos maior poderia cumprir também a função do móvel de cabeceira. Outro aspecto negativo desta planta extremamente compacta, com área equivalente a 3,99m², é a provável sobreposição da porta de acesso com as portas do guarda-roupas.

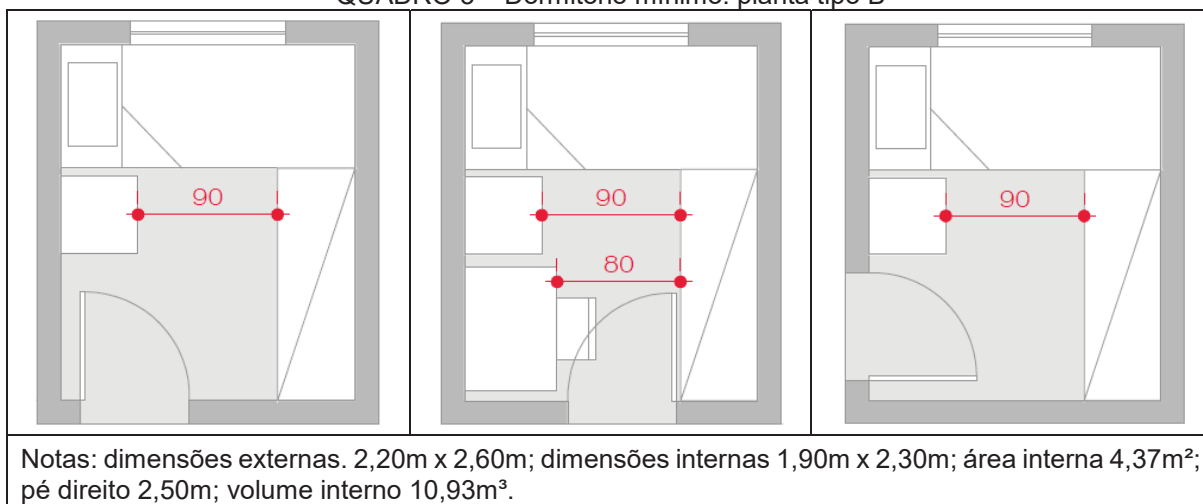
Na planta Tipo B (QUADRO 3), ligeiramente mais alongada, a cama é posicionada paralelamente à janela, com os demais móveis perpendiculares a mesma. As dimensões internas 1,90m X 2,30m possibilitam acomodar melhor a mobília de modo a solucionar o problema da sobreposição, todavia a cama permanece sob a janela. Com 4,37m² de área esta opção também é bastante compacta e restrita, principalmente quando incluída a mesa de estudo. Um ponto positivo é a área de circulação alcançada, aproximadamente 1,20m² em todas as plantas desenvolvidas.

QUADRO 2 – Dormitório mínimo: planta tipo A



Fonte: Autora (2022).

QUADRO 3 – Dormitório mínimo: planta tipo B



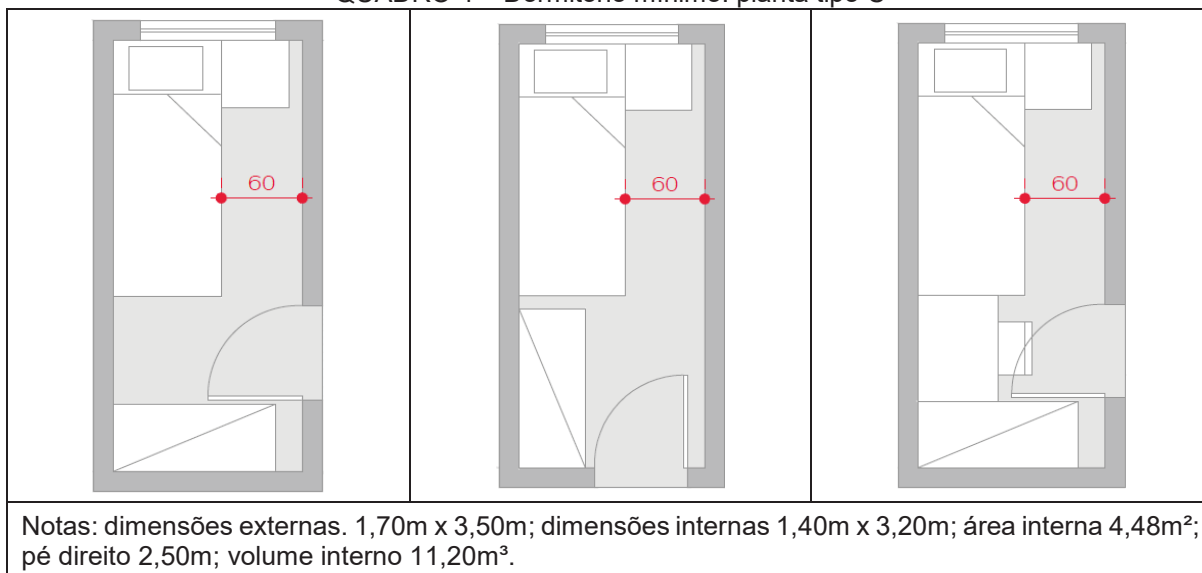
Fonte: Autora (2022)

A planta Tipo C (QUADRO 4) embora atenda aos requisitos da NBR 15.575, resulta em uma forma excessivamente estreita e alongada com 1,40m X 3,20m internamente, o que pode limitar as possibilidades de layout no caso da célula-teste ser utilizada para estudos sobre percepção térmica. Observa-se ainda que, no último layout, para a inclusão da mesa de estudo seria necessária a utilização de mobiliário não convencional com portas mais altas de correr para que se tenha acesso ao guarda-roupa.

A planta Tipo D (QUADRO 5), apesar de ser menos alongada e estreita do que a anterior, com medidas internas de 2,70m X 1,80m, apresenta poucas possibilidades de variação do layout. Nota-se que, mesmo com uma maior área

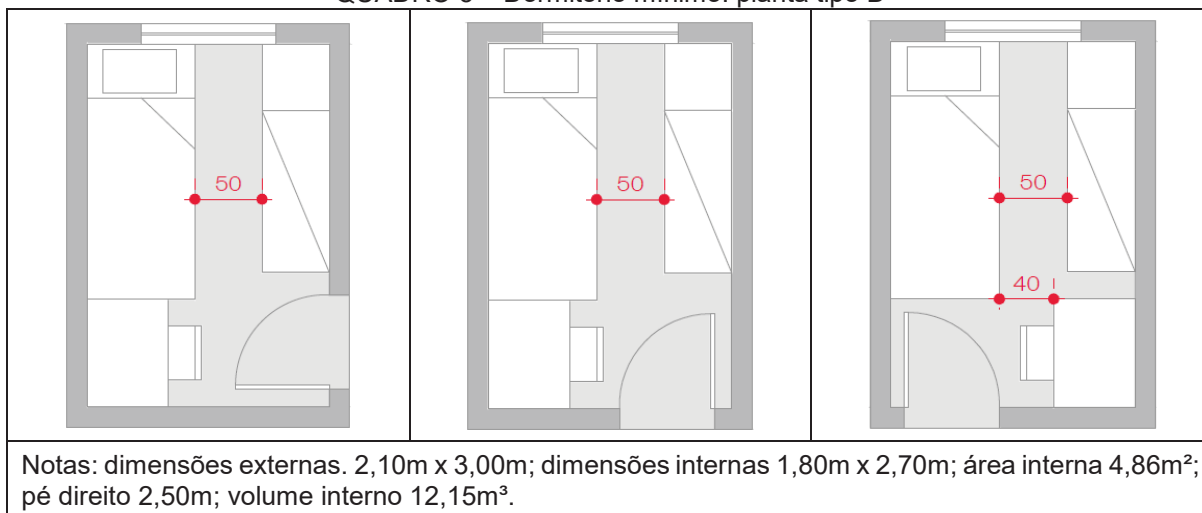
(4,86m²), na última disposição proposta a inclusão da mesa de estudo resultou em uma circulação com 0,40m, desrespeitando as orientações da norma.

QUADRO 4 – Dormitório mínimo: planta tipo C



Fonte: Autora (2022).

QUADRO 5 – Dormitório mínimo: planta tipo D



Fonte: Autora (2022).

Por fim, a TABELA 16 reúne as características das quatro plantas desenvolvidas bem como os valores médios resultantes. Observa-se que as

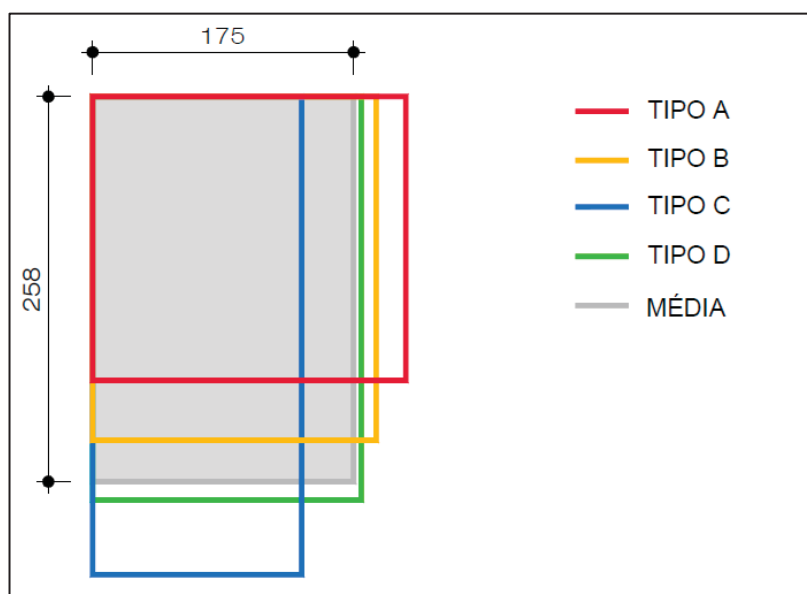
dimensões médias e a área se aproximam das medidas da planta Tipo D, enquanto que o volume é semelhante a planta Tipo C (FIGURA 45).

TABELA 16 – Síntese das dimensões do dormitório mínimo segundo a NBR 15.575

PLANTA	DIMENSÕES EXTERNA (m)	DIMENSÕES INTERNAS (m)	ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)
Tipo A	2,40 X 2,20	2,10 X 1,90	3,99	9,98
Tipo B	2,60 X 2,20	2,30 X 1,90	4,37	10,93
Tipo C	3,50 X 1,70	3,20 X 1,40	4,48	11,20
Tipo D	3,00 X 2,10	2,70 X 1,80	4,86	12,15
Média	2,88 X 2,05	2,58 X 1,75	4,52	11,30

Fonte: Autora (2022).

FIGURA 45 – Diagrama comparativo das dimensões internas



Fonte: Autora (2022).

Em relação a iluminação natural, a norma não apresenta dimensões mínimas para as aberturas. Para verificar os níveis de desempenho da iluminação, os valores estabelecidos estão relacionados ao conceito de iluminância, medido em lux. Para ambientes de permanência prolongada, o nível de iluminação natural não deve ser inferior a 60 lux. A NBR 15.575 recomenda ainda que o fator de luz diurna (FLD) para dormitórios seja maior que 0,50%, ou seja, a iluminação natural observada no interior do cômodo não deve ser menor que a metade no nível de iluminação natural do

exterior (ABNT, 2013). Nota-se que, essas especificações apresentadas pela norma são pouco objetivas e de difícil comparação com os valores comumente exigidos pelos órgãos municipais para a aprovação de projeto, visto que para verificar o seu cumprimento é necessário recorrer a medições 'in loco' e/ou simulações.

Quanto à ventilação, a norma determina que esta deve atender a legislação municipal e na ausência de especificações locais indica valores a serem adotados nas diferentes regiões brasileiras. Para ambientes de permanência prolongada, caso dos dormitórios, a abertura mínima para ventilação deve ser igual a 12% da área do piso para a Região Norte, 8% para a região Nordeste e Sudeste, e 7% para as demais regiões. A norma apresenta ainda uma fórmula para verificação das aberturas previstas pelo projeto arquitetônico: $A = 100 \times (Aa/Ap)$, na qual A é porcentagem entre a área de abertura e a área de piso da região correspondente, Aa é a área efetiva da abertura e Ap é a área de piso do ambiente. Sendo assim, a área efetiva da abertura de ventilação calculada para a área média 4,52m² obtida na TABELA 16, equivale a 0,54m² para a região Norte; 0,36m² para Nordeste e Sudeste; e 0,32m² para as demais regiões. Desta forma, uma janela convencional de 1,20m X 1,00m com duas folhas de correr e abertura para ventilação de 0,60m² atende aos requisitos de ventilação natural da NBR 15.575 em todas as regiões brasileiras.

5.2.2 Leis Municipais

Os dados referentes ao dimensionamento do dormitório de solteiro coletados (área, dimensão e pé direito mínimos) ou calculados (segunda dimensão e volume interno) a partir dos códigos de obra municipais dos 100 municípios brasileiros mais populosos são expressos na íntegra na TABELA B.1, do Anexo B. A TABELA 17 sintetiza estes valores indicando a média, a mediana, o menor valor, o maior valor, aquele com maior frequência de ocorrência e a quantidade de cidades considerada em cada critério.

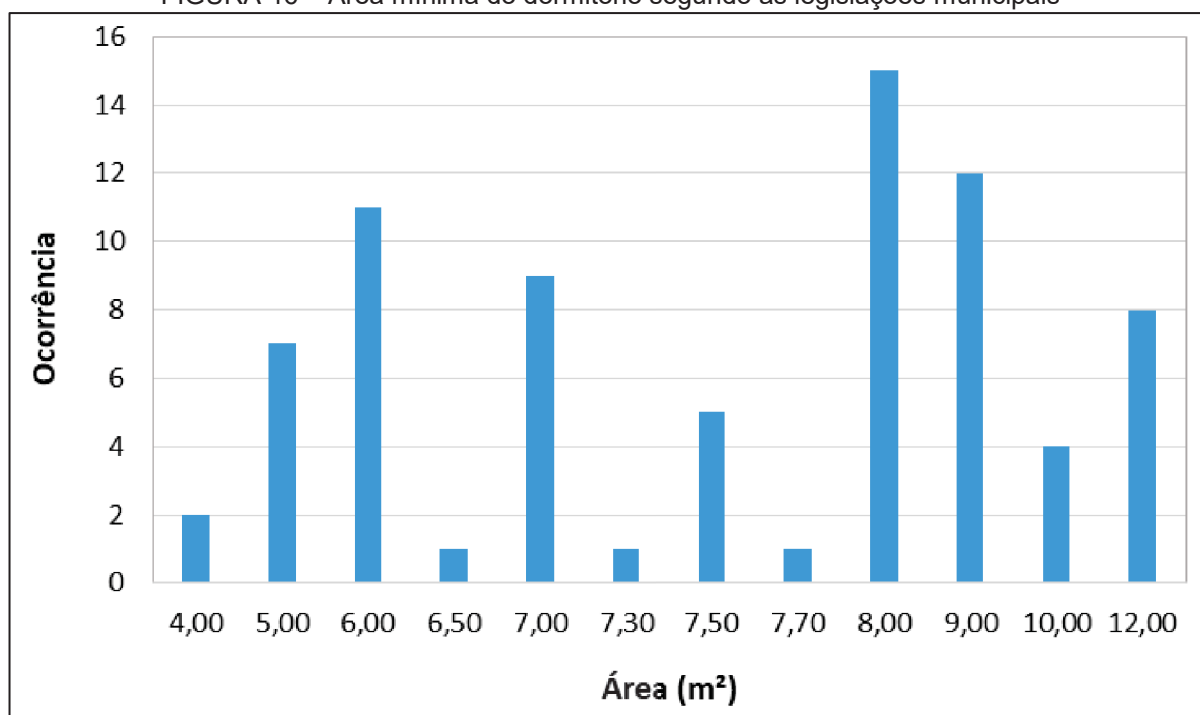
TABELA 17 – Análise estatística das dimensões mínimas dos dormitórios segundo a legislação municipal

ESTATÍSTICA	ÁREA MÍNIMA (m ²)	DIMENSÃO MÍNIMA (m)	DIMENSÃO CALCULADA (m)	PÉ-DIREITO MÍNIMO (m)	VOLUME RESULTANTE (m ³)
Mediana	8,00	2,00	3,50	2,60	20,00
Média	7,83	2,16	3,67	2,58	20,37
Maior valor	12,00	3,00	9,00	2,80	33,60
Menor valor	4,00	1,00	2,00	2,30	10,40
Maior ocorrência	8,00	2,00	3,00	2,50	18,20
Quantidade	76	73	70	90	75

Fonte: Autora (2022).

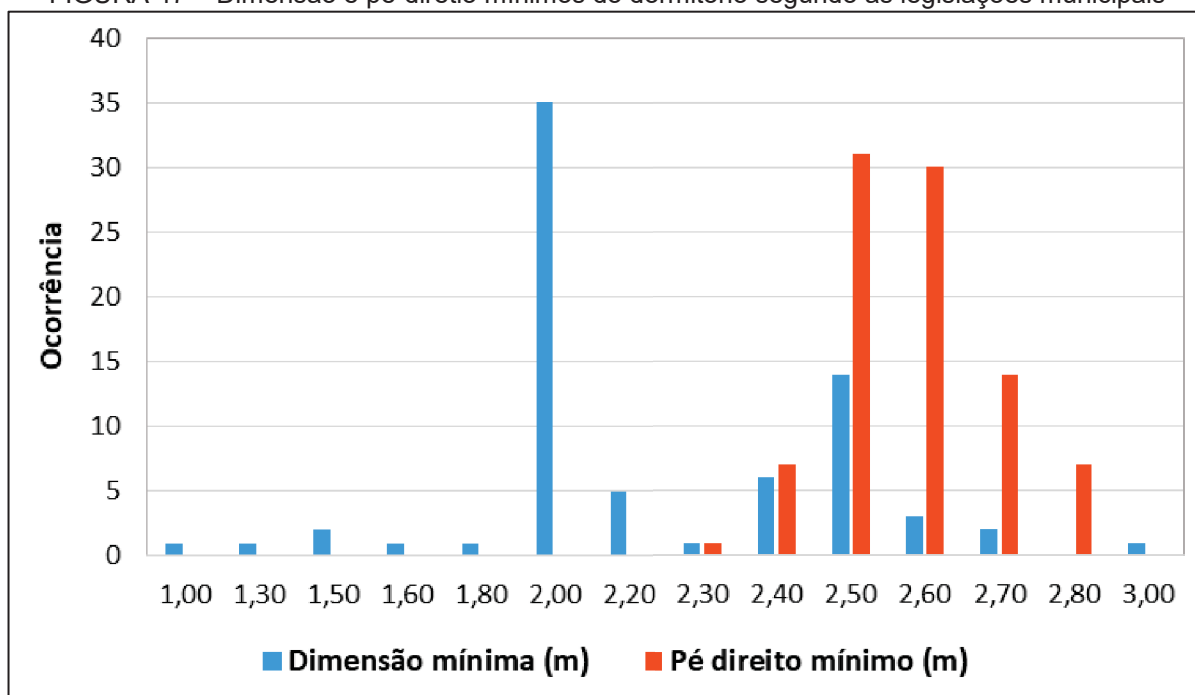
Quanto à área mínima (FIGURA 46), 76 dos 100 municípios apresentam um valor para o critério que varia entre 4,00m²-12,00m², com média de 7,83m² e maior ocorrência sendo 8,00m². Em relação às dimensões mínimas (FIGURA 47), 73 cidades definem valores que vão de 1,00m a 3,00m, sendo 2,16m o valor médio e 2,00m o mais frequente, correspondendo à 48% do total. Já o pé direito mínimo (FIGURA 47) é indicado por 90 cidades e varia entre 2,30m-2,80m, sendo a média 2,58m.

FIGURA 46 – Área mínima do dormitório segundo as legislações municipais



Fonte: Autora (2022).

FIGURA 47 – Dimensão e pé-direito mínimos do dormitório segundo as legislações municipais



Fonte: Autora (2022).

Os valores levantados nas legislações municipais correspondentes à ventilação e à iluminação mínima para o dormitório de solteiro encontram-se completos na TABELA B.2, do Anexo B. A TABELA 18 apresenta uma análise sintética dos mesmos indicando a média, a mediana, o menor valor, o maior valor e aquele com maior frequência de ocorrência.

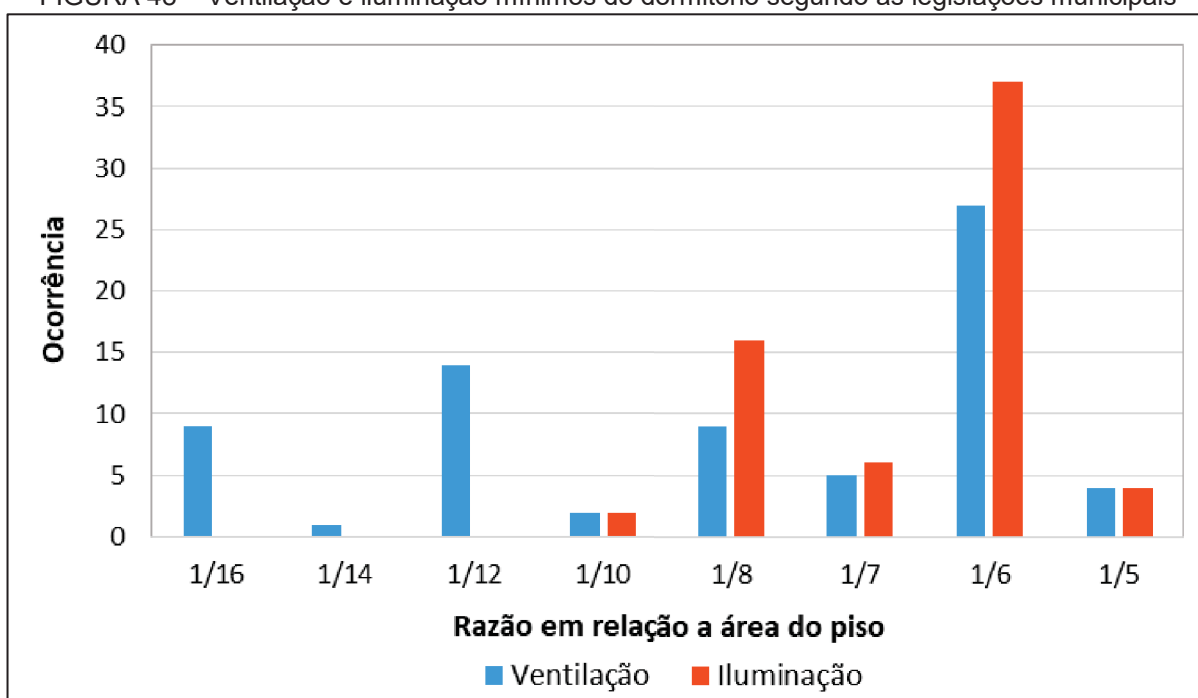
TABELA 18 – Análise estatística da ventilação e iluminação mínimas dos dormitórios segundo a legislação municipal

ESTATÍSTICA	VENTILAÇÃO		ILUMINAÇÃO	
	RAZÃO EM RELAÇÃO À ÁREA DO PISO	ÁREA MÍNIMA CALCULADA (m ²)	RAZÃO EM RELAÇÃO À ÁREA DO PISO	ÁREA MÍNIMA CALCULADA (m ²)
Mediana	1/7,5	1,00	1/6	1,21
Média	1/8	1,01	1/6,5	1,24
Maior valor	1/5	2,00	1/5	2,00
Menor valor	1/16	0,29	1/10	0,57
Maior ocorrência	1/6	1,34	1/6	1,00
Quantidade	74	64	65	56

Fonte: Autora (2022).

Quanto à ventilação mínima (FIGURA 48), 74 municípios trazem informações sobre a razão entre a área de ventilação e a área do ambiente sendo 1/6 o valor com maior ocorrência. Já a área média calculada equivale a 1,01m². Em relação à iluminação mínima (FIGURA 48), 65 cidades incluem dados que permitem calcular a área mínima de iluminação cuja média obtida corresponde a 1,24m², e o valor mais frequente observado é novamente 1/6. Nota-se que, para ambos os critérios, se a área de abertura for ao menos 1/5 da área do piso, esta atende aos requisitos de todos os códigos de obra consultados.

FIGURA 48 – Ventilação e iluminação mínimas do dormitório segundo as legislações municipais



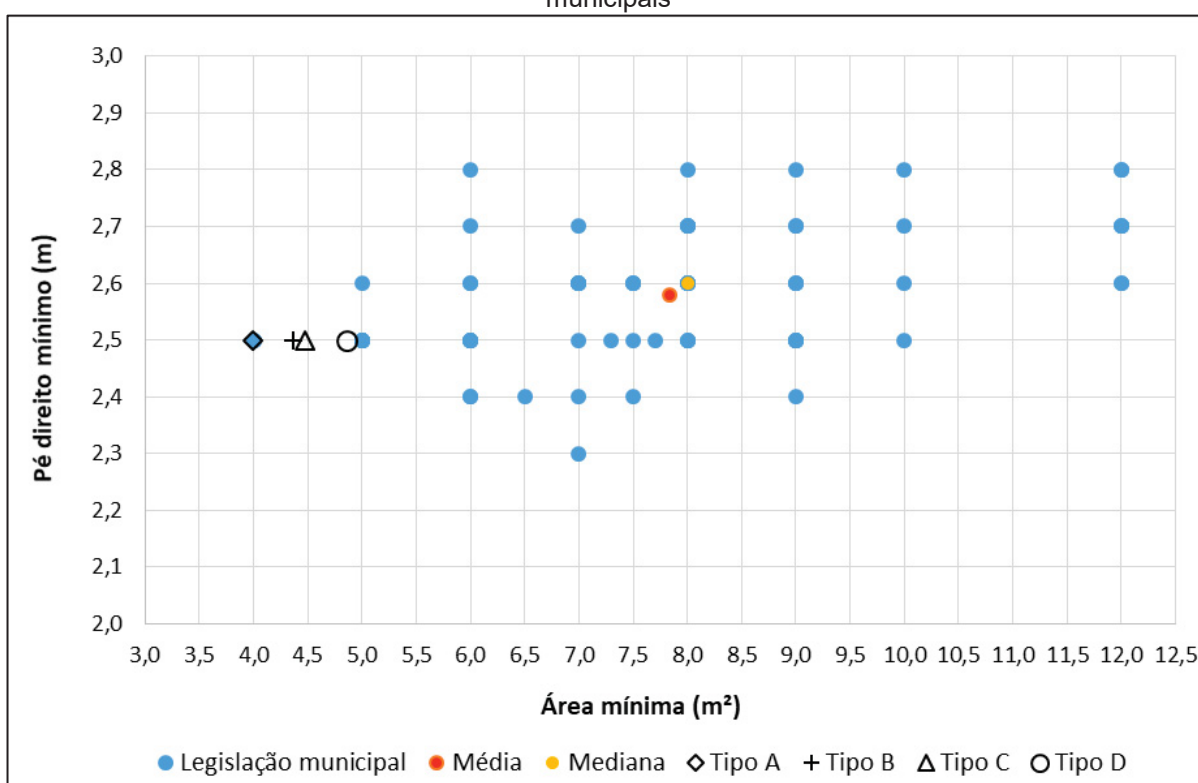
Fonte: Autora (2022).

5.2.3 Comparação dos resultados

A plotagem das áreas e larguras mínimas resultantes para as plantas baixas Tipo A, Tipo B, Tipo C e Tipo D conjuntamente com os valores mínimos, médios e medianos relativos às recomendações dos códigos de obras permite colocá-los em perspectiva, deixando evidente que os códigos de obras dos municípios considerados são mais exigentes que a NBR 15.575.

