

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

EDUARDO BERENGER DE CARVALHO LOBO

**DESEMPENHO TÉRMICO DE PAINÉIS EM *LIGHT STEEL FRAMING*
EM UMA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL FRENTE
AO CLIMA EQUATORIAL DA AMAZÔNIA**

BELÉM - PA
2018

EDUARDO BERENGER DE CARVALHO LOBO

**DESEMPENHO TÉRMICO DE PAINÉIS EM *LIGHT STEEL FRAMING*
EM UMA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL FRENTE
AO CLIMA EQUATORIAL DA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Pará, para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração: Tecnologia das Construções

Orientador: Prof. Dr. Márcio Santos Barata.

BELÉM - PA
2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo
com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos
pelo(a) autor(a)**

- L799d Lobo, Eduardo Berenger de Carvalho.
- Desempenho térmico de painéis em light steel framing em uma habitação de interesse social frente ao clima equatorial da Amazônia / Eduardo Berenger de Carvalho Lobo, . — 2018.
- 130 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Márcio Santos Barata
- Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
1. Habitação de interesse social. 2. Light steel framing. 3. Desempenho térmico. 4. Sistemas construtivos.
5. Eficiência energética. I. Título.

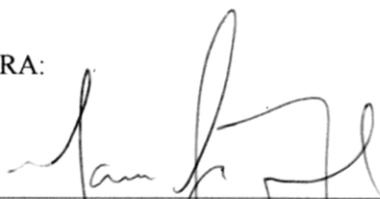
CDD 721.077

EDUARDO BERENGER DE CARVALHO

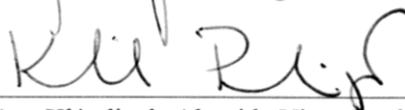
**DESEMPENHO TÉRMICO DE PAINÉIS EM *LIGHT STEEL FRAMING* EM
UMA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL FRENTE AO CLIMA
EQUATORIAL DA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo da Universidade Federal do Pará, para
obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e
Urbanismo.

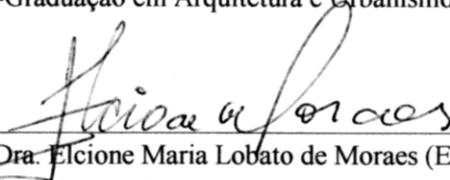
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Márcio Santos Barata - Orientador
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPGAU-UFPA



Profa. Dra. Ana Kláudia de Almeida Viana Perdigão (Interno)
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPGAU-UFPA



Profa. Dra. Elcione Maria Lobato de Moraes (Externo)
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU-UFPA



Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo (Interno)
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPGAU-UFPA

Aprovada em: 14 de setembro de 2018.

Aos meus Pais
Sônia e Luciano

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por mais esta conquista.

À Universidade Federal do Pará.

Ao Professor Marcio Santos Barata, do PPGAU da UFPA, pela orientação deste trabalho.

Aos Professores José Júlio Lima, do PPGAU da UFPA e a Professora Silvana Lima pelas sugestões durante o exame de qualificação.

Aos Arquitetos Bruno Zemero e Eliana Ceballo, pelo apoio na pesquisa e simulações.

Aos amigos que me apoiaram na execução deste trabalho.

À Companhia de Habitação do Estado do Pará – COHAB na pessoa da Arquiteta Fátima Zeneida – Gerente de Projetos e Engenheiro Antônio Tavares Cardoso – Gerente Estratégico de Obras, por cederem a unidade habitacional para as medições, objeto de estudo deste trabalho.

A minha esposa Giseli Jansen Lobo, pelo incentivo e companheirismo.

Aos meus pais Sônia Lobo (*in memorian*) e Luciano Lobo, por todo o incentivo.

RESUMO

Grande parte dos projetos de Habitação de Interesse Social (HIS) no Brasil não segue uma lógica projetual voltada para as condições climáticas locais, comprometendo o desempenho térmico destas habitações e elevando seu consumo energético pela necessidade de utilização de condicionador artificial de ar. Por outro lado, a concepção do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCVA), pelo governo brasileiro, para redução do déficit habitacional, demanda construção em larga escala e no menor período de tempo, com sistemas construtivos industrializados e racionalizados como o *Light Steel Framing* (LSF), aceito como inovação tecnológica para construção de HIS. Neste contexto, o trabalho avaliou o desempenho térmico de quatro envoltórias em LSF por meio das combinações de transmitâncias térmicas variando de 0,36 a 2,95 W/m².K versus esquadrias com e sem sombreamento total, comparando-as com os sistemas mais tradicionais como paredes de alvenaria cerâmica rebocada e as de concreto normal. A avaliação foi realizada por simulações computacionais através do software *EnergyPlus*, tendo como variável de resposta os graus horas de resfriamento pelo método estático. Os resultados demonstraram que a envoltória de LSF de maior transmitância térmica, sem isolamento térmico, proporcionou melhor desempenho térmico em relação ao sistema tradicional de alvenaria e às demais envoltórias de LSF com isolamento térmico, apesar de ter apresentado as maiores temperaturas no horário mais crítico, no período da tarde. Este tipo de sistema construtivo associado ao sombreamento das janelas e ventilação noturna permitiu no período noturno uma troca mais rápida do calor ganho durante a tarde. Este bom desempenho térmico somente foi superado pelo das paredes de concreto, que possuem maior capacidade térmica associada a uma alta transmitância térmica. Este binômio reduziu o ganho de calor durante o dia e possibilitou a perda mais rápida à noite. Em suma, o sistema de LSF se mostrou viável do ponto de vista do desempenho térmico, desde que empregado na sua configuração mais simples, sem o uso de materiais isolantes e com a câmara de ar. Por fim este trabalho reforça a importância de pesquisas futuras que considerem a possibilidade do aumento da capacidade térmica do LSF, sem reduzir a transmitância térmica, associada ao sombreamento das janelas, ventilação noturna e coberturas de maior capacidade térmica.

Palavras-chave: Habitação de interesse social. Light Steel Framing. Conforto térmico. Sistema construtivo. Desempenho.

ABSTRACT

Several Social Housing Projects (SHP) in Brazil are not conducted architectural logic turned to local climate conditions, those compromise the thermal performance increase the energy consumption due the use of mechanical air conditioning. Conversely, the necessity of reduce the Brazilian habitational deficit had done the Government, conceive the national program of social housing called “Minha Casa Minha Vida” (PMCVVA), those which demand large scale building and a short period of time, with rational industrialized building systems, as well the called Light Steel Framing, had been accepted as technological innovation in SHP. This Work evaluated the thermal performance of four building envelope constructed in LSF by means of thermal transmittance combinations, ranging 0,36 until 2,95 W/m²K against frames with and without solar shading, comparing the traditional system, as rendered masonry wall and the concrete walls. The evaluations had been realized by computational simulation via the software EnergyPlus, as a variable result the grade hours for static method. The results demonstrated the building envelope in LSFCS with high thermal transmittance, without thermal insulation, provide better thermal performance in relation to traditional system of masonry wall and others LSF building envelopes with thermal insulation, though had been presented high temperature in critical hours, in afternoon period. These building system type, associated to window shading and nocturne ventilation conceive in nocturne period a more quickly changing heat gains during afternoon. This thermal performance was just overcome to concrete wall system, once that it has high thermal capacities associated to high transmittance. There reduced the heat gains during the morning and enabled the quickly loss in the night. In conclusion, the LSF systems had been showed able in view of point of thermal performance, provide used in its simple configuration, without insulation materials, with air chamber. In the end, this work reinforce the importance of future researches that consider the possibilities to increase the thermal capacities of LSF without reduce the thermal transmittance, associated with external solar shading in windows, nocturne ventilation and roof with high thermal capacities.

Keywords: Social Housing Projects. Lightweight Steel Framed Construction System. Thermal Comfort. Constructive System. Building Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Zoneamento bioclimático brasileiro	28
Figura 2 -	Carta bioclimática adotada para o Brasil	29
Figura 3 -	Carta bioclimática de Belém, PA	29
Figura 4 -	Esqueleto estrutural em madeira	39
Figura 5 -	Montante em madeira e montante em aço galvanizado	40
Figura 6 -	Estrutura de residencial em <i>Light Steel Framing</i>	42
Figura 7 -	Guia e montante em aço auto formado a frio galvanizado	43
Figura 8 -	Guia e montante em aço auto formado a frio galvanizado e suas respectivas aplicações	45
Figura 9 -	Aplicação da placa cimentícia	46
Figura 10 -	Tratamento de juntas	46
Figura 11 -	Siding Vinílico aplicado sobre placa de OSB	47
Figura 12 -	Gesso Acartonado ST	47
Figura 13 -	Lã de vidro como isolante termo acústico	48
Figura 14 -	Fundação em Radier	49
Figura 15 -	Sapata corrida	49
Figura 16 -	Vigas de piso	50
Figura 17 -	Laje úmida	50
Figura 18 -	Painéis <i>Masterboard</i> ou <i>Wall</i> aplicados sobre as vigas	51
Figura 19 -	Casa em LSF: Cobertura com estrutura convencional em madeira e telha de Fibrocimento Belém-PA	52
Figura 20 -	Cobertura plana em <i>Light Steel Framing</i>	52
Figura 21 -	Caibros e vigas alinhados com montantes de painel estrutural	53
Figura 22 -	Edificação de 4 pavimentos em LSF	53
Figura 23 -	Criação de um material com propriedades térmicas ajustadas	61
Figura 24 -	Câmera IR mostra o calor dos perfis	63
Figura 25 -	Perfuração das almas dos montantes	64
Figura 26 -	Localização da HIS	66
Figura 27 -	Apartamentos escolhidos para simulação (2° e 4° pavimentos)	67
Figura 28 -	Pavimento tipo da edificação com a unidade habitacional escolhida	67
Figura 29 -	Bloco 3. Residencial Riacho Doce II (COHAB)	68
Figura 30 -	Planta baixa do apartamento indicando a nomenclatura dos ambientes	69
Figura 31 -	Sombreamento da fachada leste de um dos volumes do bloco III proporcionada pelo outro volume deste bloco	70
Figura 32 -	Carta solar: Fachada que contem a janela do Quarto B	70
Figura 33 -	Carta solar: Fachada que contém as janelas dos quartos A e C	71
Figura 34 -	Detalhe das Esquadrias da HIS	72
Figura 35 -	Representação da forma de abertura das Esquadrias	72

Figura 36 -	HOBO data logger – temp/RH/light/extchannel	74
Figura 37 -	Posição dos <i>Dataloggers</i> nos ambientes avaliados	74
Figura 38 -	Aparelho medidor HOBO instalado no quarto B	75
Figura 39 -	Unidade habitacional escolhida para calibração	76
Figura 40 -	Os dois volumes que compõem o bloco III. Sendo o volume azul considerado elemento de sombreamento	80
Figura 41 -	Todos os ambientes do bloco considerado uma zona térmica cada um	82
Figura 42 -	Cobertura padrão com laje de forro estilo <i>steeldeck</i>	87
Figura 43 -	Cobertura padrão com laje de forro em concreto	88
Figura 44 -	Esquema de atendimento ao procedimento de simulação computacional. NBR 15575	94
Figura 45 -	Resultados: simulação x medição do quarto B	97
Figura 46 -	Quantidade de GHR anual do quarto B (2° Pavimento) para situação 1A e 1B, ventilação noturna	98
Figura 47 -	Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação noturna, sem sombreamento para o quarto B do 2° Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 1A)	99
Figura 48 -	Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação noturna, com sombreamento para o quarto B do 2° Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 1B)	100
Figura 49 -	Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação diurna, sem sombreamento para o quarto B do 2° Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 2A)	104
Figura 50 -	Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação noturna, com sombreamento para o quarto B do 2° Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 2B)	105
Figura 51 -	Quantidade de GHR anual do quarto B (4° Pavimento) para situação 1A e 1B, ventilação noturna	107
Figura 52 -	Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação noturna, sem sombreamento para o quarto B do 4° Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 1A)	108
Figura 53 -	Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação noturna, com sombreamento para o quarto B do 4° Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 1B)	108
Figura 54 -	Quantidade de GHR anual do quarto B (4° Pavimento) para situação 2A e 2B, ventilação diurna	110
Figura 55 -	Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação diurna, sem sombreamento para o quarto B do 4° Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 2A)	111
Figura 56 -	Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação diurna, com sombreamento para o quarto B do 4° Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 2B)	112
Figura 57 -	Desempenho térmico do quarto B com fechamento em Alvenaria	116

Figura 58 -	Desempenho térmico do quarto B com fechamento em Parede de Concreto	116
Figura 59 -	Desempenho térmico do quarto B com fechamento em painel de LSF simples	117
Figura 60 -	Desempenho térmico do quarto B com fechamento em painel de LSF + lã de vidro	117
Figura 61 -	Desempenho térmico do quarto B com fechamento em painel de LSF + eps	118
Figura 62 -	Desempenho térmico do quarto B com fechamento em painel de LSF (lã de vidro+eps)	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Valores admissíveis de transmitância (U), de acordo com o valor da absorptância (α) da superfície	30
Tabela 2 -	Diferença de desempenho térmico entre painéis de LSF, com e sem considerar as pontes térmicas	62
Tabela 3 -	Características dos ambientes do apartamento padrão	67
Tabela 4 -	Área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar	72
Tabela 5 -	Resistência Térmica da Câmara de Ar	78
Tabela 6 -	Indicadores estatísticos sobre a influência das pontes térmica	81
Tabela 7 -	Situações relativas à rotina de abertura da janela e sombreamento	84
Tabela 8 -	Variáveis de controle da simulação	88
Tabela 9 -	Características dos materiais	89
Tabela 10 -	Temperaturas mensais de conforto adaptativo para a cidade de Belém	90
Tabela 11 -	Níveis de eficiência estipulados pelo PROCEL EDIFICA para Belém, segundo o arquivo climático TRY	91
Tabela 12 -	Variáveis de desempenho térmico	92
Tabela 13 -	Resultados dos indicadores estatísticos para os diversos casos de modelos	96
Tabela 14 -	Resultado das variáveis estatísticas: CASO 03	98
Tabela 15 -	Indicadores de GHR para a rotina de ventilação noturna, sem e com sombreamento	99
Tabela 16 -	Percentual de redução de GHR com o sombreamento para condição de ventilação noturna no quarto B do 2º pavimento	103
Tabela 17 -	Quantidade de GHR anual do quarto B (2º Pavimento) para situação 2A e 2B, ventilação diurna	104
Tabela 18 -	Indicadores de GHR para a rotina de ventilação diurna, sem e com sombreamento	111
Tabela 19 -	Valor de Transmitância térmica obtido pelo método simplificado NBR 15575	113
Tabela 20 -	Índices mínimos para U de acordo com a NBR 15575	114
Tabela 21 -	Nível mínimo de desempenho- NBR 15575	114
Tabela 22 -	Resultados de desempenho térmico dos fechamentos pelos critérios da NBR 15575	114

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.2	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA	16
1.3	OBJETIVOS	18
1.3.1	Objetivo Geral	18
1.3.2	Objetivos Específicos	18
1.4	HIPÓTESE	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	20
2.2	ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA	20
2.2.1	Condicionantes de projeto	21
2.2.1.1	Ventilação	21
2.2.1.2	Sombreamento	22
2.2.1.3	Envoltória	22
2.3	INÉRCIA TÉRMICA	23
2.4	DESEMPENHO TÉRMICO	25
2.5	NORMAS DE DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	26
2.5.1	NBR 15220	28
2.5.2	NBR 15575	30
2.5.2.1	Procedimento Simplificado	30
2.5.2.2	Procedimento por Simulação Computacional	31
2.5.2.3	Medição <i>in loco</i>	31
2.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA NORMA NBR 15575	31
2.7	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS PARA A SIMULAÇÃO	34
2.7.1	Programa <i>Energy Plus</i>	34
2.7.1.1	Apresentação do programa	34
2.7.1.2	Limitações do programa	35
2.8	CALIBRAÇÃO	36
2.9	HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL	37
2.10	<i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	39
2.10.1	Histórico	39
2.10.2	Vantagens e desvantagens	41
2.10.3	Descrição do sistema	42
2.10.3.1	Perfis	43
2.10.3.2	Revestimento e conforto dos painéis externos e internos	45
2.10.3.3	Isolamento térmico e acústico	48
2.10.3.4	Fundação	48
2.10.3.5	Laje	49
2.10.3.6	Cobertura	51
2.10.4	Aplicações do LSF em Habitações de Interesse Social	53
2.11	DESEMPENHO TÉRMICO DO SISTEMA <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	55
2.11.1	Avaliação do desempenho térmico do <i>Light Steel Framing</i> por medição	55
2.11.2	Desempenho térmico do LSF por simulação	56

2.11.3	Inércia térmica do solo e ventilação natural no desempenho térmico do LSF	58
2.11.4	Inércia térmica dos painéis de fechamento em LSF	59
2.11.5	Pontes térmicas	60
2.11.5.1	Impacto das pontes térmicas em edifícios em LSF	60
2.11.5.2	Estratégias para quebrar as Pontes Térmicas	63
3	METODOLOGIA	65
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	65
3.2	LOCALIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO	65
3.3	TIPOLOGIA DA EDIFICAÇÃO	66
3.4	CALIBRAÇÃO DO MODELO	73
3.4.1	Procedimento	73
3.4.2	Análise de sensibilidade	77
3.5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: edificação em <i>Light Steel Framing</i>	80
3.5.1	Considerações iniciais	80
3.5.2	Efeito das pontes térmicas	81
3.5.3	Modelagem	81
3.5.4	Dados gerais da simulação	82
3.5.4.1	Parâmetros de entrada no programa <i>EnergyPlus</i> (versão 8.7)	82
3.5.4.2	Rotinas de ocupação e cargas térmicas	83
3.5.5	CrITÉRIOS de avaliação do método de simulação proposto	84
3.5.5.1	Variáveis de controle	84
3.5.5.2	Método de simulação da NBR 15575	92
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
4.1	CALIBRAÇÃO	96
4.2	DESEMPENHO TÉRMICO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PELO MÉTODO DO GHR	98
4.2.1	2º pavimento	98
4.2.2	2º pavimento com ventilação diurna	103
4.2.3	4º pavimento (cobertura) com ventilação noturna	107
4.2.4	4º pavimento (cobertura) com ventilação diurna	110
4.3	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO PELA NBR 15575	113
4.3.1	Avaliação de desempenho pela Método Simplificado da NBR 15575	113
4.3.2	Avaliação de desempenho pelo método de simulação computacional NBR 15575	114
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS	119
5.1	CONCLUSÕES	119
5.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	121
	REFERENCIAS	122

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Desde o início da civilização humana, os espaços habitacionais foram concebidos buscando o conforto e a satisfação de seus usuários, sendo presente a busca em adequá-los às realidades culturais, ambientais e climatológicas dos locais onde estas edificações estariam inseridas. Entretanto, a evolução das técnicas construtivas ocorridas a partir da segunda metade do século XX, aliada a abundância e o baixo custo dos combustíveis, foi gradativamente suplantando uma série de atribuições do arquiteto na concepção da edificação. Neste contexto, o atendimento às condições de conforto térmico para o usuário passou a ser, na maioria dos casos, desconsiderado. A iluminação artificial começou a ganhar destaque em detrimento da iluminação natural, a interação entre a edificação e seu entorno deixou de ser prioridade, a ventilação natural deixou de ser considerada nos projetos arquitetônicos para dar lugar ao condicionamento artificial de ar. Estes fatores, entre outros, contribuem para o aumento do consumo de energia necessário para solucionar os problemas gerados por este tipo de arquitetura, sem contar a enorme poluição provocada pela geração e consumo desta energia (CORBELLA; YANNAS, 2009).

A consequência disso é a crescente demanda de energia elétrica por parte das edificações habitacionais. A *International Energy Agency* (IEA) aponta que o consumo de energia das edificações comerciais e residenciais respondem por 32% do consumo da energia global, sendo que 10% estão relacionados a emissão de CO₂. Diante disso, Soares et al. (2017) destacam a importância da implementação de estratégias de desempenho térmico e eficiência energética para obras de reforma e novas construções, assim como estratégias para o desenvolvimento de novas tecnologias construtivas eficientes para a envoltória das edificações e seus sistemas de resfriamento e aquecimento.

No Brasil, os setores comercial, residencial e público, foram responsáveis por 43% do consumo de energia elétrica em 2017 (EPE, 2012). Segundo Lambert (2001), o crescimento do consumo de energia no país se deve ao aumento do poder aquisitivo da população, provocando uma maior demanda de energia devido ao maior número de ligações à rede elétrica e a compra de bens de consumo elétricos. Como agravante, o setor energético brasileiro tem atravessado uma grave crise devido aos baixos níveis dos reservatórios das usinas hidroelétricas brasileiras, provocados pelos índices de pluviosidade abaixo da média ocorridos no Brasil nos últimos anos. Como consequência, houve uma maior participação de

fontes de petróleo e derivados na geração de energia elétrica, o que tem provocado por parte do governo a implantação da bandeira vermelha nas contas de energia elétrica, sobretaxando o consumo.

O consumo de energia elétrica predominante no Brasil se deve aos sistemas de iluminação artificial e de condicionamento artificial de ar, que em sua grande maioria são utilizados para o resfriamento dos ambientes. No caso do resfriamento, grande parte dessa demanda ocorre pela não adequação da maioria dos projetos das edificações residenciais brasileiras às condições climáticas do local. Entre estas cabe salientar as Habitações de Interesse Social (HIS). Conforme Motezuki, Cheg e Pipiel (2005), as habitações populares são caracterizadas pelas dimensões reduzidas e pela simplicidade construtiva, nas quais não são consideradas a adequação dos projetos como melhor orientação, a ventilação cruzada, sombreamento e os materiais mais apropriados à realidade climática local. De tal forma que, historicamente no âmbito nacional, HIS têm apresentado problemas de conforto térmico e eficiência energética (GRIGOLETTE et al., 2009).

Devido a esse cenário, uma das várias iniciativas para incentivar a busca pela eficiência energética no Brasil foi a criação, nos anos 90, do selo PROCEL de eficiência energética para equipamentos e eletrodomésticos, que posteriormente se estendeu aos edifícios públicos federais e as residências, esta última através do Selo PROCEL EDIFICA, em 2014.