Ao comparar as áreas e os pés direitos mínimos (FIGURA 49) observa-se que, além de valores maiores as legislações municipais também apresentam maior diversidade, especialmente no que diz respeito às áreas variando de 4,00m² a 12,00m² enquanto as recomendações da NBR 15.575 encontram-se entre 4,00m² e 5,00m² aproximadamente. Os pés direitos têm diferenças menores concentrando-se entre 2,30m-2,80m, com os valores da NBR se aproximando da média dos municípios.

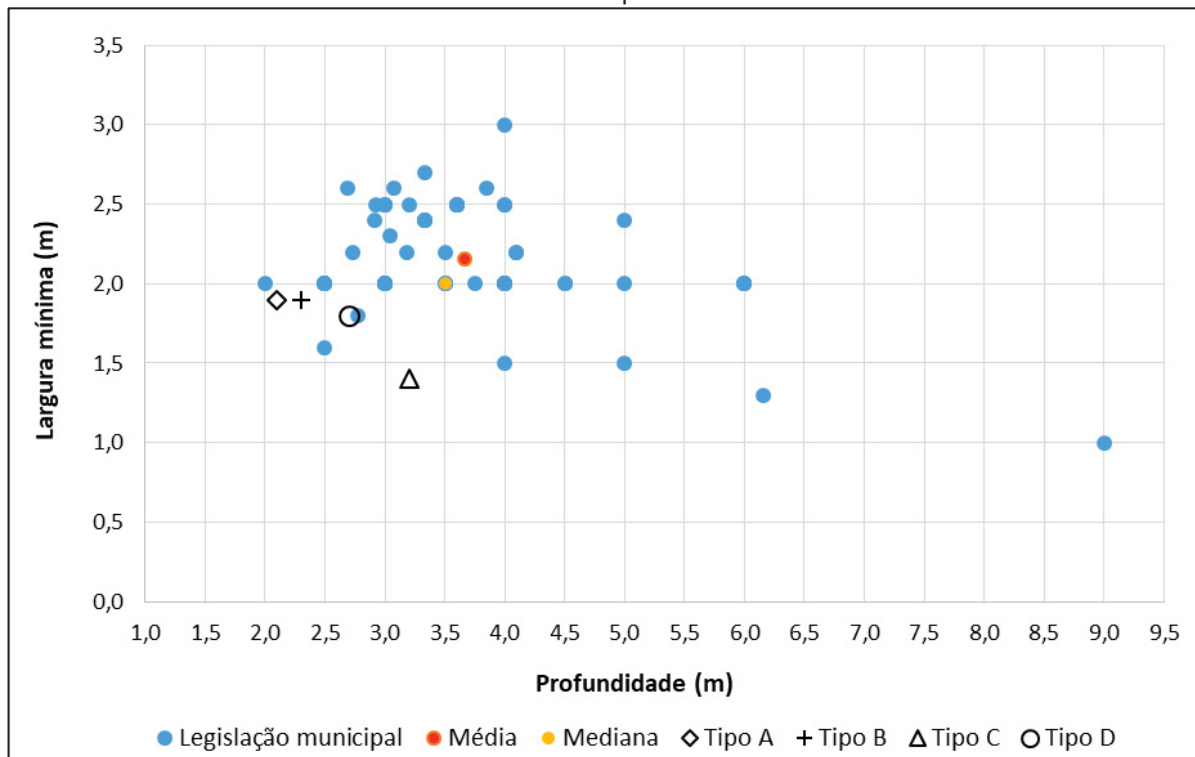
FIGURA 49 – Comparativo entre pés direitos e áreas mínimas da NBR 15.575 e das legislações municipais



Fonte: Autora (2022).

A partir das áreas e larguras mínimas foi possível calcular a profundidade dos dormitórios para cada um dos municípios sempre que os dois valores anteriores estavam disponíveis, bem como as respectivas média e mediana. Ao comparar esses valores com os obtidos a partir dos layouts elaborados conforme as orientações dadas pela NBR 15.575, percebe-se que a adoção das medianas dos valores dos códigos de obra (largura 2,00m e comprimento 3,50m) atende tanto as exigências da norma quanto as exigências da maioria dos municípios considerados (FIGURA 50).

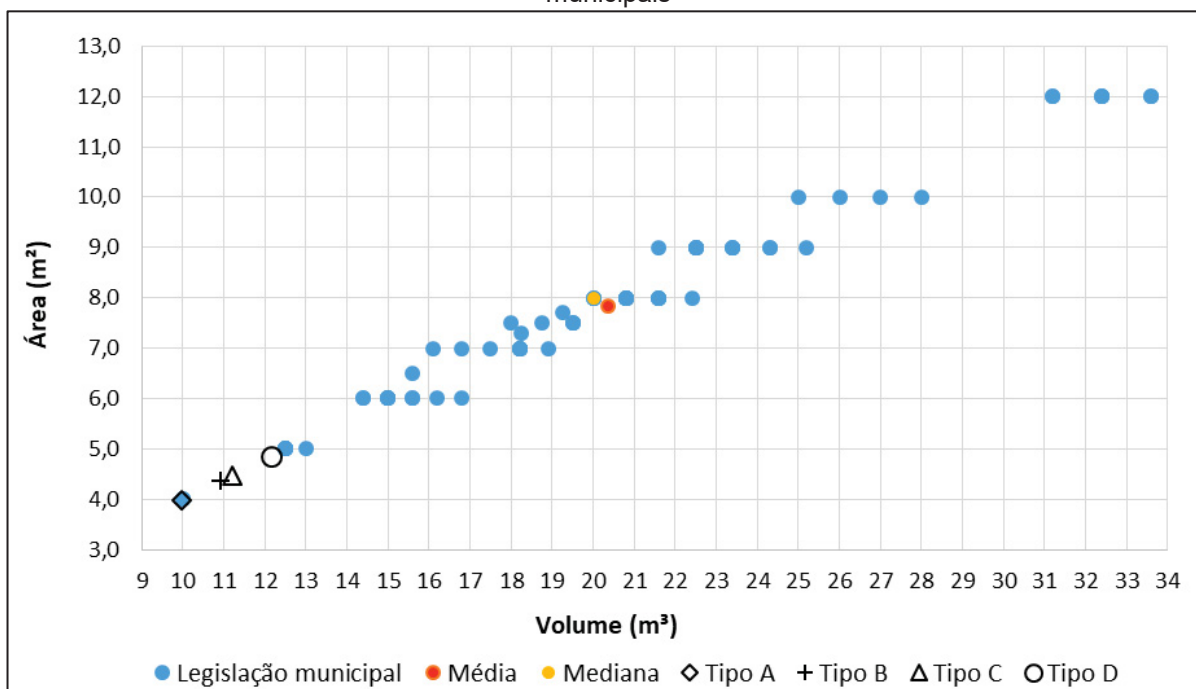
FIGURA 50 – Comparativo entre larguras e profundidades mínimas da NBR 15.575 e das legislações municipais



Fonte: Autora (2022).

Finalmente, a comparação das áreas e volumes resultantes evidencia que o dimensionamento recomendado pela NBR 15.575 é bastante reduzido em relação às exigências municipais (FIGURA 51). Quando analisadas as propostas criadas a partir da NBR 15.575, percebe-se que raramente estas satisfazem os requisitos das leis municipais.

FIGURA 51 – Comparativo entre áreas e volumes mínimos da NBR 15.575 e das legislações municipais



Fonte: Autora (2022).

A proposta Tipo A, atende ao requisito dimensão mínima dos municípios de Petrópolis (1,00m); Caruaru (1,30m); Aracajú e Rio Branco (1,50m); Foz do Iguaçu (1,60m) e Diadema (1,80m) que apresentam os menores valores levantados. Todavia, não satisfaz os critérios de área mínima definidas pelos mesmos, à exceção de Foz do Iguaçu e Guarulhos que exigem 4,00m² de área.

O Tipo B, se assemelha a proposta anterior atendendo a dimensão mínima dos mesmos seis municípios, que correspondem a 6% do total, bem como das duas cidades com as menores áreas exigidas.

A sugestão Tipo C, alcançou apenas a dimensão mínima determinada pelos municípios de Petrópolis e Caruaru, bem como a área mínima dos municípios de Foz do Iguaçu e Guarulhos.

Apesar de maior a planta Tipo D apresenta o mesmo desempenho dos layouts tipo A e B. Todavia, diferencia-se por se aproximar da área mínima de 5,00m² determinada pelos municípios de Campinas, Caucaia, Diadema, Fortaleza, Recife,

São Paulo e Palmas, todos eles com dimensão mínima equivalente a 2,00m que não foi alcançada.

Quanto à ventilação mínima, todos os municípios das regiões Norte, Nordeste e Centro-oeste, das 23 cidades que indicaram valores para este critério, 16 atendem a recomendação de 12% da NBR 15.575, o correspondente a 70% do total. No Sudeste 10 municípios exigem menos de 8% de ventilação, de um total de 40 que apresentaram dados. No Sul apenas Londrina não atende a sugestão de 7% de ventilação.

Nas quatro propostas iniciais de dormitório foi considerada uma janela de 1,20m X 1,00m, com abertura efetiva de uma folha equivalente a 0,60m². Tal área de abertura atende aos critérios estabelecidos pela NBR 15575 para ventilação mínima de todos os tipos de planta e em todas as regiões. No caso das leis municipais, a abertura proposta atende a iluminação de aproximadamente 55% enquanto a ventilação atende apenas 19% dos municípios para os quais foi possível calcular as respectivas áreas mínimas.

5.2.4 Síntese

De maneira geral, observa-se que os critérios de dimensionamento do dormitório de solteiro previstos pela NBR 15.575 são bem menos exigentes do que as leis municipais pesquisadas. Em relação à área, se adotadas as medianas das dimensões levantadas nas legislações municipais de 2,00m (largura) x 3,50m (profundidade) x 2,60m (altura), serão atendidas as exigências de ao menos 50% dos respectivos municípios e, com folga, as exigências da NBR 15.575. No caso da ventilação e iluminação mínimas, a adoção de uma janela de 1,50m x 1,00m com duas folhas de correr atenderia à norma brasileira bem como a 82% dos municípios em relação a iluminação e a 37,5% dos municípios quanto a ventilação, sendo necessário avaliar a possibilidade de incremento na área de abertura efetiva da janela para melhor atender este critério.

5.3 DIRETRIZES PROJETUAIS

Este tópico busca selecionar, dentre os dados levantados na revisão bibliográfica, nos estudos de caso e do dimensionamento, aqueles que serão empregados como subsídio no desenvolvimento de um projeto padronizado de célula-teste.

5.3.1 Usos e aplicações

As investigações com células-teste no Brasil se concentram principalmente no estudo do desempenho térmico da edificação como um todo, realizado a partir da comparação direta entre temperaturas internas do ar e temperaturas superficiais de componentes. Todavia, o emprego deste procedimento implica na necessidade de dispor de duas células ou mais (uma CT de controle e as demais como experimentais), sendo estas, geralmente, construídas com menor grau de sofisticação quando comparadas com os modelos estrangeiros. Quando se trata de testes de elementos construtivos, o levantamento demonstrou que as pesquisas brasileiras investigam uma grande diversidade de componentes: de cobertura, vedação e elementos associados a estratégias bioclimáticas.

Neste sentido, a adaptação do protocolo de investigação, de modo a incluir o uso de equações estimativas de temperaturas e de simulações computacionais, permitiria realizar experimentos com apenas uma célula-teste, o que reduziria custos e possibilitaria um grau maior de sofisticação no que diz respeito aos materiais, sistema construtivo e instrumentação empregados. Esse incremento em tecnologia também colaboraria para ampliar as possibilidades de usos para além da análise do desempenho térmico da edificação, permitindo também estudos sobre propriedades físicas de materiais e de percepção térmica.

Sendo assim, propõe-se um modelo de célula-teste:

- Unitária com maior grau de sofisticação que permita testes comparativos e absolutos;

- Aplicável em pesquisas sobre o desempenho térmico de edificações no todo, estudos das propriedades térmicas de materiais e investigações quanto a percepção térmica dos usuários;
- Com faces substituíveis, para testes de elementos de cobertura e/ou vedação.

5.3.2 Características físicas

Tendo como referência o estudo que verificou os parâmetros mínimos para o dormitório de solteiro exigidos por algumas legislações municipais e recomendados pela NBR 15.575, bem como os estudos de caso, são estabelecidos os seguintes critérios para as características físicas da célula-teste:

- Dimensões internas equivalentes a 2,00m x 3,50m x 2,60m, configurando área de 7,00m² e volume de 18,20m³;
- Área de teste de vedação localizada na menor face, com dimensões máximas de 2,00m x 2,60m;
- Possibilidade de instalação de abertura para iluminação e ventilação junto à área de teste com tamanho igual ou menor a esta;
- Área de teste de cobertura com dimensões máximas de 3,50m x 2,00m;
- Porta de acesso com 0,70m x 2,10m posicionada na parede oposta à área de teste;
- Elevação da edificação da base de modo a permitir a ventilação sob o piso.

5.3.3 Materiais e sistema construtivo

Conforme observado nos estudos de caso, os protótipos mais sofisticados têm como características construtivas principais o uso de estrutura leve metálica ou de madeira, fechamento externo em material resistente às intempéries, fechamento interno feito por chapas de madeira ou gesso e preenchimento com uma combinação de materiais isolantes térmicos resistivos de modo a alcançar determinado valor de

transmitância térmica. Neste sentido, em relação aos materiais e ao sistema construtivo da célula-teste sugere-se:

- O uso de estrutura em madeira por ser menos suscetível a pontes térmicas (ALCAMO, 2011b; MOLINA *et al.* 2019; TREVISAN, 2019);
- A aplicação do sistema construtivo *wood frame* por possibilitar a montagem e desmontagem da edificação no todo, bem como a remoção das partes que compõem as áreas de teste a fim de encaixar os elementos a serem investigados e reduzir seu impacto ambiental;
- O emprego de isolantes térmicos resistivos de fácil manuseio, como poliestireno expandido (EPS), poliestireno extrudido (XPS) e/ou poliuretano expandido (PU), visando alcançar envelope com transmitância térmica $\leq 0,100 \text{ W/m}^2\text{K}$.

5.3.4 Sistemas complementares

Dentre os sistemas complementares observados nos estudos de caso, destacam-se a proteção contra a radiação solar, a possibilidade de rotação e a climatização. Desta maneira recomenda-se:

- O uso de um sistema móvel de lonas de cor clara para o sombreamento da célula-teste no todo ou em parte quando houver necessidade de restringir o ganho solar direto;
- A implantação sobre uma base plana resistente (possivelmente uma laje do tipo radier) que permita a montagem da edificação em diferentes orientações ou o giro de 360° quando for dotado de rodas;
- A instalação de equipamento de ar condicionado do tipo *inverter*, modelo *split*, com ciclo de ar quente e frio, com capacidade mínima de 9.000 BTUs/h e vazão de ar de $500 \text{ m}^3/\text{h}$.

5.3.5 Local de implantação

Considerando a possibilidade de replicação da célula-teste no território nacional é necessário estabelecer alguns requisitos para o espaço externo de instalação visando otimizar o potencial investigativo do artefato e viabilizar a comparação dos resultados obtidos com células-teste do mesmo modelo instaladas em outros locais. Desta maneira, o local de implantação precisa:

- Possuir superfície plana mínima de 5,50m x 5,50m de modo a acomodar a célula-teste e seus equipamentos, além de possibilitar o giro de 360° da edificação;
- Estar distante de elementos que possam afetar as condições naturais de insolação e ventilação;
- Possibilitar a instalação de mecanismos de segurança, como cercas e travas, que limitem o acesso de pessoas estranhas à área de experimento.

Com o objetivo de verificar o desempenho do projeto desenvolvido, propõem-se a implantação de um primeiro protótipo junto à estação meteorológica situada no campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR) (FIGURA 52). O local foi escolhido considerando o atendimento dos critérios descritos acima, bem como a vantagem de estar situado ao lado de equipamentos de monitoramento, cujos dados referentes às condições ambientais externas podem ser utilizados nas investigações (FIGURA 53).

FIGURA 52 – Área de implantação (vermelho) no campus Centro Politécnico (amarelo)



Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH (2022).

FIGURA 53 – Estação meteorológica UFPR



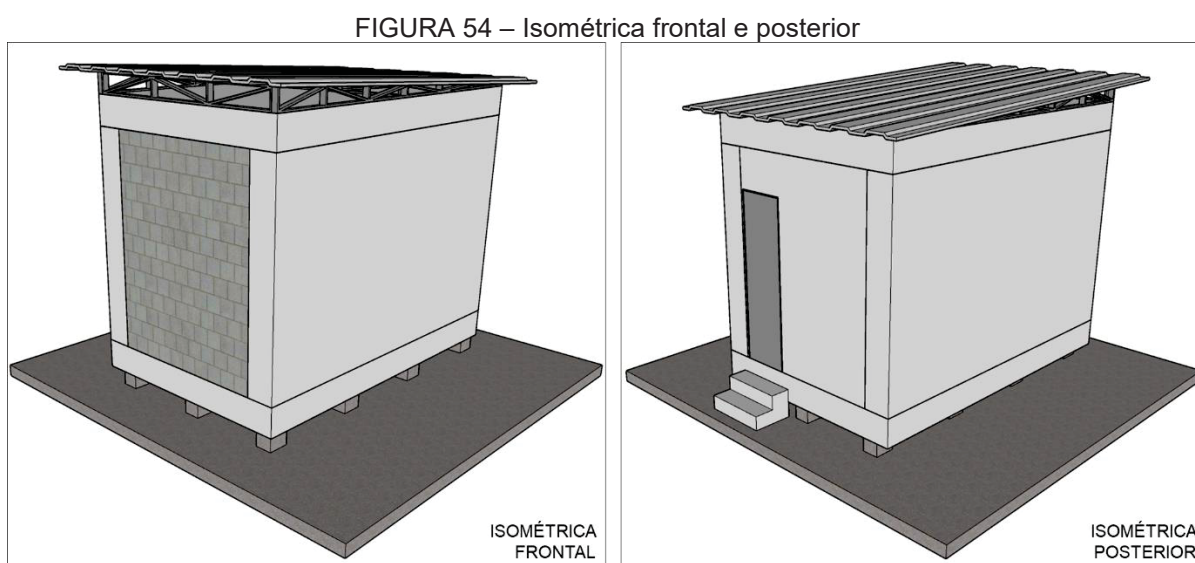
Fonte: A autora (2022).

5.4 CÉLULA-TESTE PARA ESTUDOS DE CAMPO

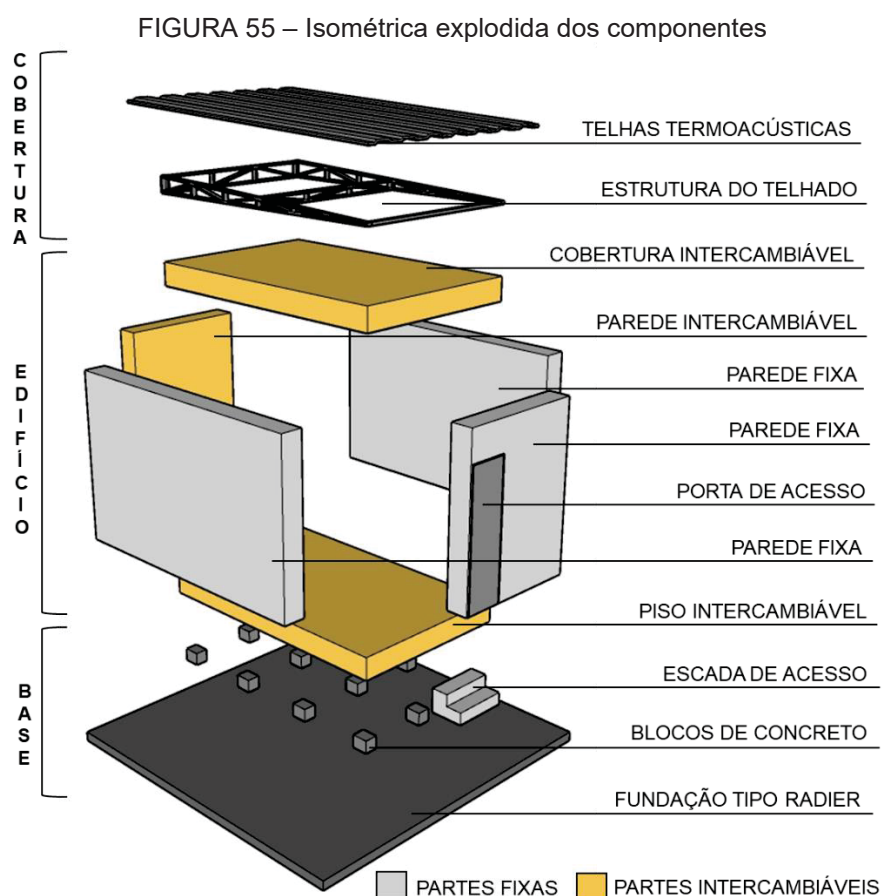
Neste tópico são apresentados os desenhos que compõem o projeto arquitetônico desenvolvido em nível de anteprojeto (apresentado na íntegra no Anexo B), além dos equipamentos sugeridos e dos procedimentos de uso recomendados.

5.4.1 Projeto arquitetônico

O desenvolvimento do projeto arquitetônico buscou seguir as diretrizes apresentadas anteriormente. Desta forma, a volumetria resultante é composta por um bloco retangular ligeiramente alongado com alto nível de isolamento térmico, sustentado por uma base ventilada e protegido das intempéries por uma cobertura também ventilada (FIGURA 54).



Visando atender às diversas possibilidades de usos, o projeto foi concebido de modo que as faces tenham estrutura independente permitindo a remodelação do edifício a depender do experimento em curso. Sendo assim, propõem-se que três faces sejam intercambiáveis, sendo estas de cobertura, piso e parede transversal frontal, indicadas em amarelo na FIGURA 55.

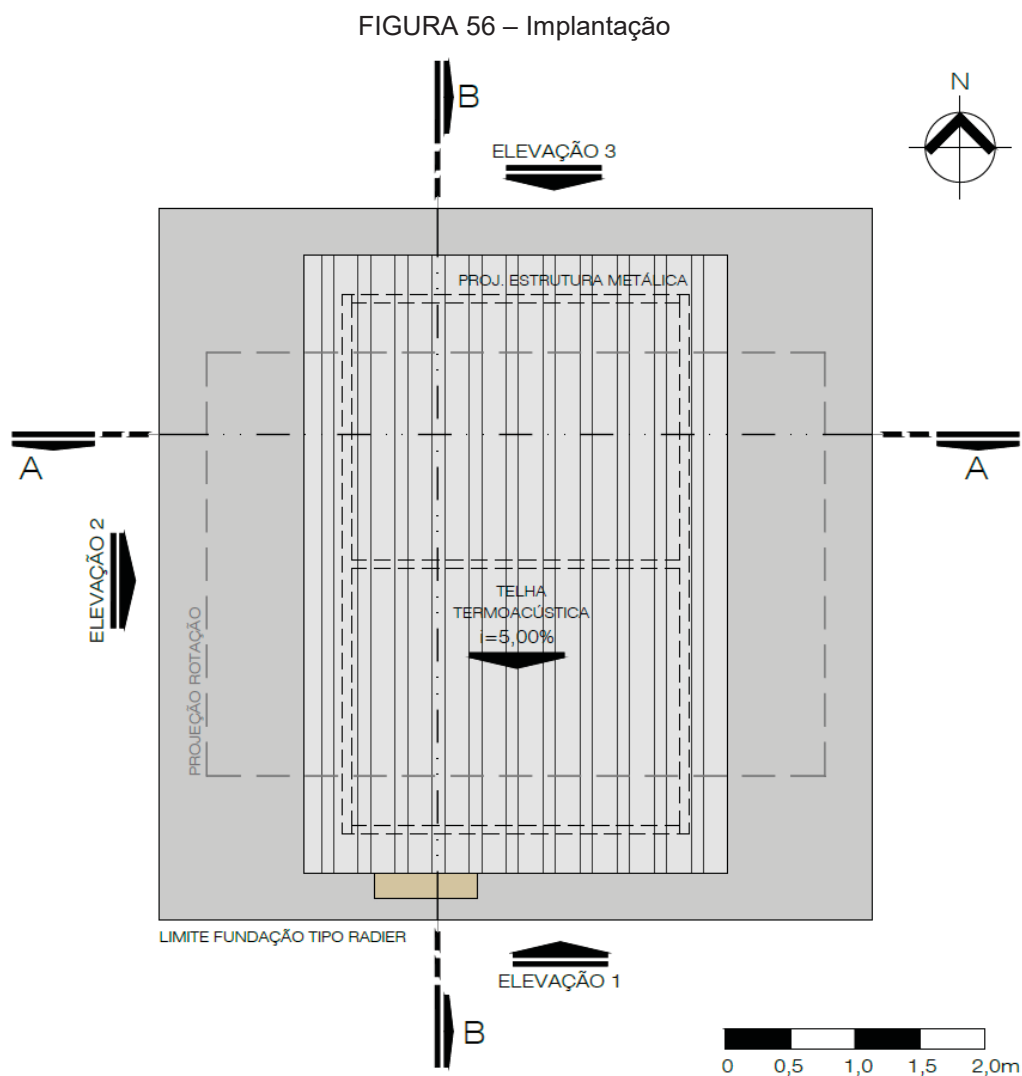


Fonte: A autora (2022).

Considerando que a célula-teste será implantada sobre um piso irregular, o embasamento é composto por uma fundação tipo *radier* com dimensões 5,50m x 5,50m, possibilitando a rotação do edifício; blocos de concreto com dimensões de 0,20m x 0,20m, que podem ser substituídos por um sistema de rotação com rodas; e uma escada de acesso com dois degraus em madeira, por ser um material leve e de fácil remoção.

A cobertura é constituída por uma estrutura treliçada metálica que permite a ventilação lateral e dá suporte às telhas metálicas termoacústicas inclinadas em 5,00%, com caída voltada para a parede posterior e projeção de 0,30m em todo o perímetro. A opção por estes materiais se dá em função da leveza e da facilidade de montagem e desmontagem. Além disso, recomenda-se que as telhas sejam pintadas de cor clara a fim de reduzir a absorção de radiação solar.

A implantação arquitetônica (FIGURA 56) ilustra os aspectos de cobertura e embasamento descritos acima.



Fonte: A autora (2022).

Em relação ao edifício, a adaptação do sistema construtivo *wood frame* com montagem em fábrica (FIGURA 57) é o que possibilita a independência das faces, também chamadas de painéis, e a substituição daquelas que são intercambiáveis. O sistema é constituído essencialmente por uma estrutura de madeira com montantes verticais e horizontais contraventados em ambos os lados por chapas estruturais de OSB, além de camadas de acabamento interno e externo que variam conforme o projeto.

FIGURA 57 – Processo industrial de montagem de painéis em wood frame

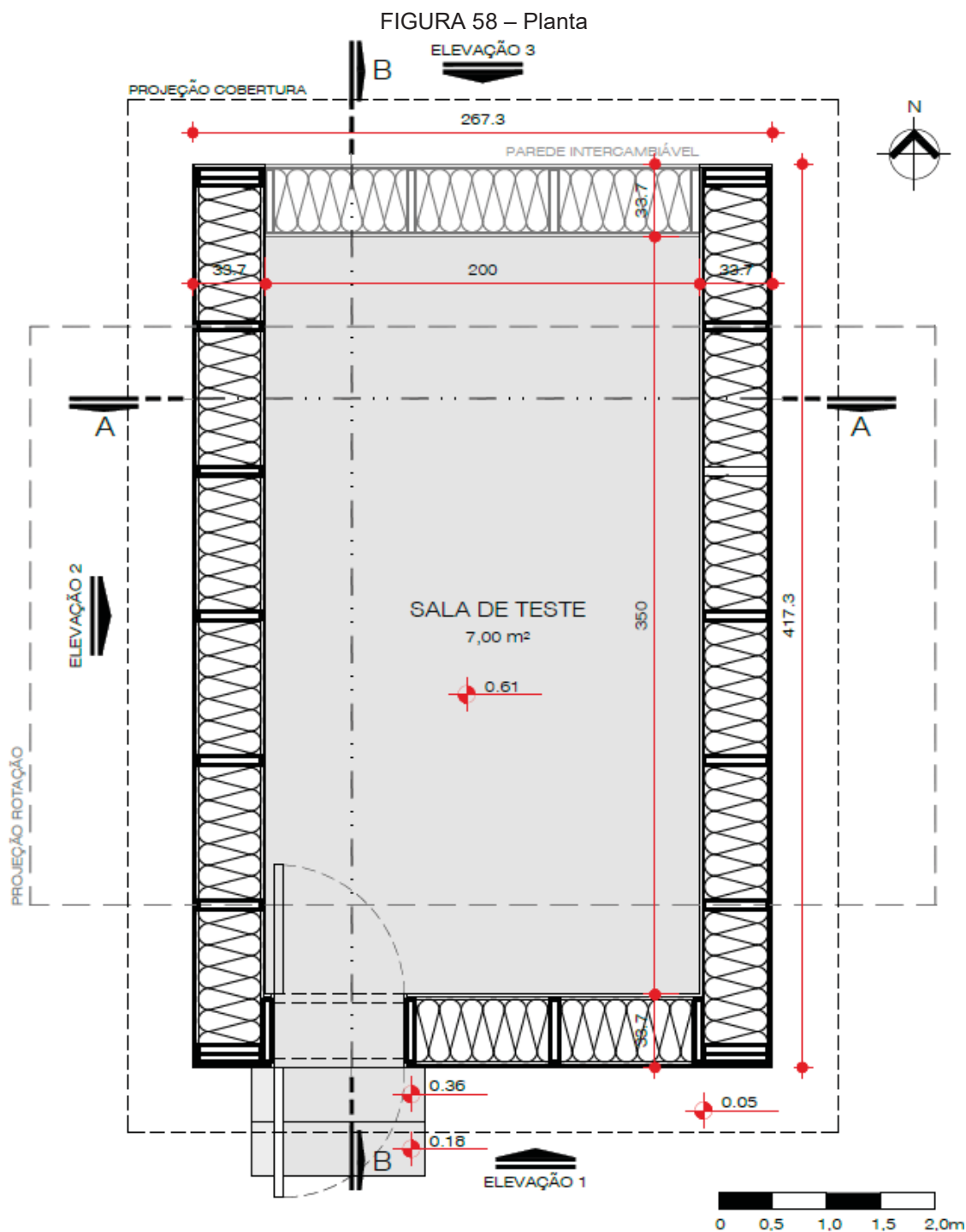


Fonte: Tecverde (2022).

No caso da célula-teste projetada, cujo objetivo principal da vedação é oferecer alto nível de resistência térmica, os montantes são preenchidos com isolamento térmico composto por placas de poliuretano com espessura de 0,29m, valor suficiente para que o conjunto atinja a transmitância térmica resultante de 0,100 W/m²K. Externamente, após a camada de OSB é aplicada em todos os painéis (paredes, cobertura e piso) uma membrana hidrófuga, placas cimentícia e chapas metálicas com acabamento em cor clara. Internamente, o acabamento das paredes e da cobertura é feito por chapas de PVC, enquanto o piso recebe tábuas de madeira. A escolha dos materiais de acabamento priorizou aqueles que não são moldados 'in loco' o que permite a montagem e desmontagem sem que haja risco de deterioração dos componentes.

Na planta (FIGURA 58) observa-se que a sala de testes tem dimensões internas de 2,00m x 3,50m e área resultante de 7,00m², conforme recomendado pelas diretrizes projetuais. As dimensões externas são 2,67m x 4,17m, em função da espessura das paredes de aproximadamente 33,7cm, o que totaliza uma área de 11,15m². Nota-se também a distribuição dos montantes verticais de 38mm x 290mm, com espaçamento aproximado de 0,60cm e o emprego de perfis duplos nas extremidades. Verifica-se ainda a existência de uma parede transversal intercambiável ao norte (em cinza) e uma porta dupla de acesso ao sul. A porta constitui um ponto de possíveis trocas térmicas indesejáveis entre o ambiente interno e externo. Desta maneira, buscando minimizar tal efeito, opta-se por portas metálicas

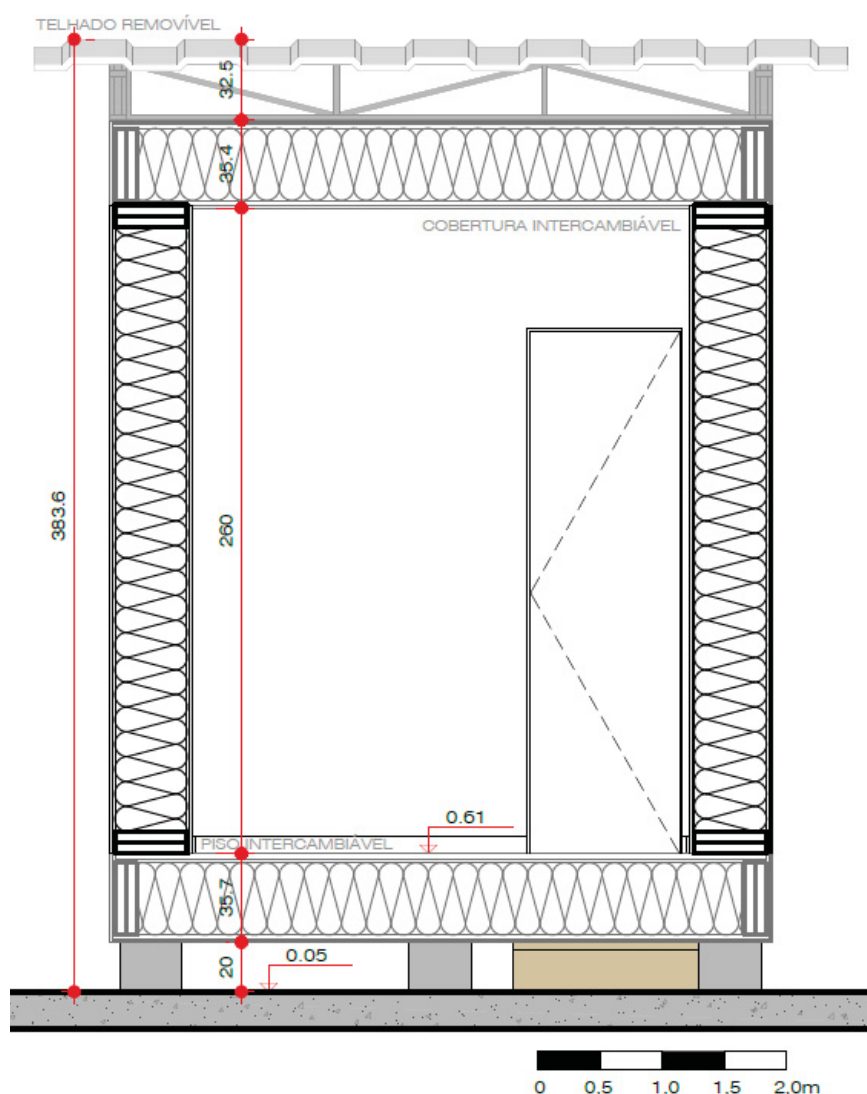
com preenchimento em poliuretano separadas por uma camada de ar, com transmitância térmica resultante de $0,095 \text{ W/m}^2\text{K}$, considerando a vedação das frestas.



Fonte: A autora (2022).

No corte transversal AA são indicados alguns valores de altura como o pé direito de 2,60m que configura um volume de ar interno de 18,20m³. São expressas também as espessuras da cobertura de 35,4cm, do piso com 35,7cm e do telhado com 32,5cm, bem como a altura total da edificação equivalente a 3,84m. Observa-se ainda o piso e a cobertura intercambiáveis e o telhado removível, representados em cinza.

FIGURA 59 – Corte transversal AA

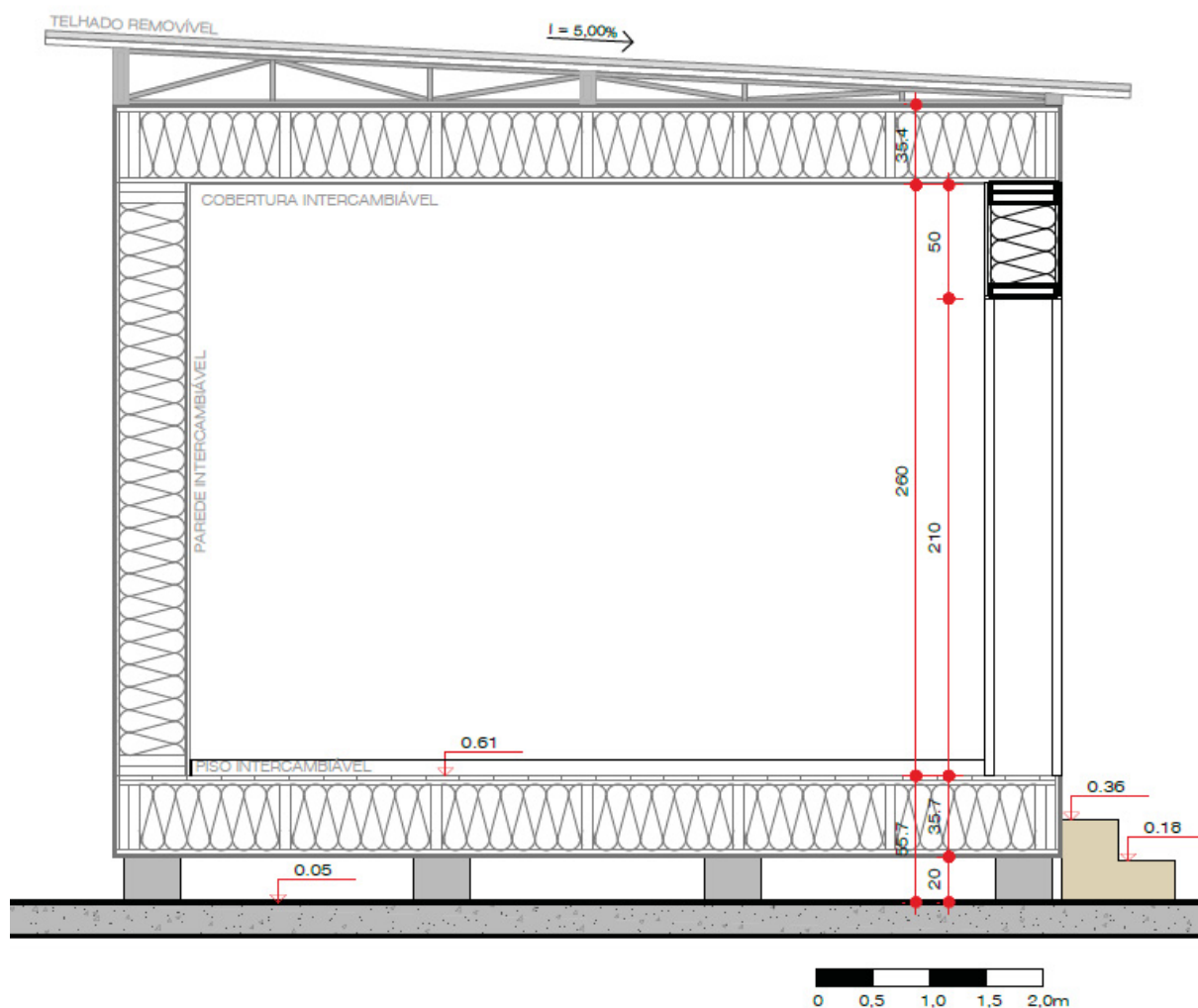


Fonte: A autora (2022).

Da mesma forma, no corte longitudinal BB destaca os níveis da fundação que está ligeiramente elevada do solo, dos degraus e do piso interno a aproximadamente

0,61m do piso externo. A porta de acesso possui altura padrão de 2,10m. E são observados a cobertura, o piso e a parede modificáveis, além do telhado que pode ser removível.

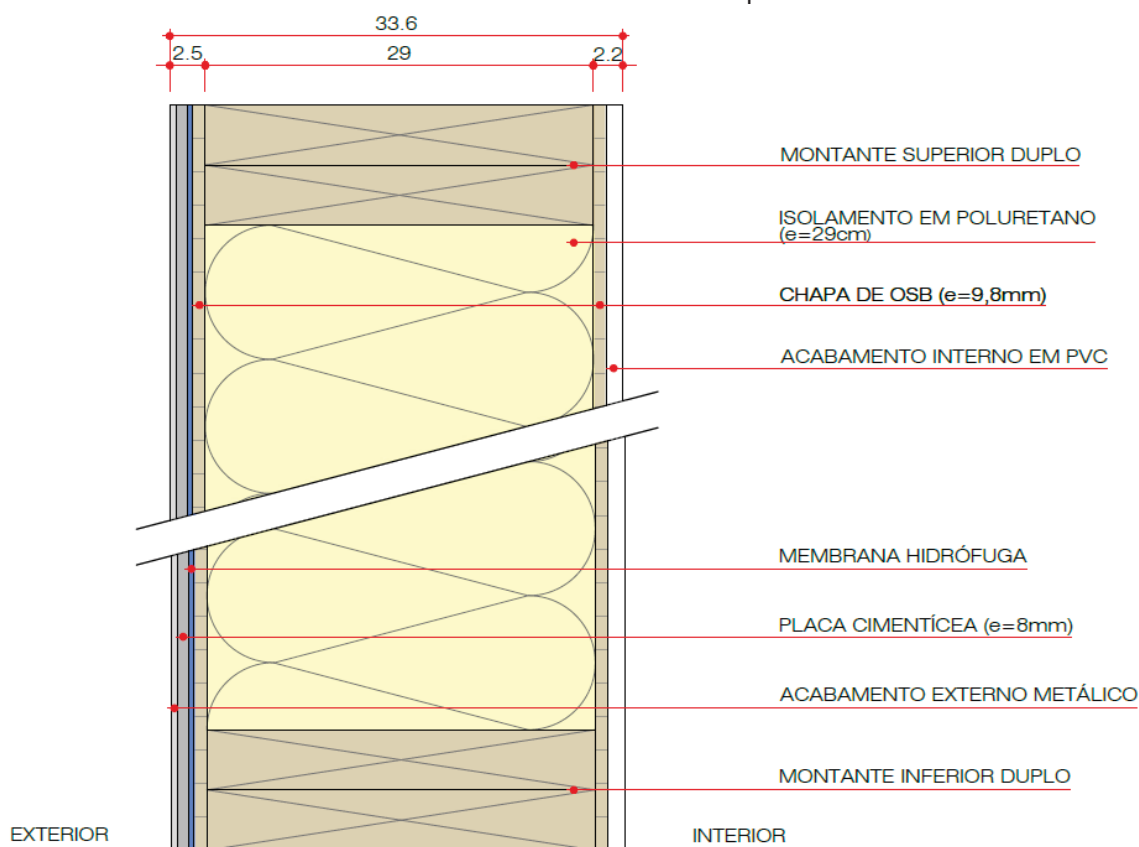
FIGURA 60 – Corte longitudinal BB



Fonte: A autora (2022).

O detalhamento das camadas de vedação é apresentado na FIGURA 61, FIGURA 62 e FIGURA 63, assim como os valores considerados no cálculo das propriedades térmicas resultantes na TABELA 19, TABELA 20, TABELA 21, com destaque para a transmitância térmica obtida que ficou abaixo de $0,100 \text{ W/m}^2\text{K}$ nos três casos verificados.

FIGURA 61 – Detalhe camadas das paredes



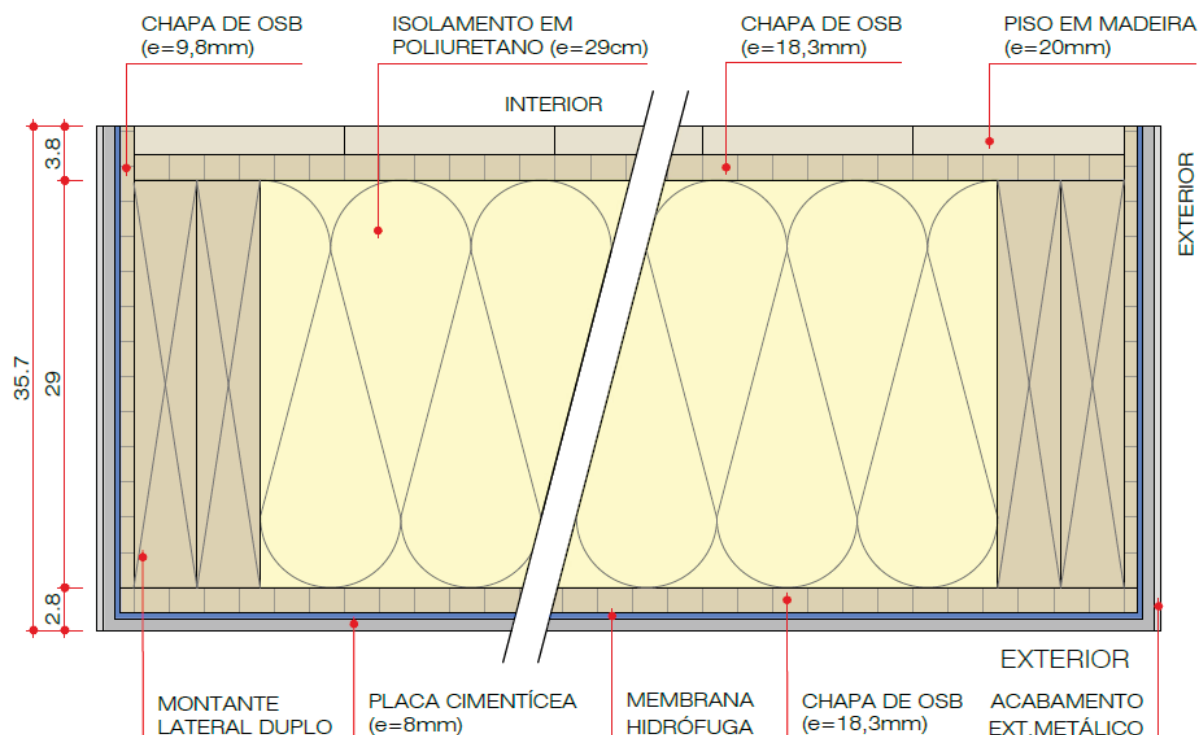
Fonte: A autora (2022).

TABELA 19 – Propriedades físicas e térmicas das camadas de parede

CAMADAS DE PAREDE	ESPESSURA (m)	DENSIDADE (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kgK)	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/mK)	CAPACIDADE TÉRMICA (KJ/m ² K)	RESISTÊNCIA TÉRMICA (m ² K/W)
Resistência superficial externa	-	-	-	-	-	0,040
Acabamento externo metálico	-	-	-	-	-	-
Placa cimentícia	0,008	1700	1000	0,35	13,60	0,023
Membrana hidrófuga	-	-	-	-	-	-
Chapa de OSB	0,0095	681	2300	0,17	14,88	0,056
Placa de Poliuretano	0,29	30	1,67	0,03	0,01	9,667
Chapa de OSB	0,0095	681	2300	0,17	14,88	0,056
Acabamento interno em PVC	-	-	-	-	-	-
Resistência superficial interna	-	-	-	-	-	0,130
Somatório					43,37	9,971
Transmitância térmica total (W/m ² K)						0,100

Fonte: A autora (2022).

FIGURA 62 – Detalhe camadas do piso



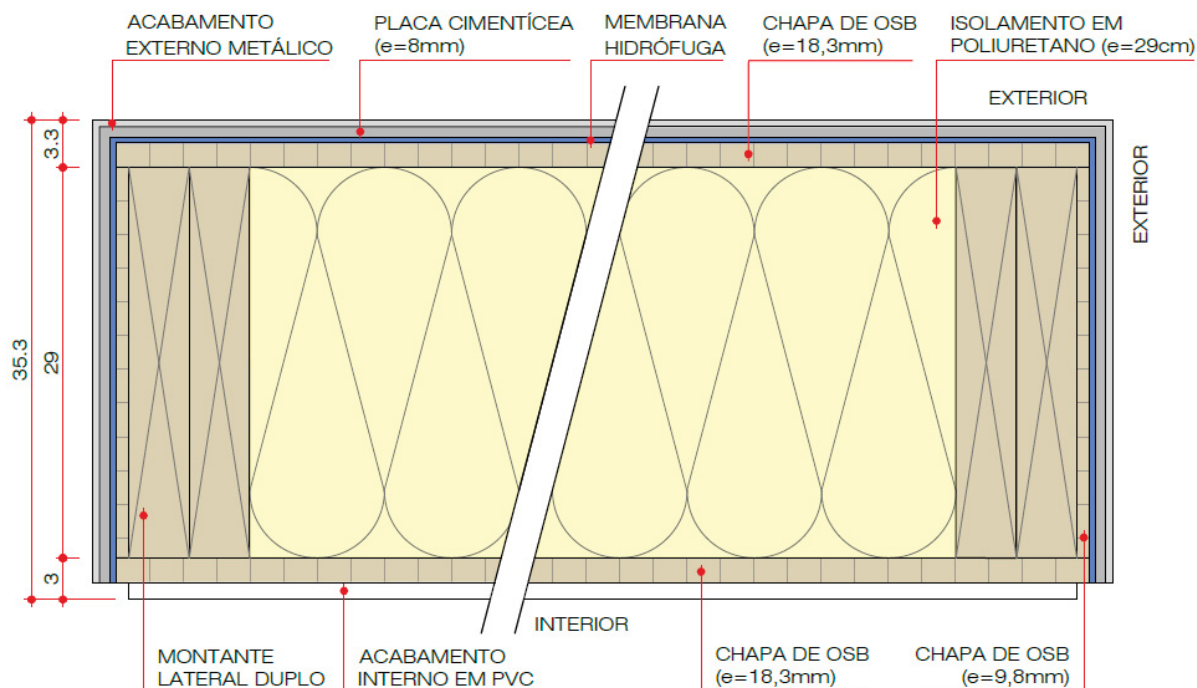
Fonte: A autora (2022).

TABELA 20 – Propriedades físicas e térmicas das camadas de piso

CAMADAS DO PISO	ESPESSURA (m)	DENSIDADE (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kgK)	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/mK)	CAPACIDADE DE TÉRMICA (KJ/m ² K)	RESISTÊNCIA À TÉRMICA (m ² K/W)
Resistência superficial externa	-	-	-	-	-	0,040
Acabamento externo metálico	-	-	-	-	-	-
Placa cimentícia	0,008	1700	1000	0,35	13,60	0,023
Membrana hidrófuga	-	-	-	-	-	-
Chapa de OSB	0,0183	681	2300	0,17	28,66	0,108
Placa de poliuretano	0,29	30	1,67	0,03	0,01	9,667
Chapa de OSB	0,0183	681	2300	0,17	28,66	0,108
Piso de madeira	0,02	500	1,34	0,15	0,01	0,133
Resistência superficial interna	-	-	-	-	-	0,130
Somatório					70,95	10,208
Transmitância térmica total (W/m ² K)						0,098

Fonte: A autora (2022).

FIGURA 63 – Detalhe camadas da cobertura



Fonte: A autora (2022).

TABELA 21 – Propriedades físicas e térmicas das camadas de cobertura

CAMADAS DA COBERTURA	ESPESSUR A (m)	DENSIDAD E (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFIC O (J/kgK)	CONDUTIVID A-DE TÉRMICA (W/mK)	CAPACIDAD E TÉRMICA (KJ/m ² K)	RESISTÊNCI A TÉRMICA (m ² K/W)
Resistência superficial externa	-	-	-	-	-	0,040
Acabamento externo metálico	-	-	-	-	-	-
Placa cimentícea	0,008	1700	1000	0,35	13,60	0,023
Membrana hidrófuga	-	-	-	-	-	-
Chapa de OSB	0,0183	681	2300	0,17	28,66	0,108
Placas de poliuretano	0,29	30	1,67	0,03	0,01	9,667
Chapa de OSB	0,0183	681	2300	0,17	28,66	0,108
Acabamento interno em PVC	-	-	-	-	-	-
Resistência superficial interna	-	-	-	-	-	0,130
Somatório					70,94	10,075
Transmitância térmica total (W/m ² K)						0,099

Fonte: A autora (2022).

Por fim, a TABELA 22 apresenta de forma sintética as características físicas principais da célula-teste projetada e a FIGURA 64 ilustra o aspecto estético final do objeto exposto às condições ambientais externas.

TABELA 22 – Síntese das características físicas da célula-teste

PARÂMETRO	AMBIENTE INTERNO	PAREDE	PISO	COBERTURA
Dimensões p/ teste (m)	2,00 x 3,50 x 2,60	2,00 x 2,60	2,00 x 3,50	2,00 x 3,50
Área p/ teste (m ²)	7,00	5,20	7,00	7,00
Volume interno (m ³)	18,20	-	-	-
Espessura (cm)	-	33,60	35,70	35,3
Capacidade térmica (KJ/m ² K)	-	43,37	70,95	70,94
Transmitância térmica (W/m ² K)	-	0,100	0,098	0,099

Fonte: A autora (2022).

FIGURA 64 – Perspectiva da célula-teste



Fonte: A autora (2022).

5.4.2 Equipamentos

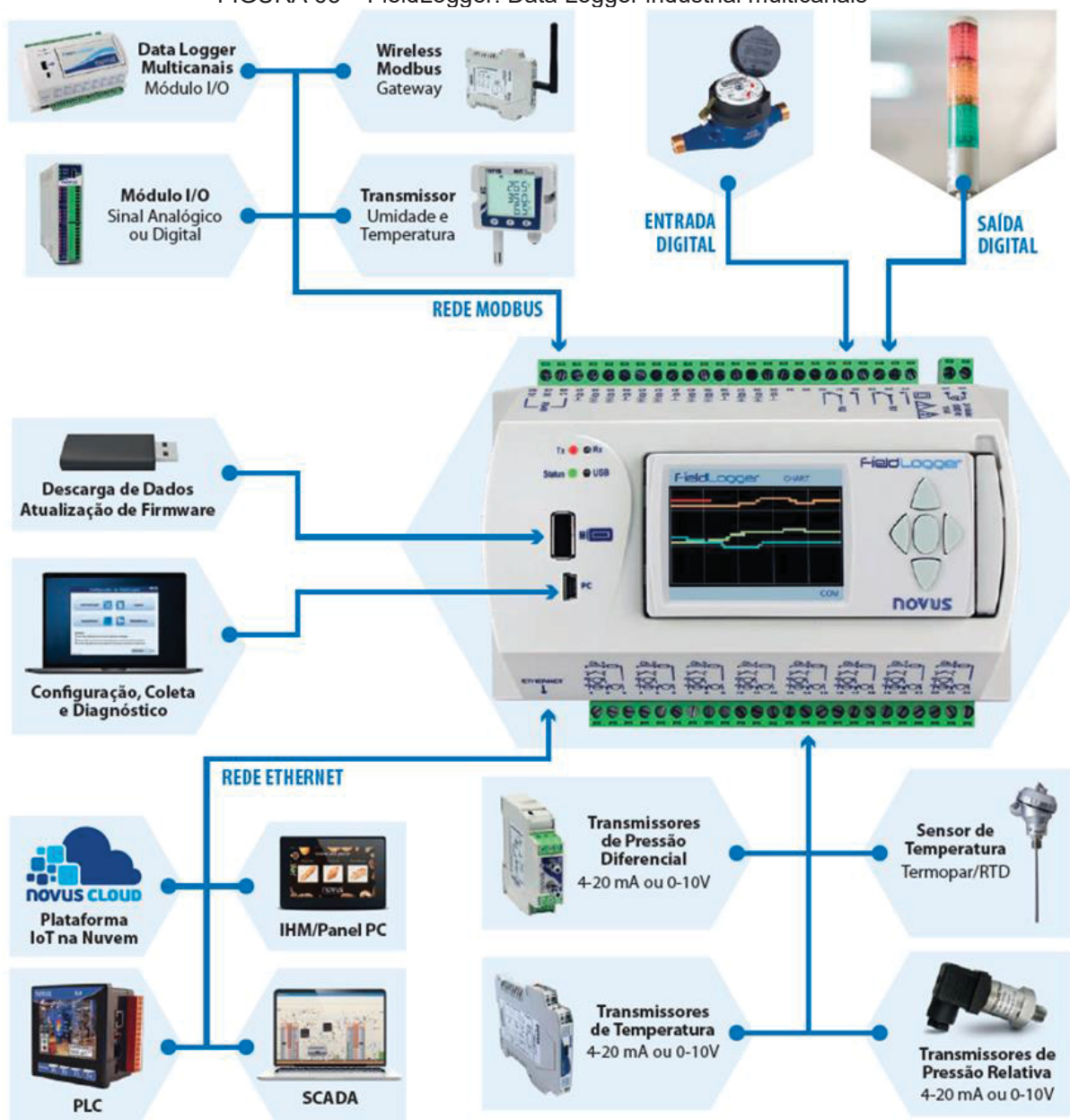
Considerando experimentos com foco no desempenho térmico, para registro das temperaturas optou-se pelo módulo para registro de dados modelo *FieldLogger* da marca *Novus*, (FIGURA 65). O aparelho possui 8 entradas analógicas configuráveis por software para sinais de tensão, corrente, termopares, Pt100 e Pt1000. Dispõe ainda de 2 saídas a relé e 8 portas digitais individualmente configuráveis como entrada ou saída. Essa configuração permite a conexão, via cabos, de sensores de temperatura do tipo Pt100, que podem ser utilizados para monitorar a temperatura do ar, a temperatura superficial e adaptados para monitorar temperatura de globo (para o cálculo da temperatura radiante média).