Este panorama aponta para a responsabilidade do arquiteto e do engenheiro na elaboração do projeto arquitetônico e suas especificações técnicas e de materiais de modo a aumentar a eficiência energética das edificações residenciais, comerciais e públicas. Pois, conforme afirma Frota e Schiffer (2001), mesmo que não seja possível obter um desempenho térmico satisfatório da edificação, através da arquitetura, com os recursos naturais disponíveis, devido a condições climáticas locais muito rígidas, devem ser buscadas soluções de projeto que maximizem o desempenho térmico natural.

Essa realidade fomenta a busca por sistemas e materiais construtivos que, aliados às boas práticas de projeto arquitetônico, que consideram as características climáticas do local à sua concepção, proporcionem à edificação, entre outros quesitos de conforto, um desempenho térmico adequado e conseqüentemente uma maior eficiência energética, com a redução dos gastos energéticos, uma vez que a racionalização do uso de energia apresenta estreita relação com a adequação da arquitetura ao clima, evitando ou reduzindo os sistemas de condicionamento artificial de ar (FROTA; SCHIFFER, 2001).

O desafio da busca pelo maior conforto térmico associado a maior eficiência energética se torna ainda muito maior quando se leva em questão o déficit habitacional brasileiro, pois, em razão da necessidade de se construir em grande escala de produção em períodos curtos, há uma demanda por processos construtivos industrializados. De acordo com Ferreira (2015), as demandas cada vez maiores por habitações populares nos grandes centros urbanos vêm exigindo a busca por soluções que atendam a essas demandas crescentes. Neste contexto, o próprio Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) do Governo Federal incentiva o uso de sistemas construtivos racionalizados e industrializados que aperfeiçoem o processo produtivo de construção, através do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT).

O panorama criado pelo PMCMV deu origem a um cenário favorável ao uso de estruturas metálicas que contribuem para a industrialização da construção civil. Nesse caso, o uso sistemas racionalizados como o *Light Steel Framing* (LSF) para a construção de HIS possibilita uma série de vantagens. Penna (2009) constatou a viabilidade econômica do LSF ao avaliar o seu uso em HIS na cidade de Belo Horizonte, concluindo que os custos de construção estavam dentro dos parâmetros do PMCMV e em condição de igualdade aos sistemas construtivos tradicionais.

Seja qual for a tecnologia construtiva, a mesma deve atender às condições mínimas de conforto ambiental das construções (FERREIRA, 2015). Gomes (2007) contempla a possibilidade de emprego de outros recursos de projeto como isolantes térmicos, elementos arquitetônicos para melhorar a ventilação natural, dispositivos de proteção solar como brises, telas metálicas, entre outros, com vistas a melhorar as condições térmicas da habitação. Entretanto, podem ser inviáveis em termos financeiros dentro do PMCMV.

O uso de sistemas construtivos inovadores que não são contemplados pelas normas técnicas nacionais específicas podem ser avaliados dentro das normas de desempenho NBR 15575 que foi publicada em 2013. No caso do PMCMV, o financiamento por bancos públicos como a Caixa Econômica Federal e Banco do Brasil para a construção de HIS com sistemas construtivos inovadores somente é possível através da elaboração de diretrizes específicas e de relatórios técnicos chamados DATEC (Documento de avaliação Técnica), estes elaborados por Instituições Técnicas Avaliadoras (ITA), como por exemplo, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em São Paulo, a TECONMAT em Recife, o SENAI em Criciúma, entre outras.

No atual contexto brasileiro, ainda são poucos os estudos que avaliam o desempenho destes sistemas construtivos inovadores frente às características locais, principalmente no

tocante ao conforto térmico, que poderia indicar a adequação ou não às condições climáticas brasileiras. Além disto, propor soluções arquitetônicas mais adequadas a um determinado sistema construtivo racionalizado que permitissem o seu emprego nas HIS na região.

1.2 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA

No caso de Belém, cidade localizada na região amazônica, de clima equatorial chuvoso, caracterizado pelas altas temperatura e pluviosidade, os percentuais de hora de conforto térmico são desprezíveis, tendo sido apontadas como estratégias para a cidade o percentual de 89% para o uso de ventilação natural e 10% de condicionamento de ar (GOULART et al, 1998). Entretanto, Pacheco (2013) constatou que o balanço adequado do sombreamento e da transmitância térmica da envoltória da edificação pode melhorar o conforto térmico dos ambientes de uma edificação, uma vez que em Belém, ao longo de todo o ano, há uma alta transmitância de calor do exterior para o interior, o que faz com que maiores valores de transmitância térmica da envoltória demandem um maior consumo de energia elétrica a noite, com a utilização de condicionamento de ar para manter a temperatura interna dentro de um intervalo de conforto.

Do ponto de vista habitacional, o município de Belém possui um déficit de quase 72 mil moradias, que se traduz em 115 mil famílias que não possuem habitação adequada (IBGE, 2017). Estes números demonstram que além da necessidade dos investimentos governamentais, estes devem ser otimizados ou baseados em estudos científicos que norteiem o emprego de sistemas construtivos mais apropriados ao clima da região e que proporcionem maior rapidez, minimizem os desperdícios e os impactos ambientais de modo a fazer frente à necessidade de construção de grande volume de obras em um período relativamente curto de tempo. Neste sentido, consolida-se a necessidade da industrialização das construções, cenário incentivado pelo PMCMV (PENNA, 2009).

Neste contexto, os sistemas construtivos industrializados como o LSF, já consagrado em países como Estados Unidos, Austrália, Japão e grande parte Europa, se apresentam como alternativa de construção racionalizada, ganhando gradativamente espaço no mercado da construção civil brasileira (SOUZA, 2010). Sendo tecnicamente viável, de custo reduzido, funcional e durável, o sistema tem grande potencial de ser empregado no Brasil, haja vista que o seu uso, apesar de ainda ser modesto, é crescente no país (SOUZA, 2010).

Apesar do PMCMV favorecer o uso de sistemas construtivos inovadores, não foram ainda executadas obras de HIS em LSF no Norte do Brasil até o presente momento. Na região

sul e sudeste, pelo contrário, o sistema já vem sendo empregado em construções do PMCMV financiadas pela Caixa Econômica Federal (CEF). Estudos técnicos atestaram a viabilidade econômica do LSF em HIS (PENNA, 2009), assim como os DATECs 14 e 030 comprovam o atendimento do LSF aos parâmetros de desempenho térmico exigidos pela norma da ABNT NBR 15575.

Apesar da utilização do LSF em obras de interesse social no sul e sudeste do Brasil com financiamento da CEF, há críticas de diversos pesquisadores sobre a metodologia de avaliação do desempenho térmico de sistemas construtivos para HIS através da norma da ABNT NBR 15575 (SORGATO et al., 2014; SILVA; GHISI, 2014). Além da questão de adequação do sistema LSF às condições climáticas da região Norte, Penna (2009) aponta para uma das dúvidas formuladas por técnicos da CEF acerca da aceitação cultural desta mudança de paradigma construtivo por parte do usuário brasileiro.

Em outras palavras, questões culturais e a falta de estudos técnicos conclusivos acerca do desempenho térmico do sistema LSF têm dificultado a utilização desse e de outros sistemas racionalizados nas construções de HIS na região Norte do Brasil, apesar da contribuição que, em tese, estes sistemas poderiam proporcionar em termos de produtividade da construção de unidades de HIS na região, principalmente nas questões de rapidez, logística e impacto ambiental.

Crasto (2005) já apontava a carência de estudos sobre o comportamento e desempenho térmico de edificações construídas em LSF no Brasil. Diante do quadro de carência de informações sobre desempenho dos sistemas construtivos racionalizados frente às condições climáticas da região e da necessidade premente de reduzir o déficit habitacional, destaca a importância da realização de um trabalho que avalie o desempenho térmico do LSF frente ao clima equatorial chuvoso da cidade de Belém, comparando os resultados com outros sistemas construtivos já tradicionalmente utilizados, de tal forma que o trabalho não se restringiria aos procedimentos normativos, mas sim, ao sugerido pelos trabalhos do Laboratório de Eficiência Energética de Edificações (LABEEE) da UFSC, no qual tem como aspecto principal e mais relevante a consideração da variação anual climática de Belém, dentro de condições mais realistas e que não são contempladas pela norma de desempenho da ABNT NBR 15575, a fim de verificar a possibilidade de utilização destes sistemas em HIS nas regiões brasileiras de clima equatorial amazônico, na qual está inserida a cidade de Belém, no Estado do Pará.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

- Investigar através do método de simulação computacional o desempenho térmico de uma habitação de interesse social construída no sistema *Light Steel Framing* com vistas a verificar a sua adequação ou não ao clima equatorial amazônico da cidade de Belém-PA.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Calibrar o modelo obtido a partir de uma HIS multifamiliar de 4 pavimentos, já construída na região metropolitana de Belém em alvenaria de tijolos cerâmicos, através da comparação dos resultados de temperatura de bulbo seco obtidos pela medição *in loco* realizada e os resultados obtidos pela simulação computacional;
- Realizar simulação computacional a fim de aferir o desempenho térmico do LSF em um modelo de HIS multifamiliar com 4 pavimentos, através da obtenção da quantidade total de graus horas de desconforto térmico ao longo de um ano, tomando por base quatro modelos de composição de painéis de *Light Steel Framing*, considerando as variáveis de sombreamento e ventilação;
- Comparar os resultados da avaliação de desempenho térmico do LSF através de simulação computacional, para cada um dos 4 tipos de painel deste sistema construtivos propostos com os resultados obtidos pelos sistemas construtivos tradicionais de alvenaria de tijolos cerâmicos e painéis de concreto moldados *in loco*, todos para o mesmo modelo de HIS, a fim identificar o sistema com melhor desempenho.

1.4 HIPÓTESE

Parte-se da hipótese de que a combinação de transmitâncias térmicas baixas, na ordem entre 0,5 e 2 w/m²k, entre 1 e 2 W/m²K, obtidas com os painéis de LSF isolados termicamente nas envoltórias de uma edificação, combinada com sombreamento parcial das aberturas e ventilação natural, possam reduzir os ganhos de calor vindos do exterior durante o dia e possibilitar um conforto térmico maior aos ambientes de uma edificação em comparação ao

proporcionado pelas paredes de alvenaria e de concreto normal, que possuem transmitâncias térmicas mais elevadas que a do LSF, na ordem de 2,5 e 4,4 w/m²k, respectivamente.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação é constituída por cinco capítulos.

O Capítulo I, através de suas considerações iniciais, chama a atenção para a necessidade de retomar os princípios de uma arquitetura adequada as condições climáticas locais, através de soluções projetuais e utilização de novos materiais e novos sistemas construtivos, assim como aponta na caracterização do problema, a falta de estudos acerca de sistemas construtivo alternativos. Na justificativa é abordada a necessidade e a importância da avaliação de desempenho dos sistemas construtivos, assim como são apresentados os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre:

- Arquitetura bioclimática, apresentando seus conceitos, ramificações, sua importância na adequação do projeto ao clima e ao meio ambiente, noções sobre conforto térmico, desempenho térmico e as Normas de Desempenho Térmico e Eficiência Energética, assim como a consideração acerca de seus limites.

- Habitação de interesse social, seus conceitos e deficiências e o sistema construtivo *Light Steel Framing*, seu histórico, componentes, detalhes construtivos e sua aplicação em habitações de interesse social no Brasil, assim como seus documentos de avaliação fornecidos por institutos de tecnologia.

- Programas computacionais para simulação e o programa de simulação numérica *EnergyPlus*, suas vantagens e seus limites, assim como a importância da calibração do modelo a ser simulado para garantia da precisão dos resultados e os principais métodos.

- Principais estudos realizados sobre o desempenho térmico do sistema construtivo *Light Steel Framing* no Brasil e no exterior, a fim de embasar a metodologia desta pesquisa.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia do trabalho, apresentando os critérios para a escolha do modelo a ser avaliado, a sua descrição e o seu processo de calibração, assim como os elementos e variáveis para a avaliação e os respectivos métodos de cálculo e simulação.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da simulação dos modelos e a análise dos mesmos considerando as configurações de envoltória e as variáveis de sombreamento.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados da simulação, além de destacar sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Em uma edificação, o consumo de energia está relacionado ao ganho ou perdas de calor por parte da envoltória da edificação, sendo que estes fatores, associados à carga interna gerada pela ocupação, pelo uso de equipamentos e pela iluminação artificial, resultam no consumo do sistema de condicionamento artificial de ar, além dos próprios sistemas de iluminação e equipamentos (CARLO, 2008 apud FOSSATI; LAMBERTS, 2010).

Nesse sentido, a eficiência energética de uma habitação corresponde à quantidade de energia elétrica gasta por seus habitantes para que seja possível alcançar o conforto térmico interno de uma edificação. Nesse caso, para uma maior eficiência energética é necessário manter o conforto térmico com o menor uso possível de aparelhos elétricos (MENDONÇA, 2016). Sendo assim, Gomes (2007) destaca, entre outros fatores, a importância de considerar os componentes energético-climáticos para nortear as decisões de um projeto arquitetônico face à importância do controle do consumo de energia na edificação. Nessa linha de pensamento, Frota e Schiffer (2001) destacam que nas regiões brasileiras em que o clima quente é predominante, a arquitetura deve contribuir para minimizar a diferença entre as temperaturas externas e internas do ar em uma edificação.

2.2 ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA

O conceito de arquitetura bioclimática, segundo Goulart et al. (1994), consiste na utilização da tecnologia baseada na correta aplicação dos elementos arquitetônicos com o objetivo de fornecer ao ambiente construído um alto grau de conforto higrotérmico com o baixo consumo de energia. Já Romero (2001 apud LEÃO, 2007) enfatiza que a arquitetura bioclimática é aquela em que o projeto arquitetônico otimiza suas relações energéticas com o entorno e o meio ambiente, não se restringindo às características arquitetônicas adequadas, uma vez que deve preocupar-se, também, com o desenvolvimento de equipamentos e sistemas que são necessários ao uso da edificação (aquecimento de água, circulação de ar e de água, iluminação, conservação de alimentos, etc.) de forma que o consumo energético seja eficiente.

Na arquitetura bioclimática, conforme destaca Gurgel (2012), estão presentes os conceitos de arquitetura sustentável e arquitetura passiva. Na primeira são considerados fatores como energia renovável, materiais ecológicos, não poluição, preservação da natureza e

economia de água. A segunda, por sua vez, utiliza princípios do design passivo, tais como a adaptação da edificação ao clima local.

A arquitetura sustentável é, segundo Corbella e Yannas (2009), a continuidade mais natural da Bioclimática, pois busca a integração do edifício a totalidade do meio ambiente, seguindo o princípio da sustentabilidade que define a capacidade, por exemplo, de uma comunidade se manter e se abastecer sem prejudicar as gerações futuras (GURGEL, 2012). Em outras palavras, o consumo de energia das edificações pode ser reduzido através da adoção de estratégias passivas (SORGATO, 2009).

Cardenal (2017) destaca a importância da arquitetura em fornecer condições favoráveis para o seu usuário. A arquitetura deve visar o desenho de forma que atenuie as desvantagens que o clima apresenta e aproveite conscientemente suas vantagens em favor do desempenho térmico da edificação (FROTA, SCHIFFER, 2001). Para tal, segundo Maciel (2002), a arquitetura deve assumir o papel de minimizar os efeitos climáticos e não de intensificá-los ou agravá-los, como vem acontecendo em tão larga escala na arquitetura contemporânea. Para isso, é necessária a compreensão das variáveis que compõem o clima e o grau de influência de cada uma delas sobre o ambiente construído de modo a tirar partido das condições climáticas para criar uma arquitetura com desempenho térmico adequado (MACIEL, 2002).

O primeiro a ampliar a bioclimatologia para arquitetura foi Olgyay e Olgyay (1973), que criou a expressão projeto bioclimático, que visa a adequação da arquitetura ao clima local (LAMBERTS; DUARTE, 2016). A criação do primeiro índice bioclimático por meio da “Carta Bioclimática” de Olgyay Olgyay (1973) e marcou a pauta para estudar as zonas de conforto, a psicologia humana, a física dos edifícios e suas relações com o clima (FROTA, SCHIFFER; 2001). O princípio fundamental da arquitetura bioclimática é correspondência entre características arquitetônicas e a respectiva zona climática, na qual procura minimizar os impactos resultantes de uma intervenção no meio e obter uma relação harmônica entre a paisagem e a construção (NEVES, 2006).

2.2.1 Condicionantes de projeto

2.2.1.1 Ventilação

Gomes (2007) define a ventilação como uma estratégia de resfriamento natural por meio da renovação do ar no ambiente construído, na qual, em climas quentes, poderá melhorar a sensação térmica se a temperatura interior ultrapassar os 29°C ou a umidade

relativa do ar for superior a 80%. Nesta linha, segundo Sorgato (2009), no caso de países de clima tropical, como o Brasil, a ventilação natural pode contribuir para o conforto térmico de uma edificação e a conseqüente redução do consumo de energia proveniente do condicionamento artificial. Ou seja, a ventilação natural nas edificações além de assegurar a qualidade do ar nos ambientes, promove o resfriamento da edificação, proporcionando conforto térmico aos usuários sempre que as condições do clima externo forem favoráveis. O planejamento da ventilação deve aproveitar ao máximo os ventos dominantes no local, privilegiando a ventilação cruzada que é obtida através da existência de aberturas em paredes opostas (MONTENEGRO, 1984).

2.2.1.2 Sombreamento

O primeiro objetivo do projeto arquitetônico é proteger a edificação da radiação solar, pois quando se trata de uma edificação localizada em uma região de clima tropical, cujas temperaturas são muito elevadas, a principal causa de desconforto é o ganho de calor produzido pela absorção de energia solar que atinge as superfícies externas dos ambientes construídos (CORBELLA; YANNAS, 2009).

O sol, ao incidir sobre uma superfície, vai aquecê-la com sua radiação infravermelha de onda curta, onde parte dessa radiação é refletida, essencialmente em função da cor dessa superfície (FROTA, 2004). A outra parte dessa radiação é absorvida em parte por essas superfícies, convertendo-se em energia térmica que eleva a temperatura das mesmas, aumentando a temperatura do ar que estão em contato com elas. Esta energia infravermelha é transmitida para outros elementos da construção e, conseqüentemente, para superfícies internas da edificação, que por sua vez aquece todo o ar do ambiente (CORBELLA; YANNAS, 2009).

Neste contexto, o sombreamento não somente exerce papel importante no desempenho térmico de edificações em climas quentes, porque evita o ganho pela radiação infravermelha sobre as fachadas, como também nas aberturas das mesmas no período no verão, uma vez que nem sempre é possível evitar abertura nas faces mais quentes da edificação (GURGEL, 2012).

2.2.1.3 Envoltória

A envoltória tem papel importante no desempenho térmico de uma edificação, pois são os componentes da envoltória (paredes, cobertura, aberturas e piso) das edificações que

separam o ambiente interior do exterior, exercendo grande influência na determinação dos ganhos e perdas de calor entre ambiente externo e interno, através das propriedades termofísicas dos materiais (LAMBERTS, 2004). Além disso, este elemento também é responsável pelos fluxos de calor entre os ambientes, por isso, a composição dos materiais da envoltória exerce uma forte influência no desempenho térmico da edificação (MAZZAFERRO, SILVA; GHISI, 2014). Segundo Vinagre (2013), o conforto térmico e a eficiência energética das edificações são função do desempenho térmico dos materiais utilizados na envoltória das mesmas.

2.3 INÉRCIA TÉRMICA

Inércia térmica é a capacidade que uma edificação possui de armazenar e liberar calor. Uma edificação com pouca inércia acompanha a variação da temperatura externa ao passo que com inércia infinita, a temperatura interna permanece constante no seu interior. Conforme destaca Gurgel (2012), a inércia térmica está relacionada ao volume de massa de uma construção, ou seja, quanto mais volumoso e mais espesso for o material, maior será sua massa e conseqüente a sua inércia térmica. Além disso, a autora ressalta que a massa térmica de um material também está relacionada à sua densidade, estando também relacionada a sua capacidade térmica. Um material possui massa térmica quando tem a capacidade de absorver o calor incidente sobre ele e de liberá-lo quando a temperatura externa a ele for menor do que a sua própria temperatura.

Gurgel (2012) chama atenção para o fato que massa térmica não pode ser confundida com isolamento térmico, pois a primeira consiste em reter o calor por um período de tempo para posteriormente liberá-lo, enquanto que o isolamento consiste no objetivo de impedir a passagem de calor para dentro ou para fora de um ambiente, dependendo do tipo e da capacidade do isolante aplicado ao fechamento. Por outro lado, a autora também destaca que isolamento térmico não é a mesma coisa que desempenho térmico. O primeiro tem a função de “isolar” o calor, não permitindo a sua circulação entre o ambiente interno e o externo de uma edificação. Já a inércia térmica está relacionada à capacidade do material de retardar a transferência de calor.

O uso da inércia térmica em edificações além de amortecer os picos de temperatura externa, proporciona um atraso no pico máximo e mínimo na temperatura interna, sendo uma das estratégias arquitetônicas para o conforto térmico da edificação. No caso de climas de temperaturas quentes, o calor armazenado na massa térmica da parede reduz o pico das cargas

de resfriamento. O calor é liberado para o interior da edificação com um tempo de atraso, havendo uma mudança no horário de pico da carga de resfriamento e uma redução deste valor (PAPST, 1999).

A autora ainda afirma que a necessidade de grande inércia térmica aumenta quanto maior for a variação da temperatura externa, radiação solar e ou ganhos de calor. A razão entre o calor absorvido e o calor armazenado nos materiais da edificação dependem da capacidade térmica do material que compõe a envoltória.

Yannas e Maldonado (1995 apud PAPST, 1999) indicam que a baixa inércia térmica é benéfica para ambientes cuja ocupação ocorre somente à noite, pois proporciona altas temperaturas durante o dia e temperaturas confortáveis no período noturno. No caso de ocupação durante todo o dia, Szokolay (1981) sugere uma edificação híbrida, tendo parte com massa térmica onde há ocupação diurna, cozinha, jantar, estar e parte da edificação com massa leve, com ventilação noturna onde há ocupação apenas no período noturno. Sendo assim, casos onde a variação da temperatura do ar é reduzida, mas com radiação solar intensa, como os climas quentes e úmidos, uma construção com inércia térmica pode ser uma desvantagem.

Segundo as recomendações de Frota e Schiffer (2001), para edificações em clima quente e úmido, não se deve empregar uma inércia muito grande, pois isto dificultaria a retirada do calor interno armazenado durante o dia, prejudicando o resfriamento da construção quando a temperatura externa noturna estivesse mais agradável que internamente. Segundo Giovani (1994), em regiões com pequena variação de temperatura diária, uma edificação com grande inércia térmica, fechada e bem isolada, não produz uma redução significativa da temperatura interna diária abaixo do nível externo. Sendo assim, o autor recomenda o uso de edificações com materiais leves e que permitam a ventilação necessária para minimizar o efeito psicológico da alta umidade e aumentar as perdas de calor convectivas pelo corpo.

Conforme aponta Papst (1999), o armazenamento de calor nos materiais construtivos da edificação é capaz de reduzir a temperatura interna e os picos da carga de resfriamento, transferindo-a para um horário posterior. Parte do ganho de calor externo obtido durante o dia é armazenado na massa térmica dos elementos que compõe a envoltória da edificação, sendo somente parte do calor transmitido para dentro da edificação. O tempo de atraso e o amortecimento do calor transmitido são função das características térmicas do material, como o seu calor específico (c), que define a quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de um componente, por unidade de massa e da sua espessura.

Associados à inércia térmica dois parâmetros são os mais relevantes: o atraso térmico e a capacidade de amortecimento. A norma da ABNT NBR 15220 define atraso térmico como 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. O atraso depende dos parâmetros que intervêm no processo de transmissão de calor por condução em regime variável, ou seja, a condutividade térmica (λ), o calor específico (c), a densidade absoluta (d), e a espessura (l). No caso de um componente formado por diferentes materiais superpostos em “n” camadas paralelas às faces (perpendiculares ao fluxo de calor), o atraso térmico varia conforme a ordem das camadas.

A capacidade de amortecimento é a propriedade do fechamento de diminuir a amplitude das variações térmicas. Rivero (1986) define o coeficiente de amortecimento (μ) como a relação entre a amplitude da temperatura superficial interna de um fechamento (ω_s) pela amplitude da temperatura do ambiente externo (θ_s). Para o coeficiente de amortecimento (μ), em regimes cíclicos e temperaturas internas constantes, o valor será sempre menor que 1. E quanto menor for seu valor maior será a capacidade de amortecimento do fechamento.

2.4 DESEMPENHO TÉRMICO

O desempenho térmico de uma edificação se refere ao quanto esta responde, de forma positiva, às mudanças no ambiente ao ar livre para manter condições de conforto térmico interno. Essas condições devem ser alcançadas envolvendo a menor demanda de energia para aquecimento ou refrigeração possível. Nesse sentido, o termo eficiência energética da construção significa usar menos energia para fornecer as mesmas condições térmicas interiores (SOARES et al., 2017). O desempenho térmico adequado repercute no conforto das pessoas e em condições adequadas para o sono e atividades normais em uma habitação, contribuindo para a economia de energia (LAMBERTS; DUARTE, 2016).

Para conseguir o desempenho térmico de uma edificação, segundo Costa (2011), é necessário alcançar o equilíbrio entre os componentes desta edificação, suas fontes internas de calor e o ambiente externo no qual está inserida, sendo que por componentes se entende os materiais construtivos, a sua arquitetura e o seu entorno. Já suas fontes internas de calor constituem todos os elementos ocupantes que geram calor, tais como pessoas, aparelhos e equipamentos eletrônicos. Por fim, o ambiente externo se refere às condições climáticas do local onde tal edificação está implantada.

2.5 NORMAS DE DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

As normas de desempenho térmico e de eficiência energética permitem identificar os materiais construtivos mais adequados à determinada edificação, de acordo com o clima em que está inserida (SORGATO et al., 2013). Sendo assim, é possível conceituar a norma de desempenho como um conjunto de requisitos e critérios estabelecidos para uma edificação habitacional e seus sistemas, com base em requisitos do usuário, independentemente da sua forma ou dos materiais constituintes (CBIC, 2013). Sendo evidente a sua importância, na escolha dos materiais construtivos mais adequados para as características climáticas do local onde a respectiva edificação está inserida.

O conceito de desempenho aplicado à construção como é conhecido nos dias de hoje, data do final da década de 1960, quando surgiram trabalhos e artigos em diversos países acerca deste novo enfoque com relação ao processo da construção, que culminou com a criação do grupo de trabalho W60 e a posterior organização de vários eventos como o primeiro simpósio internacional nos Estados Unidos em 1972 e os congressos internacionais realizados em 1982 em Lisboa e em 1996 em Israel.

Sorgato (2009) destaca que na década de 70, após a crise do petróleo, começaram a surgir as primeiras normas de eficiência energética em edificações. Mais recentemente, o Protocolo de Kioto desencadeou um processo de elevação do rigor das normas internacionais referentes ao desempenho térmico das edificações, apesar de que alguns países, como Estados Unidos e França, já haviam instituído seus regulamentos de desempenho térmico e energético antes de 1990.

No caso do Brasil, como iniciativa para incentivar a busca pela eficiência energética, nos anos 90, foi criado o selo PROCEL de eficiência energética para equipamentos e eletrodomésticos. A obrigatoriedade do selo foi estendida para os edifícios públicos federais em junho de 2015 através da publicação no Diário Oficial da União, pela Secretaria de Logística e Tecnologia, da Instrução Normativa nº 02/2014, que estabelece a obrigatoriedade das edificações novas serem etiquetadas. Em novembro de 2014, foi estabelecido o Selo PROCEL EDIFICA, um instrumento de adesão voluntária, no caso dos edifícios residenciais, que tem por objetivo principal identificar as edificações que apresentam as melhores classificações de eficiência energética em uma dada categoria (PROCEL INFO). Para isso, são consideradas as fachadas, envoltória, iluminação, condicionamento de ar e a possibilidade de geração de energia renovável e uso de água. O selo garante que o produto ou o bem que o consumidor está adquirindo, consome menos energia que os seus similares (LAMBERTS et

al., 1997). Assim como em normas de outros países, a etiquetagem de eficiência energética deve atender aos requisitos relativos à eficiência e a potência instalada do sistema de iluminação, eficiência do sistema de condicionamento de ar e o desempenho térmico da envoltória do edifício.

Em 2010 foi lançado o Regulamento Técnico da Qualidade referente ao nível de eficiência energética de edifícios comerciais, serviços e públicos (RTQ-C), estabelecendo os parâmetros para definição do nível de eficiência de um edifício e posterior fornecimento de Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (CARLO; LAMBERTS, 2010). Além da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (Ence), o RTQ-C possibilita o uso de etiquetas parciais para avaliações posteriores dos sistemas de iluminação e condicionamento.

No Brasil, a Lei nº 10.295 dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (BRASIL, 2001b) e que foi regulamentada pelo Decreto nº 4.059, de 19 de outubro de 2001 (BRASIL, 2001a). Esse decreto estabeleceu a criação de “níveis máximos de consumo de energia ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país, bem como as edificações construídas”, além da necessidade de “indicadores técnicos e regulamentação específica” para estabelecer a obrigatoriedade dos níveis de eficiência no país (CARLO; LAMBERT, 2010).

Para a avaliação específica do desempenho térmico das edificações, se tornou necessária a criação de normas construtivas que estabelecessem critérios de adequação destas edificações com relação ao seu desempenho relativo a esses fatores de conforto e conseqüentemente a redução do consumo de energia. Sendo assim, foi criada a primeira norma de desempenho térmico de edificações do Brasil, a NBR 15220 (ABNT, 2005), a qual foi desenvolvida para a avaliação de habitações unifamiliares de interesse social, na qual foi proposto um zoneamento bioclimático que abrange todo o território nacional, sobre o qual se baseiam as recomendações de projeto. Entretanto, devido à aplicação da NBR 15220 ser restrita para edificações unifamiliares de interesse social, foi iniciado o processo de desenvolvimento da norma de desempenho para edificações residenciais (SORGATO et al., 2013). Sendo assim, foi publicada em 2008 a NBR 15575 – Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos: desempenho. Sua primeira revisão ocorreu em 2013 e publicada como NBR 15575 – Edifícios habitacionais: desempenho (ABNT, 2013). Nesta última versão a norma ficou mais abrangente, contemplando não somente o desempenho térmico como também vários outros aspectos de desempenho de uma edificação.

2.5.1 NBR 15220

A NBR 15220 (ABNT, 2005) é composta por cinco partes, sendo que a parte 3 estabelece um zoneamento bioclimático brasileiro (Figura 1) ao mesmo tempo que apresenta recomendações de diretrizes e estratégias construtivas para a adequação climática de habitações unifamiliares de interesse social de até três pavimentos.

Figura 1 – Zoneamento bioclimático brasileiro

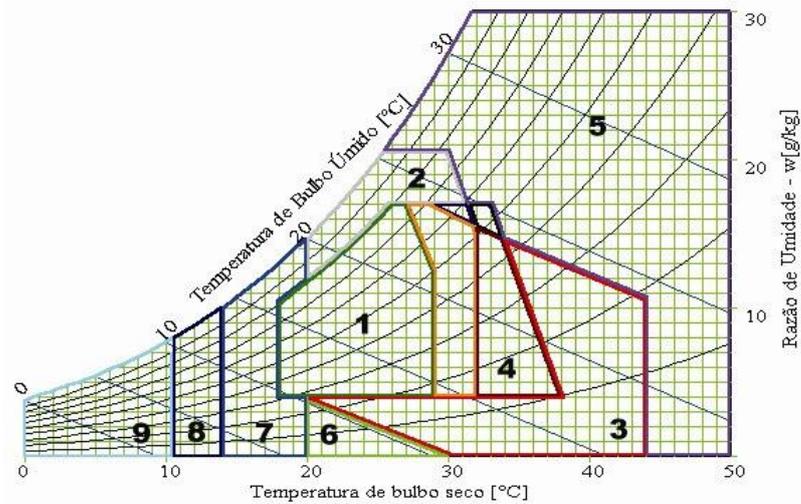


Fonte: NBR 15 220: 2005 (Parte 3) p. 2.

Esta norma dividiu o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas relativamente homogêneas quanto ao clima, tendo formulado, para cada uma destas zonas, um conjunto de recomendações técnico- construtivas que otimizam o desempenho térmico da edificação, através de uma melhor adequação ao clima onde a mesma está inserida.

Para tal, foi adotada uma carta bioclimática sugerida por Givoni (1992), adaptada por Goulart (1994) na qual, de acordo com os dados das normais climatológicas inseridos, indicam em quais zonas da carta esta cidade se enquadra. Estas zonas da carta bioclimática representam a necessidade que, a cidade que tem suas normais sobre esta zona, deve suprir (Figura 2).

Figura 2 - Carta bioclimática adotada para o Brasil

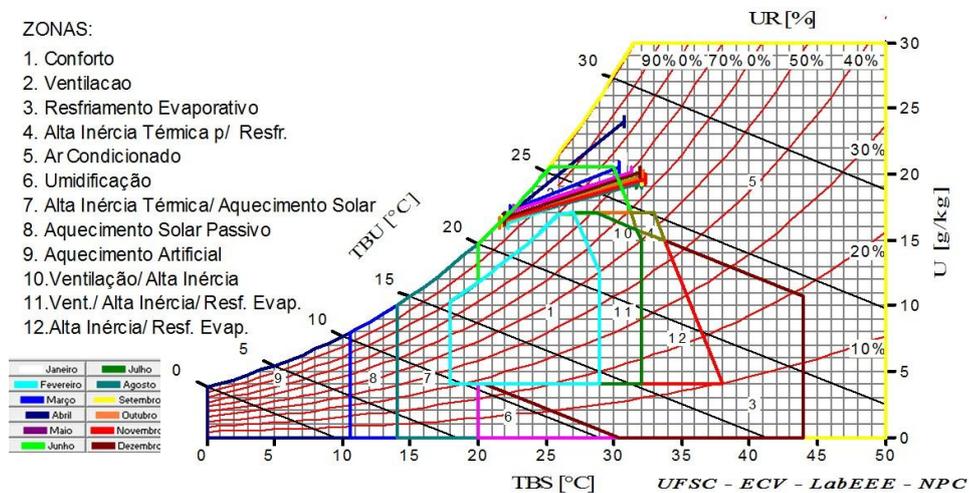


- 1- Zona de Conforto
- 2- Zona de ventilação
- 3- Zona de resfriamento evaporativo
- 4- Massa Térmica para resfriamento
- 5- Zona de refrigeração artificial
- 6- Zona de Umidificação
- 7- Massa Térmica/Aquecimento Solar
- 8- Aquecimento Solar Passivo
- 9- Zona de Aquecimento Artificial

Fonte: Goulart et al. (1997, p. 10).

A cidade de Belém, que faz parte da zona bioclimática 8, tem a sua carta bioclimática caracterizada pela concentração de normais na zona de ventilação, indicando que naqueles períodos em que as normais estão na zona de ventilação, a edificação vai necessitar do auxílio da ventilação natural para a manutenção do conforto térmico (Figura 3).

Figura 3 - Carta bioclimática de Belém, PA



Fonte: Analysis Bio.

2.5.2 NBR 15575

A NBR 15575 estabelece dois procedimentos para a avaliação de desempenho térmico numa edificação: normativo e informativo (ABNT, 2013). O procedimento normativo se subdivide em dois métodos: o simplificado e o de simulação computacional. O procedimento informativo se refere ao método de medição *in loco*.

2.5.2.1 Procedimento Simplificado

O procedimento simplificado verifica o atendimento aos requisitos e critérios para o envelopamento da obra com base na transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) das paredes de fachada e cobertura, utilizando os modelos de cálculos estabelecidos pela NBR 15220-2, de tal forma que a avaliação simplificada prevê que as paredes da fachada atinjam apenas o nível M (mínimo) de atendimento, que é obrigatório. Em outras palavras, se U calculada para a envoltória em análise for igual ou menor que o U_{limite} e a CT calculada for superior ou igual ao CT_{limite}, considera-se que a parede atende ao nível mínimo de desempenho. No caso da zona bioclimática 8, a capacidade térmica é desconsiderada (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores admissíveis de transmitância (U), de acordo com o valor da absorvância (α) da superfície

Zona Bioclimática	Absortância (α)	Transmitância (U)
8	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 3,7$
	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 2,5$

Fonte: Adaptado NBR 15220.

Para a obtenção dos valores de transmitância térmica e capacidade térmica para atendimento aos requisitos da norma NBR 15575 pelo método simplificado são utilizadas equações contidas na NBR 15220, que permitem obter o resultado da resistência térmica das paredes através da soma das respectivas resistências térmicas de cada material componente, que por sua vez permite calcular o valor da transmitância, assim como da Capacidade Térmica.

2.5.2.2 Procedimento por Simulação Computacional

De acordo com a NBR 15575-3 (ABNT, 2013), se os valores obtidos com relação a “U” e “CT” se mostrarem insatisfatórios frente aos critérios e métodos estabelecidos, o desempenho térmico global da edificação deve ser avaliado por simulação computacional através da utilização do software *EnergyPlus*.

Segundo a norma, na simulação computacional a avaliação deverá ser feita considerando os dias típicos de verão e de inverno, os quais, como a norma não estabelece estes dias, os mesmos podem ser obtidos através do arquivo climático.

Para a avaliação nas condições de verão e inverno, a norma prescreve que uma unidade habitacional seja submetida as condições mais críticas de calor e de inverno, definidas como dias típicos. No caso da zona bioclimática 8, a simulação deve ser realizada somente para o verão, considerando os ambientes analisados com aberturas voltadas para o oeste e norte. Deve ser considerado também o sombreamento, com uma taxa de ventilação de 1 renovação/hora assim como o coeficiente de absorvância da cor da superfície externa exposta a radiação solar direta. Caso não haja cor definida, devem ser considerados os seguintes coeficientes: cores claras (0,3), médias (0,5) e escuras (0,7). Caso os resultados da simulação não sejam satisfatórios, deve ser realizada nova simulação considerando a proteção de 50% da abertura da janela e uma ventilação de 5 Ren/h.

2.5.2.3 Medição *in loco*

A verificação do atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos na NBR 15575 (ABNT, 2013) por meio de medições em edificações existentes ou protótipos construídos para esta finalidade trata-se somente de um método informativo, não se sobrepondo ao método de simulação computacional.

2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA NORMA NBR 15575

A norma de desempenho da NBR 15575 (ABNT, 2013), apesar de estar em vigor, tem recebido críticas de diversos pesquisadores sobre a metodologia de avaliação do desempenho térmico pelos métodos simplificado e de simulação energética. No método simplificado, a incerteza é bastante significativa, ao passo que na simulação computacional, da forma como

está sugerida na norma, não avalia a influência da variação anual da temperatura, não contempla estratégias de ventilação natural e não prevê cargas internas de ocupação e iluminação (SORGATO, 2013).

Segundo Ferreira et al. (2015), estudos apontam inconsistências nas normas NBR 15220 (ABNT, 2005) e a NBR 15575 (ABNT, 2013), principalmente no que se refere aos valores limites estabelecidos para as características termo físicas das paredes e coberturas. Vários estudos realizados detectaram incoerências entre o procedimento simplificado proposto pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013) e seu método de simulação. Após avaliar uma habitação de interesse social, através dos métodos simplificado e por simulação, Chvatal (2014) aponta que o procedimento simplificado não representa de forma correta os impactos da transmitância e da absorvância das paredes exteriores e da cobertura, avaliados pelo método de simulação, podendo levar a resultados de desempenho equivocados.

Com relação ao método simplificado da NBR 15575, Abreu et al. (2017) destaca que o mesmo não considera as diferentes necessidades de verão e inverno, além do fato da avaliação ficar limitada às superfícies opacas, não deixando claro como deve ser o procedimento de cálculo de transmitância térmica e capacidade térmica com vedações verticais com aberturas externas, assim como desconsidera a orientação solar dos fechamentos verticais e de cobertura. Já com relação aos métodos de simulação e medição, os mesmos autores relatam que existe uma lacuna com relação às variáveis não definidas pela norma. Isso ocorre porque o procedimento de simulação computacional da NBR 15575 desconsidera, entre outras variáveis, o ganho de calor interno e a ocupação nas suas análises, mesmo sendo sabido que simulações computacionais recentes mostram que a ação dos usuários, em função do desempenho térmico da edificação e da sensação térmica dos mesmos, tem forte impacto no consumo de energia.

As análises foram realizadas comparando os dados provenientes dos dois procedimentos normativos, ou seja, os dados da simulação com dados provenientes da medição. Tendo sido detectadas algumas incoerências que sugerem alguns itens a serem observados na próxima revisão da NBR 15575 (ABREU et al., 2017).

Como proposta de alteração, foi desenvolvido pelos pesquisadores novo método de simulação durante a consulta pública da NBR 15575, no qual a avaliação de desempenho térmico da edificação se faz através dos graus-hora de resfriamento e aquecimento.

Neste caso, na simulação computacional consideram-se os dados climáticos da cidade na qual o modelo avaliado está inserido. Estes dados poderão ser obtidos dos arquivos climáticos. No Brasil, os principais tipos de arquivos climáticos utilizados pelos programas de simulação

computacional são o *Test Reference Year* (TRY), o *Typical Meteorological Year* (TMY), o *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) e o do INMET (dados medidos nas estações automáticas do INMET, com extensão epw) (LAMBERTS; DUARTE, 2016).

O arquivo climático TRY representa um ano de dados médios para um local específico, sem extremos de temperatura. Compreendendo as variáveis de temperatura de bulbo seco; temperatura de orvalho; umidade relativa do ar; direção e velocidade dos ventos; nebulosidade; pressão barométrica e radiação solar. Os disponíveis no Brasil foram determinados sobre um período de 10 anos de medições, apenas para 14 capitais (SCHELLER et al., 2015). O arquivo climático TMY também representa um ano climático sem extremos de temperatura, entretanto este é gerado pela compilação de meses sem extremos de temperatura, a partir de uma série de dados anuais disponíveis. Ou seja, o arquivo TMY é gerado por dados climáticos de meses provenientes de anos diferentes.

Em contraposição ao método de avaliação de desempenho térmico da norma NBR 15575, realizada através dos dias típicos de verão e inverno, Sorgato et al. (2013) desenvolveu e propôs um novo método de simulação que determina a avaliação do desempenho térmico da edificação através dos graus hora de desconforto. Este método permite quantificar o desconforto térmico dentro de um período de tempo, buscando os períodos em que a temperatura interna ultrapassa os limites (inferior ou superior) do intervalo de conforto térmico. Estes limites do intervalo de conforto térmico podem ser fixos durante todo o período avaliado ou adaptativo. Neste último caso, os valores dos limites superiores e inferiores de temperatura dos intervalos de conforto térmico, estipulados a partir de uma temperatura de referência, se alteram dinamicamente durante o período avaliado.

O desempenho térmico da edificação ventilada naturalmente, segundo Sorgato et al (2013), é avaliado através dos indicadores de graus-hora de resfriamento ($^{\circ}\text{ChR}$) e graus-hora de aquecimento ($^{\circ}\text{ChA}$), os quais avaliam o desempenho térmico da edificação para o calor e para frio, respectivamente. Os ambientes de permanência prolongada são avaliados através da comparação entre o desempenho térmico da edificação sob avaliação com o desempenho térmico de uma edificação de referência (SORGATO et al., 2013).

Os indicadores de $^{\circ}\text{ChR}$ e $^{\circ}\text{ChA}$ dos ambientes de permanência prolongada da edificação sob avaliação devem ser iguais ou menores que os graus-hora de resfriamento e graus-hora de aquecimento da edificação de referência para que esta apresente desempenho satisfatório. Sendo que, no caso de uma unidade habitacional, entende-se por ambientes de permanência prolongada os dormitórios e as salas de estar. Neste caso, não são considerados ambientes de permanência prolongada o banheiro, a cozinha e as circulações.