Sua interface RS485 também pode ser configurada como mestre ou escravo, o que permite a aquisição de até 64 canais externos para registro. Há também uma interface Ethernet que permite o acesso ao equipamento por navegador (HTTP), FTP (cliente e servidor), envio de e-mails (SMTP), SNMP e Modbus TCP. Possui ainda uma interface USB para se conectar a um computador (configuração, monitoramento ou coleta) e outra para se conectar a um pen drive (coleta). A memória básica é de 512.000 registros, com a possibilidade de expansão por cartão SD.

Para indicação ou configuração local, uma interface com display colorido pode ser acoplada ou instalada remotamente. Possui ainda um software configurador amigável que permite alterações nas configurações dos equipamentos, seja por ethernet, USB ou RS485, além de diagnóstico on-line, coleta dos registros e exportação para diversos formatos.

O *FieldLogger* apresenta grande flexibilidade e pode ser adaptado para diferentes experimentos, possibilitando realizar o monitoramento de temperaturas internas e externas à célula-teste.

FIGURA 65 – FieldLogger: Data Logger industrial multicanais



Fonte: Novus (2022).

Pensando em experimentos com foco na percepção térmica por parte de usuários da célula-teste, optou-se pelo *Confortímetro SENSU* (FIGURA 66). Trata-se de um equipamento fabricado no Brasil, pela empresa *Climaxar*, de Florianópolis, que vem sendo utilizado por diferentes pesquisadores na área de percepção térmica em ambientes internos (STILPEN, 2007; LAMBERTS *et al.*, 2013; LAMBERTS *et al.*, 2016). O equipamento apresenta os seguintes sensores e especificações:

- 01 Sensor de Temperatura de bulbo seco ventilado, operando de 0 a 100 °C e com incerteza de 0,2 °C;
- 01 Sensor de Umidade Relativa com faixa de medição de 5 a 98 % e incerteza de 3 %;
- 01 Sensor de Velocidade do Ar (termo-anemômetro omnidirecional), para a faixa de 0 a 3 m/s e com incerteza de 3%;
- 01 Sensor de Temperatura de Globo (esfera metálica, segundo norma ISO 7726), operando no intervalo de 0 a 80 °C e com incerteza de 0,2 °C;
- 01 Sensor de radiação ultravioleta UVB, para comprimento de onda de 280 a 315nm, com incerteza de 3%;
- 01 Sensor de luminosidade com incerteza de 3%;
- 01 Sensor de CO₂ com incerteza 5%;
- 01 Tripé, altura regulável de 0,5 a 1,3 metros;
- 01 Valise para transporte;
- 01 Módulo de aquisição SENSU com bateria;
- 01 Software de aquisição para conexão com PC (Sensu Tempo Real);
- 01 Software para pós processamento (Sensu PMV).

FIGURA 66 – Confortímetro SENSU



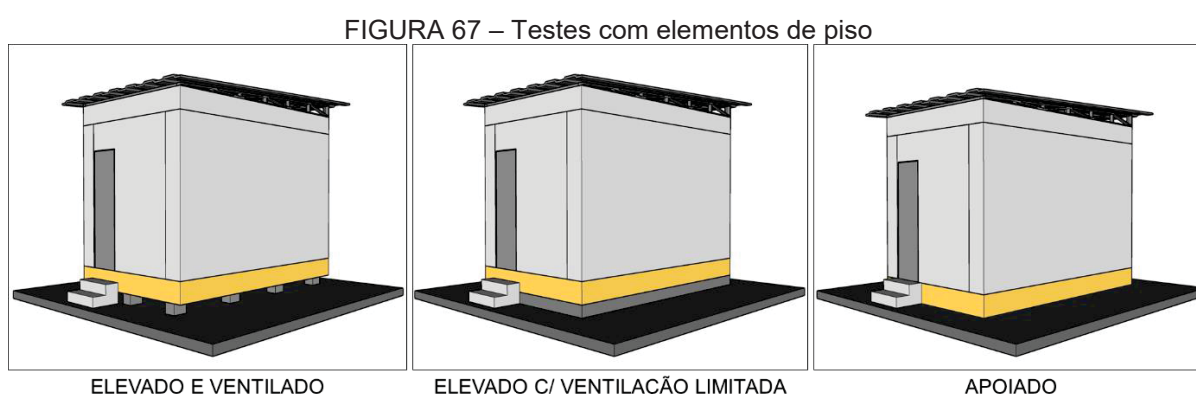
Fonte: Climaxar (2022).

5.4.3 Procedimentos de uso

Nesta subseção, são apresentados alguns dos procedimentos possíveis de serem empregados nas investigações utilizando a células-teste desenvolvida.

5.4.3.1 Testes de pisos, coberturas e vedações verticais

Observando as pesquisas levantadas durante a etapa de revisão bibliográfica, nota-se que nenhum trabalho se concentrou no estudo do desempenho térmico de componentes de piso, com exceção de Biasi (2018) que verificou a influência do contato com o solo ao posicionar as células-teste apoiada sobre o solo, semienterrada e enterrada. Apesar de ser um campo pouco explorado pelos pesquisadores brasileiros, alguns exemplos internacionais demonstram diferentes possibilidades de investigações vinculadas aos elementos de piso. A pesquisa australiana (DEWSBURY *et al.*, 2009) avaliou o desempenho térmico de células-teste com diferentes configurações de pisos – elevado ventilado (1), elevado com ventilação reduzida (2) e apoiado sobre o solo (3) – e constatou que as temperaturas do ar interno são bastante estáveis em (3), apresentam alguma variação em (2) e indicam grande flutuação em (1), tanto para o período frio quanto quente. Outra pesquisa sobre configurações de pisos foi realizada na Inglaterra (PELSMAKERS, 2016) e verificou o desempenho térmico e os valores da transmitância térmica em casos de *retrofit* de edificações históricas. Desta forma, a célula-teste foi desenvolvida de modo a permitir a realização de testes com elementos de piso que podem ser posicionados conforme a FIGURA 67.



Fonte: A autora (2022).

Por outro lado, os experimentos com elementos de cobertura são bastante frequentes nas pesquisas brasileiras (CARDOSO e VECCHIA, 2014; ANDRADE e RORIZ, 2015; SEIXAS, 2015; FERNANDES *et al.*, 2015a; KRÜGER; FERNANDES; LANGE, 2016; BRANDÃO e SANTOS, 2017; KAYANO *et al.*, 2018a; CADETE, BARBOSA e TORRES, 2020; entre outros) sendo que na maioria destes foi realizado o monitoramento das temperaturas do ar (internas e externas) e das temperaturas superficiais (internas e externas). Desta forma, os equipamentos recomendados anteriormente atenderiam em grande parte às pesquisas levantadas. Em relação ao modelo projetado, procura-se possibilitar diferentes abordagens permitindo o uso do telhado auxiliar como elemento de sombreamento com e sem ventilação, ou ainda a remoção completa do mesmo para que haja ampla exposição solar (FIGURA 68).

FIGURA 68 – Testes com elementos de cobertura

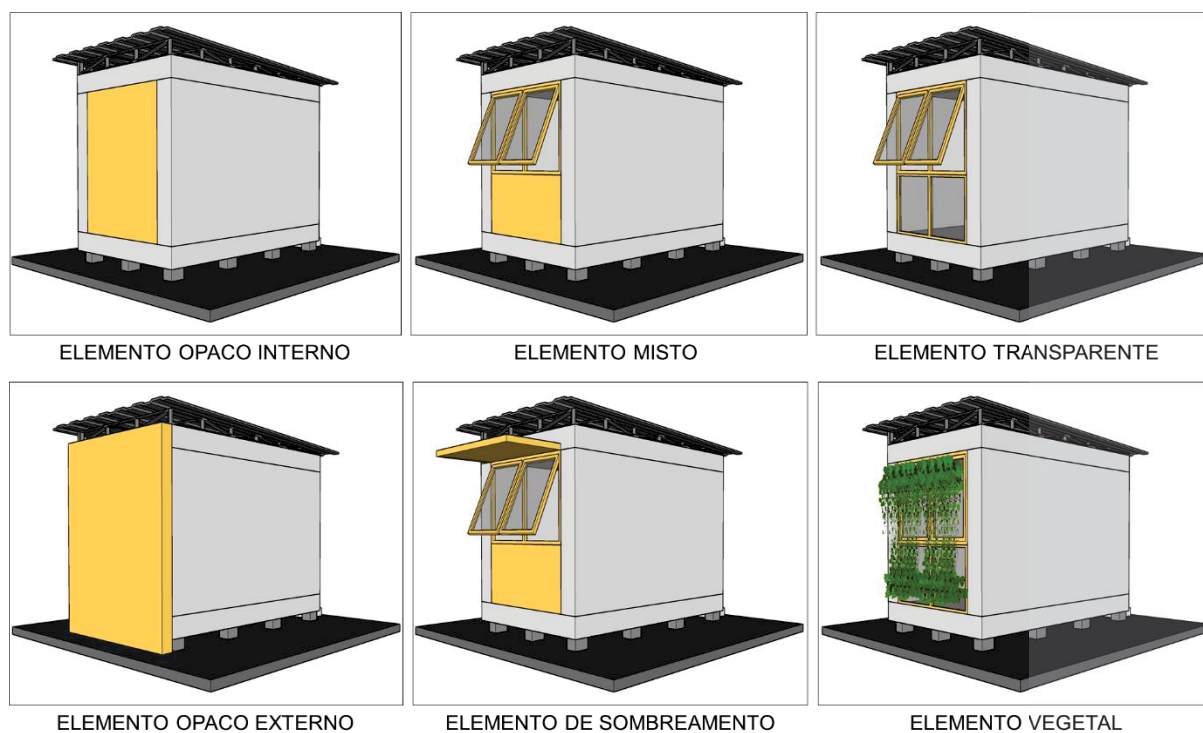


Fonte: A autora (2022).

Quanto às investigações de vedações, a revisão de literatura mostrou uma grande variedade de elementos verticais avaliados que podem ser opacos (KRÜGER *et al.*, 2004; RODRIGUES, 2022) ou transparentes (MIANA, 2005; CASTRO, 2006) constituindo o fechamento da edificação ou acoplados externamente, principalmente no caso de estratégias bioclimáticas como paredes vegetadas, parede trombe ou fachada dupla ventilada (MORELLI, 2009; SOUZA *et al.*, 2018). Sendo assim, a célula-teste para estudos de campo foi desenvolvida de modo a permitir o posicionamento de elementos opacos, mistos e transparentes leves apoiados internamente sobre o piso; externos apoiados sobre a fundação quando forem mais pesados; e acoplados ao edifício (FIGURA 69). Em relação ao monitoramento, a verificação das

temperaturas internas e superficiais é o procedimento mais comum, podendo também ocorrer medições de fluxo de calor com uso de equipamento específico.

FIGURA 69 – Testes com elementos de vedação vertical



Fonte: A autora (2022).

5.4.3.2 Células-teste e métodos estimativos de temperaturas

O emprego de métodos estimativos das temperaturas internas ainda é pouco difundido no Brasil, todavia é uma alternativa que pode ser incluída ao procedimento investigativo, principalmente no caso de experimentos com célula-teste unitária, tal qual o modelo proposto. Existem diferentes métodos preditivos como Papst (2004) e Fernandes (2015) que têm em comum a necessidade de um período curto de tempo de calibração no qual ocorre a medição das temperaturas médias internas e externas do ar, a partir das quais são desenvolvidas as equações. Em seguida, é feito um segundo o monitoramento das temperaturas para comparação destas com os valores calculados, que se validados são passíveis de aplicação em experimentos. A vantagem do seu emprego está na obtenção de resultados em um curto espaço de

tempo, a partir de um pequeno conjunto de dados de campo e com a possibilidade da aplicação dos testes para diferentes configurações da célula-teste em diferentes condições climáticas.

5.4.3.3 Células-teste e simulação computacional

As células-teste podem ser utilizadas de maneira independente como também podem ser combinadas com simulações computacionais. Alguns pesquisadores (LITTLER, 1993; STRACHAN, 2008) defendem inclusive que os edifícios sejam empregados muito mais como instrumento de suporte da validação e calibragem de modelos numéricos, do que elemento de análise propriamente dito. Cerca de 10% das pesquisas brasileiras fizeram uso de softwares computacionais como parte da investigação, no entanto as medições 'in loco' ainda prevalecem como principal componente de avaliação (KOMENO, 2005; PERALTA, 2006; KOMENO *et al.*, 2006; CARDOSO *et al.*, 2011; NEVES E RORIZ, 2012; ABREU-HARBICH *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2018; RODRIGUES, 2022). A proposta de uma célula-teste composta por materiais com propriedades físicas conhecidas facilita a modelagem paramétrica. Dentre os programas mais utilizados para a simulação termoenergética destaca-se o emprego do *SketchUp* com o auxílio do plug-in *OpenStudio* que funciona como uma interface para a inserção de informações que serão computadas pelo *EnergyPlus*. Além das características físicas da edificação e dos dados climáticos no formato *EPW*, podem ser adicionadas informações sobre o perfil de uso e ocupação, as cargas energéticas internas, as zonas térmicas desejadas e a configuração dos equipamentos de climatização a depender do caráter dos experimentos.

5.4.3.4 Células-teste e experimentos sobre percepção térmica e lumínica

A célula-teste projetada também pode ser utilizada para investigações sobre percepção térmica e lumínica ao incluir características das câmaras climáticas. Neste caso, é necessário adaptar a edificação com níveis de iluminação e ventilação naturais e artificiais que sejam adequados à permanência prolongada dos usuários. Ainda é preciso verificar e seguir os requisitos éticos a serem adotados nas pesquisas que

envolvem seres humanos. Neste sentido, são exemplos de abordagens os trabalhos de TRENTO *et al.* (2019) e KRÜGER *et al.* (2020) que analisaram o efeito de orientação de abertura nas condições térmicas, lumínicas e de satisfação dos usuários. Quanto à instrumentação necessária, o *confortímetro* recomendado na seção anterior atende aos principais aspectos verificados nas pesquisas desta natureza: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, temperatura de globo, iluminação, nível de radiação, e nível de CO₂.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O baixo desempenho térmico dos edifícios no Brasil pode ser observado nas diferentes regiões bioclimáticas e nos diversos padrões construtivos, todavia afeta mais intensamente a população de menor renda, que vive em moradias precárias e não dispõe de recursos para adquirir equipamentos para climatização. Soma-se a isto, o déficit habitacional brasileiro e os programas governamentais, que impulsionam a construção em massa de residências sem a devida preocupação com o conforto ambiental dos usuários nem com os impactos ambientais negativos causados pela transformação do meio ambiente.

Considerando esse contexto, esta dissertação foi motivada pela necessidade de ampliar o entendimento do desempenho térmico e do conforto ambiental como elementos essenciais para a realização das atividades cotidianas, sendo particularmente importantes nos edifícios habitacionais. Para tanto, é preciso em um primeiro momento aumentar as pesquisas que investigam materiais, sistemas construtivos e equipamentos que venham a contribuir para o aprimoramento da qualidade das edificações.

Neste sentido, o principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento do projeto arquitetônico de uma célula-teste padrão para estudos de campo que possa dar suporte a estas investigações, sendo replicável no território brasileiro. Para isto foram estabelecidos objetivos específicos vinculados às diferentes etapas de pesquisa.

Primeiramente, foi avaliado o estado da arte da aplicação de células-teste nos panoramas internacional, latino-americano e brasileiro. Nesta etapa foi identificado um atraso das pesquisas latino-americanas, incluindo as do Brasil, em relação ao quadro norte-americano e ao europeu. Observou-se ainda que os pesquisadores latino-americanos não estão organizados em redes nem dispõem de protocolos ou células-teste padronizadas. Destaca-se também que o Brasil e o México são os países protagonistas da região em pesquisas com células-teste. Todavia, as pesquisas mexicanas apresentam maior grau de internacionalização.

Em seguida, foram descritos os principais conceitos físicos envolvidos no estudo do desempenho térmico de edificações traçando paralelos com a sua aplicação nas pesquisas brasileiras com células-teste. Verificou-se que as

propriedades térmicas de materiais e componentes foram amplamente investigadas e consolidadas em documentos normativos, ao passo que, as propriedades térmicas das edificações consideradas no todo foram menos exploradas. Diante deste contexto, as células-teste podem ser um instrumento facilitador para o desenvolvimento e a validação das pesquisas nacionais.

Na sequência, foi realizado o estudo aprofundado de dois exemplos europeus e um sul-americano de célula-teste, além de um exemplar brasileiro de câmara climática. Apesar de apresentarem diferentes graus de sofisticação, a divisão da análise nos tópicos características físicas, instrumentação e método de investigação permitiu identificar elementos orientadores de projeto – como a composição da vedação, o tamanho da área de teste e a orientação do artefato – que foram determinantes ao longo do desenvolvimento do projeto da célula-teste padrão.

Para o dimensionamento, optou-se por tomar como referência um ambiente de longa permanência para representar as características espaciais de um edifício real, sendo escolhido o dormitório de solteiro em função de suas dimensões reduzidas e das limitações de contato com o ambiente externo. A fim de subsidiar esse levantamento, foi verificada a NBR 15.575:2013 e as legislações locais das cidades brasileiras mais populosas que incidem sobre o dimensionamento do dormitório quanto a área, dimensões internas, iluminação e ventilação. Ficou evidente a grande variação de valores apresentada pelas legislações municipais, que são bem mais exigentes do que a normativa nacional, sendo recomendável a adoção das médias dos valores apresentados pelos municípios.

Por fim, os dados levantados nas etapas de revisão bibliográfica, estudos de caso e dimensionamento permitiram a definição de diretrizes projetuais quanto aos usos e aplicações, características físicas, materiais e sistema construtivo, sistemas complementares e local de implantação. O projeto final resultou em uma célula-teste com dimensões internas de 2,00m x 3,00m x 2,60m, estruturada por um envelope em *wood frame* com transmitância térmica média de 0,100 W/m²K possibilitando a realização de testes com elementos de piso, parede e cobertura.

Diante do exposto, considera-se que a pesquisa desenvolvida atendeu em suas diversas etapas os objetivos propostos, tendo como produto o projeto arquitetônico apresentado. Este, juntamente com os equipamentos sugeridos e a sua

ampla possibilidade de aplicação, colabora para que o modelo de célula-teste criado seja um importante instrumento de suporte às pesquisas de campo nas áreas de conforto ambiental e desempenho térmico de edificações, sendo passível de replicação no território nacional.

Entre as limitações encontradas ao longo deste estudo, destacam-se: a dificuldade em localizar trabalhos brasileiros com emprego de células-teste por não estarem concentrados em uma única base de dados; a carência de pesquisas nacionais e internacionais que detalhem a etapa de desenvolvimento do projeto arquitetônico; e a necessidade de definir critérios técnicos para o embasamento do projeto evitando assim a subjetividade.

Como sugestão para a continuidade da pesquisa, recomenda-se:

- A divulgação e discussão dos resultados em meios científicos e a participação em eventos de alcance nacional, com o objetivo de incrementar o projeto desenvolvido e despertar o interesse da comunidade acadêmica para a criação de uma rede de investigação colaborativa;
- O aprimoramento do projeto arquitetônico visando facilitar a montagem e desmontagem dos componentes – por exemplo pela redução do tamanho dos painéis – além de definir os mecanismos de encaixe, vedação e fixação das partes;
- O desenvolvimento dos projetos arquitetônicos e complementares em nível executivo;
- A definição dos quantitativos e do orçamento final seguido pela busca por financiamento e/ou patrocínio de instituições públicas e privadas;
- A construção de um protótipo no campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná para verificação *in loco* do modelo desenvolvido e consolidação dos equipamentos e procedimentos recomendados;
- A replicação do modelo validado em outras localidades, dando início a uma rede de pesquisa nacional.

REFERÊNCIAS

ABREU-HARBICH, L. V. de. How do green façades mitigate the thermal stress under heat waves? In: 32th PLEA – CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, Los Angeles, 2016. **Anais...** Los Angeles: PLEA, 2016

ALCAMO, G. Daylight distribution and thermo-physical evaluation of new facade components through a test cell for the overheating control in Mediterranean Climate. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE SOLARIS, Brno, 2011. **Anais...** Brno: SOLARIS, 2011a.

_____. **Sistemi per valutare e comparare in opera le prestazioni energetiche di componenti edilizi**: Progetto di una test-cell per il clima Mediterraneo. 268 f. Tese (Doutorado em Tecnologia da Arquitetura e do Design) – Departamento de Tecnologia da Arquitetura e do Design, Universidade de Florença, Florença, 2011b.

ALCAMO, G; DE LUCIA, M. A new test cell for the evaluation of thermophysical performance of facades building components. **International Journal of Sustainable Energy**. [s. l.], v. 33, n. 4, p. 954-962, 2014.

ALVES, A. B. M. **Potencial de climatização por dutos subterrâneos segundo zona bioclimática, profundidade e tratamento da superfície do solo**. 122 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

AMARILLA, R. S. D. *et al.* Modelagem acústica: processo de avaliação de poluição sonora em um Campus Universitário na Cidade de Curitiba - Paraná. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, Porto Alegre, 2018. **Anais [...]** Porto Alegre: SOBRAC, 2018.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **ASHRAE Standard 55-2004** - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. USA, Atlanta: 2004.

_____. **ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.2-2018** – Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings. USA, Atlanta: 2018.

ANDRADE, N. C. de; RORIZ, M. Comportamento térmico de cobertura verde utilizando a grama *Brachiaria Humidicola* na cidade de São Carlos, SP. **Revista Pesquisa em Arquitetura e Construção (PARC)**. Campinas, p. 1-16, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220 Desempenho térmico de edificações Parte 1**: Definições, símbolos e unidades. 2005a. Brasil: ABNT.

_____. **NBR 15220 Desempenho térmico de edificações Parte 2**: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações 2005b. Brasil: ABNT.

_____. **NBR 15220 Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimáticos brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** 2005c. Brasil: ABNT.

_____. **NBR 15.575 Edificações Habitacionais Desempenho - Parte 1: Requisitos Gerais.** 2013. Brasil: ABNT

_____. **NBR 15.575 Edificações Habitacionais Desempenho - Parte 4: Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE.** 2013. Brasil: ABNT

BALCOMB, J. D. Passive Solar Research and Practice. **Building and Environment**, [s. l.], v. 7, p. 281-295, 1984.

BALDESSAR, S. M. N. **Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada.** 125 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BÄR, B. V. **Influência de diferentes camadas de drenagem no desempenho hidrológico de telhados verdes extensivos na cidade de Curitiba – PR.** 172 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

BIASI, J. A. **Estudo comparativo do desempenho térmico de células-teste enterrada e semienterrada na cidade de Curitiba-PR.** 134f. (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

BIASI, J. A; KRÜGER, E. L. Estudo do desempenho térmico de células-teste enterrada e semienterrada. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 10, p. e019023, 2019.

BLASIUS, J. F. dos S. **Avaliação do desempenho térmico de sistemas de envoltórias acopladas a trocador de calor subterrâneo.** 109 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

BRANDÃO, L. M; SANTOS, L. R. **Desempenho térmico de telhas: análise de monitoramento por células-teste.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2017.

CADETE, E. S; BARBOSA, R. V. R; TORRES, S. C. Análise do desempenho térmico de coberturas e subcoberturas com materiais alternativos no contexto climático do semiárido alagoano. In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Porto Alegre, 2020. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). Banco de dados. **Déficit Habitacional no Brasil**. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/deficit-habitacional/deficit-habitacional-no-brasil>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

_____. Banco de dados. **PIB Brasil e Construção Civil**, 2022a. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

_____. Agência CBIC. **Informativo econômico 04/03/2022**, 2022b. Disponível em: <<https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2022/03/informativo-economico-pib-04-marco-2022.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

CARDOSO, G. T; VECCHIA, F. Comparison of thermal performance between test cells with different coverage systems for experimental typical day of heat in Brazilian Southeastern. **Frontiers of Architectural Research**, [s. l.], v. 3, p. 271-282, 2014.

CARDOSO, G. T; VECCHIA, F; CLARO NETO, S. Espuma rígida de poliuretano (PU) derivada de óleo vegetal (*Ricinus communis*) para isolamento térmico em sistemas de cobertura. In: IV SEMINÁRIO MATO-GROSSENSE DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, Sinop, 2011. **Anais...** Sinop: SHIS, 2011.

CASAGRANDE, T. **O desempenho de telhados verdes intensivos em termos de controle de temperaturas superficiais e retenção de água pluviais na cidade de Curitiba-PR**. 144f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

CASTRO, A. P. de A. S. **Desempenho térmico de vidros utilizados na construção civil: estudo em células-teste**. 239f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Campinas, Campinas, 2006.

CASTRO, A. P. de A. S. *et al.* Estudo de ganho de calor em vidros planos e refletivos através de células-teste. In: IX ENCONTRO NACIONAL E V LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Ouro Preto, 2007. **Anais...** Ouro Preto: ANTAC, 2007.

CASTRO, *et al.* Análise do comportamento de vidros refletivos prolíticos em relação às temperaturas superficiais através de medições em células-teste. In: XIII ENTAC - ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Canela, 2010. **Anais...** Canela: ANTAC, 2010.

CATTARIN, G. *et al.* Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation – A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. [s. l.], v. 54, p. 606-625, 2016.

CLIMAXAR. **Confortímetro SENSU**. Disponível em: <<http://www.climaxar.com.br>>. Acesso em: 28 nov. 2022.

DEWSBURY, M. *et al.* **Comparison of Test Cell Thermal Performance & The Empirical Validation of Accurate in a Cool Temperate Climate**. Melbourne, 2009.

DIJK, H. A. L; LINDEN, G. P. van der; The PASSYS Method for Testing Passive Solar Components. **Building Environment**. [s. l.], v. 28, n. 2, p. 115-126, 1993.

DI NÚBILIA, C. S. A. **Estudo comparativo do desempenho térmico de telhados verdes com diferentes materiais drenantes em Curitiba-PR**. 273f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

DI NÚBILIA, C. S. A. *et al.* Efeito da camada drenante no desempenho térmico de coberturas verdes em Curitiba-PR: estudo comparativo com células-teste. In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2020, Porto Alegre, **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020.