2.7 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS PARA A SIMULAÇÃO

Na busca por edificações eficientes energeticamente, Gomes (2012) destaca que os programas computacionais se apresentam como uma ferramenta importante na análise do comportamento térmico de determinada edificação, já que permitem a análise de diferentes propostas de projeto de forma rápida.

Muitos programas de simulação térmica e energética de edificações foram desenvolvidos em diferentes países com o intuito de auxiliar arquitetos, engenheiros e projetistas na elaboração de edificações com maior nível de eficiência energética (WESTPHAL; LAMBERTS, 2005), onde a utilização desses programas de simulação possibilitou que o efeito de cada fator isoladamente fosse analisado, o que nem sempre é possível em um caso real (SORGATO et al., 2013).

No Brasil, a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) recomenda o emprego do programa *EnergyPlus*, sendo que outros programas de simulação poderão ser utilizados, desde que permitam a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima, sendo capazes de reproduzir os efeitos de inércia térmica e sejam validados pela ASHRAE *Standard* 140.

2.7.1 Programa *Energy Plus*

2.7.1.1 Apresentação do programa

O *EnergyPlus* é um programa de simulação térmica e energética de edificações que possibilita desenvolver estudos no sentido da melhoria da eficiência energética de uma habitação existente, ou ainda, em fase de projeto (SILVA; GHISI, 2014). Trata-se de uma das ferramentas de software de simulação de energia mais conhecidas. Seu desenvolvimento começou em 1996, patrocinado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE). O governo dos EUA estava inicialmente desenvolvendo duas ferramentas de *software*, o BLAST e DOE-2, que foram criadas nos anos 70 para a simulação numérica de desempenho energético e dimensionamento de sistemas de climatização. Entretanto, foram abandonadas após muitas discussões, representando um primeiro passo e a base de trabalho do *Energy Plus*.

Sendo assim, *EnergyPlus* foi desenvolvido com base nos melhores recursos do BLAST (Modelagem da edificação) e DOE-2 (Modelagem dada aos sistemas de

condicionamento de ar). Esta fusão dos programas foi batizada pelo Departamento de Energia dos EUA como *EnergyPlus* (BUORO et al., 2006). Trata-se de um programa de simulação energética de edificações para modelar o aquecimento, resfriamento, iluminação, ventilação e outros fluxos de energia. Entretanto, apesar do *EnergyPlus* não possuir nenhuma interface gráfica, seus resultados saem como arquivos de texto capazes de serem tabulados em outras plataformas.

Silva (2010) completa afirmando que, por ser uma ferramenta de simulação térmica e energética útil e eficiente, o *EnergyPlus* possibilita um estudo mais real que permite complementar qualquer análise. Esta ferramenta de otimização faculta, não só, o cálculo das necessidades energéticas, como também, o estudo das temperaturas, das condições de conforto e da eficiência dos sistemas de climatização.

O *EnergyPlus* calcula as temperaturas internas em edifícios não condicionados, através de arquivos climáticos de dados horários, como também, entre outras funções, permite a análise das cargas térmicas provenientes dos componentes construtivos. Desta forma, possibilita a verificação do desempenho térmico de diferentes tipologias de edificações, inclusive aquelas não condicionadas artificialmente (ventilação natural), considerando as condições ambientais dos locais onde as mesmas encontram-se inseridas (BATISTA et al., 2005).

2.7.1.2 Limitações do programa

Apesar de ser uma excelente ferramenta para a simulação e avaliação de desempenho de edificações, o *Energyplus* apresenta algumas limitações e particularidades que dificultam a sua utilização. Coronato et al (2017) apontam que o *EnergyPlus* foi projetado especificamente para a simulação de energia de edifícios, portanto, possui dificuldades quanto à construção física dos edifícios, pois não possui recursos ou interações gráficas. Torna-se útil aos profissionais ligados ao projeto e construção de casas, que sejam utilizadas interfaces que simplifiquem o seu uso como por exemplo no caso do *Euclid*, cuja versão 0.9.3 é uma extensão gratuita para o *SketchUp*, disponibilizada pelo *Big Ladder Software*. A partir desta extensão, o arquivo geométrico pode ser exportado para o formato IDF, utilizado pelo *Energyplus*.

Outra limitação são os dados de entrada, no caso, o valor máximo da temperatura de superfície do solo aceito pelo programa é de 25° (CASTAÑO, 2017). No caso de locais onde os valores de temperatura são maiores que 25°, como no caso de Belém do Pará, isto se

configura como uma limitação. Além disso, as complexas linguagens das ferramentas, assim como dos dados de entrada requeridos e a dificuldade de interpretação dos registros extraídos, são apontadas por Meusel e Westphal (2017) como uma das dificuldades para a introdução de simulação computacional à rotina do processo de projeto.

Silva (2010), em seu trabalho sobre utilização do *Energy Plus*, enfatiza que se trata de uma ferramenta de simulação complexa e de difícil compreensão, mas que também é um instrumento muito completo e, tendo bom conhecimento do mesmo, o usuário consegue obter resultados credíveis e bastante favoráveis com relação ao estudo de desempenho térmico ou energético. Nesse aspecto, pode-se dizer que o *Energy Plus* é uma ferramenta das mais potentes, mas exige do usuário muita experiência e conhecimentos avançados.

2.8 CALIBRAÇÃO

Os programas de simulação computacional são ferramentas que permitem analisar com muita precisão o comportamento térmico e energético das edificações. Entretanto, os dados de entrada utilizados nos modelos computacionais podem gerar imprecisão dos resultados e simplificação dos modelos (BARBOSA; GHISI, 2017). Sendo assim, antes de se realizar a simulação computacional para a avaliação de desempenho de determinada edificação, é imprescindível a realização do processo de calibração do modelo que será avaliado, pois através do processo de calibração do modelo de simulação é possível obter resultados mais confiáveis e que representem a edificação estudada.

O processo de calibração consiste em comparar os resultados da simulação com valores de referência visando corrigir erros e reduzir incertezas do modelo (GALVARRO et al., 2013). A calibração trata de comparar os valores de temperatura do ar obtidos na simulação do modelo com os valores obtidos no monitoramento da edificação. Caso haja diferenças estatisticamente significativas, o modelo simulado deve sofrer variações dos dados de entrada até que o valor de temperatura obtido por simulação fique igual ou o mais próximo possível da temperatura monitorada.

Diversos métodos de calibração podem ser encontrados na literatura como, por exemplo, o de Fernandes e Labaki (2015). Neste, a qualidade da calibração pode ser estimada por diferentes indicadores, estando entre os mais utilizados o *Coefficient of Variation of the Root Mean Squared Error* (RMSE) e o *Normalized Mean Bias Error* (NMBE). Estes indicadores determinam a diferença entre os dados obtidos por meio de medição realizada no edifício e através da simulação. Conforme a recomendação, os valores limites do CV(RMSE)

e do NMBE são de 30% e de 10%, respectivamente. Modelos que apresentem dados dentro desses limites são considerados calibrados (FERNANDES; LABAKI, 2015).

Outro procedimento de calibração foi o adotado por Galvarro et al. (2013) para a análise estatística dos dados medidos e simulados em uma unidade familiar. O autor utilizou o erro quadrático médio (EQM) e o viés médio (viés M). O erro quadrático médio mostra o erro absoluto entre as grandezas analisadas, de tal forma que, quanto menor o valor do EQM, maior será a proximidade entre os dados simulados e dados medidos. O viés médio é usado para identificar qual a tendência que o modelo em estudo tem para superestimar ou subestimar os valores coletados. Caso viés M seja positivo, os dados simulados são maiores que os dados medidos e vice-versa (GALVARRO et al., 2013).

Barbosa e Ghisi (2017) demonstraram em seu trabalho de calibração de um modelo computacional de uma tipologia residencial na cidade de Goiânia que a alteração realizada nos dados de entrada será considerada satisfatória quando o desvio médio e o erro quadrático médio foram inferiores aos valores da simulação anterior, até então considerada a mais calibrada, assim como o coeficiente de determinação (R^2) fique próximo de 1 e a amplitude térmica próxima do valor monitorado.

2.9 HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL

A falta de acesso a moradia por parte de uma parcela considerável da população é um dos problemas comuns em países considerados em desenvolvimento como o Brasil. Haja vista que o déficit habitacional brasileiro sempre foi muito grande, onde, por muito tempo, o tipo de moradia predominante foi a casa de aluguel e a produção habitacional estava ligada à iniciativa privada. O Estado não possuía grande participação no setor habitacional até a era Vargas (1930-1945). Foi quando a situação habitacional passou a ganhar atenção do poder público, sendo ponto fundamental nos planos e realizações do Estado Novo.

Conforme aponta Rubin e Bolfe (2014), outro marco importante foi a criação do sistema Financeiro da Habitação (SFH) através da Lei 4380/64 que instituiu a correção monetária e o Banco Nacional da Habitação (BNH). Esta configuração atuou entre 1964 e 1986, na qual as Companhias Estaduais de Habitação (COHABS) foram as principais responsáveis pelo atendimento das demandas do BNH.

Em 2009, o então presidente Luís Inácio Lula da Silva, lançou o PMCMV que tem uma grande abrangência social (MORAES; LABAKI, 2013). Esse programa tem por finalidade criar mecanismos de incentivo à produção e aquisição de novas unidades

habitacionais para famílias de baixa renda (FERREIRA, 2015), fazendo com que, para minimizar o déficit de moradias no Brasil, estejam sendo construídas HIS com o incentivo do Governo Federal. Entretanto, essas habitações têm projetos semelhantes para todo o país, não sendo trabalhada a sua adequação climática para as distintas regiões bioclimáticas brasileiras (JAUDY et al., 2015). Esta questão é pertinente, uma vez que o Brasil apresenta regiões de diferentes climas e microclimas, sendo que uma mesma tipologia de edificação pode ser recomendada para uma região e desaconselhada para outra. Por esse motivo, no Brasil, habitação de interesse social (HIS) tem historicamente apresentado problemas de conforto térmico e eficiência energética (GRIGOLETTI et al., 2009).

Por outro lado, como resultado de uma política que privilegia basicamente a redução de custos, estas habitações apresentam elevados graus de desconforto e inadequação à vida de boa parte dos seus domiciliados (MORENO; SOUZA, 2011). Isto se deve ao fato dos programas habitacionais brasileiros serem, na maioria das vezes, pensados isoladamente, com o objetivo apenas de produzir novas habitações para sanar o déficit habitacional sem que em seus projetos, sejam considerados critérios climáticos, sociais, geográficos e culturais. Haja vista que a definição de materiais e técnicas construtivas tem, na maioria dos casos, como pressuposto básico, a minimização de custos, geralmente caracterizando um baixo desempenho térmico destas edificações, gerando descontentamento dos usuários pela falta de conforto e maior consumo de energia (LUCAS et al., 2011).

Motezuki, Cheg e Pipiel (2005) destaca também que as habitações populares têm como característica seu tamanho reduzido e simplicidade na construção, visando o menor custo possível. Por isso, muitas vezes depois de terminada a obra, a HIS apresenta problemas como o aquecimento excessivo devido ao clima, agravado pelas deficiências de projeto e construção que geralmente não levam em conta de forma detalhada e precisa, os aspectos de conforto térmico e ventilação.

Todos estes fatores fazem com que em pleno século XXI o modelo projetado para a habitação de interesse social permaneça inalterado. Trata-se de soluções projetuais e construtivas repetitivas, sem ou com pouca participação dos futuros ocupantes no planejamento e elaboração do projeto da unidade habitacional (COSTA et al., 2015).

No caso da cidade de Belém, Costa e Perdigão (2012) identificaram que as novas unidades habitacionais produzidas pelas intervenções governamentais também seguem modelos habitacionais padronizados, sem atenção ao contexto cultural local, induzindo a maiores dificuldades na adaptação das famílias. O Estado tem priorizado excessivamente a questão do custo, em detrimento da qualidade. A disseminação de moradias desconsiderando

o conforto térmico tem resultado, em algumas regiões, em edificações impróprias para habitação (FERNANDES; KRÜGER 2005).

Diante desse cenário, Siqueira e Araújo (2014) concluem que os Programas de Habitação Popular no Brasil têm muito o que evoluir para que a construção de grandes conjuntos habitacionais resolva a maioria dos problemas de habitação do país, assim como o PMCMV precisa ser reavaliado do ponto de vista tanto quantitativo quanto qualitativo. Além disso, o Brasil é um país muito extenso, com diversas culturas, o que provoca problemas na padronização das construções dos Planos de Habitação Social.

2.10 *LIGHT STEEL FRAMING*

2.10.1 Histórico

A história do *Light Steel Framing* tem sua origem a partir do início do século XIX, entre os anos de 1810, quando tem início a conquista do território americano, e 1860, quando começa a migração para a costa oeste americana. O objetivo era atender a forte demanda por habitação naquele período devido ao rápido crescimento populacional naquela região, o que promoveu a utilização de materiais disponíveis em abundância no local, neste caso a madeira (CBCA, 2012) (Figura 4).

Figura 4 - Esqueleto estrutural em madeira



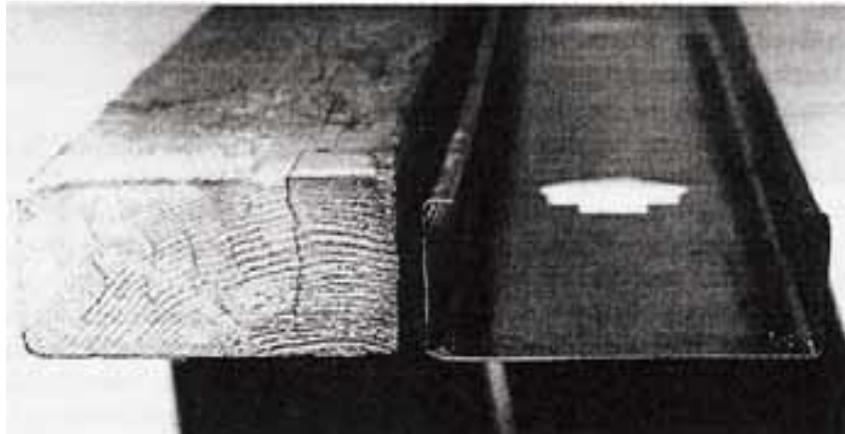
Fonte: CBCA (2010).

Os perfis de madeira foram utilizados para formar o “esqueleto estruturante” com o fechamento das paredes realizado também com peças de madeira. Estava nascendo o sistema *Light Wood Framing* que passou a ser amplamente utilizado na construção de residências em todo o território dos Estados Unidos da América (RODRIGUES; FREITAS, 2006 apud PENNA, 2009).

Já no século XX, com o crescimento da indústria do aço nos Estados Unidos, foi lançado na feira internacional de Chicago, em 1933, o primeiro protótipo de uma residência em *Light Steel Framing*, utilizando perfis de aço, extremamente leves em substituição aos perfis de madeira na construção do esqueleto estrutural da edificação (CBCA, 2010).

Após a segunda guerra mundial, com o crescimento da economia dos Estados Unidos e o aumento na produção de aço, os perfis de aço galvanizado foram gradativamente substituindo os perfis de madeira (Figura 5), contribuindo para evolução dos processos de fabricação dos perfis de aço formados a frio, tanto que nos anos 90 do século XX, cerca de 25% das casas americanas já eram de LSF (BALEMAN, 1998 apud PENNA, 2009).

Figura 5 - Montante em madeira e montante em aço galvanizado



Fonte: Brasilit (2010).

As primeiras construções em *Light Steel Framing* no Japão ocorreram após a segunda guerra mundial, devido a necessidade de reconstrução de 4 milhões de habitações, uma vez que o LSF proporcionava rapidez e segurança na construção, gerando um grande mercado para este sistema no país. Sendo que a decisão do governo japonês, no pós-guerra, de criar restrições à utilização de estruturas de madeira nas construções também contribuiu para o avanço da utilização do LSF nesse país, pois a madeira utilizada na estrutura das casas

originais foi um fator agravante dos incêndios que se alastraram nos ataques sofridos pelo Japão durante a guerra (PENNA, 2009).

No Brasil, o *Light Steel Framing* só chegou a partir do ano de 1990. Apesar disso, esse sistema vem sendo utilizado em grande escala no Brasil e sua aplicação tornando-se cada vez mais popular na região sudeste do país (SOUZA, 2010).

2.10.2 Vantagens e desvantagens

LSF vai ao encontro do conceito de construção industrializada, caracterizada pela racionalização da produção e produção seriada, através de uma mão de obra qualificada e padronização dos seus componentes, proporcionando a obra, entre outras vantagens, a otimização de custos, otimização de prazos e contenção de desperdícios. Na prática, conforme destaca Crasto (2005), o sistema LSF apresenta facilidade de montagem, de manuseio e de transporte devido à leveza dos elementos, além de durabilidade e longevidade da estrutura.

Entre as desvantagens está o fato de que nenhum dos componentes é produzido na Amazônia, o que do ponto de vista da sustentabilidade é negativo pela maior emissão de CO₂ decorrentes do transporte de materiais a longas distâncias. Outros aspectos de desempenho necessitam ser investigados como o conforto acústico e sua harmonização com as ações necessárias para o conforto térmico, visando a adequação do sistema as condições climáticas locais. A falta de mão de obra qualificada em grande escala, assim como a dificuldade de disponibilidade dos componentes de reposição em locais mais distantes do interior do país, para a aquisição imediata em caso de reforma, reparos ou ampliação de determinada edificação, também são pontos que precisam ser melhorados para a consolidação do LSF no Brasil. Sendo que à todos estes fatores pode ser adicionado a barreira cultural por parte dos usuários em aceitar um sistema construtivo novo, em detrimento de um sistema construtivo consolidado há décadas no país, como a alvenaria de tijolo, por exemplo.

2.10.3 Descrição do Sistema

O *Light Steel Framing* é um sistema construtivo de concepção racional, que tem como principal característica uma estrutura constituída por perfis leves de aço galvanizado, formados a frio que são utilizados para a composição de painéis estruturais e não-estruturais, vigas secundárias, vigas de piso, tesouras de telhado e demais componentes construtivos (Figura 6) (CBCA, 2010).

Figura 6 - Estrutura de residencial em *Light Steel Framing*



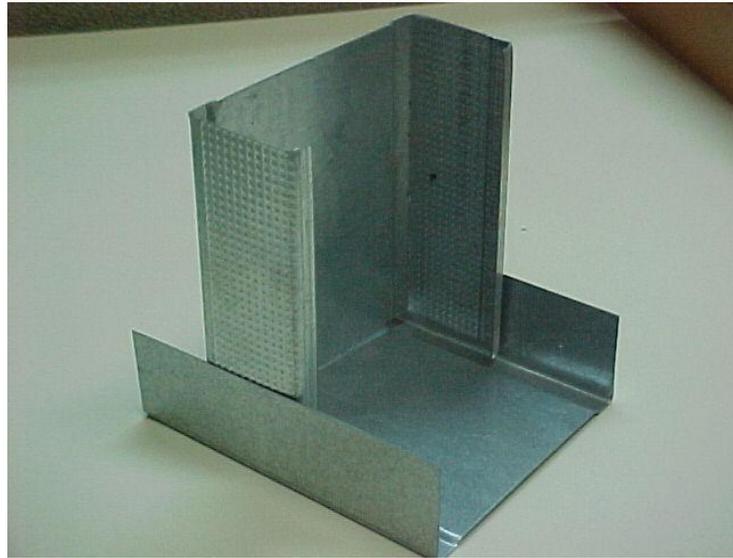
Fonte: Construtora Sequência (2003).

O termo LSF decorre da conjunção de dois conceitos básicos: *Frame* e *Framing*. O *Frames* e refere ao esqueleto estrutural projetado para dar forma e suportar a edificação, o qual é constituído elementos leves (*Light*) - perfis metálicos formados a frio (PFF), geralmente galvanizado por imersão a quente. O *Framing* é o processo pelo qual se unem e se vinculam esses elementos (CBCA, 2010). Conforme destaca Crasto (2005) a expressão “*Steel Framing*”, do inglês “*Steel*” (aço) e “*Framing*” (Estrutura, esqueleto...) define o sistema como um processo composto de um esqueleto estrutural em aço, formado por diversos elementos individuais ligados entre si, formando um conjunto capaz de, além de dar forma à edificação, resistir às cargas que solicitam esta edificação.

2.10.3.1 Perfis

A estrutura do sistema LSF é composta de perfis leves de aço zincados formados a frio, compostos de montantes, que são os perfis metálicos com função estrutural e as guias, perfis metálicos que tem a função de amarração, ambos de secção transversal “U”, sendo que, no caso do montante, o perfil “U” é enrijecido (Ue). Os montantes são espaçados entre si cerca de 400 a 600 mm, de acordo com o cálculo estrutural, compondo um painel estrutural autoportante com a função de absorver e distribuir as cargas, transmitindo-as a fundação (GOMES, 2007). Estes perfis de aço são revestidos com zinco ou liga alumínio-zinco pelo processo contínuo de imersão a quente ou por eletrodeposição. A figura 7 mostra a composição de perfis Ue como montante e guia.

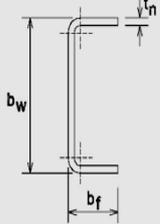
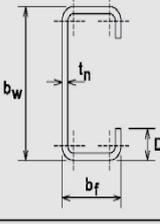
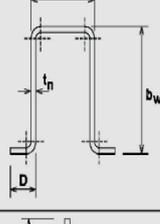
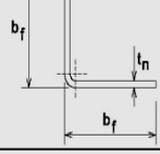
Figura 7 - Guia e montante em aço auto formado a frio galvanizado



Fonte: Acervo do autor.

Vale destacar que as seções mais comuns nas edificações em LSF são as com formato em “U” enrijecido (Ue) para montantes e vigas e “U” como guia na base e no topo dos painéis. O quadro 1 apresenta as seções transversais dos perfis utilizados e suas aplicações. A seção do perfil U (guia) possui alma (bw) e mesa (bf) que também pode ser chamado de flange ou aba, mas não possui a borda (D) que está presente no montante, isto permite o encaixe deste na guia. As guias não devem transmitir nem absorver os esforços, sendo isto feito pelos montantes, vigas e eventualmente pilares presentes na estrutura. As dimensões da alma dos perfis Ue variam geralmente de 90 a 300 mm (medidas externas), apesar de ser possível utilizar outras dimensões. Os perfis U apresentam a largura da alma maior que a do perfil Ue, a fim de permitir o encaixe deste no perfil guia ou U.