Dynamic Analysis Simulation and Testing Applied to the Energy and Environmental Performance of Buildings Group (DYNASTEE). **The Dynastee Network**. Dynastee Newsletter, v. 15, 2020. Disponível em: <www.dynastee.info>. Acesso em: 05 jul. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Projeção da demanda de energia elétrica 2016-2026**, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2026>>. Acesso em: 16 jun. 2020.

_____. **Anuário estatístico de energia elétrica 2021** – Ano base 2020. Rio de Janeiro, 2021a. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 25 jun. 2022.

_____. **Balanco energético nacional 2021** – Ano base 2020. Rio de Janeiro, 2021b. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 25 jun. 2022.

FERRARESE, R. A. **Conforto Ambiental interno em edificações: a estratégia da parede trombe**. 95f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

FERNANDES, L. C. **Experimentos de campo com teto-reservatório: desempenho térmico e percepção do usuário**. 330f. Tese (Doutorado em Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

_____. Diagramas de apoio ao projeto baseados na ideia do conforto térmico adaptativo. **PARC Revista Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v.11, p. e020030, 2020.

FERNANDES, L. C. *et al.* Revisão de estudos baseados no uso de células teste no Brasil. In: 4º SEMINÁRIO NACIONAL DE CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS - 1º FÓRUM DE DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES 2015, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: IMED, 2015a.

_____ *et al.* Estimativa de Temperaturas Internas Horárias de Pequenas Edificações a Partir de Temperaturas Externas: Proposta de Método Alternativo. XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, Campinas, 2015. **Anais...** Campinas, 2015b.

FERNANDES, L. C.; KRÜGER, E. Thermal performance of a thermal performance of a roof-pond system under subtropical conditions. In: PLEA – CONDERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 2017, Edinburgh. **Anais...** Edinburgh: PLEA, 2017.

FERNANDES, L.; KRÜGER, E.; ROSSI, F. A. Análise de desempenho térmico de células teste dotadas de teto reservatório em clima subtropical. In: XIV ENCONTRO NACIONAL E X ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRuíDO, Balneário Camboriú, 2017. **Anais...** Balneário Camboriú: ANTAC, 2017.

FORLIN, C. L. **Estudo experimental em células-teste sobre a influência térmica de módulos fotovoltaicos aplicados em fachada em Curitiba/PR.** 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

GALLARDO, N. P. *et al.* Redução da amplitude térmica por meio de tecnologia verde: estudo de caso no inverno de São Carlos/SP. In: 3ª SEMANA DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ, Marabá, 2019. **Anais...** Marabá: UNIFESSPA, 2019.

_____ *et al.*, Avaliação de conforto e eficiência térmica em edifícios com ambientes de plantas: um relato de estudo experimental. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté, v. 17, n. 2, p. 365-380, 2021.

GALLO, P. Operation and testing for product innovation. **Eco-Architecture V.** [s. l.], v. 142, p. 373-384, 2014.

GARCÍA CHÁVEZ, J. R.; GIVONI, B.; VIVEROS, O. Potential of Indirect Evaporative Passive Cooling with Embedded Tubes in a Humid Tropical Climate Applications in a typical hot humid climate. In: 23th PLEA - CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. 2009, Quebec. **Anais...** Quebec: PLEA, 2009.

GARCÍA-GÁFARO, C. *et al.* Dynamical edge effect factor determination for building components thermal characterization under outdoor test conditions in a PASLINK test cell: A methodological proposal. **Energy and Buildings**, v. 210, 2020.

GICQUEL, R. The Project Passys. In: SOLAR ENERGY APPLICATIONS TO BUILDINGS AND SOLAR RADIATION DATA 1987, Brussels and Luxembourg. **Anais...** Brussels and Luxembourg: T. C. Steemers, 1987.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GONÇALVES, T. B. **Análise de desempenho térmico segundo a NBR 15.575/2013 em protótipos em Palmas-TO**: comparação entre a telha cerâmica e a telha de concreto. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020.

GONÇALVES, T. B; OLIVEIRA, M. C. A. de; OMENA, T. H. Comparações no desempenho térmico entre protótipos de telha cerâmica e telha de concreto em Palmas-TO. **Revista Sítio Novo**, Palmas, v. 6, n. edição especial, p.139-148, 2022.

GONZALEZ-CRUZ, E. M. *et al.*, Resultados preliminares do desempenho térmico de um sistema de resfriamento radiante capacitivo. In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TCENOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Porto Alegre, 2020. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020.

GONZÁLEZ-CRUZ, E.; GIVONI, B. Radiative and Radiative / Evaporative Passive Cooling Systems for a Hot Humid Climate – Maracaibo. In: 21th PLEA - CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE 2004, Eindhoven. **Anais...** Eindhoven: PLEA, 2004.

GONZÁLEZ-CRUZ, E. M.; GONZÁLEZ-GARCIA, S. I. Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estanque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo. **Ambiente Construído**, [s. l.], p. 149–171, 2013.

GONZALEZ-CRUZ, E. M; KRÜGER, E. L. Experimental study on a low energy radiante-capacitive heating and cooling system. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 255, p. 111674, 2022.

GONZALEZ, M. E. Q; HASELAGER, W. F. G; Raciocínio abduutivo, criatividade e auto-organização. **Cognitio: Revista de Filosofia**, São Paulo, n.3, p. 22-31, 2002.

GUTIERREZ, G. C. R; LABAKI, L. C. Avaliação de desempenho térmico de três tipologias de brise-soleil fixo. In: VIII ENCAC – ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005.

HITCHIN, R. Editorial. **Building and Environment**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 105–106, 1993.

HOMOUD, M. S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. **Building and Environment**, [s. l.], v. 40, p. 353-366, 2005.

JANSSENS, A; ROELS, S; VANDAELE, L. **Full scale test facilities for evaluation of energy and hygrothermal performances.** International DYNASTEE-INIVE workshop, Brussels, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **International Standard ISO 7726.** Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities, 1998.

_____. **International Standard ISO 7243.** Ergonomics of the thermal environment — Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index, 2017.

_____. **International Standard ISO 7730.** Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.

KAYANO K. T. Y. *et al.* Avaliação do comportamento térmico de cobertura e fachada verde em células de testes. **Revista de Arquitetura IMED**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 145, 2018a.

_____. *et al.* Cobertura e fachada verde: análise de episódio climático representativo de frio em células de teste. **Revista de Geografia – PPGeo – UFJF**. Juiz de Fora, v. 8, n.2, p. 89-100, 2018b.

KLEPEIS, N. E. *et al.* The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. **Journal of exposure analysis and environmental epidemiology**, v. 11, n. 3, p. 231–252, 2001.

KOMENO, M. H. **Avaliação do desempenho quanto aos aspectos da inércia térmica e pintura externa de test-cells de blocos de concreto com entulho nos furos:** estudo de caso realizado em Brasília. 218f. (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

KOMENO, M. H.; SPOSTO, R. M.; KRÜGER, E. L. Metodologia para avaliação de desempenho térmico de sistemas não-convencionais de paredes de vedação através de monitoramento em test-cells e simulação computacional. In: XI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006.

KRAMEL, C. **Inércia térmica para habitações unifamiliares nas diferentes regiões climáticas do Estado do Paraná.** 140f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civi) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

KRAMEL, C. *et al.* Amplitudes térmicas diárias no Estado do Paraná e Níveis de Inércia Térmica para habitações com baixo consumo energético. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 39, p. 497-517, 2022.

KRÜGER, E; ADRIAZOLA, M. K. O. Heat flux measurements and indoor temperatures in wood-based test cells. In: 25th PLEA – CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE 2008, Dublin. **Anais...** Dublin: PLEA, 2005.

_____. Thermal analysis of Wood-based test cells. **Construction and Building Materials**. [s. l.], v. 24, p. 999-1007, 2010.

KRÜGER, E. L. *et al.* O uso de protótipos experimentais de baixo custo para avaliação de materiais de vedações quanto ao seu desempenho térmico. In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS E X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2004.

_____ *et al.* Thermal analysis of wood-based panels: heat flux and indoor temperature measurements in test cells. **Construction and Buildings Materials**, [s. l.], v. 23, p. 2299-2305, 2009.

KRÜGER, et al.; Proposition of a simplified method for predicting hourly indoor temperatures in test cells. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 57-70, 2017.

_____ *et al.* Efeito de orientação de janela nas condições térmicas do ambiente e na percepção do usuário. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 79-98, 2020.

KRÜGER, E; FERNANDES, L; LANGE, S. Thermal performance of different configurations of a roof pond-based system for subtropical conditions. . **Building and Environment**, [s. l.], v. 107, p. 9-98, 2016.

KRÜGER, E.; GONZÁLEZ CRUZ, E.; GIVONI, B. Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate. **Building and Environment**, [s. l.], v. 45, p. 1422–1433, 2010.

KRÜGER, E. L.; SUETAKE, G. Y.; ADRIAZOLA, M. K. O. Comparação do desempenho térmico de coberturas manta reflexiva e placas de EPS. In: XI ENTAC - ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006.

KRÜGER, E; SUZUKI, E; MATOSKI, A. Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 66, p. 364-372, 2013.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEEE). **Desempenho térmico de edificações**. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://labeeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161_v2016.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2022

LAMBERTS, R; XAVIER, A. A. de P. **Conforto térmico e stress térmico**. Florianópolis: LABEEEE: 2002. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4435477/mod_resource/content/1/apostila%20conforto.pdf>. Acesso em: 05 out. 2022.

LAMBERTS, R. *et al.* **Conforto e stress térmico**. Florianópolis: LABEEE: 2013. Disponível em: <[http:// www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Conforto Térmico 2013_0.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Conforto_Termico_2013_0.pdf)>. Acesso em: 28 nov. 2022.

LAMBERTS, R. *et al.* **A nova proposta de norma brasileira de conforto térmico**. Florianópolis: LABEEE: 2016. Disponível em: <www.labeee.ufsc.br>. Acesso em: 28 nov. 2022

LANGE, S. C. **Avaliação de um sistema de resfriamento passivo para o clima de Curitiba**. 88f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

LEITNER, D. S. **Avaliação de desempenho em edificação de interesse social em *light wood frame***: estudo de caso na região metropolitana de Curitiba com avaliação pré-ocupação do desempenho térmico, acústico, lumínico e qualidade do ar. 165 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

LEONARDO, H. R. De A. L. **Desempenho de telhados ecológicos em área urbana**. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro De Tecnologia E Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 2021.

LEÓN-RODRÍGUEZ, A. L. *et al.* Design and performance of test cells as an energy evaluation model of facades in a Mediterranean building area. **Energies**, [s. l.], v. 10, n. 11, 2017.

LITTLER, J. Test cells: do we need them? **Building and Environment**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 221-228, 1993.

LOPES, T. V. **Influência de espécies herbáceas no escoamento pluvial e temperaturas superficiais em protótipos de telhados verdes na cidade de Curitiba**. 142 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

MAGALHÃES, R. J. **Desempenho térmico de telhas**: um estudo comparativo entre telhas ecológicas e telhas fibrocimento. 53f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2018.

MARCOLINI, M; ALMEIDA, R; BARREIRA, E. Avaliação do efeito de diferentes técnicas de resfriamento passivo no conforto térmico utilizando células de teste em Palmas-TO. In: XVI ENCONTRO NACIONAL E XII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2021, Palmas. **Anais...** Palmas: ANTAC, 2021.

MARTÍNEZ, *et al.* Energy characterization of a PASLINK test cell with a gravel covered roof using a novel methodology: sensitivity analysis and Bayesian calibration. **Journal**

of **Building Engineering**, [s. l.], v. 22, p. 1-11, 2019.

MARTINS, M. C. **O tratamento da resistência térmica superficial nas normas técnicas brasileiras e seu impacto no consumo energético estimado para edifícios**. 111 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

MASIERO, E. *et al.*, Estudo experimental de condicionamento ambiental com resfriamento evaporativo direto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, b=n.2, p. 151-173, 2020.

MASIERO, E; VECCHIA, F. Resfriamento evaporativo e condicionamento de ar convencional: estudo experimental comparativo para a obtenção do conforto humano. In: XI ENTAC – ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006.

MIANA, A. C. **Avaliação do desempenho térmico de brises transparentes: ensaios em células-teste**. 200f. Dissertação. (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MILES, M. B; HUBERMAN, A. M. An Expanded Sourcebook: **Qualitative Data Analysis**. 2 ed. Sage Publications, 1994.

MICHELATO, R. **Avaliação do desempenho térmico de vidros refletivos: estudo de caso em células-teste**. 226f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE. **Ventilação natural + inércia térmica para resfriamento**, 2005. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/projeteee/estrategia/ventilacao-natural-inercia-termica-para-resfriamento/#:~:text=A%20in%C3%A9rcia%20t%C3%A9rmica%20total%20da,de%20absorver%20e%20armazenar%20calor>>. Acesso em: 15 de jun. 2022.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). Notícias. **Dados revisados do déficit habitacional e inadequação de moradias nortearão políticas públicas**, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/dados-revisados-do-deficit-habitacional-e-inadequacao-de-moradias-nortearao-politicas-publicas>>. Acesso em: 26 jun. 2022.

MISAKA, B. L. S. **Avaliação do conforto térmico entre os sistemas de telhado verde, ecológico e convencional**. 87f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2021.

MOLINA, J. O; HORN, M. J; GÓMEZ, M. M. Design of a “Test Cell” to be located at 4500 masl in a high Andean region of Peru and dynamic simulation of the thermal performance of housing wall materials. **Journal of Physics Conference Series**, 2019.

MORELLI, D. D. de O. **Paredes verde: vegetação como qualidade ambiental no espaço construído**. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

MORELLI, D. D. de O; LABAKI, L. C. The use of creeper in building envelopes as bioclimatic strategy for social housing. In: PLEA – CONFERENCE ON PASSIVE LOW ENERGY ARCHITECTURE, Bologna, 2015. **Anais...** Bologna: PLEA, 2015.

NEVES, L. de O; RORIZ, M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 177-192, 2012.

NOVUS. **FieldLogger**. Disponível em: <<https://www.novus.com.br>>. Acesso em: 28 nov. 2022.

PARANÁ. **Resolução SESA nº 318**, de 31 de julho de 2002. Estabelece exigências sanitárias para instituições de ensino fundamental, médio e superior, bem como cursos livres no Estado do Paraná. Disponível em: <<https://www.saude.pr.gov.br/Pagina/Resolucoes>>. Acesso em: 25 out. 2022.

_____. **Resolução SESA nº 107**, de 06 de março de 2018. Estabelece os requisitos mínimos de Boas Práticas e condições sanitárias para a instalação e funcionamento das Instituições de Ensino Fundamental, Médio, Profissionalizante e Superior no Estado do Paraná. Disponível em: <<https://www.saude.pr.gov.br/Pagina/Resolucoes>>. Acesso em: 25 out.

PELSMAKERS, S. L. J. **Pre-1919 suspended timber ground floors in the UK: estimating in-situ U-values and heat loss reduction potential of interventions**. Thesis - UCL Energy Institute, University College London. London, 2016.

PERALTA, G. **Desempenho térmico de telhas: análise de monitoramento e normatização específica**. 131f. Dissertação. (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

PEREIRA, C. D. **A influência do envelope no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ocupadas e ventiladas naturalmente**. 141f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PEREIRA, C. D; SIQUEIRA, W. F. **Desempenho térmico de coberturas de fibrocimento em estado natural e submetidas a pintura de cor branca**. 85f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Unievangélica, Anápolis, 2019.

PFLUGER, R.; HAHNE, E. Improvements on PASSYS test cells. **Solar Energy**, [s. l.], v. 58, n. 4, p. 239–246, 1996.

PONS, V. **Estudo do potencial dos materiais com mudança de fase para redução do consumo de energia na manutenção do conforto térmico no ambiente construído**. 113 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

PREFEITURA DE CURITIBA. Portaria nº 80/2013. **Caderno de anexos - regulamento de edificações**. Disponível em: <<https://mid.curitiba.pr.gov.br/2013/00134264.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2020.

ROBSON, C. **Real World Research**: a resource for social scientists and practitioner-researchers. 2. ed. Blackwell Publishing, 2002.

ROCHA, R. S. T. M. **Desempenho térmico de telhado verde ecológico de baixo custo em clima semiárido**. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.

RODRIGUES, M. G. **Simulação numérica do desempenho térmico de alvenaria construída com blocos de concreto**. 97f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Projeto e Cidade, Universidade Federal de Goiás, 2022.

SANTOS, A. dos. **Seleção do método de pesquisa**: guia para pós-graduandos em design e áreas afins. Curitiba: Insight, 2018.

SAVI, A. C. **Telhados verdes: uma análise da influência das espécies vegetais no seu desempenho na cidade de Curitiba**. 200f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SHIBATA, *et al.* Avaliação Pós-Ocupação da Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBCB). In: XV ENCONTRO NACIONAL E XI ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUIDO, João Pessoa, 2019. **Anais...** João Pessoa: ANTAC, 2019.

_____ *et al.* Avaliação pelo usuário de uma câmara climática: foco em aspectos de conforto ambiental. In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUIDO, Porto Alegre, 2020. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC: 2020.

SEIXAS, G. T. C. de. **Climatologia aplicada à arquitetura**: investigação experimental sobre a distribuição de temperaturas internas em duas células de teste. 126f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SILVA, W. S. **Desempenho do sistema de telhado verde como estratégia de condicionamento térmico passivo no semiárido alagoano**. 208 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, 2020.

SILVA, W. S; BARBOSA, R. V. R. Comportamento térmico de telhado verde nas estações úmida e seca em clima tropical. In: XVI ENCINTRI NACIONAL E XII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2021, Palmas. **Anais...** Palmas: ANTAC, 2021.

SILVA, W. S; BARBOSA, R. V. R; BATISTA, J. O. Desempenho térmico de sistema de cobertura vegetada na região do semiárido alagoano. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba v. 6, n. 12, p.103449-103466, 2020.

SILVA, W. S; VIEIRA, C. E; BARBOSA, R. V. R. Análise de desempenho térmico de cobertura com sistema de teto verde no semiárido alagoano. In: XV ENCONTRO NACIONAL E XI ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, João Pessoa, 2019. **Anais...** João Pessoa: ANTAC, 2019.

SILVA, Y. V. **Estudo do potencial de redução do consumo de energia para manter o conforto térmico no ambiente construído através da tecnologia de resfriamento evaporativo.** 175 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SOUZA, L. C. O; SOUZA, H. A; RODRIGUES, E. F. Experimental and numerical anlysis of a naturally ventilated double-skin façade. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 165, p. 328-339, 2018.

SPOSTO, R. R; KOMENO, M. H; KRÜGER, E. L. Viabilidade energético-econômica de habitações de interesse social em Brasília com uso de blocos de concreto e entulho. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 3, p.519-524, 2007.

STILPEN, D. V. de S. **Eficiência Energética e Arquitetura Bioclimática - O Caso do Centro de Energia e Tecnologias Sustentáveis.** 2007. [s. l.], 2007.

STRACHAN, P. A. Simulation support for performance assessment of building components. **Building and Environment**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 228-236, 2008.

STRACHAN, P. A; BAKER, P. H. Editorial - Outdoor testing, analysis and modelling of building components. **Building and Environment**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 127–128, 2008.

STRACHAN, P. a.; VANDAELE, L. Case studies of outdoor testing and analysis of building components. **Building and Environment**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 129–142, 2008..

SUZUKI, E. V. **Avaliação do potencial de aquecimento/resfriamento de um sistema de climatização passiva.** 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

TECVERDE. **Sistema construtivo.** Disponível em: <<https://www.tecverde.com.br/sistema-construtivo/>>. Acesso em: 28 nov. 2022.

TEXEIRA, C. F. B. **Comportamento térmico de coberturas de fibrocimento em Campinas, SP**: aplicação de técnicas passivas. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Campinas, Campinas, 2006.

TEXEIRA, C. F. B; LABAKI, L. C. Resfriamento evaporativo em coberturas: estudo de caso em Campinas-SP. In: XI ENTAC – ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006.

TEIXEIRA, P. D. E. C. **Qualidade da água drenada por coberturas verdes para fins de aproveitamento em edifícios**. 2013. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, [s. l.], 2013.

THERMAL and visual performance of reflective window films and reflective glass. In: PLEA – CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 2015, Bologna. **Anais...** Bologna: PLEA, 2015.

TRENTO, T. P. W. *et al.* Efeito da orientação de aberturas em ambientes na satisfação e percepção da iluminação em humanos. In: XV ENCONTRO NACIONAL E XI ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, João Pessoa, 2019. **Anais...** João Pessoa: ANTAC, 2019.

TREVISAN, L. Y. I. **Concepção, construção e verificação da aplicabilidade de uma câmara bioclimática de baixo custo em estudos de conforto ambiental**. 210f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

TREVISAN, *et al.* Avaliação Pós-Ocupação de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo: a percepção térmica e acústica no diagnóstico de um ambiente construído. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 20, p. 285-303, 2020.

TONIETTO, T. L. **Telhado verde e telhado frio e suas contribuições para a redução da temperatura ambiente em construções na cidade de Cascavel no oeste do Estado do Paraná**. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste, 2021.

VECCHIA, F. Estudo comparativo do comportamento térmico de quatro sistemas de cobertura. Um estudo experimental para reação frente ao calor. **Revista Construção Metálica**, [s. l.], p.21-24, 2011.

WOUTER, P. *et al.* The use of outdoor test cells for thermal and solar building research within the PASSYS Project. **Building and Environment**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 107-113, 1993.

XAVIER, J. R. **Análise de desempenho termo acústico de telhas em Barreiras – Bahia**. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) Centro

Universitário Regional do Brasil, 2021.

YIN, R. K. **Estudo de caso – planejamento e métodos**. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZANELLA, K; FOIATO, M; CARELLI, J. M. **Avaliação do desempenho térmico de coberturas com a substituição de manta térmica por embalagens Tetra Pak**. Conhecimento e Construção, Joaçaba, v. 9, p. 53-74, 2022.

ANEXO A

QUADRO A – Quadro síntese das pesquisas brasileiras com células-teste

AUTORES	TÍTULO	TAMANHO	ELEMENTO TESTADO	ASPECTOS FÍSICOS	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
Krüger et al. (2004)	O uso de protótipos experimentais de baixo custo para avaliação de materiais de vedação quanto ao seu desempenho térmico	P	Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico com seis furos, bloco de concreto e bloco de concreto celular autoclavado, todos sem revestimento e com cobertura em telha de fibrocimento; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00 m ³ .	Comparação do desempenho térmico do material de vedação de três células-teste durante o inverno a partir do monitoramento da temperatura, da umidade interna e das condições ambientais.
Gutierrez e Labaki (2005)	Avaliação de desempenho térmico de três tipologias de brise-soleil fixo	G	Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço sem revestimento com pintura branca, laje pré-moldada (cerâmico e concreto) e telha fibro-vegetal; Área: 5,00m ² ; Volume: 12,00m ³ .	Avaliação do desempenho térmico de brises horizontais, verticais e combinados posicionados na abertura de seis células-teste, a partir da medição das variáveis ambientais, das temperaturas internas do ar e das temperaturas superficiais.
Komeno (2005)	Avaliação do desempenho quanto aos aspectos da inércia térmica e pintura externa de <i>test-cells</i> de blocos de concreto com entulho nos furos: estudo de caso realizado em Brasília	P	Vedação	Materiais construtivos: bloco de concreto com largura de 9cm e 13cm, com e sem preenchimento de entulho, como e sem revestimento, com cobertura por telha de fibrocimento sobre uma manta de lã de vidro; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00m ³ .	Avaliação da influência do preenchimento de blocos de concreto com entulho e da pintura de cor cinza ou branca, no desempenho térmico de três células-teste. Monitoramento da temperatura e umidade interna e comparação com dados climáticos disponibilizados pelo INMET. Transposição dos dados medidos para a simulação computacional de habitações de interesse social com as mesmas características construtivas das células-teste.
Miana (2005)	Avaliação do desempenho térmico de brises transparentes: ensaios em células-teste	G	Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço sem revestimento com pintura branca, laje pré-moldada (cerâmico e concreto) e telha fibro-vegetal; Área: 5,00m ² ; Volume: 12,00m ³ .	Comparação do desempenho térmico e lumínico de diferentes conjuntos de brise-soleil e vidros com características variáveis posicionados em aberturas de seis células-teste. Monitoramento das temperaturas internas e superficiais, e das condições ambientais.
Castro (2006)	Desempenho térmico de vidros utilizados na construção civil. Estudo em células-teste.	G	Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço sem revestimento com pintura branca, laje pré-moldada (cerâmico e concreto) e telha fibro-vegetal; Área: 5,00m ² ; Volume: 12,00m ³ .	Avaliação do desempenho térmico de quatorze tipos de vidros instalados na abertura de 1,00x1,20m de seis células-teste. Foram monitoradas as temperaturas externas, internas e superficiais. Os dados foram comparados com os ensaios espectrofotômetro realizados em laboratório (transmitância, absorvância e refletância) para análise do ganho de calor.

(CONTINUA)

(CONTINUAÇÃO)

AUTORES	TÍTULO	TAMANHO	ELEMENTO TESTADO	ASPECTOS FÍSICOS	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
Komono; Sposto; Krüger (2006)	Metodologia para avaliação de desempenho térmico de sistemas não-convencionais de paredes de vedação através de monitoramento em <i>test-cells</i> e simulação computacional	P	Vedação	Materiais construtivos: bloco de concreto com largura de 9cm e 13cm, com e sem preenchimento de entulho, como e sem revestimento, com cobertura por telha de fibrocimento sobre uma manta de lã de vidro; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00m ³ .	Avaliação da influência do preenchimento de blocos de concreto com entulho e da pintura de cor cinza ou branca, no desempenho térmico de três células-teste. Monitoramento da temperatura e umidade interna e comparação com dados climáticos disponibilizados pelo INMET. Transposição dos dados medidos para a simulação computacional de habitações de interesse social com as mesmas características construtivas das células-teste.
Krüger; Suetake; Adriazola. (2006)	Comparação do desempenho térmico de coberturas constituídas de embalagens Tetra Pak com manta reflexiva e placas de EPS	P	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com seis furos, bloco de concreto e bloco de concreto celular autoclavado, todos com revestimento em argamassa, e com cobertura de telha fibrocimento sobre diferentes tipos de isolamento térmico (<i>Tetra Pack</i> voltada para cima, <i>Tetra Pack</i> voltada para baixo, manta reflexiva tipo <i>foil</i> , placas de EPS); Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00 m ³ .	Comparação do desempenho térmico de quinze configurações de células-teste com e sem isolamento térmico sob a cobertura. Monitoramento das temperaturas internas e externas.
Masiero e Vecchia (2006)	Resfriamento evaporativo e condicionamento de ar convencional: estudo experimental comparativo para a obtenção do conforto humano	G	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço sem revestimento com pintura branca e cobertura por telha de fibrocimento. Área: 5,00m ² ; Volume: 12,00m ³ .	Comparação do desempenho térmico de duas células-teste dotadas de sistemas de resfriamento (ativo e evaporativo) com uma célula controle. Monitoramento das condições ambientais internas por estação meteorológica e do consumo de energia do climatizador de ar.
Peralta (2006)	Desempenho térmico e telhas: análise de monitoramento e normalização específica	G	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço, sem revestimento, com pintura branca e cobertura variável; Área: 4,18m ² ; Volume: 10,03m ³ .	Monitoramento do desempenho térmico de quatro diferentes tipos de telhas instaladas em células-teste, com o monitoramento das condições ambientais, temperatura interna e superficiais. Análises laboratoriais da refletância das telhas utilizadas e comparação dos resultados com a norma NBR 15220:2005.
Teixeira (2006)	Comportamento térmico de coberturas de fibrocimento em Campinas, SP: aplicação de técnicas passivas	G	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço sem revestimento com pintura branca, laje pré-moldada (cerâmico e concreto) e telha fibro-vegetal; Área: 5,00m ² ; Volume: 12,00m ³ .	Comparação do desempenho térmico de três células de teste dotadas de sistemas de resfriamento passivo (evaporativo, radiante e reflexivo) com uma célula controle sem nenhum sistema de resfriamento. Monitoramento das temperaturas superficiais das telhas, áticos, lajes e da temperatura do ar interno e condições ambientais.

(CONTINUAÇÃO)

AUTORES	TÍTULO	TAMANHO	ELEMENTO TESTADO	ASPECTOS FÍSICOS	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
Teixeira e Labaki (2006)	Resfriamento evaporativo em coberturas: estudo de caso em Campinas-SP	G	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço sem revestimento com pintura branca, laje pré-moldada (cerâmico e concreto) e telha fibro-vegetal; Área: 5,00m ² ; Volume: 12,00m ³ .	Comparação do desempenho térmico da célula de teste com aspersão de água sobre a cobertura em relação do desempenho da célula de controle sem a aspersão. Monitoramento das temperaturas superficiais das telhas, da temperatura do ar interno e das condições ambientais.
Castro <i>et al.</i> (2007)	Estudo do ganho de calor em vidros planos e refletivos através de células-teste	G	Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço sem revestimento com pintura branca, laje pré-moldada (cerâmico e concreto) e telha fibro-vegetal; Área: 5,00m ² ; Volume: 12,00m ³ .	Avaliação do desempenho térmico de sete tipos de vidros instalados na abertura de 1,00x1,20m de seis células-teste. Foram monitoradas as temperaturas externas, internas e superficiais, além de utilizar dados de ensaios espectrofotômetro realizados anteriormente para o cálculo do ganho de calor.
Michelato (2007)	Avaliação do desempenho térmico de vidros refletivos: estudo de caso em células-teste	G	Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço sem revestimento com pintura branca, laje pré-moldada (cerâmico e concreto) e telha fibro-vegetal; Área: 5,00m ² ; Volume: 12,00m ³ .	Avaliação do desempenho térmico de nove tipos de vidros instalados na abertura de 1,00x1,20m de seis células-teste. Foram monitoradas as temperaturas externas, internas e superficiais, além de utilizar dados de ensaios espectrofotômetro realizados anteriormente para o cálculo do ganho de calor.
Sposto; Komeno; Krüger (2007)	Viabilidade energético-econômica de habitações de interesse social em Brasília com uso de blocos de concreto e entulho	P	Vedação	Materiais construtivos: bloco de concreto com largura de 9cm e 13cm, com se sem preenchimento de entulho, como e sem revestimento, com cobertura por telha de fibrocimento sobre uma manta de lã de vidro; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00m ³ .	Avaliação da influência do preenchimento de blocos de concreto com entulho e da pintura de cor cinza ou branca, no desempenho térmico de três células-teste. Monitoramento da temperatura e umidade interna e comparação com dados climáticos disponibilizados pelo INMET. Transposição dos dados medidos para a simulação computacional de habitações de interesse social com as mesmas características construtivas das células-teste.
Krüger e Adriazola (2008)	<i>Heat flux measurements and indoor temperatures in wood-based test cells</i>	P	Vedação	Materiais construtivos: diferentes vedações compostas por painéis de madeira (madeira-cimento, painel wall, madeira compensada, madeira aglomerada, OSB, bloco cerâmico com furos), cobertura de fibrocimento e isolamento com Tetra Pak; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00 m ³ .	Avaliação desempenho térmico de cinco células-teste, com vedação por diferentes painéis de madeira, com a célula de controle em alvenaria de bloco cerâmico. Monitoramento da temperatura interna do ar, do fluxo de calor e da radiação solar.

(CONTINUAÇÃO)

AUTORES	TÍTULO	TAMANHO	ELEMENTO TESTADO	ASPECTOS FÍSICOS	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
Krüger <i>et al.</i> (2009)	<i>Thermal analysis of wood-cement panels: heat flux and indoor temperature measurements in test cells</i>	P	Vedação	Materiais construtivos: vedação com madeira-cimento ou loco cerâmico com furos, cobertura de fibrocimento e isolamento com Tetra Pak; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00 m ³ .	Caracterização das propriedades físicas e mecânicas e comparação do desempenho térmico de uma célula-teste com vedação por painel madeira-cimento com a célula de controle em alvenaria de bloco cerâmico. Monitoramento da temperatura interna do ar, do fluxo de calor e da radiação solar.
Morelli (2009)	Paredes verdes: vegetação como qualidade ambiental no espaço construído	P	Vedação	Materiais construtivos: vedação com bloco cerâmico maciço com revestimento e pintura branca e MDF com pintura branca, cobertura em concreto armado com pintura branca; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00m ³ .	Avaliação do desempenho térmico de dois edifícios com e sem parede verde, com monitoramento da temperatura interna do ar, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura superficial da parede interna e externamente. Estudo experimento do desempenho térmico de três células-teste sem vegetação, com vegetação sobre a parede e com vegetação com afastamento da parede, com monitoramento da temperatura interna do ar e temperaturas superficiais, além das condições ambientais.
Castro <i>et al.</i> (2010)	Análise do comportamento de vidros refletivos pirolíticos em relação às temperaturas superficiais através de medições em células-teste	G	Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço sem revestimento com pintura branca, laje pré-moldada (cerâmico e concreto) e telha fibro-vegetal; Área: 5,00m ² ; Volume: 12,00m ³ .	Avaliação do desempenho térmico de quatro tipos de vidros refletivos pirolíticos instalados separadamente nas fachadas norte e oeste de quatro células-teste. Foram monitoradas as temperaturas externas, internas e superficiais, além de utilizar dados de ensaios espectrofotômetro realizados anteriormente para o cálculo do ganho de calor.
Krüger e Adiazola (2010)	<i>Thermal analysis of wood-based test cells</i>	P	Vedação	Materiais construtivos: diferentes vedações compostas por painéis de madeira (madeira-cimento, painel wall, madeira compensada, madeira aglomerada, OSB, bloco cerâmico com furos), cobertura de fibrocimento e isolamento com Tetra Pak; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00 m ³ .	Caracterização das propriedades físicas e mecânicas e avaliação desempenho térmico de cinco células-teste, com vedação por diferentes painéis de madeira, com a célula de controle em alvenaria de bloco cerâmico. Monitoramento da temperatura interna do ar, do fluxo de calor e da radiação solar.
Cardoso <i>et al.</i> (2011)	Espuma rígida de poliuretano (PU) derivada de óleo vegetal (<i>Ricinus communis</i>) para isolamento térmico em sistemas de cobertura	G	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço, sem revestimento, com pintura branca e cobertura variável (telha fibrocimento, telha fibrocimento e forro de espuma PU, telha de fibro cimento e laje mista, telha fibrocimento laje mista e forro espuma PU); Área: 4,18m ² ; Volume: 10,03m ³ .	Caracterização das propriedades físicas e mecânicas da espuma PU derivada de óleo de mamona pelo Método do Fio Quente Paralelo e por Análise Termogravimétrica. Análise do comportamento térmico da espuma aplicada em três células-teste comparadas com uma célula de controle. Monitoramento das condições ambientais e das temperaturas superficiais.

(CONTINUAÇÃO)

AUTORES	TÍTULO	TAMANHO	ELEMENTO TESTADO	ASPECTOS FÍSICOS	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
Vecchia (2011)	Estudo comparativo do comportamento térmico de quatro sistemas de cobertura. Um estudo experimental para a reação frente ao calor.	G	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço, sem revestimento, com pintura branca e cobertura variável (aço galvanizado, fibrocimento, cerâmica e aço galvanizado com poliestireno); Área: 4,18m ² ; Volume: 10,03m ³ .	Estudo comparativo do comportamento do térmico de quatro sistemas de cobertura, com monitoramento da temperatura do ar interno e externo, e das temperaturas superficiais.
Neves e Roriz (2012)	Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura	G	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: célula-teste constituída por bloco cerâmico argamassado e com pintura branca com chaminé solar sobre a cobertura; Área: 4,32m ² ; Volume: 9,93m ³ .	Monitoramento de uma célula-teste para calibração de um modelo matemático e de simulação computacional. Análise comparativa da temperatura superficial, temperatura do ar e vazão volumétrica no interior da chaminé.
Suzuki (2012)	Avaliação do potencial de aquecimento/resfriamento de um sistema de climatização passiva	G	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: bloco de concreto vazado, piso e cobertura em concreto, parede trombe com vidro duplo e câmara de ar, parede posterior pintada de preto; Área: 2,62m ² ; Volume: 5,38m ³ .	Comparação do desempenho de duas células-teste com e sem parede trombe. Monitoramento durante o inverno e verão das condições ambientais e temperaturas internas e externas.
Krüger; Suzuki; Matoski (2013)	<i>Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location</i>	G	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: bloco de concreto vazado, piso e cobertura em concreto, parede trombe com vidro duplo e câmara de ar, parede posterior pintada de preto; Área: 2,62m ² ; Volume: 5,38m ³ .	Comparação do desempenho de duas células-teste com e sem parede trombe. Monitoramento durante o inverno e verão das condições ambientais e temperaturas internas e externas. Cálculo preditivo para outras condições climáticas.
Cardoso e Vecchia (2014)	<i>Comparison of thermal performance between test cells with different coverage systems for experimental typical day of heat in Brazilian Southeastern</i>	G	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço, sem revestimento, com pintura branca e cobertura variável (telha cerâmica e telhado verde leve); Área: 4,18m ² ; Volume: 10,03m ³ .	Comparação do desempenho térmico de dois sistemas de cobertura e avaliação da distribuição espacial e temporal das temperaturas no interior do edifício. Monitoramento das condições climáticas, temperatura interna do ar e temperaturas superficiais em quatorze pontos diferentes.
Andrade e Roriz (2015)	Comportamento Térmico de Cobertura Verde Utilizando a grama <i>Brachiaria Humidicola</i> na Cidade de São Carlos, SP	G	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico de 8 furos argamassado com pintura, bloco cerâmico vazado na face posterior, laje pré-moldada de concreto com e sem cobertura vegetal.	Análise do comportamento térmico de dois tipos de cobertura, sendo uma vegetada com uso da grama Braquiária e a outra com laje aparente. Monitoramento das temperaturas internas e externas do ar e temperaturas superficiais em períodos quente e frio. Comparação dos resultados com outros tipos de grama estudados em pesquisa anteriores.
Fernandes <i>et al.</i> (2015a)	Estimativa de temperaturas internas horárias de edificações a partir de temperaturas externas: proposta de método alternativo	P	Modelo matemático	Materiais construtivos: bloco de concreto celular autoclavado, cobertura com telha fibrocimento sobre manta de lã de vidro. Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00m ³ .	Desenvolvimento de um modelo matemático de equações preditivas para estimativa das temperaturas internas horárias. Emprego de dados coletados na pesquisa de Krüger <i>et al.</i> (2004) de temperatura interna e externa horárias. Comparação do modelo com outras duas metodologias.
Fernandes <i>et al.</i> (2015b)	Revisão de estudos baseados no uso de células teste no Brasil	N/A	N/A	N/A	Revisão bibliográfica de trabalhos que utilizam células-teste para ensaios ao ar livre na área de climatologia.

(CONTINUAÇÃO)

AUTORES	TÍTULO	TAMANHO	ELEMENTO TESTADO	ASPECTOS FÍSICOS	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
Morelli e Labaki (2015)	<i>The use of creeper in building envelopes as bioclimatic strategy for social housing</i>	G	Vedação e Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico argamassado com pintura branca, cobertura com telha fibro-vegetal; Área: 8,35m ² ; Volume: 23,62m ³ .	Comparação do desempenho térmico de três células-teste sem vegetação, com vegetação sobre a parede, e afastada da parede e da cobertura. Monitoramento da temperatura externa e interna do ar, velocidade do ar, umidade relativa e temperaturas superficiais.
Seixas (2015)	Climatologia aplicada à arquitetura: investigação experimental sobre a distribuição de temperaturas internas em duas células de teste	G	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço, sem revestimento, com pintura branca e cobertura variável (telha cerâmica e telhado verde leve); Área: 4,18m ² ; Volume: 10,03m ³ .	Comparação do desempenho térmico de dois sistemas de cobertura e avaliação da distribuição espacial e temporal das temperaturas no interior do edifício. Monitoramento das condições climáticas, temperatura interna do ar e temperaturas superficiais em quatorze pontos diferentes
Autor desconhecido (2015)	<i>Thermal and visual performance of reflective window films and reflective glass</i>	G	Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço sem revestimento com pintura branca, laje pré-moldada (cerâmico e concreto) e telha fibro-vegetal; Área: 5,00m ² ; Volume: 12,00m ³ .	Análise do desempenho térmico e lumínico de sete filmes e quatro tipos vidros aplicados na abertura de células-teste. Monitoramento das condições ambientais e temperaturas internas do ar e superficiais. Testes laboratoriais das amostras em espectrofotômetro.
Abreu-Harbach et al. (2016)	<i>How do green façades mitigate the thermal stress under heat waves?</i>	G	Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico argamassado com pintura branca, cobertura com telha fibro-vegetal; Área: 8,35m ² ; Volume: 23,62m ³ .	Comparação do desempenho térmico de células-teste com e sem fachada verde nas faces leste, norte e oeste. Transposição deste desempenho para uma aplicação no meio urbano por simulação. Monitoramento das condições externas e temperatura superficial a partir de imagens infravermelhas.
Krüger; Fernandes Lange (2016)	<i>Thermal performance of different configurations of a roof pond-based system for subtropical conditions</i>	P	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: painéis de madeira pintados de branco com isolamento interno de poliestireno; Área: 0,64 m ² ; Volume: 0,32m ³ .	Comparação do desempenho térmico de três configurações de célula-teste (sem cobertura, ventilado com e sem com cobertura) com a célula controle. Monitoramento da temperatura interna e condições ambientais.
Lange (2016)	Avaliação de um sistema de resfriamento passivo para o clima de Curitiba	P	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: compensado naval envernizado e pintado de branco com revestimento interno em poliestireno expandido; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00m ³ .	Comparação do desempenho térmico de três configurações de célula-teste (resfriamento evaporativo, massa térmica, e resfriamento evaporativo e massa térmica) com a célula de controle. Monitoramento da temperatura do ar interna e externa, interna e umidade relativa.
Brandão e Santos (2017)	Desempenho térmico de telhas: análise de monitoramento por células teste	M	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com seis furos, estrutura de madeira para suporte da cobertura e cobertura variável (ecológica Tetra Pak e fibrocimento); Área: 1,00 m ² ; Volume: 1,27m ³ .	Avaliação do desempenho de duas células-teste cobertas por telha ecológica Tetra Pak e fibrocimento. Verificação da temperatura e umidades internas e comparação com as condições externas ambientais disponibilizadas pelo INMET.

(CONTINUAÇÃO)

AUTORES	TÍTULO	TAMANHO	ELEMENTO TESTADO	ASPECTOS FÍSICOS	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
Fernandes e Krüger (2017)	<i>Thermal performance of a roof-pond system under subtropical conditions</i>	P	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: painéis de madeira pintados de branco com isolamento interno de poliestireno; Área: 0,64 m ² ; Volume: 0,28m ³ .	Comparação do desempenho térmico de quatro configurações de célula-teste (sem cobertura, ventilado com e sem com cobertura, com sombreamento durante o dia e coberto a noite) com a célula controle. Monitoramento da temperatura interna, externa e condições ambientais.
Fernandes Krüger; Rossi (2017)	Análise de desempenho térmico de células teste dotadas de teto reservatório em clima subtropical	P	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: compensado naval envernizado e pintado de branco com isolamento interno em poliestireno; Área: 0,80 m ² ; Volume: 0,40m ³ .	Comparação do desempenho térmico de cinco células-teste (massa térmica, resfriamento evaporativo descoberto, resfriamento evaporativo coberto, coletor solar e coletor solar sombreado) com a célula controle. Monitoramento das condições ambientais e da temperatura do ar interno.
Krüger et al. (2017)	<i>Proposition of a simplified method for predicting hourly indoor temperatures in test cells</i>	G	Modelo matemático	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço sem revestimento com pintura branca, laje pré-moldada (cerâmico e concreto) e telha fibro-vegetal; Área: 5,00m ² ; Volume: 12,00m ³ .	Desenvolvimento de um método para obtenção de estimativas horárias de temperatura do ar interno em células-teste a partir de dados experimentais. Monitoramento da temperatura do ar interno e externo.
Biasi (2018)	Estudo comparativo do desempenho térmico de células-teste enterrada e semienterrada na cidade de Curitiba-PR	P	Vedação	Materiais construtivos: compensado naval envernizado e pintado de branco, com isolamento interno em poliestireno. Área: 0,46 m ² ; Volume: 0,19m ³ .	Comparação do desempenho de três células-teste posicionadas na superfície, semienterrada ou enterrada. Monitoramento das temperaturas internas e superficiais das paredes, e das condições ambientais.
Fernandes (2018)	Experimentos de campo com teto-reservatório: desempenho térmico e percepção do usuário	P	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: compensado naval e isolamento interno em poliestireno; Área: 0,46 m ² ; Volume: 0,19m ³ .	Avaliação do desempenho térmico de diversas configurações de células-teste com teto-reservatórios voltados para o aquecimento solar, resfriamento evaporativo e redução das amplitudes térmicas diárias. Monitoramento das condições ambientais, temperaturas internas do ar, temperaturas superficiais e da água do reservatório.
Kayano et al. (2018a)	Avaliação do comportamento térmico de cobertura e fachada verde em células de testes	G	Cobertura e Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço, sem revestimento, com pintura branca e cobertura variável (telha cerâmica e telhado verde leve); Área: 4,18m ² ; Volume: 10,03m ³ .	Comparação do desempenho de uma célula-teste com telhado e fachada verde com a célula de controle com cobertura em telha cerâmica. Monitoramento das condições ambientais, da temperatura do ar interno e das temperaturas superficiais.
Kayano et al. (2018b)	Cobertura e fachada verde: análise de episódio climático representativo de frio em células teste	G	Cobertura e Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço, sem revestimento, com pintura branca e cobertura variável (telha cerâmica e telhado verde leve); Área: 4,18m ² ; Volume: 10,03m ³ .	Comparação do desempenho de uma célula-teste com telhado e fachada verde com a célula de controle com cobertura em telha cerâmica. Monitoramento das condições ambientais, da temperatura do ar interno e das temperaturas superficiais.

(CONTINUAÇÃO)

AUTORES	TÍTULO	TAMANHO	ELEMENTO TESTADO	ASPECTOS FÍSICOS	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
Magalhães (2018)	Desempenho térmico de telhas: um estudo comparativo entre telhas ecológicas e telhas de fibrocimento	M	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com seis furos, estrutura de madeira de suporte da cobertura e cobertura variável; Área: 1,00 m ² ; Volume: 1,13m ³ .	Avaliação comparativa de duas células-teste com coberturas distintas com telha ecológica (fabricada a partir de resíduo de embalagem Tetra Pak) e telha de fibrocimento. Monitoramento da temperatura interna do ar, superficial das telhas e do ar externo.
Souza; Souza, Rodrigues (2018)	<i>Experimental and numerical analysis of a naturally ventilated double-skin façade</i>	G	Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico argamassado e cobertura com telhas cerâmicas; Área: 8,00 m ² ; Volume: 26,40m ³ .	Experimento e análise numérica do desempenho-térmico de uma célula-teste com ventilação natural e fachada dupla. Monitoramento da temperatura externa e interna do ar, temperatura das superficiais e velocidade do ar.
Biasi e Krüger (2019)	Estudo do desempenho térmico de células-teste enterrada e semienterrada	P	Vedação	Materiais construtivos: bloco compensado naval envernizado e pintado de branco, com isolamento interno em poliestireno. Área: 0,46 m ² ; Volume: 0,19m ³ .	Comparação do desempenho térmico de três células-teste posicionadas na superfície, semienterrada ou enterrada. Monitoramento das temperaturas internas e superficiais das paredes, e das condições ambientais.
Gallardo et al. (2019)	Redução da amplitude térmica por meio de tecnologia verde: estudo de caso no inverno de São Carlos/SP	G	Cobertura e Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço, sem revestimento, com pintura branca e cobertura variável (telha cerâmica e telhado verde leve); Área: 4,18m ² ; Volume: 10,03m ³ .	Comparação do desempenho térmico de três células de teste (cobertura verde, fachada verde e cobertura e fachada verde) com a célula de controle (sem vegetação). Verificação das condições ambientais, temperatura interna do ar e temperaturas superficiais.
Pereira e Siqueira (2019)	Desempenho de coberturas de fibrocimento em estado natural e submetidas a pintura de cor branca	P	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com furos argamassado e pintado de branco, com cobertura em fibrocimento; Área: 0,60m ² ; Volume: 0,61m ³ .	Comparação do desempenho térmico de três células-teste com cobertura em fibrocimento (natural, com pintura branca e com pintura branca reflexiva); Monitoramento da temperatura do ar interno e externo.
Silva; Vieira; Barbosa (2019)	Análise de desempenho térmico de cobertura com sistema de teto verde no semiárido alagoano	P	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com furos argamassado pintado de branco, com cobertura variável; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,09m ³ .	Comparação do desempenho térmico de duas células-teste com coberturas distintas (telhado verde e telha cerâmica). Monitoramento da temperatura externa e interna do ar e das temperaturas superficiais com medições por câmara termográfica.
Cadete, Barbosa; Torres (2020)	Análise do desempenho térmico de coberturas e subcoberturas com materiais alternativos no contexto climático do semiárido alagoano	P	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com oito furos argamassado e pintado de branco, com cobertura variável; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,09m ³ .	Comparação do desempenho térmico de seis células-teste com coberturas distintas (telha cerâmica com e sem forro de PVC ou taboca, telão com e sem forro de PVC ou taboca). Monitoramento da temperatura do ar interno e superficiais e verificação das condições ambientais do INMET.

(CONTINUAÇÃO)

AUTORES	TÍTULO	TAMANHO	ELEMENTO TESTADO	ASPECTOS FÍSICOS	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
Di Núbila (2020)	Estudo comparativo do desempenho térmico de telhados verdes com diferentes materiais drenantes em Curitiba-PR	P	Cobertura	Materiais construtivos: compensado naval, com isolamento em poliestireno e impermeabilização, sistema de cobertura vegetal variável. Área: 0,12m ² ; Volume: 0,03m ³ .	Comparação do desempenho térmico de doze células-teste com diferentes configurações de cobertura vegetal variando a camada de drenagem (argila expandida, geomembrana com e sem armazenamento de água) e uma célula de controle. Monitoramento das condições ambientais, temperatura do ar interno, temperatura superficial interna, temperatura do substrato e registro fotográfico do crescimento vegetal.
Di Núbila <i>et al.</i> (2020)	Efeito da camada drenante no desempenho térmico de coberturas verdes em Curitiba-PR: estudo comparativo com células teste	P	Cobertura	Materiais construtivos: compensado naval, com isolamento em poliestireno e impermeabilização, sistema de cobertura vegetal variável. Área: 0,12m ² ; Volume: 0,03m ³ .	Comparação do desempenho térmico de quatro células-teste com diferentes configurações de cobertura vegetal variando a camada de drenagem (argila expandida, geomembrana com e sem armazenamento de água) e uma célula de controle. Monitoramento das condições ambientais, temperatura do ar interno, temperatura superficial interna, temperatura do substrato e registro fotográfico do crescimento vegetal.
Gonçalves (2020)	Análise de desempenho térmico segundo a NBR 15575/2013 em protótipos em Palmas/TO: comparação entre a telha cerâmica e a telha de concreto	M	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico de oito furos argamassado, estrutura metálica para cobertura e telhas variáveis; Área: 2,25; Volume: 3,51m ³ .	Avaliação do desempenho de duas células-teste com telhas distintas (cerâmica e de concreto). Monitoramento das condições ambientais e temperatura do ar interno.
Gonzales-Cruz <i>et al.</i> (2020)	Resultados preliminares do desempenho térmico de um sistema de resfriamento radiante capacitivo	P	Condicionamento Térmico	Materiais construtivos: compensado naval e isolamento interno em poliestireno, com cobertura variável. Área: 0,45 m ² ; Volume: 0,14m ³ .	Comparação do desempenho de uma célula-teste com teto projetado para o aquecimento/resfriamento radiante capacitivo, com a célula de controle. Monitoramento da temperatura interna e externa do ar.
Masiero <i>et al.</i> (2020)	Estudo experimental de condicionamento ambiental com resfriamento evaporativo direto	G	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço, sem revestimento, com pintura branca, laje mista e cobertura com telha de fibrocimento; Área: 4,18m ² ; Volume: 10,03m ³ .	Comparação do desempenho e um célula-teste dotada de um sistema de resfriamento evaporativo direto com a célula de controle sem nenhum sistema de condicionamento. Monitoramento das condições ambientais, da temperatura e umidade interna e do consumo de água e energia.
Rocha (2020)	Desempenho térmico de telhado verde ecológico de baixo custo em clima semiárido	M	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com furos, argamassado, com pintura branca e cobertura com laje mista; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,80m ³ .	Comparação do desempenho térmico de dois sistemas de cobertura (laje mista com e sem telhado verde ecológico). Monitoramento da temperatura interna do ar, temperaturas superficiais e condições ambientais do INMET.

(CONTINUAÇÃO)

AUTORES	TÍTULO	TAMANHO	ELEMENTO TESTADO	ASPECTOS FÍSICOS	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
Silva (2020)	Desempenho do sistema de telhado verde como estratégia de condicionamento térmico passivo no semiárido alagoano	P	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com seis furos argamassado e cobertura variável; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,09m ³ .	Avaliação do desempenho de oito sistemas de cobertura aplicados em células-teste (telha cerâmica, telha fibrocimento, laje impermeabilizada, laje impermeabilizada com solo nu, três sistemas de telhado verde com vegetação e um sem vegetação). Monitoramento da temperatura do ar interno e externo, e temperaturas superficiais internas e externas.
Silva; Barbosa; Batista (2020)	Desempenho térmico de sistema de cobertura vegetada na região do semiárido alagoano	P	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com seis furos argamassado e cobertura variável; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,09m ³ .	Avaliação do desempenho de cinco sistemas de cobertura aplicados em células-teste (telha cerâmica, telha fibrocimento, laje impermeabilizada, laje impermeabilizada com solo nu e telhado verde). Monitoramento da temperatura do ar interno e externo, temperaturas superficiais internas e externas e registro de imagens termográficas.
Ferrese (2021)	Conforto ambiental interno em edificações: a estratégia da parede trombe	M	Vedação	Materiais construtivos: tábuas de madeira envernizadas, cobertura com telha de fibrocimento, forro de madeira pinus. Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00m ³ .	Comparação do desempenho térmico de duas células-teste com e sem parede trombe. Monitoramento da temperatura interna e condições ambientais SIMEPAR.
Gallardo et al. (2021)	Avaliação de conforto e eficiência térmica em edifícios com ambientes de planta: um relato de estudo experimental	G	Cobertura e Vedação	Materiais construtivos: bloco cerâmico maciço, sem revestimento, com pintura branca, laje mista e cobertura variável; Área: 4,18m ² ; Volume: 10,03m ³ .	Comparação do desempenho térmico de três células-teste (cobertura verde, fachada verde e ambos) com a célula controle sem vegetação. Monitoramento das condições ambientais, temperatura interna do ar e temperatura superficial.
Leonardo (2021)	Desempenho de telhados ecológicos em área urbana	M	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com furos argamassado, laje pré-moldada impermeabilizada e cobertura variável; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,80m ³ .	Comparação do desempenho térmico de três células-teste com sistemas de cobertura distintos (laje impermeabilizada, telhado verde ecológico e telhado verde convencional). Monitoramento da temperatura e umidade internas e verificação das condições ambientais do INMET.
Marcolini; Almeida; Barreira (2021)	Avaliação do efeito de diferentes técnicas de resfriamento passivo no conforto térmico utilizando células de teste em Palmas-TO	G	Condicionamento térmico	Materiais construtivos: chapa de OSB, isolamento interno em lã de vidro, cobertura com telha termo acústica; Área: 5,76 m ² ; Volume: 13,82 m ³ .	Avaliação do desempenho de diferentes técnicas de resfriamento passivo (ventilação cruzada, pintura refletante, ventilação noturna e efeito chaminé) aplicados em uma célula-teste e comparados com a célula de controle. Monitoramento da temperatura e umidade interna, temperatura radiante e infiltração de ar, verificação das condições ambientais do INMET.
Misaka (2021)	Avaliação do conforto térmico entre os sistemas de telhado verde, ecológico e convencional	P	Cobertura	Materiais construtivos: Madeirite plastificado com cobertura variável; Área: 0,25m ² ; Volume: 0,125m ³ .	Comparação do desempenho térmico de três sistemas de cobertura (telhado verde, telha ecológica e telha fibrocimento). Monitoramento da temperatura interna, velocidade do vento e radiação solar.