Quadro 1 - Designações dos perfis de aço formados a frio para uso em LSF e suas respectivas aplicações

SEÇÃO TRANSVERSAL	SÉRIE Designação NBR 6355:2003	Utilização
	<p>U simples</p> <p>U $b_w \times b_f \times t_n$</p>	<p>Guia</p> <p>Ripa</p> <p>Bloqueador</p> <p>Sanefa</p>
	<p>U enrijecido</p> <p>Ue $b_w \times b_f \times D \times t_n$</p>	<p>Bloqueador</p> <p>Enrijecedor de alma</p> <p>Montante</p> <p>Verga</p> <p>Viga</p>
	<p>Cartola</p> <p>Cr $b_w \times b_f \times D \times t_n$</p>	<p>Ripa</p>
	<p>Cantoneira de abas desiguais</p> <p>L $b_{f1} \times b_{f2} \times t_n$</p>	<p>Cantoneira</p>

Fonte: NBR 15253: 2005.

Os painéis associados a elementos de vedação exercem a mesma função das paredes das construções convencionais. Os montantes são unidos em seus extremos inferiores e superiores pelas guias, perfil de seção transversal U simples, cuja função é fixar os montantes a fim de constituir um quadro estrutural (figura 8).

Figura 8 - Guia e montante em aço auto formado a frio galvanizado e suas respectivas aplicações



Fonte: Google Imagens.

Os perfis metálicos formam, além dos painéis de parede, estrutura de laje e cobertura, sendo que os painéis de parede são revestidos em ambas as faces com placas que podem ser cimentícias, de gesso acartonado ou de OSB (Oriented Strand Board). Os painéis são fixados através de parafusos à estrutura dos perfis, que por sua vez são unidos por parafusos autobrocantes e por pinos especiais, formando painéis de paredes e estrutura de laje e cobertura, originando um conjunto autoportante, apto a receber os esforços solicitados pelas edificações. Em outras palavras, com resistência suficiente para suportar as cargas estabelecidas em projeto (CBCA, 2010).

2.10.3.2 Revestimento e conforto dos painéis externos e internos

No mercado nacional estão disponíveis diversos materiais adequados ao revestimento dos painéis, tanto interno quanto externo. Dentre os mais utilizados, podem ser destacados a placa cimentícia, o *siding* vinílico sobre placa OSB e o gesso acartonado.

A placa cimentícia é composta por cimento reforçado com fio sintético (no caso, polipropileno), sendo comercializada nas espessuras de 10 mm para as faces externas e 8mm de espessura para as faces internas (Figura 9). Caracterizam-se pela resistência aos impactos e à água, sobre a qual pode aplicar os mais diversos tipos de revestimento, variando desde pintura simples até revestimentos cerâmicos.

Figura 9 - Aplicação da placa cimentícia



Fonte: Internet

No caso de utilização de placas cimentícias, a estanqueidade é garantida através do tratamento de juntas entre as placas. Consiste em vedar o espaçamento de 3 mm entre placas, de tal forma que, após este tratamento, o painel já está pronto para receber qualquer tipo de acabamento. Esta junta é composta de massa cimentícia específica reforçada com telas de fios de vidro resistentes à álcalis (Figura 10). A função da tela é garantir a elasticidade necessária para evitar fissuras que poderiam ser ocasionadas pela movimentação das placas.

Figura 10 - Tratamento de juntas



Fonte: Acervo do autor

O *siding* vinílico é aplicado sobre base executada com placas de OSB, de espessura 12mm, protegido por manta hidrófuga para evitar umidade no interior do painel (Figura 11).

Figura 11 - Siding Vinílico aplicado sobre placa de OSB



Fonte: Revista Técnica.

Vale ressaltar que o *siding* é um revestimento de fachadas, composto de placas paralelas, muito comuns nas residências norte-americanas. O *siding* pode ser vinílico (PVC), de madeira ou cimentício. Já a placa de OSB são painéis compostos de fibras de madeira orientadas que proporcionam ao conjunto boa resistência mecânica.

O gesso acartonado proporciona um tipo de vedação vertical utilizada na compartimentação e separação de espaços internos das edificações. As placas de gesso acartonado são fabricadas industrialmente e compostas por uma mistura de gesso, água e aditivos, revestida em ambos os lados com laminas de papel cartão, que confere ao gesso resistência a tração e flexão (Figura 12).

Figura 12 - Gesso Acartonado ST



Fonte: Penna (2009).

2.10.3.3 Isolamento térmico e acústico

Para melhorar o conforto térmico e acústico das edificações podem ser utilizados materiais de isolamento como a lã de vidro, conforme mostrado na figura 13. Este material é facilmente recortado, pois o papelão acartonado que o reveste é quadriculado de 5 em 5 cm, permitindo a sua colocação nos vãos entre os montantes.

Figura 13 - Lã de vidro como isolante termo acústico



Fonte: Brasilit (2010).

2.10.3.4 Fundação

Pelo fato da estrutura de LSF ser muito leve, seus componentes de fechamento exigem bem menos da fundação do que outros sistemas construtivos (CBCA, 2010). No entanto, como a estrutura distribui a carga uniformemente ao longo dos painéis estruturais, a fundação deverá ser preferencialmente contínua suportando os painéis em toda a sua extensão. Por esse motivo, é geralmente usada a fundação do tipo *Radier* (Figura 14) ou a fundação tipo sapata corrida (Figura 15).

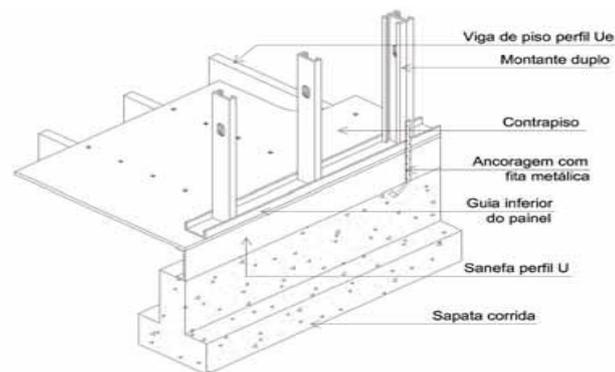
Figura 14 - Fundação em Radier



Fonte: Brasilit (2010).

É importante destacar, entretanto, que as fundações para uma edificação em LSF deverão ser efetuadas segundo o processo da construção convencional e como em qualquer outra construção deve-se observar o isolamento contra a umidade. Neste caso, a fundação em radier é a mais utilizada juntamente com a fundação do tipo sapata corrida.

Figura 15 - Sapata corrida



Fonte: CBCA (2010).

2.10.3.5 Laje

A estrutura de piso em LSF possui a mesma modelação e princípios estruturais dos painéis verticais (GOMES, 2007). Os perfis galvanizados, também enrijecidos, são chamados de vigas de piso, apresentam secção Ue, dispostas na horizontal, cujas mesas tem as mesmas dimensões dos montantes verticais, porém, a altura da alma é determinada principalmente pela modulação da estrutura e o vão entre os apoios verticais (Figura 16) (CBCA, 2010).

Figura 16 - Vigas de piso



Fonte: CBCA (2010).

A laje do sistema LSF, dependendo do tipo de contra piso, pode ser do tipo úmida ou do tipo seca, quando placas rígidas de OSB, painéis mistos, entre outros, são aparafusados a estrutura do piso.

- Laje Úmida

A laje úmida é composta basicamente por uma chapa ondulada de aço, aplicadas sobre as vigas metálicas de piso, com cantoneiras colocadas ao longo do perímetro de modo a formar uma caixa na qual será lançada uma camada de 4 a 6 cm de concreto armado com tela soldada que servirá como substrato para a colocação de vários tipos de piso, tais como porcelanato, madeira, lajotas cerâmicas, granitos, laminados, entre outros (Figura 17).

Figura 17 - Laje úmida



Fonte: CBCA (2010).

- Laje Seca

A laje seca é formada através da colocação de placas ou painéis rígidos, diretamente aparafusados sobre as vigas de piso, as quais já servem como contra piso. Entre as placas mais utilizadas como laje seca está o OSB com 18mm de espessura (Figura 18), que além de apresentar propriedades estruturais, favorecendo o uso como diafragma estrutural, é leve e de fácil instalação. Outra opção muito versátil são os painéis tipo sanduíche *Masterboard*, comercializados em espessuras de 23 e 40 mm, que após vedação das juntas entre os painéis e uma impermeabilização prévia de sua superfície, poderá receber argamassa para a colocação de vários tipos de piso, sendo recomendado a colocação de 2,5 cm de contrapiso com tela de aço, principalmente para o caso de pisos sintéticos (BRASILIT, 2010).

Figura 18 - Painéis *Masterboard* ou *Wall* aplicados sobre as vigas



Fonte: Brasilit (2010).

2.10.3.6 Cobertura

O LSF admite, para sua cobertura, outros sistemas construtivos, tais como estrutura em madeira, com os elementos convencionais, assim como todos os tipos de telhas comumente usadas, tais como telhas cerâmicas, de fibrocimento e metálicas (Figura 19).

Figura 19 - Casa em LSF: Cobertura com estrutura convencional em madeira e telha de Fibrocimento Belém-PA

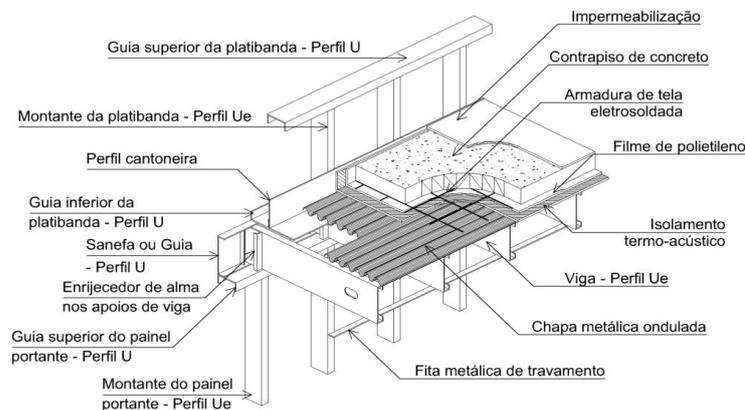


Fonte: Acervo do autor.

- Coberturas Planas

Apesar de serem menos comuns, as coberturas planas em LSF são, na maioria dos casos, resolvidas como uma laje úmida onde a inclinação para o escoamento da água é obtida variando a espessura do contrapiso de concreto (Figura 20) (CBCA, 2010).

Figura 20 - Cobertura plana em *Light Steel Framing*

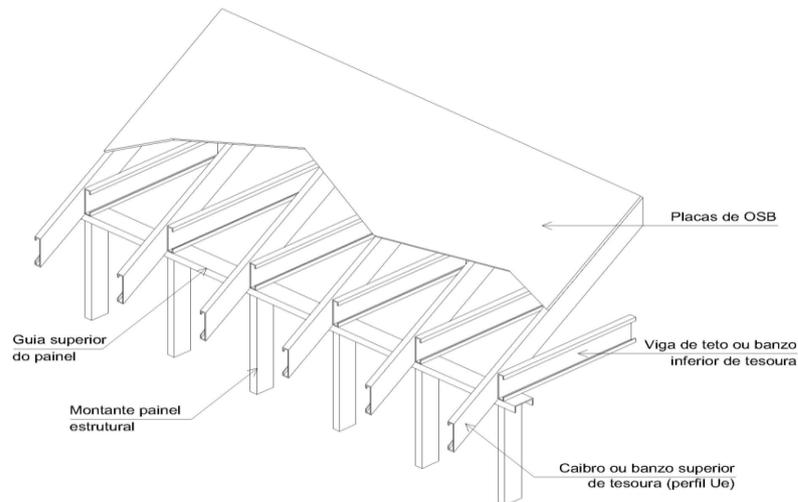


Fonte: CBCA (2010).

- Coberturas Inclinadas

A estrutura de um telhado inclinado em LSF é semelhante à de um telhado convencional, porém a armação de madeira é substituída por perfis galvanizados (Figura 21).

Figura 21 - Caibros e vigas alinhados com montantes de painel estrutural.



Fonte: CBCA (2010).

2.10.4 Aplicações do LSF em Habitações de Interesse Social

O sistema construtivo LSF pode ser utilizado 100% na construção de uma edificação de até 4 pavimentos (Figura 22). Ou seja, dentro do padrão das HIS do programa MCMV do governo federal (CEF, 2003).

Figura 22 - Edificação de 4 pavimentos em LSF



Fonte: Penna (2008).

Diante do crescimento, lento, porém constante da utilização do LSF no Brasil a partir da década de 90 (GOMES, 2007), o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) estabeleceu conjuntamente com o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBIS), SINDUSCON de

São Paulo e a CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (CEF), os requisitos e condições mínimas para financiamento de construções com o sistema construtivo utilizando perfis estruturais formados a frio de aços revestidos (CEF, 2003).

Com este intuito, o CBCA e seus parceiros nesta iniciativa, buscaram constituir um grupo de trabalho com o objetivo de fornecer subsídios suficientes para o estabelecimento de critérios de análise de solicitação de financiamento para a construção de edificações em LSF, por ser mais uma alternativa de sistema construtivo dentre os usualmente utilizados nos empreendimentos habitacionais financiados pela CEF.

O sistema LSF, assim como os demais sistemas construtivos que estão sendo utilizados em HIS, está submetido às normas e diretrizes para a avaliação de seu desempenho que permitam a sua utilização, assim como determinam e especificam os componentes destes sistemas. O texto base é a NBR 15.575 (ABNT, 2013) relacionada ao desempenho térmico do sistema e sua adequação as zonas bioclimáticas brasileiras através da NBR 15220 (ABNT, 2005) e a ABNT NBR 15253 (ABNT, 2014) referente aos perfis metálicos.

Além das normas supracitadas, há o Sistema Nacional de Avaliação Técnica (SINAT), através de suas diretrizes, estabelece critérios para a avaliação técnica do produto. Com relação à avaliação térmica do LSF, a DIRETRIZ SINAT determina a avaliação de três subsistemas: paredes, pisos e cobertura. Assim como, determina que a edificação atenda às exigências de desempenho térmico estabelecidas na NBR 15575 (ABNT, 2013) considerando a respectiva zona bioclimática estabelecida na NBR 15220 (ABNT, 2005) referente ao local da edificação.

O Sistema LSF possui dois DATEC (Documento de Avaliação Térmica): os de número 14 e 030 para os quais o IPT realizou a avaliação técnica do sistema em vários aspectos, entre estes o seu desempenho térmico de acordo com a diretriz SINAT 003.

A conclusão de ambos os DATECs foi que o sistema LSF atende ao critério de desempenho técnico mínimo da NBR 15575 (ABNT, 2013) para a tipologia de projeto considerada para uma edificação localizada na zona bioclimática 8, onde se encontra a cidade de Belém, desde que atenda, além da espessura da camada isolante, aos requisitos acerca da tonalidade das cores das fachadas, ventilação e sombreamento apontados no quadro 2

Quadro 2 - Resultado da avaliação de desempenho Térmico - LSF

Zona Bioclimática	Camada Isolante Sobre o Forro (2)	Cor do Acabamento Externo-Paredes			
		Condição Padrão 3	Com Sombreamento 4	Com Ventilação 5	Com Sombreamento e Ventilação 6
8	100	Não Atende	Claras	Não Atende	Claras

Fonte: Adaptado de SINAT (2003).

2.11 DESEMPENHO TÉRMICO DO SISTEMA *LIGHT STEEL FRAMING*

Inúmeras avaliações de desempenho térmico do sistema LSF foram realizadas, além do DATEC 14 e 30, tanto no Brasil como em outras partes do mundo através de artigos científicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado que apresentaram resultados relativos ao comportamento térmico do sistema e de seus materiais e componentes, inclusive com relação à influência de cada um, quando submetidos às variações térmicas ou temperaturas extremas. Além disso, os autores chamam a atenção para fatores que podem comprometer o desempenho térmico da edificação e que conseqüentemente devem ser considerados nas avaliações de desempenho.

2.11.1 Avaliação do desempenho térmico do *Light Steel Framing* por medição

Nascimento e Araújo (2015) realizaram análise de desempenho térmico de edificações em paredes externas em *Light Steel Framing* na cidade de Manaus (AM) através de medições *in loco*. Para as medições foi utilizado o aparelho termo higrômetro para determinar a temperatura do bulbo seco do ar e da umidade do ar no interior da edificação, com medições realizadas às 9h00, 12h00 e 15h00. Estes aparelhos foram posicionados no centro do dormitório e da sala a uma altura de 1,20m do piso, sendo que o período de medição correspondeu a um dia típico de verão e um dia típico de inverno. Estas medições foram realizadas em duas edificações com 111,09 m² no condomínio Tales de Mileto, localizado na zona centro-sul da cidade de Manaus-AM, a fim de comparar o desempenho entre as mesmas, onde uma foi construída com o sistema *Light Steel Framing*, com fechamento de placas cimentícias, e a outra construída em alvenaria estrutural com tijolo cerâmico. No caso do LSF as paredes foram revestidas com placas cimentícias nas duas faces e os vazios entre estas foram preenchidos com lã de vidro. Os resultados obtidos em relação ao desempenho térmico dos painéis de LSF para as condições de verão foi satisfatório, considerando que o LSF

atendeu ao critério de desempenho térmico exposto na tabela específica para a zona Bioclimática Z8 de acordo com parâmetros da NBR 15575, com a redução de temperatura interna de até 5,1°C em relação à temperatura externa. Desempenho melhor que o da parede de alvenaria estrutural cerâmica, que reduziu apenas 2,9°C, um valor ainda considerado satisfatório se analisado de acordo com os parâmetros da NBR 15575 (ABNT, 2013). Houve uma diferença na temperatura interna de até 2,6°C entre a edificação construída em *Light Steel Framing* e de alvenaria. As autoras concluíram que o sistema LSF, quando tem o espaço interno dos painéis das paredes externas isolado com lã de vidro, apresenta desempenho térmico satisfatório, ou seja, atende aos requisitos da norma NBR 15575 (ABNT, 2013). Entretanto, conforme determina a referida norma, a medição apresenta apenas caráter informativo e não se sobrepõe aos resultados de simulação, além do fato de que não houveram medições noturnas onde a temperatura externa é inferior a interna.

2.11.2 Desempenho térmico do LSF por simulação

Gomes (2007) avaliou duas habitações unifamiliares em *Light Steel Framing* através de simulação computacional por meio do programa *EnergyPlus* para obter a resposta global da edificação, considerando diferentes composições de painéis adequados ao clima das regiões de interesse (Curitiba, Belo Horizonte, Brasília, Goiânia, Teresina e Belém). Na simulação, o pesquisador considerou a resposta global da edificação em relação às interações térmicas existentes entre o ambiente externo e o ambiente construído. Sendo que o caso-base foi o projeto de uma edificação residencial unifamiliar em LSF a ser construída em Belo Horizonte. Cada ambiente do projeto representou uma zona térmica no *EnergyPlus* para que fossem obtidos resultados mais precisos, assim como também foram consideradas as características e as propriedades termo físicas dos materiais utilizados na composição dos painéis de fechamento.

Para o caso das simulações para a cidade de Belém do Pará. O autor utilizou para os fechamentos internos painéis com perfis (montantes) em aço galvanizado revestidos com placas de gesso acartonado de 12,5 mm, em ambos lados, com isolante em lã de vidro de 5cm de espessura no espaço interno do painel, entre as duas placas. Já para as paredes externas, foram utilizados painéis com fechamento em chapa de OSB, membrana de polietileno e *siding* vinílico, pela face externa, e na parte interna o fechamento foi com placa de gesso acartonado de 12,5mm. Vale informar que no caso das paredes externas não foi utilizado isolamento com lã de vidro. Para a cobertura foi utilizada telha cerâmica apoiada sobre placa de OSB através

de perfis em madeira (ripões) seguindo a mesma inclinação, onde todo este conjunto está apoiado sobre uma laje de forro feita em LSF com perfis metálicos de 20 cm de largura fechados com placa de OSB, na parte superior e placas de gesso acartonado na parte inferior.

Na simulação também foram consideradas as condições climáticas de Belém, localizada na zona bioclimática 8, onde os respectivos dados climáticos para o dia típico de verão das cidades analisadas, foram obtidos no diretório do *EnergyPlus*.

Os resultados obtidos mostraram um amortecimento da onda de calor externo pelos fechamentos em LSF, porém como as temperaturas internas atingiram valores maiores que 29°C, Gomes (2007) conclui que o condicionamento passivo se mostra insuficiente. Neste caso, o autor concluiu que a condição de projeto, com fechamentos em LSF analisada não apresentou desempenho térmico adequado para a cidade de Belém.

Souza (2010) apresentou um estudo numérico acerca da transferência de calor em modelos de painéis de *Light Steel Framing*. O estudo analisou a transferência de calor através da espessura da parede quando submetidas à elevadas temperaturas, assim como a variação e a distribuição da temperatura e a proteção térmica dos materiais envolvidos. A simulação foi realizada através do desenvolvimento de modelos numéricos utilizando um programa de simulação computacional ABAQUS que efetua cálculos por meio do método dos elementos finitos. Nesta simulação foi considerado que a parede de LSF padrão teria um de seus lados exposto a elevadas temperaturas, o que permitiu monitorar a variação de temperatura em função do tempo ao longo da seção da parede, utilizando como variáveis o aumento tanto do número de placas de fechamentos e materiais de isolamento como também da espessura da camada de lã de vidro. O autor constatou que emprego das placas de gesso acartonado como material de fechamento nos painéis das paredes do sistema construtivo LSF com isolamento em lã de vidro, foi bastante satisfatório, proporcionando condições de isolamento térmico e proteção térmica para o perfil formado a frio, mostrando ser uma ótima opção para reduzir a transferência de calor, de tal forma que, o acréscimo de mais placa nos modelos, fez com que a elevação de temperatura ao longo da seção da parede tivesse uma redução significativa. O autor conclui que a presença da lã de rocha, material com baixa condutividade térmica, também proporciona a manutenção da temperatura por um período de tempo maior no entorno do perfil em comparação aos modelos sem isolamento.

Nos três estudos acima citados, os seus respectivos autores apontaram a eficiência do isolamento térmico das paredes de LSF na redução ou no amortecimento da transmissão de calor através destes painéis. Correlacionado à maior resistência térmica com melhores índices de conforto térmico para o ambiente interno. Indicando que, quanto mais isolada uma parede

de fechamento do ambiente estiver, quanto maior resistência térmica esta apresentar, melhor será o desempenho térmico que esta proporcionará a este ambiente interno. Entretanto estas afirmações se contrapõem ao que Roriz, Chvatal e Cavalcanti (2009) apresenta em seu estudo, no qual relata que em muitas construções monitoradas no Brasil, há diversos casos em que o isolamento mais prejudica do que contribui para o conforto térmico da edificação, principalmente quando este ambiente apresenta altas fontes de ganho de calor, como os ganhos solares de um ambiente interno ocorrido através do vidro de uma janela, em que as paredes isoladas, com alta resistência térmica restringem as perdas de calor para o ambiente externo, quando este apresenta menor temperatura. Em seu estudo, Roriz, Chvatal e Cavalcanti (2009) analisou termicamente um ambiente utilizado como escritório, onde este ambiente foi simulado sob 9 climas, correspondente a 9 cidades brasileiras, através do programa *EnergyPlus*. Considerando 4 tipos de parede de concreto cada uma com um valor de Resistência Térmica, utilizando 3 taxas de ventilação (2,5 e 10 ren/h) para o ambiente. Como resultado, dos 9 climas analisados, 8 apresentaram desconforto térmico proporcional a resistência térmica das fachadas, apontando que paredes com resistência mais alta provocam mais desconforto térmico ao ambiente interno de edificação com ventilação natural.

2.11.3 Inércia térmica do solo e ventilação natural no desempenho térmico do LSF

Amparo et al. (2011) avaliou o desempenho térmico de uma edificação unifamiliar projetada em LSF adotando como diretriz de pesquisa a intenção de verificar a influência de fatores externos no conforto térmico de uma edificação, considerando algumas estratégias de ventilação natural e a influência da inércia térmica do solo em Belo Horizonte. Para este estudo o autor adotou o programa computacional *EnergyPlus*, seguindo as seguintes etapas: caracterização da edificação, das condições típicas de exposição ao clima, do perfil de ocupação, das exigências humanas, configuração do sistema de fechamento e avaliação das condições de conforto térmico nos ambientes em concordância com as normas específicas.

Os autores observaram que a estratégia de ventilação natural, quando adequadamente utilizada, em função das condições climáticas locais, proporciona uma melhora significativa no desempenho térmico da edificação, assim como a inércia térmica do solo pode ter um papel importante no balanço térmico da edificação. O contato com o solo pode servir como uma estratégia de inércia térmica para resfriamento, assim como a topografia do terreno e as características do projeto.

Neste caso, Amparo et al (2011) concluiu que a interferência do solo ocorre para alguns ambientes localizados no primeiro pavimento, principalmente aqueles voltados para a fachada sul. Foi considerado o valor da temperatura superficial interna da parede em contato com o solo, como também o ambiente ventilado com uma taxa constante de 4 ren/h e o não ventilado, conforme preconizado na NBR 15575 (ABNT, 2008). Os autores constataram que as temperaturas superficiais são mais baixas quando ocorre o contato com o solo, em média 1°C, alcançando uma diferença máxima de 1,5°C no período vespertino. Já a taxa de ventilação de 4 ren/h representou, nesse caso, uma redução média na temperatura interna de 3,5°C. Ainda com relação inércia térmica do solo, Gomes (2011) afirma seu papel importante no balanço térmico da edificação, uma vez que o contato com o solo pode servir como uma estratégia para resfriamento e/ou aquecimento, assim como a ventilação natural pode também ser utilizada como uma importante estratégia de resfriamento passivo de ambientes.

2.11.4 Inércia térmica dos painéis de fechamento em LSF

A utilização de sistemas de fechamento empregando material com inércia térmica elevada proporciona a diminuição na amplitude da temperatura do ar interior em relação à temperatura exterior. Por outro lado, a temperatura interna de uma edificação que utiliza envoltória com baixa inércia térmica sofre grande influência das condições climáticas externas (GOMES, 2011).

Em locais onde a amplitude térmica não excede 10°C e a temperatura externa máxima fica em torno de 31°C, o uso da inércia térmica pode ser efetivo quando conjugado com ventilação noturna (GOMES, 2011). No caso de edificações com ocupação predominante diurna e condições climáticas com amplitudes térmicas diárias maiores que 10°C, é recomendado o uso de fechamentos com elevada massa térmica.

Neste aspecto, Pacheco (2013) destaca a importância da transmitância térmica da envoltória e do seu sombreamento para o conforto térmico do ambiente interno, ao afirmar que paredes externas com menores transmitâncias térmicas reduzem o aumento da temperatura das faces internas, mas, ao mesmo tempo, também reduzem a perda interna de calor para o exterior quando a temperatura interna for maior que a externa. Entretanto, o autor afirma que os ganhos de calor pela falta de sombreamento das paredes externas podem ser compensados, em alguns casos, pela sua menor transmitância térmica. Neste caso, a combinação de sombreamentos das superfícies transparentes associadas à menor transmitância térmica pode ser o caminho para a redução do consumo de energia noturno pelo ar condicionado.

2.11.5 Pontes térmicas

Ponte térmica é o efeito que ocorre quando um elemento de alta condutividade térmica, como o aço, colocado em paralelo com um material isolante, permite por condução, naquele ponto, a passagem da maior parte de calor, reduzindo a resistência térmica do painel. No caso de fechamento de uma edificação, esta comprometerá seu desempenho térmico e conseqüentemente os aumentos dos gastos energéticos para o resfriamento dos seus respectivos ambientes internos no caso de locais de clima quente (GOMES, 2012).

2.11.5.1 Impacto das pontes térmicas em edifícios em LSF

No caso de um painel em *Light Steel Framing*, as pontes térmicas ocorrem através dos perfis de aço galvanizados que compõem a estrutura de sustentação, onde a alta condutividade térmica do aço pode levar a pontes térmicas significativas. Angelis e Serra (2014) em seus estudos acerca das pontes térmicas e o desempenho dos isolamentos em painéis estruturados em aço formados a frio, observaram que alguns dados de fabricantes italianos desses sistemas ignoram o efeito térmico da estrutura metálica no cálculo da resistência térmica dos respectivos painéis em LSF, desta forma superestimando a sua resistência térmica em até 200%, dependendo dos detalhes da construção. Em outras palavras, se nos painéis de *Light Steel Framing* não forem consideradas a heterogeneidade dos materiais e o alto poder de transmitância de elementos metálicos, ocorrerá uma superestimação da sua resistência térmica, uma vez que até os parafusos metálicos também são importantes pontes térmicas.

Na utilização do programa *Energy Plus* na avaliação de desempenho térmico de edificações em *Light Steel Framing*, Gomes (2012) destaca que podem ser considerados métodos que incluem ou não a estrutura de aço leve formado a frio que compõem os painéis no cálculo da resistência térmica. No caso de cálculo do desempenho considerando os perfis de aço, podem ser utilizados o método ART (apenas a resistência térmica), CSM (com e sem os montantes), PE (paredes equivalentes) e o método PTC (propriedades térmicas combinadas), baseado no método de Purdy e Beausoleil-Morrison (2001). Este último consiste no cálculo da resistência térmica do painel, considerando o efeito da estrutura e o ajuste da condutividade térmica da camada que contém os montantes, na qual a densidade e o calor específico também devem ser ajustados a fim de combinar a massa térmica dos perfis com o isolamento.

No método PTC a camada que contém o isolamento e os perfis é considerada a camada composta, sendo representada por apenas um material (Figura 23). Para tal, se faz

necessário o ajuste das demais propriedades térmicas. O procedimento é uma simplificação e consiste em criar um novo material com propriedades térmicas modificadas (GOMES, 2012), permitindo assim a entrada dos dados dos componentes do painel no programa *EnergyPlus* para consideração das pontes térmicas na simulação (equações 1 e 2).

$$\rho_s = \sum_{i=1}^N C_i \cdot \rho_i$$

onde:

ρ_s - Massa específica (kg/m³)

C_i - Fração volumétrica do material i ,

ρ_i - massa específica do material i (Kg/m³)

$$C_i = \frac{V_i}{V_s} \quad (2)$$

O calor específico do sólido composto C_s pode ser determinado pela equação 3.

$$\sum_{i=1}^N V_i \cdot \rho_i \cdot C_i = V_s \cdot \rho_s \cdot C_s \quad (3)$$

Onde:

V_i - Volume do material i (m³)

ρ_i - Massa específica do material i (Kg/m³)

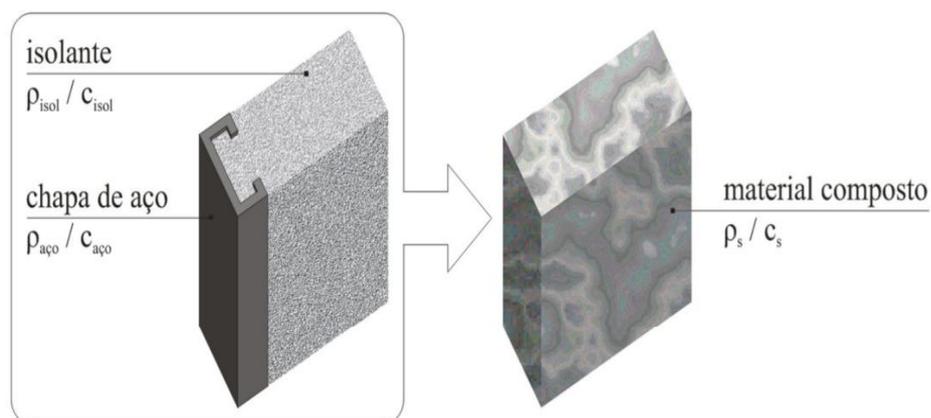
C_i - Calor específico do material i [KJ/(kg.k)]

V_s - Volume do sólido composto (m³)

ρ_s - Massa específica do sólido composto

C_s - Calor específico do sólido composto [KJ/(Kg.K)].

Figura 23 - Criação de um material com propriedades térmicas ajustadas



Fonte: Gomes (2012).

Para a determinação da resistência térmica em painéis de LSF, considerando a influência das pontes térmicas, Gomes (2012) utilizou o Método das Zonas Modificado (MZM), que é de uso exclusivo para painéis com estrutura de aço e material isolante entre os montantes.

Gomes (2012) também apresentou o impacto das pontes térmicas sobre o desempenho térmico dos edifícios construídos em LSF no Brasil, no qual empregou para esta análise o programa de simulação numérica *EnergyPlus*, juntamente com um MZM especificamente concebido para considerar os efeitos de estruturas metálicas nas simulações, no qual foram avaliados o desempenho térmico de seis tipologias, incluindo edifícios naturalmente ventilados e condicionados artificialmente na cidade de Belo Horizonte-MG. O autor observou que nas edificações naturalmente ventiladas não houve diferenças significativas entre os resultados em que foram e não foram considerados os efeitos das pontes térmicas (Tabela 2).

Tabela 2 – Diferença de desempenho térmico entre painéis de LSF, com e sem considerar as pontes térmicas

	Sem Sombreamento	50% de sombreamento
Absortância (α)	0,3	0,3
Diferença Máxima	0,2°C	0,2°C
Diferença Média	0,1°C	0,2°C

Fonte: Adaptado de Gomes (2012).

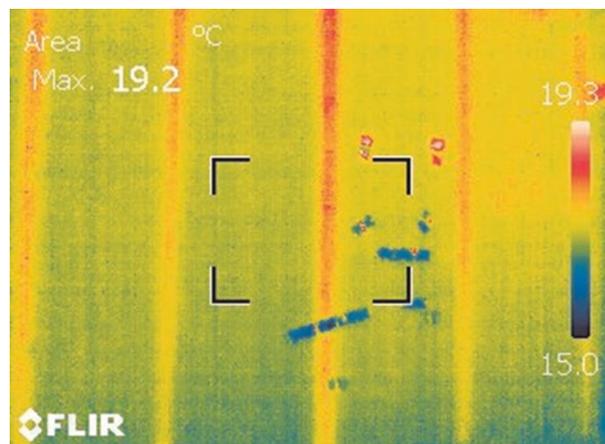
No caso das edificações condicionadas artificialmente, Gomes (2012) constatou que, ao ser aumentada a diferença de temperatura entre o interior e o exterior da edificação, por meio de condicionamento artificial de ar, os efeitos da ponte térmica passam a ser significativos, chegando a apresentar uma variação no pico da carga térmica em cerca de 10%. Entretanto a aplicação de uma camada externa de EPS rígido (25 mm), praticamente anulou por completo a transmissão excessiva de calor pelos perfis metálicos. Outra solução apresentada por Gomes (2012) foi o aumento da alma do perfil do montante metálico de 90mm para 140mm, conseqüentemente aumentando a largura painel. Como a lã de vidro preenchia toda a largura interna do painel (mesma largura do montante) de 90 mm. O aumento da largura da parede para o caso de utilização do perfil de 140 mm, proporcionou o surgimento de uma camada de ar estagnada que também ameniza os efeitos da ponte térmica. Entretanto o autor afirma que tal solução aumentaria os custos da obra, tornando inviável a sua aplicação em HIS.

Ainda com relação à estrutura de aço dos painéis *Light Steel Framing*, Santos et al. (2014) afirmam que a alta condutividade térmica do aço pode levar a ocorrência de pontes térmicas, podendo aumentar o consumo de energia em até 30% para o caso de ambientes com condicionamento artificial de ar, anulando as economias de energia. Neste sentido, Bragança (2013) afirma que o isolamento térmico desempenha um papel fundamental no ciclo de vida do edifício. Considerando a condutividade térmica entre os quadros de aço e outros materiais.

Para avaliar o desempenho de um painel em LSF considerando o efeito das pontes térmicas, Bomberg e Thorsell (2008 apud SANTOS et al., 2014) propuseram uma nova metodologia, incluindo testes e modelagem para avaliar o desempenho energético. A metodologia proposta leva em consideração o efeito de pontes térmicas, bem como umidade e fluxo de ar, tendo sido utilizada a termografia por infravermelho (IR) como ferramenta de avaliação. Trata-se de uma técnica experimental que ajuda a localizar pontes térmicas e perdas de calor.

A figura 24 mostra a temperatura na superfície externa da parede medida com câmera Infra Vermelha (Sistemas FLIR, Therma CAM T400) antes de aplicar o isolamento. A posição dos perfis verticais de aço é visível. Os perfis horizontais e diagonais não são visíveis porque estão mais bem isolados e não têm contato com a placa externa.

Figura 24 - Câmera IR mostra o calor dos perfis



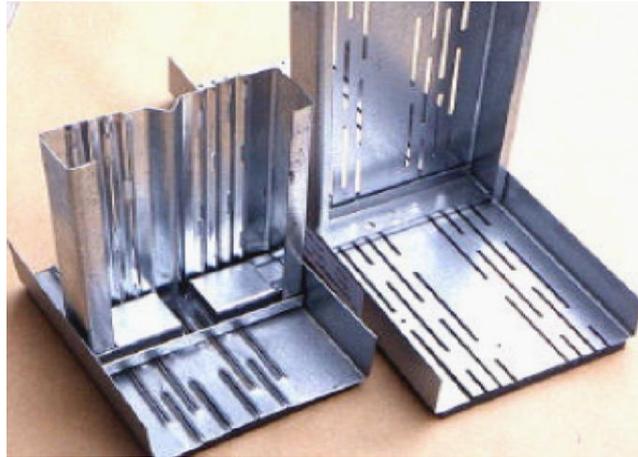
Fonte: Santos et al (2014).

2.11.5.2 Estratégias para quebrar as Pontes Térmicas

Várias estratégias têm sido apresentadas para eliminar ou reduzir os efeitos das pontes térmicas nos painéis de *Light Steel Framing*, podendo ser obtidas por meio da modificação dos montantes, do isolamento da estrutura, da inserção de um revestimento isolante ou de uma camada de ar estagnada (GOMES, 2012).

Entre estas ações, podem ser destacadas a redução dos efeitos destas pontes térmicas através da perfuração das almas dos montantes (Figura 25), aumentando o trajeto do fluxo de calor (MEO et al, 1998). Contudo, é um procedimento que compromete o desempenho estrutural do perfil, principalmente no tocante redução da sua resistência ao esforço de cisalhamento (VELJKOVICK; JOHASSON, 2006).

Figura 25 - Perfuração das almas dos montantes



Fonte: Gomes (2013).

É possível também aumentar a resistência térmica de contato, modificando o formato das mesas por meio da inclusão de sulcos. Neste caso, diminuindo o contato da estrutura com os painéis por meio da inserção de uma camada de ar através do recuo de 6mm em cada mesa. Tal procedimento pode aumentar em até 16% a resistência térmica do fechamento (THERMACHANNEL, 2017).

Kosny e Desjarlais (2010) avaliou a influência do espaçamento entre os perfis de aço através da resistência térmica “R” de paredes com diferentes espessuras da camada isolante. O autor concluiu que o ganho no valor R causado pelo aumento do espaçamento era de cerca de 20% e 15% para a camada de isolamento de 1,3 cm e 2,5 cm, assim como a criação de saliências (dimples) nas mesas dos perfis de aço para reduzir o contato com a placa de fechamento, podendo reduzir a área de contato em até 89%.

3 METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estudo do desempenho térmico de uma HIS composta por diversos tipos de envoltórios de LSF frente ao clima equatorial amazônico da cidade Belém foi desenvolvido por meio de simulação computacional. O projeto é oriundo do PMCMV, construído em sistema apertado de concreto armado e alvenaria tradicional cerâmica de vedação. As simulações foram precedidas da respectiva calibração do modelo computacional, com vistas a garantir a maior precisão dos respectivos resultados de avaliação de desempenho térmico.

Neste trabalho foram considerados seis modelos de envoltória, sendo quatro em LSF e os demais em alvenaria tradicional cerâmica estrutural e parede de concreto, todos avaliados separadamente por meio de simulação computacional.

As variáveis de controle adotadas foram dois tipos de sombreamento nas janelas e dois regimes de ventilação natural. Neste caso, através do estabelecimento de rotinas de abertura e fechamento das janelas. No caso específico dos modelos em LSF, foi adotado para as paredes de divisão entre unidades habitacionais distintas, painéis estruturados com perfil metálico de 90mm de espessura com lã de vidro incorporada para fins de isolamento acústico. As variáveis de resposta das simulações foram os graus-hora de resfriamento (GH_R) para cada um dos seis modelos de envoltório, com vistas a comparar o melhor desempenho térmico.

3.2 LOCALIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO

A HIS objeto do estudo está localizada na região amazônica, mais precisamente, na cidade de Belém (Figura 26) capital do Estado do Pará, cujo clima, segundo a classificação de Köppen (1900-1936), pertence a categoria “equatorial úmido” cujas características principais são as altas temperaturas, ventos de pouca velocidade, intercalados com frequentes momentos de calma, alto índice de umidade relativa do ar e precipitações abundantes (NASCIMENTO, 1993). É do tipo amazônico, com a média anual da temperatura do ar de 26°C, com máximas e mínimas variando de 31,5°C a 22,0°C, respectivamente (SILVA JUNIOR et al., 2013). A edificação faz parte do conjunto habitacional Riacho Doce II, localizado na Avenida Perimetral, em frente ao campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), no bairro do Guamá.

Figura 26 - Localização da HIS

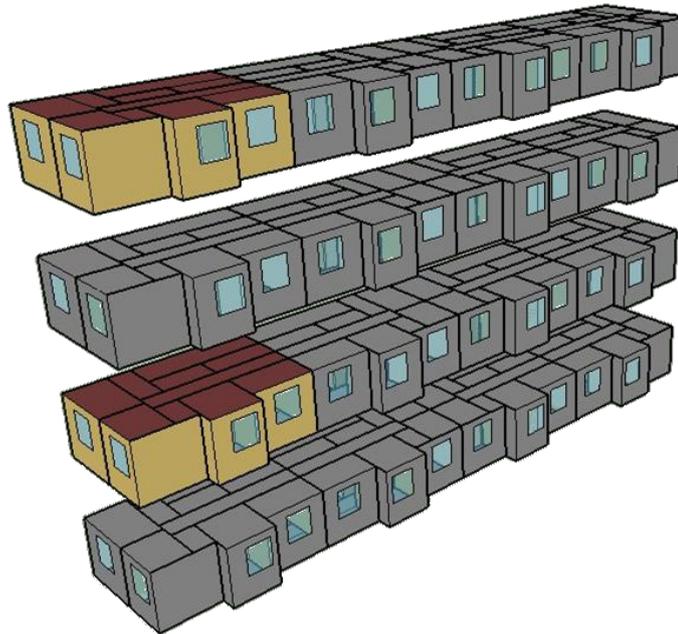


Fonte: Adaptado Google Earth (2018).

3.3 TIPOLOGIA DA EDIFICAÇÃO

A tipologia arquitetônica escolhida trata-se de um edifício residencial multifamiliar de quatro pavimentos, com oito apartamentos por pavimento (Figura 27). Conforme mostrado na figura 28, cada apartamento é constituído por uma sala de estar, dois dormitórios, cozinha e área de serviço, com área construída de 38,11 m². A tabela 3 apresenta as características dos ambientes de um apartamento padrão, área do ambiente (m²), volume do ambiente (m³) e o pé-direito do ambiente.