(CONCLUSÃO)

AUTORES	TÍTULO	TAMANHO	ELEMENTO TESTADO	ASPECTOS FÍSICOS	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
Silva e Barbosa (2021)	Comportamento térmico de telhado verde nas estações úmida e seca em clima tropical	P	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com seis furos argamassado e cobertura variável; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,09m ³ .	Comparação do desempenho térmico de duas células-teste com sistema de cobertura diferentes (telhado verde e telha cerâmica). Monitoramento das temperaturas superficiais internas e externas, condições ambientais e registro de imagens termográficas.
Toonietto (2021)	Telhado verde e telhado frio e suas contribuições para a redução da temperatura ambiente em construções na cidade de Cascavel na região oeste do Estado do Paraná	P	Cobertura	Materiais construtivos: estrutura e fechamento em madeira pinus, cobertura variável; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00m ³ .	Comparação do desempenho térmico de três sistemas de cobertura (telha verde, telha fibrocimento e telha fibrocimento com pintura térmica branca). Monitoramento das temperaturas internas e externas do ar.
Xavier (2021)	Análise de desempenho termo acústico de telhas em Barreiras - Bahia	P	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com furos argamassado, estrutura da cobertura em madeira e cobertura variável; Área: 1,00m ² ; Volume: 1,00m ³ .	Avaliação do desempenho termo acústico de quatro modelos de telhas (cerâmica esmaltada, fibrocimento ondulada, termo acústica sanduíche e ecológica laminado termo Premium). Monitoramento das temperaturas internas e externas do ar.
Gonçalves Oliveira; Omena (2022)	Comparações no desempenho térmico entre protótipos de telha cerâmica e telha de concreto em Palmas	M	Cobertura	Materiais construtivos: bloco cerâmico com oito furos argamassado, estrutura metálica para a cobertura, e cobertura variável; Área: 2,25m ² ; Volume: 3,37m ³ .	Comparação do desempenho térmico de duas células-teste com coberturas distintas (telha cerâmica e telha de concreto). Monitoramento das condições climáticas, temperatura do ar interno e temperatura superficial.
Gonzalez-Cruz e Krüger (2022)	<i>Experimental study on a low energy radiant-capacitive heating and cooling system</i>	P	Condicionamento Térmico	Materiais construtivos: compensado naval e isolamento interno em poliestireno, com cobertura variável. Área: 0,45 m ² ; Volume: 0,14m ³ .	Comparação do desempenho de uma célula-teste com teto projetado para o aquecimento/resfriamento radiante capacitivo, com a célula de controle. Monitoramento da temperatura interna e externa do ar.
Rodrigues (2022)	Simulação numérica do desempenho térmico de alvenaria construída com blocos de concreto	G	Vedação	Materiais construtivos: bloco de concreto e laje treliçada; Área: 1,57m ² ; Volume: 3,88m ³ .	Desenvolvimento de um bloco de concreto aprimorado (DT 39), cálculo da transmitância e capacidade térmica, ensaio de compressão e simulação computacional no Energy Plus de três configurações aplicadas em células-teste.
Zanella; Foiato; Carelli (2022)	Avaliação do desempenho térmico de coberturas com a substituição de manta térmica por embalagens Tetra Pak	P	Cobertura	Materiais construtivos: estrutura e fechamento em madeira e cobertura variável; Área: 1,43 m ² ; Volume: 1,43m ³	Comparação do desempenho térmico de onze diferentes sistemas de cobertura, variando a configuração (colada, costurada, comercializada) e o posicionamento (a face de alumínio para baixo, para cima ou intercalado) da manta de isolamento com Tetra Pak, e o tipo de telha (fibrocimento e metálica). Monitoramento das temperaturas internas e externas.

Fonte: Autora (2022).

ANEXO B

TABELA B.1 – Dimensões mínimas dos dormitórios segundo a legislação municipal

UF	MUNICÍPIO	ÁREA MÍNIMA (m ²)	DIMENSÃO MÍNIMA (m)	DIMENSÃO CALCULADA (m)	PÉ-DIREITO MÍNIMO (m)	VOLUME RESULTANTE (m ³)
AC	Rio Branco	7,50	1,50	5,00	2,50	18,75
AL	Maceió	-	-	-	2,50	-
AP	Macapá	9,00	2,50	3,60	2,70	24,30
AM	Manaus	9,00	2,50	3,60	2,80	25,20
BA	Salvador	-	-	-	2,60	-
BA	Feira de Santana	-	-	-	2,50	-
BA	Vitória da Conquista	7,00	2,20	3,18	2,60	18,20
CE	Fortaleza	5,00	2,00	2,50	2,50	12,50
CE	Caucaia	5,00	2,00	2,50	2,50	12,50
CE	Caruaru	8,00	1,30	6,15	2,60	20,80
DF	Distrito Federal	8,00	2,40	3,33	2,50	20,00
ES	Vitória	7,50	2,00	3,75	2,60	19,50
ES	Cariacica	7,50	2,50	3,00	2,60	19,50
ES	Vila Velha	7,00	2,00	3,50	2,60	18,20
ES	Serra	9,00	2,50	3,60	2,70	24,30
GO	Goiânia	7,00	2,30	3,04	2,50	17,50
GO	Aparecida de Goiânia	9,00	2,50	3,60	2,50	22,50
GO	Anápolis	9,00	2,50	3,60	2,50	22,50
MA	São Luís	-	-	-	-	-
MG	Belo Horizonte	8,00	2,00	4,00	2,60	20,80
MG	Uberlândia	7,00	2,00	3,50	2,60	18,20
MG	Contagem	8,00	2,00	4,00	2,60	20,80
MG	Juiz de Fora	8,00	2,00	4,00	2,60	20,80
MG	Montes Claros	9,00	2,20	4,09	2,50	22,50
MG	Betim	-	-	-	2,60	-
MG	Ribeirão das Neves	6,00	2,00	3,00	2,70	16,20
MG	Uberaba	6,00	2,00	3,00	2,50	15,00
MG	Governador Valadares	6,00	2,20	2,73	2,60	15,60
MS	Campo Grande	6,00	2,00	3,00	2,50	15,00
MT	Cuiabá	-	-	-	2,60	-
MT	Várzea Grande	9,00	2,20	4,09	2,40	21,60
PA	Belém	-	-	-	2,80	-
PA	Ananindeua	8,00	2,00	4,00	2,50	20,00
PA	Santarém	7,00	-	-	2,60	18,20
PB	João Pessoa	8,00	2,60	3,08	2,60	20,80
PB	Campina Grande	9,00	2,00	4,50	2,50	22,50
PE	Recife	5,00	2,00	2,50	2,60	13,00
PE	Jaboatão dos Guararap.	7,00	2,00	3,50	2,30	16,10
PE	Olinda	8,00	2,40	3,33	2,60	20,80
PE	Paulista	-	-	-	-	-
PE	Petrolina	-	2,50	-	2,70	-
PI	Teresina	6,50	-	-	2,40	15,60
PR	Curitiba	6,00	2,00	3,00	2,40	14,40
PR	Londrina	6,00	2,00	3,00	2,60	15,60
PR	Maringá	-	-	-	-	-
PR	Ponta Grossa	9,00	2,70	3,33	2,50	22,50
PR	Cascavel	8,00	2,40	3,33	2,60	20,80
PR	São José dos Pinhais	7,50	2,50	3,00	2,40	18,00

(CONTINUA)

(CONCLUSÃO)

UF	MUNICÍPIO	ÁREA MÍNIMA (m ²)	DIMENSÃO MÍNIMA (m)	DIMENSÃO CALCULADA (m)	PÉ-DIREITO MÍNIMO (m)	VOLUME RESULTANTE (m ³)
PR	Foz do Iguaçu	4,00	1,60	2,50	2,50	10,00
RJ	Rio de Janeiro	-	-	-	2,50	-
RJ	São Gonçalo	-	-	-	2,50	-
RJ	Duque de Caxias	6,00	2,00	3,00	2,80	16,80
RJ	Nova Iguaçu	6,00	2,00	3,00	2,40	14,40
RJ	Niterói	8,00	2,00	4,00	2,50	20,00
RJ	Belfort Roxo	12,00	-	-	2,80	33,60
RJ	Campo dos Goytacazes	10,00	2,50	4,00	2,60	26,00
RJ	São João de Meriti	9,00	2,50	3,60	2,60	23,40
RJ	Petrópolis	9,00	1,00	9,00	2,60	23,40
RJ	Volta Redonda	12,00	3,00	4,00	2,60	31,20
RN	Natal	10,00	2,60	3,85	2,50	25,00
RN	Mossoró	7,30	2,50	2,92	2,50	18,25
RO	Porto Velho	10,00	2,00	5,00	2,80	28,00
RR	Boa Vista	8,00	2,00	4,00	2,70	21,60
RS	Porto Alegre	-	-	-	2,60	-
RS	Caxias do Sul	-	-	-	-	-
RS	Pelotas	-	2,70	-	2,50	-
RS	Canoas	-	-	-	2,60	-
RS	Santa Maria	-	-	-	2,60	-
RS	Gravataí	7,50	2,50	3,00	2,60	19,50
SC	Joinville	8,00	2,00	4,00	2,80	22,40
SC	Florianópolis	7,00	2,60	2,69	2,60	18,20
SC	Blumenau	-	-	-	-	-
SE	Aracajú	6,00	1,50	4,00	2,50	15,00
SP	São Paulo	5,00	2,00	2,50	2,50	12,50
SP	Guarulhos	4,00	2,00	2,00	2,50	10,00
SP	Campinas	5,00	2,00	2,50	2,50	12,50
SP	São Bernardo do Campo	-	-	-	-	-
SP	Santo André	-	2,00	-	2,40	-
SP	Osasco	7,00	-	-	2,70	18,90
SP	São José dos Campos	7,00	2,40	2,92	2,40	16,80
SP	Ribeirão Preto	8,00	2,50	3,20	2,70	21,60
SP	Sorocaba	6,00	2,00	3,00	2,50	15,00
SP	Santos	-	-	-	2,70	-
SP	São José do Rio Preto	12,00	-	-	2,70	32,40
SP	Mauá	-	-	-	2,50	-
SP	Mogi das Cruzes	12,00	2,40	5,00	2,60	31,20
SP	Diadema	5,00	1,80	2,78	2,50	12,50
SP	Jundiaí	-	-	-	-	-
SP	Carapicuíba	-	-	-	-	-
SP	Piracicaba	12,00	2,00	6,00	-	-
SP	Bauru	6,00	2,00	3,00	2,50	15,00
SP	São Vicente	12,00	2,00	6,00	2,70	32,40
SP	Itaquaquecetuba	9,00	2,00	4,50	2,60	23,40
SP	Franca	10,00	2,50	4,00	2,70	27,00
SP	Guarujá	-	-	-	-	-
SP	Taubaté	8,00	2,40	3,33	2,70	21,60
SP	Limeira	12,00	2,00	6,00	2,80	33,60
SP	Suzano	-	-	-	-	-
SP	Praia Grande	12,00	2,00	6,00	2,70	32,40
TO	Palmas	5,00	2,00	2,50	2,50	12,50

Fonte: Autora (2022).

TABELA B.2 – Aberturas mínimas dos dormitórios segundo a legislação municipal

UF	MUNICÍPIO	VENTILAÇÃO		ILUMINAÇÃO	
		RAZÃO EM RELAÇÃO À ÁREA DO PISO	ÁREA MÍNIMA CALCULADA (m ²)	RAZÃO EM RELAÇÃO À ÁREA DO PISO	ÁREA MÍNIMA CALCULADA (m ²)
AC	Rio Branco	1/8	0,94	1/8	0,94
AL	Maceió	-	-	-	-
AP	Macapá	1/7	1,26	1/5	1,80
AM	Manaus	1/5	1,80	1/5	1,80
BA	Salvador	1/10	-	1/10	-
BA	Feira de Santana	-	1,20	-	1,20
BA	Vitória da Conquista	1/10	0,70	1/10	0,70
CE	Fortaleza	1/6	0,84	1/6	0,84
CE	Caucaia	1/12	0,42	1/6	0,84
CE	Caruaru	-	-	-	-
DF	Distrito Federal	1/8	1,00	1/8	1,00
ES	Vitória	1/16	0,47	1/8	0,94
ES	Cariacica	-	0,60	-	-
ES	Vila Velha	1/6	1,17	1/6	1,17
ES	Serra	1/12	0,75	1/6	1,50
GO	Goiânia	1/7	1,00	1/7	1,00
GO	Aparecida de Goiânia	1/12	0,75	1/7	1,29
GO	Anápolis	1/7	1,29	1/7	1,29
MA	São Luís	-	-	-	-
MG	Belo Horizonte	1/6	1,34	1/6	1,34
MG	Uberlândia	1/12	0,58	1/6	1,17
MG	Contagem	1/6	1,34	1/6	1,34
MG	Juiz de Fora	1/6	1,34	1/6	1,34
MG	Montes Claros	1/8	1,13	1/8	1,13
MG	Betim	1/6	-	1/6	-
MG	Ribeirão das Neves	1/6	1,00	1/6	1,00
MG	Uberaba	1/6	1,00	1/6	1,00
MG	Governador Valadares	1/12	0,50	1/6	1,00
MS	Campo Grande	1/7	0,86	1/7	0,86
MT	Cuiabá	-	-	-	-
MT	Várzea Grande	1/12	0,75	1/6	1,50
PA	Belém	-	-	-	-
PA	Ananindeua	1/12	0,67	1/12	1,34
PA	Santarém	-	-	-	-
PB	João Pessoa	-	-	-	-
PB	Campina Grande	-	-	-	-
PE	Recife	-	1,20	-	1,20
PE	Jaboatão dos Guararap.	1/8	0,88	1/8	0,88
PE	Olinda	1/6	1,34	-	-
PE	Paulista	-	-	-	-
PE	Petrolina	-	-	-	-
PI	Teresina	1/6	1,09	1/6	1,09
PR	Curitiba	1/12	0,50	1/6	1,00
PR	Londrina	1/16	0,38	1/8	0,75
PR	Maringá	-	-	-	-
PR	Ponta Grossa	1/12	0,75	1/6	1,50
PR	Cascavel	1/12	0,67	1/6	1,34
PR	São José dos Pinhais	-	-	-	-
PR	Foz do Iguaçu	-	-	-	-

(CONTINUA)

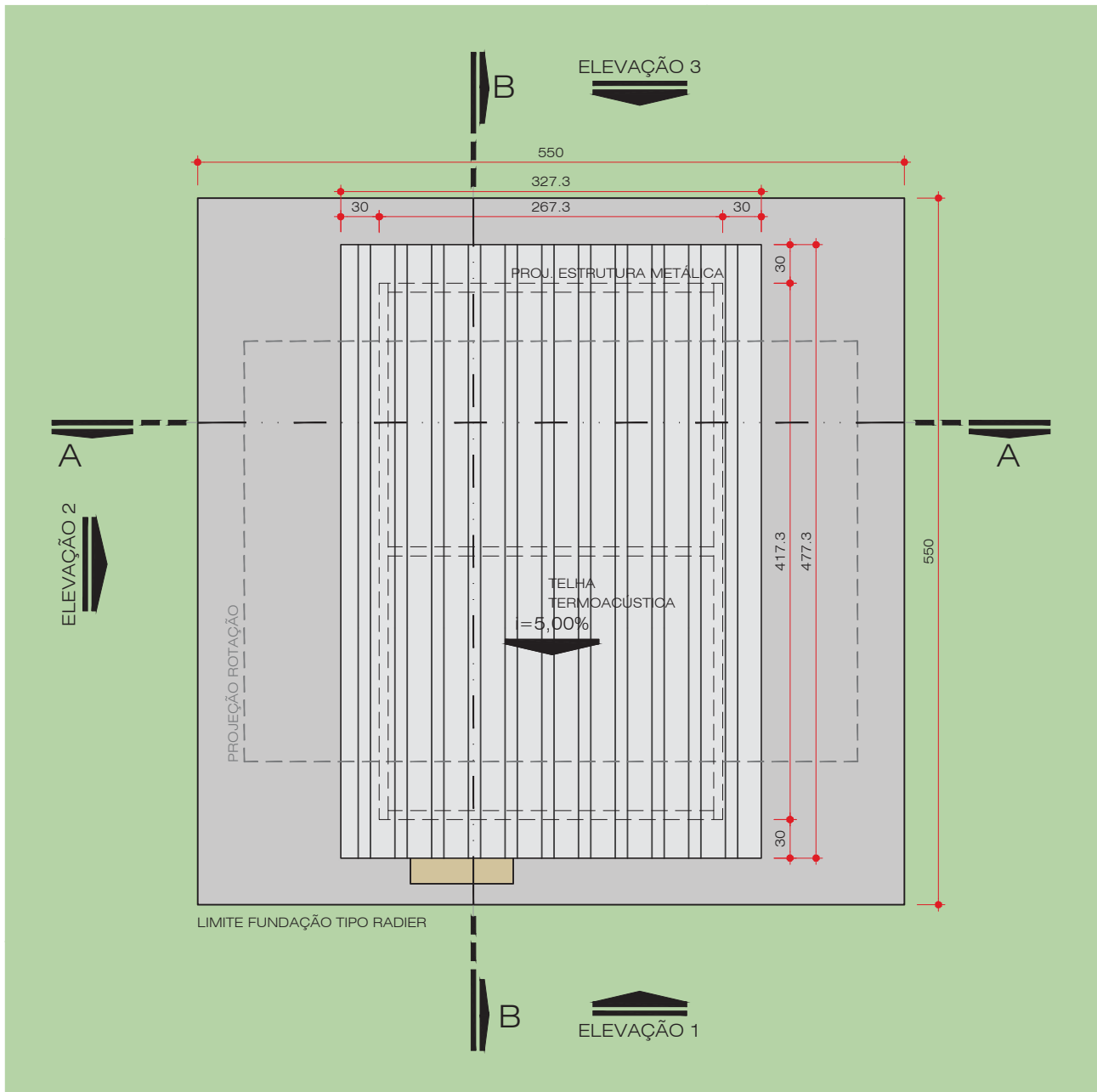
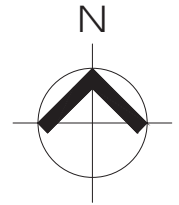
(CONCLUSÃO)

UF	MUNICÍPIO	VENTILAÇÃO		ILUMINAÇÃO	
		RAZÃO EM RELAÇÃO À ÁREA DO PISO	ÁREA MÍNIMA CALCULADA (m ²)	RAZÃO EM RELAÇÃO À ÁREA DO PISO	ÁREA MÍNIMA CALCULADA (m ²)
RJ	Rio de Janeiro	1/8	-	1/8	-
RJ	São Gonçalo	1/6	-	1/6	-
RJ	Duque de Caxias	1/6	1,00	1/6	1,00
RJ	Nova Iguaçu	1/6	1,00	1/6	1,00
RJ	Niterói	1/5	1,60	1/5	1,60
RJ	Belfort Roxo	1/6	2,00	1/6	2,00
RJ	Campo dos Goytacazes	1/6	1,67	1/6	1,67
RJ	São João de Meriti	1/6	1,50	1/6	1,50
RJ	Petrópolis	1/6	1,50	1,6	1,50
RJ	Volta Redonda	1/6	2,00	1/6	2,00
RN	Natal	1/6	1,67	1/6	1,67
RN	Mossoró	1/8	0,91	1/8	0,91
RO	Porto Velho	-	-	-	-
RR	Boa Vista	1/6	1,34	1/6	1,34
RS	Porto Alegre	1/12	-	1/6	-
RS	Caxias do Sul	-	-	1/7	-
RS	Pelotas	1/6	-	1/6	-
RS	Canoas	1/6	-	-	-
RS	Santa Maria	1/12	-	1/6	-
RS	Gravataí	1/6	1,25	1/6	1,25
SC	Joinville	1/5	1,60	1/5	1,60
SC	Florianópolis	1/6	1,17	1/6	1,17
SC	Blumenau	-	-	-	-
SE	Aracajú	-	-	1/6	1,00
SP	São Paulo	-	-	-	-
SP	Guarulhos	1/14	0,29	1/7	0,57
SP	Campinas	-	0,60	-	0,60
SP	São Bernardo do Campo	-	-	-	-
SP	Santo André	-	-	-	-
SP	Osasco	-	1,20	-	1,20
SP	São José dos Campos	1/16	0,44	1/8	0,88
SP	Ribeirão Preto	1/8	1,00	1/8	1,00
SP	Sorocaba	1/16	0,38	1/8	0,75
SP	Santos	-	-	-	-
SP	São José do Rio Preto	1/16	0,75	1/8	1,50
SP	Mauá	1/16	-	1/8	-
SP	Mogi das Cruzes	1/16	0,75	1/8	1,50
SP	Diadema	1/12	0,42	1/6	0,84
SP	Jundiaí	-	-	-	-
SP	Carapicuíba	-	-	-	-
SP	Piracicaba	-	-	-	-
SP	Bauru	-	-	-	-
SP	São Vicente	1/6	2,00	1/6	2,00
SP	Itaquaquecetuba	1/8	1,13	-	-
SP	Franca	1/6	1,67	1/6	1,67
SP	Guarujá	-	-	-	-
SP	Taubaté	-	-	-	-
SP	Limeira	1/8	1,50	1/8	1,50
SP	Suzano	-	-	-	-
SP	Praia Grande	1/16	0,75	1/8	1,50
TO	Palmas	-	-	-	-

Fonte: Autora (2022).

ANEXO C

Projeto arquitetônico da Célula-teste para Estudos de Campo - CTEC
(Pranchas 1 a 9)

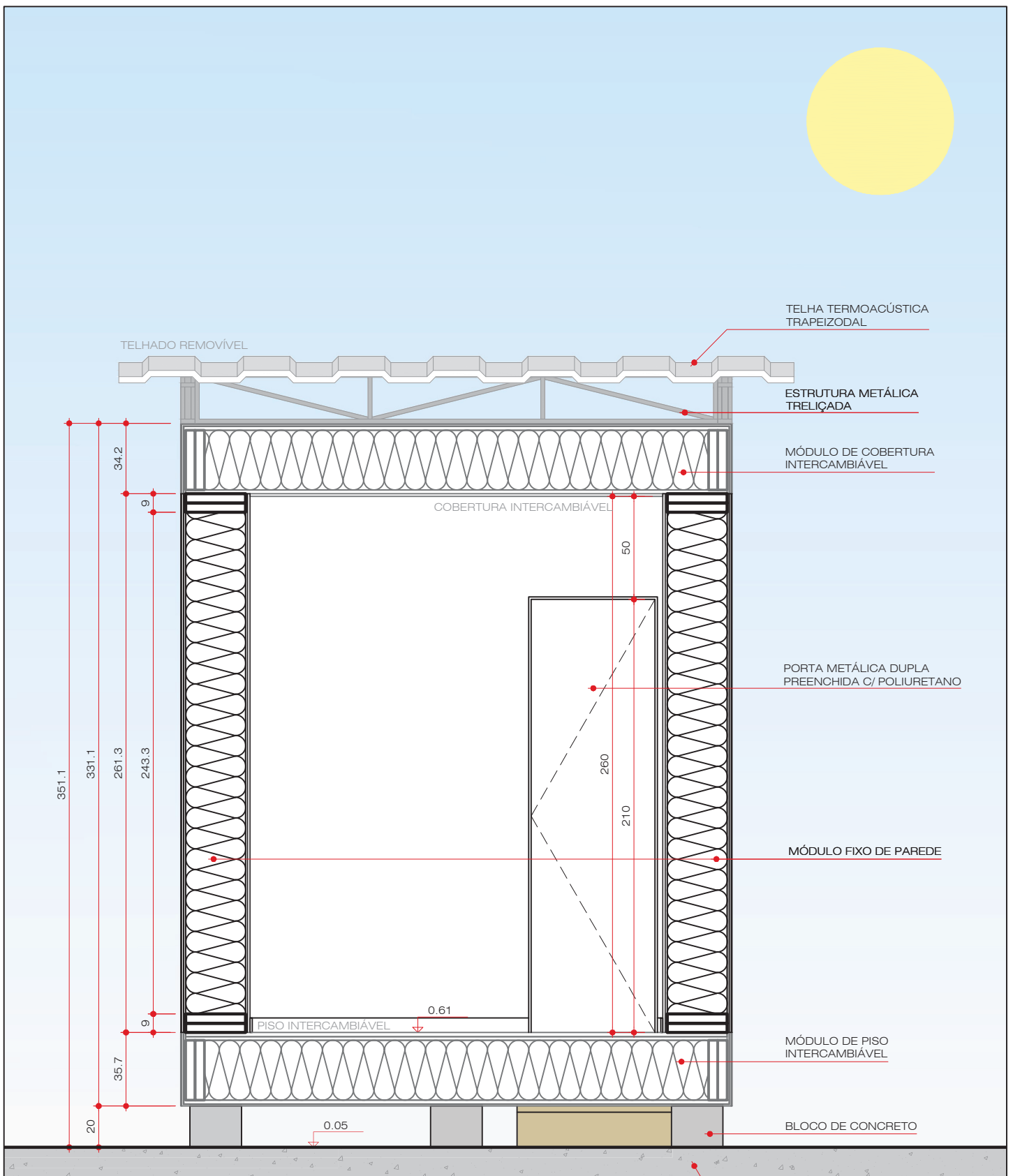


IMPLANTAÇÃO

ESCALA 1:50



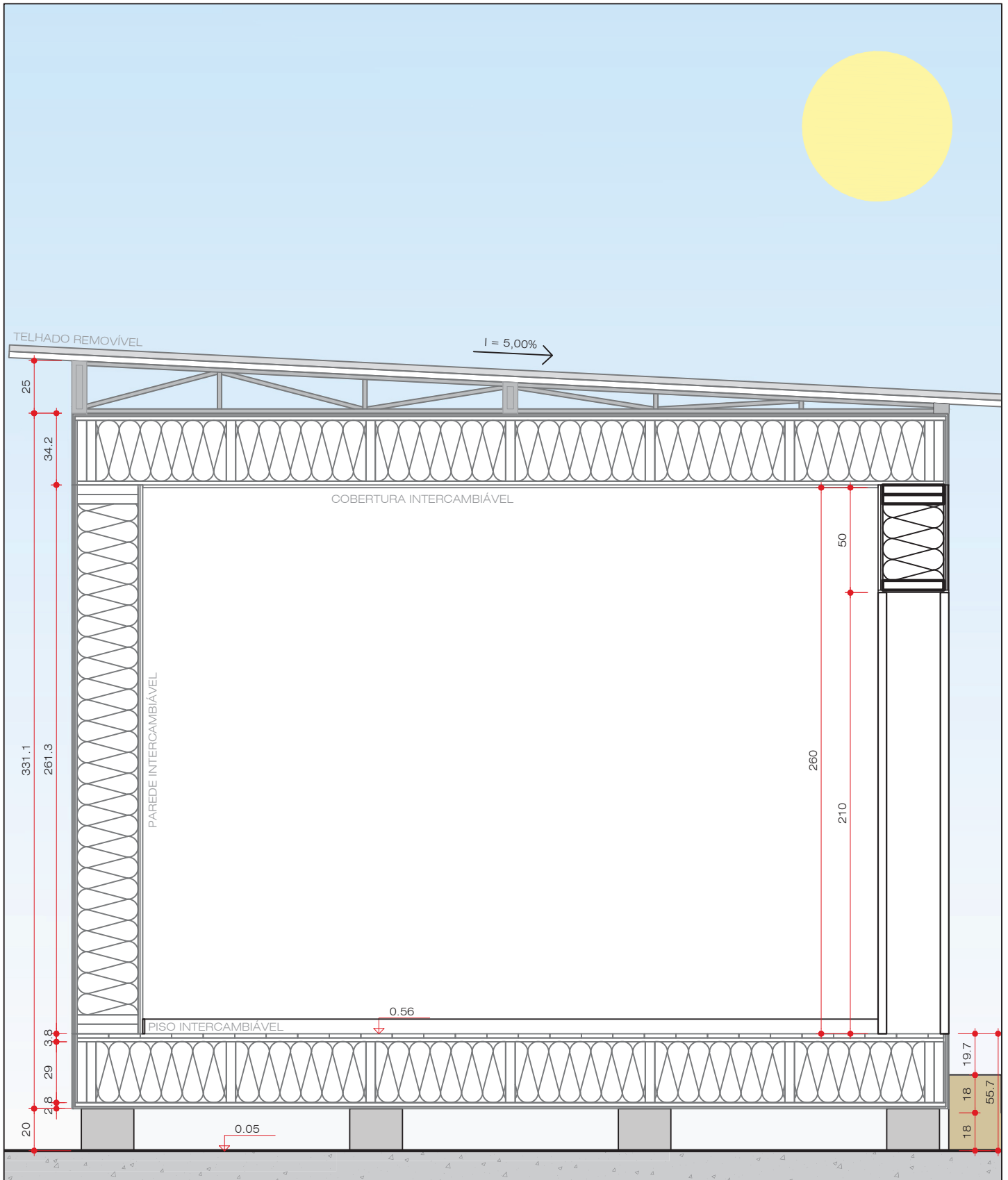
PROJETO	CÉLULA-TESTE PARA ESTUDOS DE CAMPO - CTEC	PROGRAMA	PPGEC / UFPR	PRANCHA 1/9
AUTORIA	GIOVANNA S. VERUSSA (MESTRANDA) E PROF. DR. LEANDRO C. FERNANDES (ORIENTADOR)	DATA	DEZ / 2022	
DESCRIÇÃO	IMPLANTAÇÃO	ESCALA	1:50	



CORTE AA
ESCALA 1:25



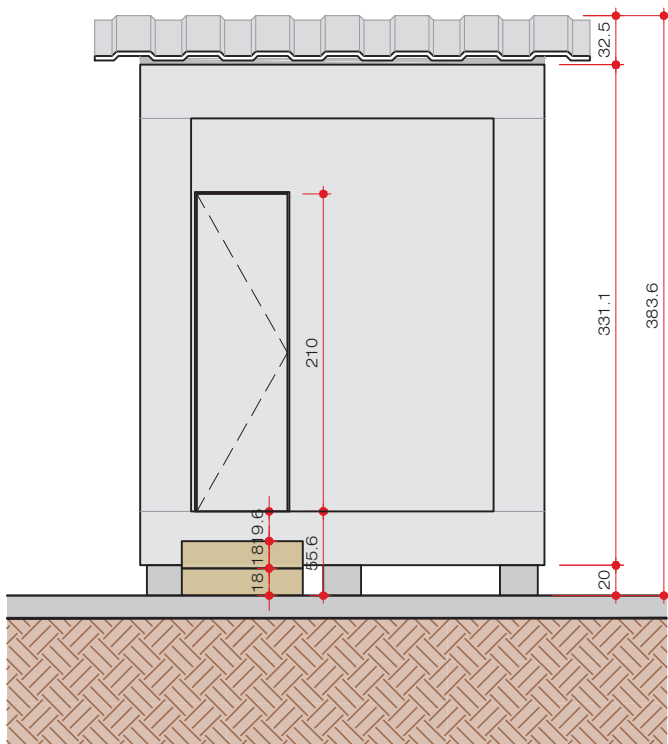
PROJETO	CÉLULA-TESTE PARA ESTUDOS DE CAMPO - CTEC	PROGRAMA	PPGEC / UFPR	PRANCHA 3/9
AUTORIA	GIOVANNA S. VERUSSA (MESTRANDA) E PROF. LEANDRO C. FERNANDES (ORIENTADOR)	DATA	DEZ / 2022	
DESCRIÇÃO	CORTE AA	ESCALA	1:25	



CORTE BB
ESCALA 1:25

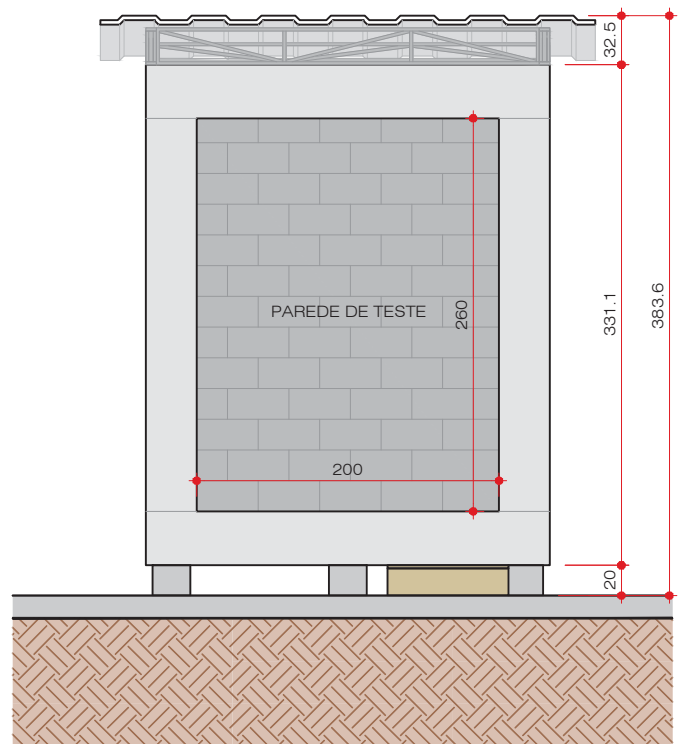


PROJETO CÉLULA-TESTE PARA ESTUDOS DE CAMPO - CTEC	PROGRAMA PPGEC / UFPR	PRANCHA 4/9
AUTORIA GIOVANNA S. VERUSSA (MESTRANDA) E PROF. LEANDRO C. FERNANDES (ORIENTADOR)	DATA DEZ / 2022	
DESCRIÇÃO CORTE BB	ESCALA 1:25	



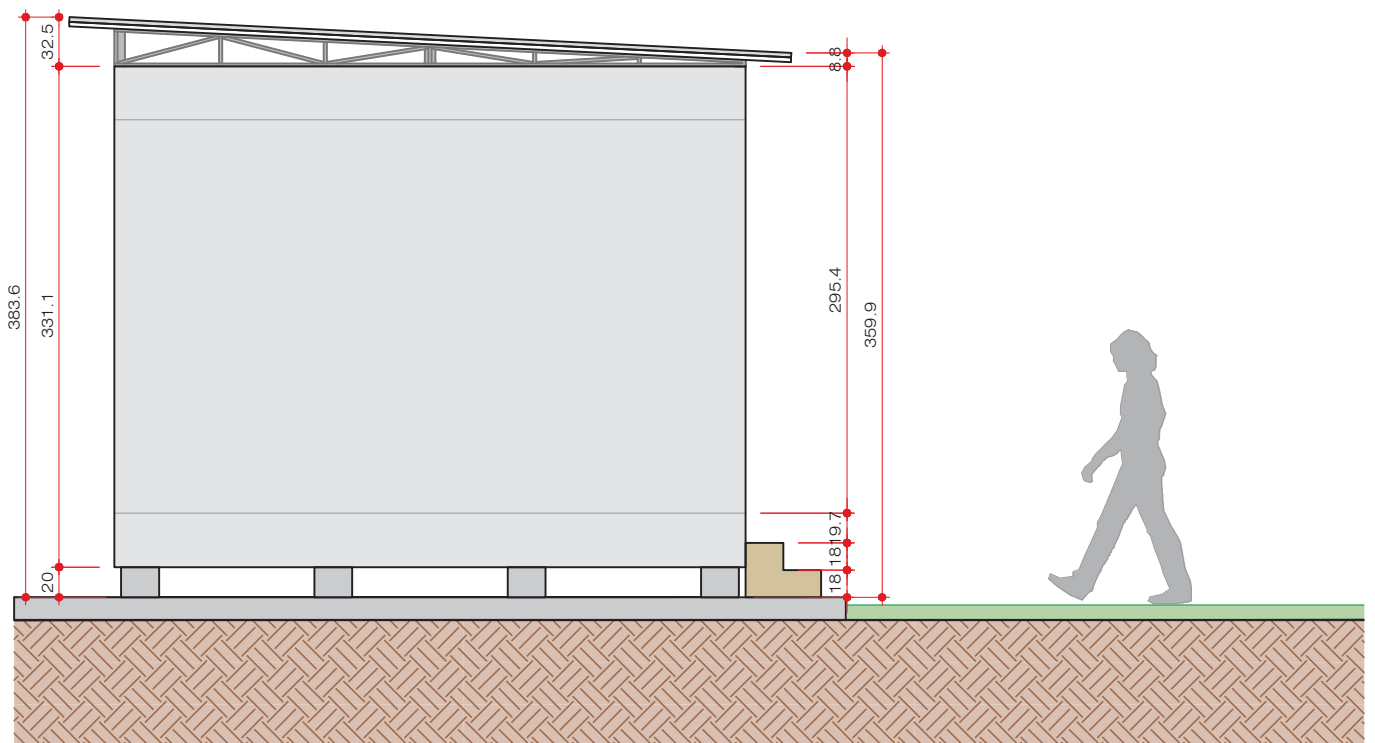
ELEVAÇÃO 1

ESCALA 1:50



ELEVAÇÃO 2

ESCALA 1:50

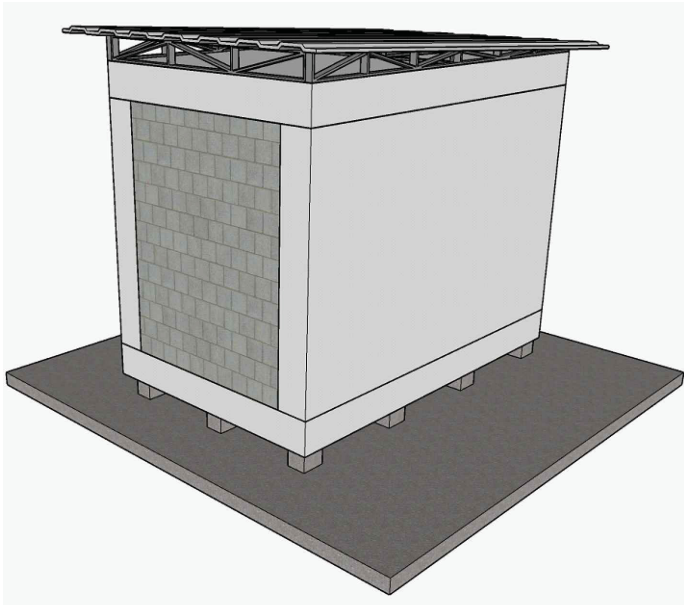


ELEVAÇÃO 3

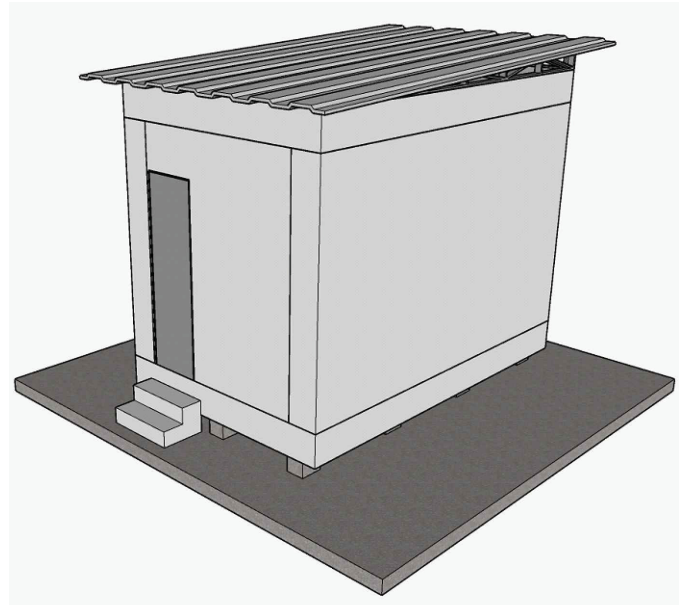
ESCALA 1:50



PROJETO CÉLULA-TESTE PARA ESTUDOS DE CAMPO - CTEC	PROGRAMA PPGEC / UFPR	PRANCHA 5/9
AUTORIA GIOVANNA S. VERUSSA (MESTRANDA) E PROF. LEANDRO C. FERNANDES (ORIENTADOR)	DATA DEZ / 2022	
DESCRIÇÃO ELEVAÇÕES 1, 2 E 3	ESCALA 1:50	



ISOMÉTRICA FRONTAL



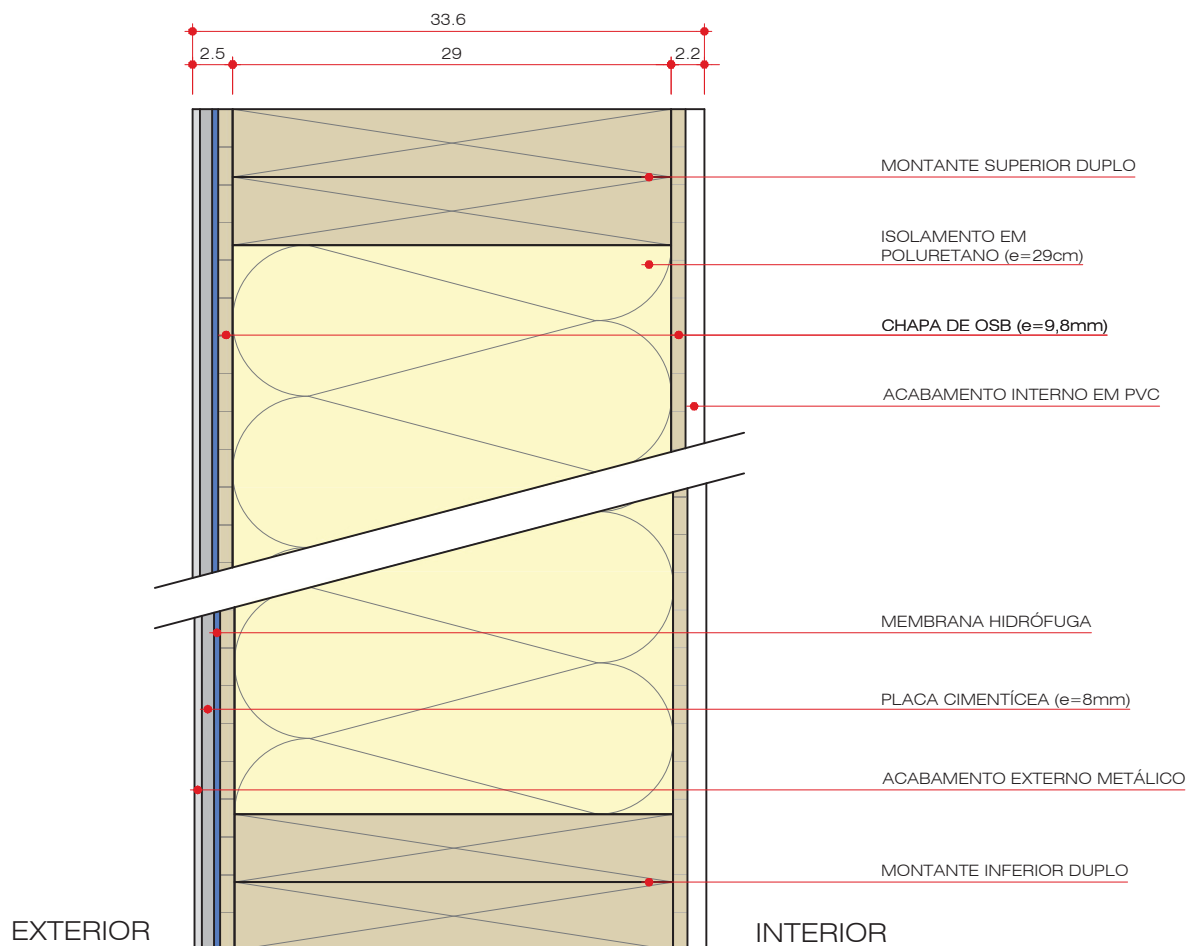
ISOMÉTRICA POSTERIOR



PERSPECTIVA REALSITA



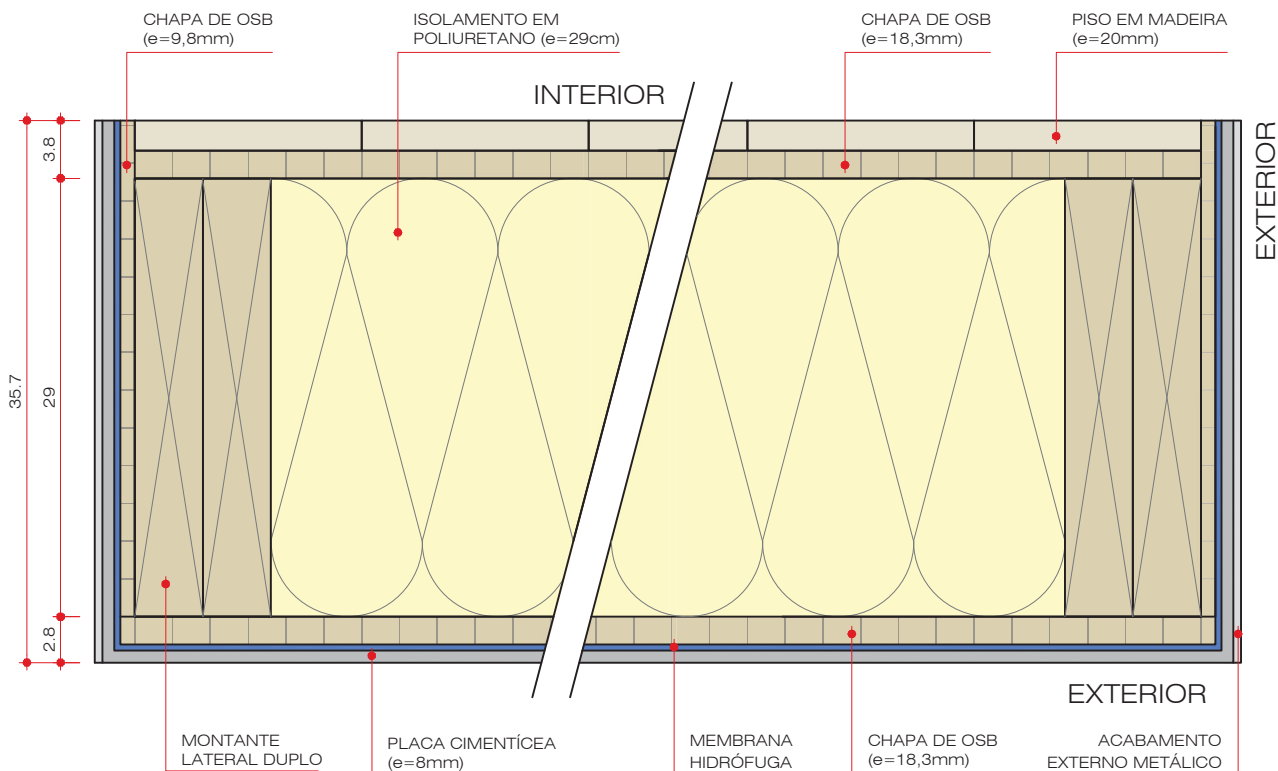
PROJETO	CÉLULA-TESTE PARA ESTUDOS DE CAMPO - CTEC	PROGRAMA	PPGEC / UFPR	PRANCHA 6/9
AUTORIA	GIOVANNA S. VERUSSA (MESTRANDA) E PROF. LEANDRO C. FERNANDES (ORIENTADOR)	DATA	DEZ / 2022	
DESCRIÇÃO	PERSPECTIVAS	ESCALA	S/ ESCALA	



DETALHE 01 - PAREDES

ESCALA 1:5

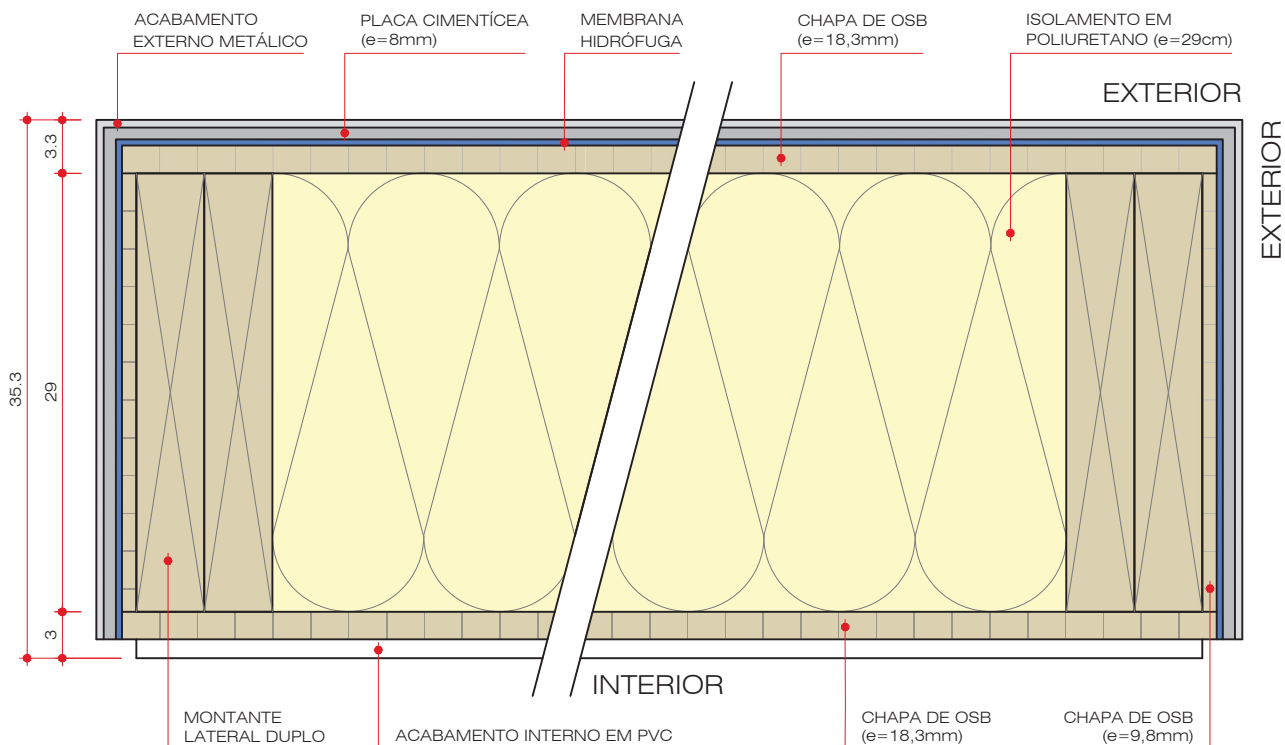
PROPRIEDADES FÍSICAS E TÉRMICAS DAS PAREDES						
CAMADAS DAS PAREDES	ESPESSURA (m)	DENSIDADE (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kg.K)	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/m.K)	CAPACIDADE TÉRMICA (KJ/m ² .K)	RESISTÊNCIA TÉRMICA (m ² .K/W)
RESISTÊNCIA SUPERFICIAL EXTERNA	-	-	-	-	-	0,040
ACABAMENTO EXTERNO METÁLICO	-	-	-	-	-	-
PLACA CIMENTÍCEA	0,008	1700	1000	0,35	13,60	0,023
MEMBRANA HIDRÓFUGA	-	-	-	-	-	-
CHAPA DE OSB	0,0095	681	2300	0,17	14,88	0,056
PLACA DE POLIURETANO	0,29	30	1,67	0,03	0,01	9,667
CHAPA DE OSB	0,0095	681	2300	0,17	14,88	0,056
ACABAMENTO INTERNO EM PVC	-	-	-	-	-	-
RESISTÊNCIA SUPERFICIAL INTERNA	-	-	-	-	-	0,130
SOMATÓRIO					51,25	9,971
TRANSMITÊNCIA TÉRMICA TOTAL (W/m ² .K)						0,100



DETALHE 02 - PISO

ESCALA 1:5

PROPRIEDADES FÍSICAS E TÉRMICAS DO PISO						
CAMADAS DO PISO	ESPESSURA (m)	DENSIDADE (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kg.K)	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/m.K)	CAPACIDADE TÉRMICA (KJ/m ² .K)	RESISTÊNCIA TÉRMICA (m ² .K/W)
RESISTÊNCIA SUPERFICIAL EXTERNA	-	-	-	-	-	0,040
ACABAMENTO EXTERNO	-	-	-	-	-	-
PLACA CIMENTÍCEA	0,008	1700	1000	0,35	13,60	0,023
MEMBRANA HIDRÓFUGA	-	-	-	-	-	-
CHAPA DE OSB	0,0183	681	2300	0,17	28,66	0,108
PLACA DE POLIURETANO	0,29	30	1,67	0,03	0,01	9,667
CHAPA DE OSB	0,0183	681	2300	0,17	28,66	0,108
PISO DE MADEIRA	0,02	500	1,34	0,15	0,01	0,133
RESISTÊNCIA SUPERFICIAL INTERNA	-	-	-	-	-	0,130
SOMATÓRIO					70,95	10,208
TRANSMITÂNCIA TÉRMICA TOTAL (W/m ² .K)						0,098



DETALHE 03 - COBERTURA

ESCALA 1:5

PROPRIEDADES FÍSICAS E TÉRMICAS DA COBERTURA						
CAMADAS DA COBERTURA	ESPESSURA (m)	DENSIDADE (kg/m³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kg.K)	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/m.K)	CAPACIDADE TÉRMICA (KJ/m².K)	RESISTÊNCIA TÉRMICA (m².K/W)
RESISTÊNCIA SUPERFICIAL EXTERNA	-	-	-	-	-	0,040
ACABAMENTO EXTERNO METÁLICO	-	-	-	-	-	-
PLACA CIMENTÍCEA	0,008	1700	1000	0,35	13,60	0,023
MEMBRANA HIDRÓFUGA	-	-	-	-	-	-
CHAPA DE OSB	0,0183	681	2300	0,17	28,66	0,108
PLACAS DE POLIURETANO	0,29	30	1,67	0,03	0,01	9,667
CHAPA DE OSB	0,0183	681	2300	0,17	28,66	0,108
ACABAMENTO INTERNO EM PVC	-	-	-	-	-	-
RESISTÊNCIA SUPERFICIAL INTERNA	-	-	-	-	-	0,130
SOMATÓRIO					78,82	10,075
TRANSMITÂNCIA TÉRMICA TOTAL (W/m².K)						0,099



PROJETO
CÉLULA-TESTE PARA ESTUDOS DE CAMPO - CTEC

AUTORIA
GIOVANNA S. VERUSSA (MESTRANDA) E PROF. LEANDRO C. FERNANDES (ORIENTADOR)

DESCRIÇÃO
DETALHE 03 - COBERTURA

PROGRAMA
PPGEC / UFPR

DATA
DEZ / 2022

ESCALA
1:5

PRANCHA

9/9