Figura 27 - Apartamentos escolhidos para simulação (2º e 4º pavimentos)



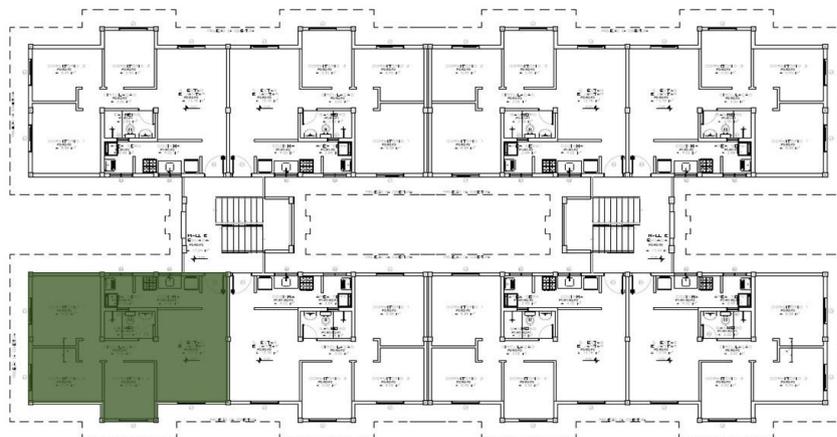
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Características dos ambientes do apartamento padrão

AMBIENTE	ÁREA (m ²)	PÉ DIREITO (m)	VOLUME (m ³)
Quarto A	6,45	2,90	18,71
Quarto B	5,5	2,90	15,95
Quarto C	8,98	2,90	26,04
Sala Estar/Jantar	16,76	2,90	48,60
Cozinha	4,02	2,90	11,66
Serviço	2,69	2,90	7,80
WC	2,69	2,90	7,80

Fonte: Adaptado de COHAB-PA.

Figura 28 - Pavimento tipo da edificação com a unidade habitacional escolhida



Fonte: Adaptado: COHAB-PA.

A opção por um modelo de habitação de interesse social no formato de blocos de apartamentos se deve ao fato de ser uma das tipologias mais utilizadas atualmente nas construções de HIS do PMCMV. A figura 29 mostra uma vista do edifício escolhido como modelo para a esta pesquisa. A escolha do número de pavimentos reside no fato de que a CEF permite a construção de prédios em LSF de no máximo quatro pavimentos (CEF, 2003).

Figura 29 - Bloco 3. Residencial Riacho Doce II (COHAB)



Fonte: Acervo o autor.

Para a avaliação de desempenho térmico foram escolhidos os quartos do 2º e 4º pavimento, ambos voltados para o oeste (quarto B), conforme mostrado na figura 30. Vale salientar que o 4º pavimento corresponde à cobertura do edifício. O critério de escolha do quarto B baseou-se no fato de ser o ambiente de permanência prolongada com a situação mais crítica quanto a sua posição em relação à incidência da radiação solar, conforme determina a NBR 15575 (ABNT, 2013). Neste caso, a radiação do sol da tarde incide de forma direta sobre a abertura da janela.

Figura 30 - Planta baixa do apartamento indicando a nomenclatura dos ambientes

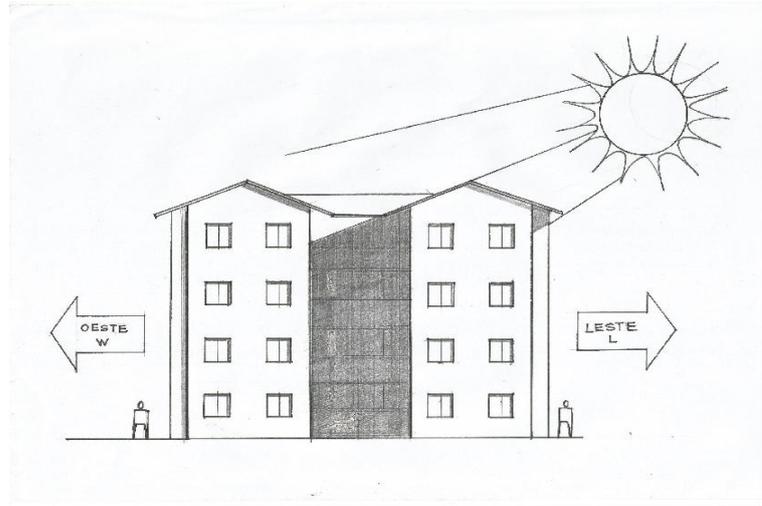


Fonte: Adaptado: COHAB-PA

O quarto apresenta a pior situação tanto em termos de exposição à radiação solar como também em termos de ventilação. Ao contrário dos quartos A e C, com suas janelas voltadas para o Norte, que recebem a radiação solar direta apenas durante uma parte do ano, no quarto B a ventilação fica comprometida porque os ventos predominantes na cidade de Belém, conforme Nascimento (1993) tem frequência de distribuição de Norte a Sudeste com as maiores frequências sendo do Nordeste seguido de Norte e Leste.

Os apartamentos avaliados apresentam a mesma planta arquitetônica e construtiva. Ambos possuem uma sala, com janela voltada para oeste, separada da cozinha por uma meia parede. A cozinha por sua vez é ventilada por balancins abertos para o leste. Entretanto, sua fachada é protegida da incidência da radiação solar direta pela parte da manhã devido à presença do outro módulo do bloco a sua frente, formando um obstáculo a essa radiação solar, sendo seu elemento de sombreamento (Figura 31). O apartamento possui três quartos, sendo um quarto menor (Quarto B), com janela também voltada para oeste, assim como outros dois quartos (Quartos A e C) com suas janelas voltadas para Norte, todos ligados a sala, juntamente com o banheiro, através de uma pequena circulação. A janela do banheiro se abre para a área de serviço, ao lado da cozinha, que por sua vez também tem uma abertura tipo balancim voltado para o leste, nas mesmas condições da abertura da cozinha.

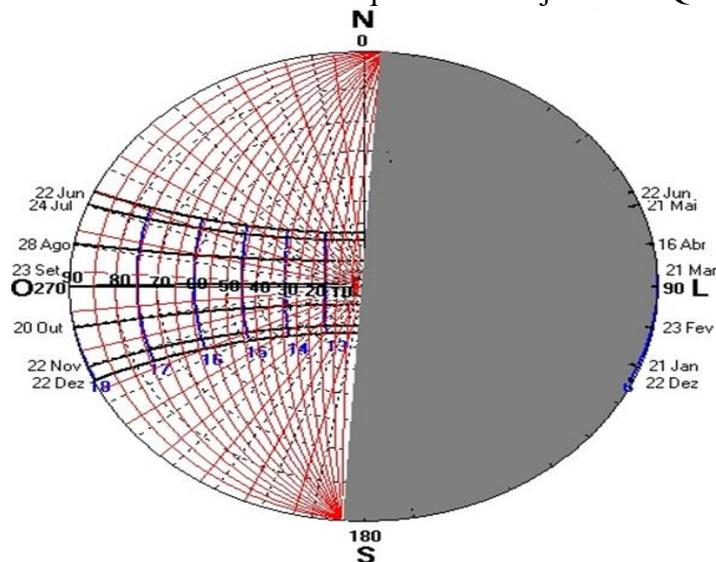
Figura 31 - Sombreamento da fachada leste de um dos volumes do bloco III proporcionada pelo outro volume deste bloco



Fonte: Elaborado pelo autor.

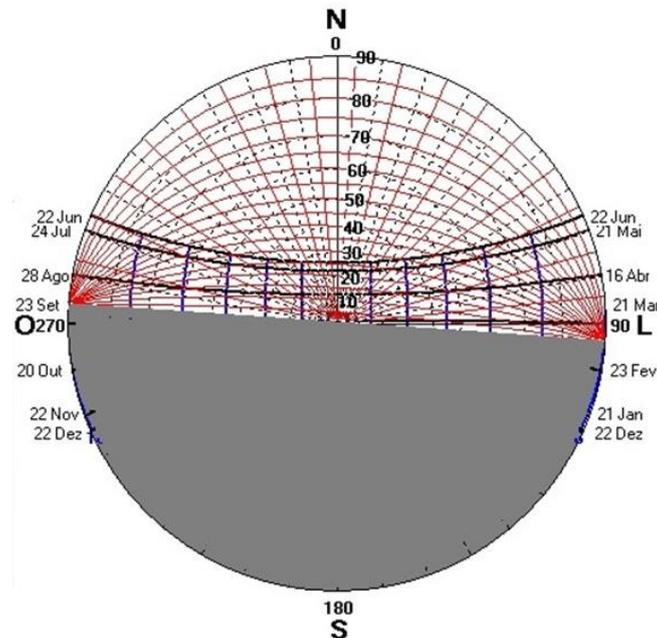
O quarto B, conforme mostra a Figura 32, tem sua janela voltada para oeste, recebendo a radiação solar o ano inteiro, somente pela parte da tarde, das 12h00 até o pôr do sol. Já os outros dois quartos (A e C) de ambos os apartamento avaliados, em que as janelas estão voltadas para o Norte, não recebem a radiação solar, no período entre o equinócio de primavera, 24/09, e o solstício de verão, 22/12, até o início do mês de março. No dia 21/03, equinócio de outono, a luz solar incide sobre estas janelas do nascer do sol até às 12:00 horas. Do início do mês de abril até o mês de agosto, as janelas desses dois quartos recebem a radiação solar durante o dia todo, do nascer ao pôr do sol, sendo que o solstício de inverno, 22/6 é o dia em que o sol atinge essas janelas com as menores inclinações (Figura 33).

Figura 32 - Carta solar: Fachada que contém a janela do Quarto B



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Frota (2004).

Figura 33 - Carta solar: Fachada que contém as janelas dos quartos A e C



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Frota (2004)

A escolha do apartamento de cobertura se baseou no critério apontado pela NBR 15575, que classifica o último pavimento como o mais crítico termicamente pelo fato de receber carga térmica tanto da envoltória vertical como também da cobertura. Com relação à escolha do apartamento do segundo pavimento, o critério de escolha se deve ao fato de ser uma área intermediária, que não recebe influência direta da cobertura, tampouco do solo, possibilitando a verificação do desempenho dos painéis de forma mais isolada, apenas considerando as interações de calor através das vedações verticais expostas.

A HIS escolhida foi construída no sistema mais utilizado em construções habitacionais na cidade de Belém, ou seja, estrutura de concreto armado e fechamento com paredes em alvenaria de tijolo rebocada. A pintura das paredes externas foi feita com tinta acrílica semi brilho nas cores azul e amarelo. A cobertura é constituída por telhas cerâmicas tipo capa-canal apoiadas sobre estrutura de madeira. As janelas são compostas de esquadria de alumínio anodizado fosco (Figura 34), fechadas com vidros transparentes de 3 mm de espessura, em duas folhas de correr, que ficam sobrepostas quando a janela se encontra em sua abertura máxima (Figura 35). Entretanto, vale ressaltar que, neste caso, apesar da área total de cada janela ser 1,44 m², estas só apresentam no máximo 0,72 m² de área livre para a ventilação, ou seja, apenas 50% da sua área. Isto porque as janelas são compostas por duas folhas de correr na qual a abertura máxima é obtida quando uma folha está sobre a outra. Este vão de abertura para ventilação da sala não atende ao vão mínimo de ventilação de 12% do piso do ambiente,

estabelecido pela NBR 15 575- 4 (Tabela 4), uma vez que 12% dos 13,22 m² de sua área de piso representa 1,58 m² de vão livre.

Tabela 4 - Área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar

Nível de Desempenho	Abertura para Ventilação (A)	
	Zonas 1 a 7 Aberturas Médias	Zonas 8 Aberturas Grandes
Mínima	$A \geq 7\%$ da área de piso	$A \geq 12\%$ da área de piso REGIÃO NORTE DO BRASIL $A \geq 8\%$ da área de piso REGIÃO NORDESTE E SUDESTE DO BRASIL

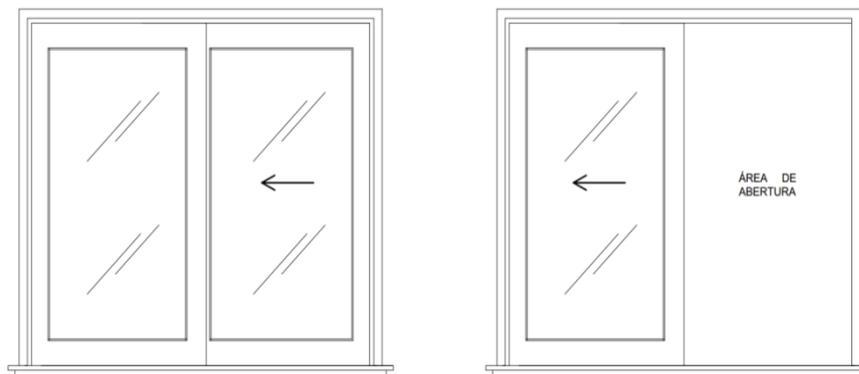
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15575-4/2013.

Figura 34 - Detalhe das Esquadrias da HIS



Fonte: Acervo do autor

Figura 35 - Representação da forma de abertura das Esquadrias



Fonte: Acervo do autor

As partes internas dos apartamentos apresentam as paredes e lajes de forro rebocadas, sendo a laje de concreto pintada com tinta PVA. Já o piso não apresenta tipo algum de

revestimento, apenas contra piso. A edificação possui quatro pavimentos, com oito apartamentos cada, incluindo o pavimento térreo ocupado. As unidades do último pavimento apresentam o teto também em laje de concreto, sobre a qual repousa a estrutura de madeira do telhado.

3.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO

3.4.1 Procedimento

A calibração do modelo da edificação, considerando seu sistema construtivo original, foi realizada antes da simulação computacional. Esse processo consistiu em realizar a medição *in loco* da temperatura interna de bulbo seco do Quarto B, de um dos dois apartamentos escolhidos, no caso o do último pavimento, durante um período de 05 dias. Concomitantemente, foi realizada a simulação computacional do modelo desse mesmo apartamento para posterior comparação de resultados de desempenho térmico entre os valores obtidos pela medição *in loco* e os resultados obtidos pela simulação computacional, a fim de validar o modelo de simulação do presente trabalho. O modelo simulado sofreu variações dos dados de entrada até que o valor de temperatura obtido por simulação ficasse o mais próximo possível da temperatura monitorada.

Para a medição *in loco* foi utilizado equipamento de aquisição de dados *datalogger*, modelo HOBO (*temp/RH/light/extchannel* ONSET) (Figura 36) para medir a temperatura de bulbo seco do ar e umidade relativa do ar. O HOBO possui uma precisão de 0,7°C de temperatura, considerando uma temperatura de 21°C (ONSET, 1999). As medições foram realizadas nos quartos A, B e na cozinha do apartamento da cobertura, conforme disposição mostrada na figura 37. Os aparelhos foram posicionados próximo à área central de cada ambiente a fim de evitar a ação direta da luz solar, dispostos sobre cavalete a uma altura de 1,20 m do piso (Figura 38).

Figura 36 - HOBO data logger – temp/RH/light/extchannel



Fonte: Acervo do autor.

Figura 37 - Posição dos *Dataloggers* nos ambientes avaliados



Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado COHAB-PA.

Figura 38 - Aparelho medidor HOBO instalado no quarto B

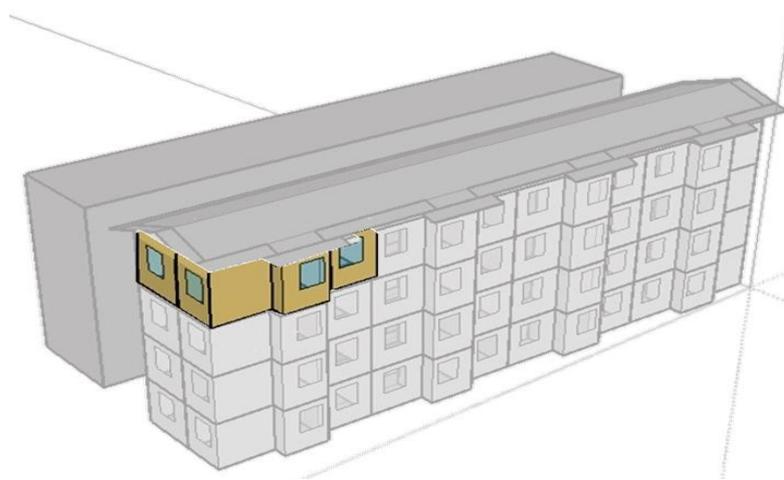


Fonte: Acervo do autor.

As medições foram realizadas durante 5 dias, no período de 5 a 10 de dezembro de 2017, com os medidores registrando dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar para intervalos de 5 minutos. Pelo fato da unidade habitacional estar pronta, mas sem moradores, as janelas permaneceram fechadas durante todo o período de medição.

Para a simulação computacional referente à calibração do modelo real foi utilizado o programa *EnergyPlus*. Na geometria do modelo de simulação foi considerada a região vertical do bloco onde foi realizada a medição na unidade habitacional, no caso o apartamento da cobertura (Figura 39). Cada ambiente das unidades habitacionais desta região foi considerado como uma zona térmica, totalizando 80 zonas. Levou-se em consideração todas as 16 unidades deste módulo da edificação. Para a análise de sensibilidade, conforme mostrado a seguir, foram considerados os resultados das temperaturas de uma zona térmica do apartamento da cobertura, no caso o quarto B.

Figura 39 – Unidade habitacional escolhida para calibração



Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado: COHAB-PA.

A simulação computacional do modelo referente à calibração foi realizada considerando as mesmas características da edificação real, com o sistema construtivo original em alvenaria sendo desconsideradas as rotinas de ocupação e iluminação, uma vez que os ambientes permaneceram vazios e desocupados durante todo o período de medição, assim como as janelas permaneceram fechadas 24h por dia. Foi adotada na simulação a opção de terreno *suburbs*, do programa *EnergyPlus* por ser mais próxima da característica da área em que a edificação monitorada está inserida.

Como não foi realizada a medição da temperatura externa, para a simulação da calibração adotou-se como entrada de dados para a temperatura de bulbo seco externa os dados climáticos do período de realização da medição disponíveis no site do INMET para a cidade de Belém. Estes dados substituíram os dados originais do arquivo TRY (formato epw) no período de 28 de novembro a 10 de dezembro. Este procedimento foi adotado por Buoro (2008) com vistas a proporcionar à simulação, valores de temperatura mais próximos aos que o prédio estava exposto, durante o período da medição uma vez que não foram efetuadas medições da temperatura externa. Além da temperatura de bulbo seco, outras variáveis climatológicas foram substituídas como o ponto de orvalho, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade do vento. As outras variáveis não disponibilizadas no arquivo de dados climáticos do INMET bem como as fornecidas de forma incompleta foram mantidas de acordo com o arquivo climático de referência TRY.

3.4.2 Análise de sensibilidade

Os resultados de temperatura obtidos na simulação do modelo foram comparados com os valores obtidos no monitoramento da edificação através dos cálculos dos indicadores estatísticos desvio médio e erro quadrático médio, conforme as equações 4 e 5 respectivamente.

$$Dm = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} \right] \quad (4)$$

$$EQ = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Onde:

Dm é o desvio médio entre temperaturas (°C);

Yi é a temperatura horária simulada (°C);

Xi é a temperatura horária monitorada (°C);

N é o número de observações (adimensional);

EQ é o erro quadrático médio (°C).

De posse desses resultados, foram aplicadas, assim como feito por Barbosa e Ghisi (2017), variações dos dados de entrada do modelo até que o valor de temperatura obtido por simulação ficasse igual ou o mais próximo possível da temperatura monitorada. Sendo assim, os dados de um determinado caso foram mantidos no caso subsequente desde que estes resultados tivessem proporcionado indicadores estatísticos de menor valor. Já os dados de entrada que elevaram os parâmetros estatísticos em relação aos casos anteriores foram desconsiderados na situação subsequente. Ao final, foi escolhido o caso que apresentou a menor diferença entre os resultados dos valores medidos e simulados.

Na primeira simulação realizada para a calibração (Caso Base) foram inseridos no *epw* os dados climáticos do período de 28 de novembro a 10 de dezembro, considerando a geometria da cobertura como zona térmica. Além disto, foi considerado o coeficiente de 0,66 de infiltração de ar pela janela, as absorvâncias 0,3 para paredes externas de cores claras e 0,8 para as não pintadas, assim como as propriedades térmicas dos materiais e a resistência térmica das câmaras de ar de acordo com a NBR 15220 (Tabela 5).

Tabela 5 - Resistência Térmica da Câmara de Ar

Espessura “e” da Câmara de Ar (cm)	Direção do Fluxo de Calor	Resistência Térmica (m².K/W)
e < 5	Horizontal	0,16
e > 5	Horizontal	0,17
e > 5	Descendente	0,21

Fonte: Adaptado ABNT NBR 15220-2/2005.

Na segunda simulação (Caso 01), o dado de entrada modificado no modelo simulado foi a modelagem da cobertura, que na primeira simulação havia sido considerada uma zona térmica e no caso 1 foi adicionada como uma câmara de ar, juntamente com a camada da cobertura, com resistência térmica de 0,21 m²K/W, conforme a NBR 15220 (ABNT, 2005), sendo mantidos os valores dos demais itens do Caso Base como coeficiente de infiltração de ar pela janela, absorvâncias e propriedades térmicas dos materiais.

Nos casos 2 e 3, terceira simulação e quarta simulação, respectivamente, os dados modificados foram a alteração de 15% nos valores da condutividade térmica e densidade para a argamassa e o tijolo, cujos valores adotados na primeira simulação haviam sido obtidos da NBR 15220-2 (ABNT, 2005). Segundo a própria norma, são valores somente indicativos. Vale ressaltar que estas variações realizadas seguem o que apontaram Pereira e Ghisi (2015), que consideraram a possibilidade de variação da resistência térmica em 15% para mais e para menos. Os autores consideram esta alteração de 15% como suficiente, não havendo necessidade de avaliar outras variações pelo fato da influência da variação da transmitância térmica dos materiais ser linear em relação ao desempenho térmico.

Sendo assim, na terceira simulação realizada (Caso 2), o valor da condutividade térmica e densidade para a argamassa e o tijolo foi reduzido em 15%. Já na quarta simulação (Caso 3), o valor da condutividade térmica e densidade para a argamassa e o tijolo foram elevados em 15%. A tabela 6 resume todos os parâmetros modificados em cada caso, desde o base até o caso 03.

Quadro 3 - Variáveis consideradas para cada caso do modelo de calibração

Casos	Variáveis consideradas
Base	Geometria da cobertura como uma zona térmica
	Dados térmicos dos materiais: NBR 15220
	Transmitância térmica da envoltória: 1,814 W/m ² .K
01	Geometria da cobertura em camadas: Resistência térmica da câmara de ar da cobertura=0,21m ² .k/w
	Dados térmicos dos materiais: NBR 15220
	Transmitância térmica da envoltória: 1,814 W/m ² .K
02	Geometria da cobertura em camadas: Resistência térmica da câmara de ar da cobertura=0,21m ² .k/w
	Dados térmicos dos materiais com redução de 15% nos valores da condutividade térmica e da densidade para a Argamassa e o Tijolo.
	Transmitância térmica da envoltória resultou em 1,768 W/m ² .K
03	Geometria da cobertura em camadas: Resistência térmica da câmara de ar da cobertura=0,21m ² .k/w
	Dados térmicos dos materiais com aumento de 15% nos valores da condutividade térmica e da densidade para a Argamassa e o Tijolo.
	Transmitância térmica da envoltória resultou em 1,850 W/m ² .K

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da simulação da calibração foram comparados com as medições e analisados também sob o viés dos indicadores estatísticos *Coefficient of Variation of the Root Mean Squared Error*, CV (RMSE), descrito pela equação 6, e o *Normalized Mean Bias Error* (NMBE), descrito pela equação 7. O objetivo da utilização destes outros indicadores foi verificar se os resultados obtidos estão dentro dos padrões aceitos pela ASHRAE (ASHRAE, 2003). Em outras palavras, se o CV (RMSE) e o NMBE estão dentro dos limites de 30% e de 10%, respectivamente, o modelo adotado é considerado calibrado.

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum (m_i - s_i)^2}{n-1}}}{\bar{m}_l} \quad (6)$$

Onde:

m_i - Dado medido (°C ou KWh)

s_i - Dado simulado (°C ou KWh)

n - Número de dados do período simulado

\bar{m}_l - Média aritmética da amostra de n observações (°C ou KWh)

$$NMBE = \frac{\sum (m_i - s_i)}{\frac{n-1}{\bar{m}}} \quad (7)$$

Onde:

m_i - Dado medido (°C ou KWh)

s_i - Dado simulado (°C ou KWh)

n - Número de dados do período simulado

\bar{m}_l - Média aritmética da amostra de n observações (°C ou KWh)

3.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: edificação em *Light Steel Framing*

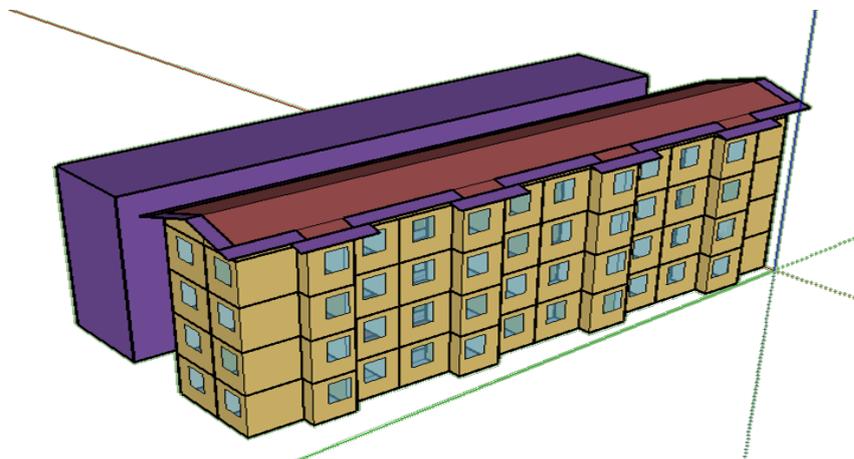
3.5.1 Considerações iniciais

A simulação foi realizada para seis diferentes tipos de envoltória, 04 tipos de LSF, além da alvenaria cerâmica e parede de concreto, conforme será mostrado detalhadamente no item 3.5.5. Além do tipo de envoltória, outra variável de controle adotada foi o controle de abertura das janelas para a ventilação natural, sendo escolhido dois tipos de regime de abertura das janelas. A variável de resposta foi a temperatura operativa (T_o) ao longo de 8.760 horas para o quarto B, do 2º e 4º pavimentos. Com a temperatura operativa, foram calculados os graus hora de resfriamento (GHR), parâmetro que indicou o desempenho térmico de cada envoltória avaliada para cada um dos regimes de abertura de janela escolhidos. Para este estudo, devido ao clima quente da cidade de Belém, não houve necessidade de calcular os graus horas de aquecimento.

A simulação foi realizada através do *software EnergyPlus* versão 8.7, para a qual foram considerados os dados climáticos da cidade de Belém do Pará, contidos no arquivo TRY (*Test Reference Year*), disponibilizado pelo LABEEE. Todos os ambientes da unidade habitacional foram considerados como zona térmica.

O outro volume que compõe o edifício não foi considerado como zona térmica, mas como elemento de sombreamento, pelo fato de estar afastado do primeiro volume, sem paredes compartilhadas, formando uma barreira de proteção à radiação solar para o a fachada Leste das unidades estudadas, no período da manhã. Os dois volumes desse bloco são separados por um corredor de ar, unidos apenas pela estrutura de duas escadas (Figura 40).

Figura 40 - Os dois volumes que compõem o bloco III. Sendo o volume azul considerado elemento de sombreamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.2 Efeito das pontes térmicas

Com o intuito de avaliar se o efeito das pontes térmicas são ou não significativos para o clima de Belém, levando em consideração apenas a ventilação natural, foram realizadas duas simulações para painéis de LSF, com isolamento em lã de vidro, considerando e desconsiderando a influência das pontes térmicas, cujos valores de Resistência Térmica para inserção no *EnergyPlus* foram obtidos através do Método das Zonas Modificado (MZM) (Tabela 6)

Tabela 6 - Indicadores estatísticos sobre a influência das pontes térmica

Variáveis	Quarto B	
	Com Pontes Térmicas	Sem Pontes Térmicas
Temp. Máxima °C	34,30	34,11
Temp. Mínima °C	25,78	26,08
Desvio Médio	0,05	
Erro Quadrático Médio	0,11	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados mostram que a diferença entre os dois modelos de painel em LSF, considerando e desconsiderando as pontes térmicas, foi desprezível, com média de diferença 0,3°C, não chegando a 0,5°C de diferença máxima. Neste caso, confirmando a afirmação de Gomes (2012) de que o efeito das pontes térmicas não é significativo para locais de clima quente levando em consideração apenas a ventilação natural. Diante destes resultados, o efeito da ponte térmica não foi considerado nas simulações.

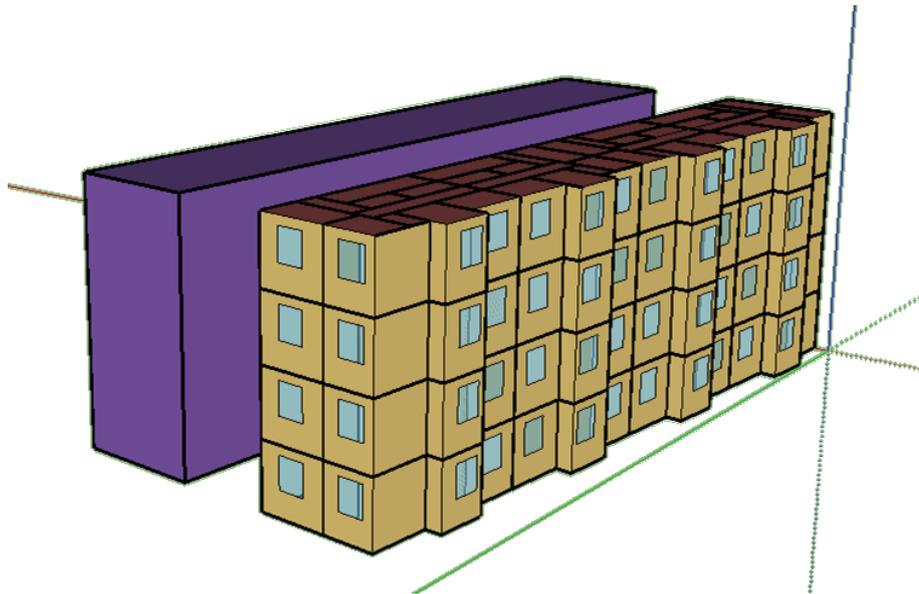
3.5.3 Modelagem

Para a realização das simulações computacionais foram também inseridas, nos respectivos campos do programa *EnergyPlus*, todas as informações necessárias sobre a edificação, tais como os materiais construtivos utilizados, suas características e dimensões, quantidade e tamanho das aberturas, as características do seu entorno, orientação solar, tipo de céu, sombreamento e ventilação, assim como foram consideradas as cargas internas e sua influência na dinâmica das temperaturas nos ambientes avaliados.

A geometria do modelo de simulação foi gerada a partir da versão 0.9.3 do *Euclid*, uma extensão gratuita para o *SketchUp*, disponibilizada pelo *Big Ladder Software*. A partir desta

extensão, o arquivo geométrico foi exportado para o formato IDF, utilizado pelo *EnergyPlus*, podendo ser aberto e editado, a fim de inserir os dados necessários para a simulação computacional. Para esta simulação, cada ambiente da edificação foi considerado como uma zona térmica (Figura 41), com a finalidade de permitir a máxima interação entre o conjunto de superfícies da edificação durante a simulação. Para fins comparativos, visando o estudo do cenário mais crítico do desempenho térmico das envoltórias, foram analisadas as zonas correspondentes aos ambientes nos quais foram realizadas as medições.

Figura 41 - Todos os ambientes do bloco considerado uma zona térmica cada um



Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado da COHAB-PA

3.5.4 Dados gerais da simulação

3.5.4.1 Parâmetros de entrada no programa *EnergyPlus* (versão 8.7)

Para a escolha do terreno, campo referente à rugosidade, adotou-se o mais próximo das características da área do entorno do modelo: *suburbs* - ambiente arborizado. Devido ao baixo gabarito das edificações e às áreas verdes próximas. Para a precisão da convergência de cargas térmicas e a precisão da convergência de temperatura, adotou-se erro de 0,01 W e 0,1°C, respectivamente. Para a radiação solar e a refletância das superfícies externas que entram no edifício, adotou-se *FullExterior*, considerando dessa forma as sombras externas existentes.

O período de simulação estabelecido foi o anual, com intervalo de tempo por hora da Simulação com *Timestep* 4. O objetivo foi obter as temperaturas referentes ao ano meteorológico típico, inserido a partir do arquivo climático, no formato *epw*, disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina.

Para os parâmetros referentes à ventilação natural, utilizou-se o grupo *Airflow Network* do programa *EnergyPlus*. O *Airflow Network* fornece a capacidade de simular fluxos de ar de várias zonas impulsionados pelo vento (ENERGYPLUS, 2016).

3.5.4.2 Rotinas de ocupação e cargas térmicas

- Cargas internas

Foi considerada uma família composta por 6 pessoas, marido, esposa e 4 filhos com suas respectivas taxas metabólicas, assim como o calor dissipado pela iluminação artificial. Não foram consideradas as cargas internas relativas aos aparelhos eletrodomésticos, conforme recomenda Lamberts (2010) na proposta de revisão da norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

- Padrão de Ocupação

Foi avaliado o dormitório B das unidades habitacionais escolhidas para a simulação. O padrão de ocupação adotado foi de duas pessoas entre as 22h e 7h, na qual foi considerada a taxa metabólica relativa à atividade predominante no respectivo ambiente, no caso repouso (dormindo ou descansando). Isso representa um valor de calor dissipado de 81W/pessoa (SORGATO et al., 2013).

- Regime de ventilação

Com o objetivo de avaliar a ventilação como fator de resfriamento, através da retirada de calor do ambiente e ao mesmo tempo, impedir ou atenuar a entrada da radiação solar para o interior da edificação através do sombreamento das janelas, foram consideradas duas situações de regime de ventilação: Rotina 1 e Rotina 2.

Na rotina 1 as janelas dos quartos ficaram fechadas no período entre 12h00 às 18h00 e abertas das 18h00 às 12h00, a fim de garantir a ventilação no período da manhã, no horário da noite e de madrugada, haja vista que nestes períodos noturnos são, estatisticamente, onde a temperatura interna é maior que a externa na cidade de Belém (GOMES, 2007). Na rotina 2 as

janelas dos quartos ficaram fechadas no período de 00h00 as 6h00 e abertas no período de 6h00 as 00h00, a fim de garantir a ventilação durante o dia e parte da noite.

No que se refere ao sombreamento, foi considerada também duas situações: A situação da janela sem sombreamento algum (A) e com a janela com 100% de sombreamento (B). Em cada caso, houve sempre dois regimes de abertura, conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Situações relativas à rotina de abertura da janela e sombreamento

Situação	Horário de Abertura das Janelas	Sombreamento
S1A	18h-12h	Não
S1B	18h-12h	Sim
S2A	06h-00h	Não
S2B	06h-00h	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante frisar que o Fator de Ventilação (FV) foi de 50%, uma vez que as janelas da HIS são compostas de duas folhas de correr nas quais o máximo de abertura corresponde a posição de uma folha sobreposta à outra, permitindo que apenas metade da área total da janela esteja livre para a ventilação.

- Iluminação artificial

Com relação às cargas térmicas referentes à iluminação artificial, foi considerada a sua utilização nos horários entre 6h00 e 7h00 no dormitório, por ser o horário usual entre o despertar e a saída dos ocupantes. Já pela parte da noite foi considerado o horário entre 22h00 e 23h00, coincidindo com o momento do recolhimento até o horário de dormir, onde a luz é apagada.

3.5.5 Critérios de avaliação do método de simulação proposto

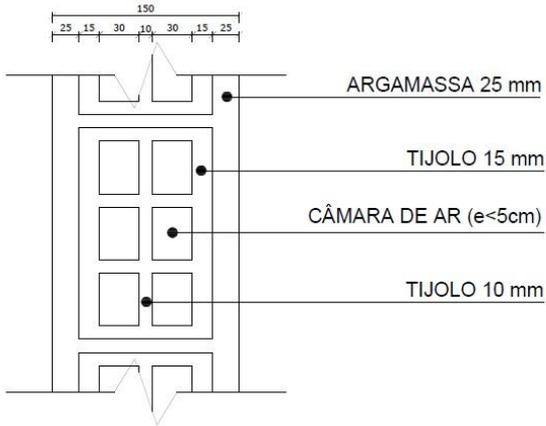
3.5.5.1 Variáveis de controle

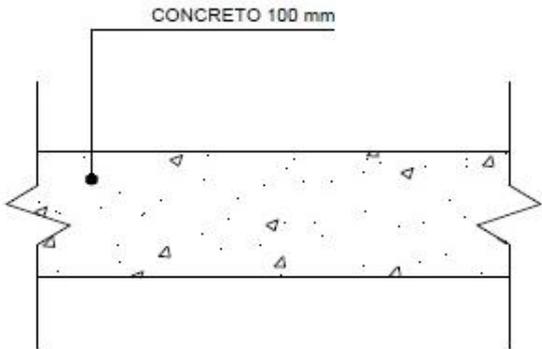
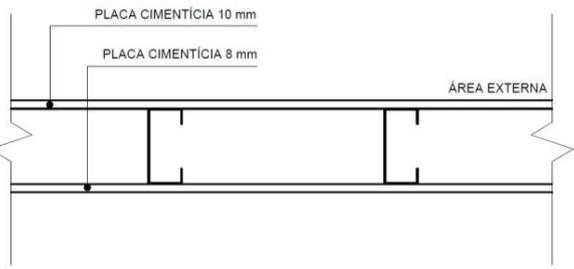
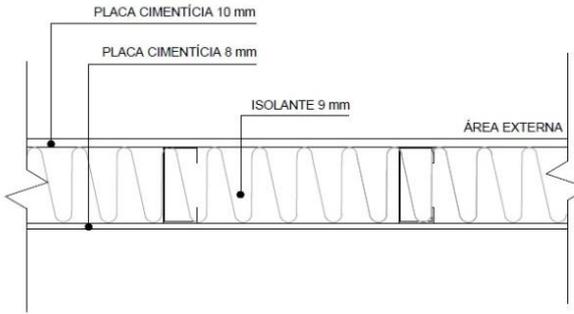
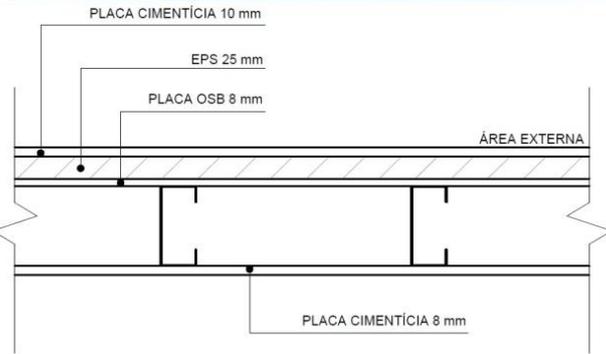
Na simulação computacional para a avaliação de desempenho térmico foram considerados 6 tipos de envoltória, sendo 4 em LSF, 1 (um) fechamento em parede de concreto de espessura 10cm e 1 (um) fechamento em parede de alvenaria. A cobertura será padrão para todos os casos, sem ventilação, constituída de telhas cerâmicas e estrutura em madeira apoiadas sobre laje de concreto para o caso da edificação de paredes de alvenaria e de

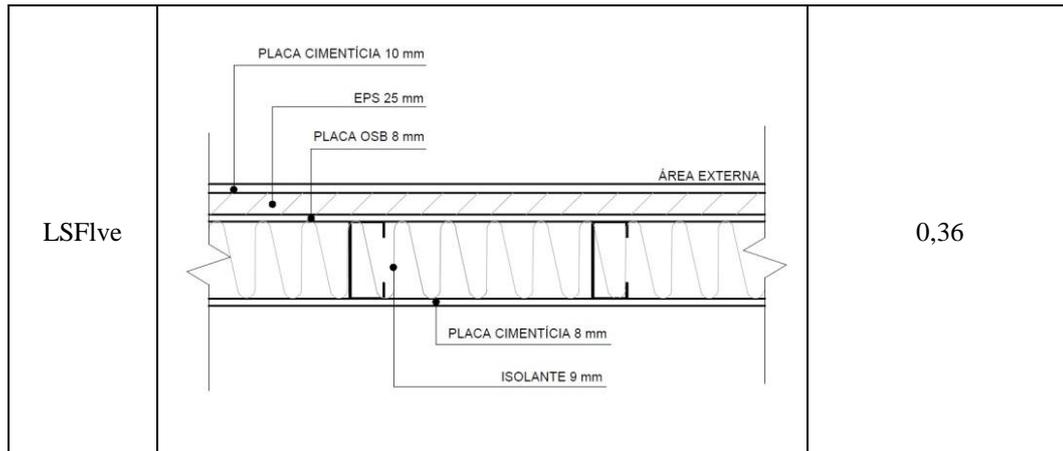
concreto. No caso das edificações em LSF a estrutura da cobertura é apoiada sobre laje úmida tipo “steeldeck”.

Na composição dos painéis de LSF foi considerado o nível da transmitância térmica e, conseqüentemente, de resistência térmica com vistas a diminuir a temperatura radiante dos mesmos através da colocação de materiais isolantes, com variáveis relativas à sua espessura e suas propriedades. Esta variedade de composições de painéis em LSF, desde o modelo simples, sem isolamento, até o modelo com dois tipos de isolamentos, objetivou verificar a real eficácia de painéis de LSF isolados em proporcionar conforto térmico aos ambientes internos. Esta questão surgiu diante de vários estudos realizados no Brasil que afirmam que o uso de isolantes mais atrapalham do que ajudam o conforto térmico, como o de Roriz, Chvatal e Cavalcanti (2009) que aponta que um sistema construtivo de baixa resistência térmica pode proporcionar mais conforto. Chvatal (2007) também constatou que para algumas situações de verão o aumento do nível de isolamento da envoltória de uma edificação provoca mais desconforto. Estes resultados se contrapõem à ideia de que o bom desempenho térmico de um ambiente se dá pelo isolamento do envelope. A composição dos painéis e suas respectivas transmitâncias térmicas são mostradas no quadro 3.

Quadro 3 - Modelos de envoltória analisados

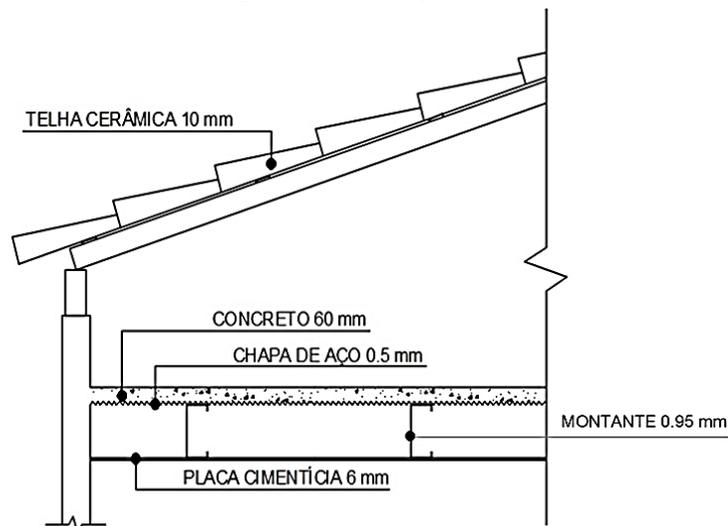
Modelo	Painel	U- Transmitância Térmica [W/(m ² .K)]
Alve	 <p>ARGAMASSA 25 mm</p> <p>TIJOLO 15 mm</p> <p>CÂMARA DE AR (e<5cm)</p> <p>TIJOLO 10 mm</p>	1,85

Conc		4,84
LSFs		2,95
LSFiv		0,46
LSFe		1,03



A Figura 42 apresenta o modelo de cobertura utilizado no sistema LSF. A laje é confeccionada com o conceito *steeldeck*, sendo composta por uma estrutura de apoio em LSF, formada por montantes com mesa de 140 mm dispostos na horizontal, que fazem o papel de vigas. Sobre as vigas é colocada uma telha ondulada metálica de 0,5 mm para receber uma camada de concreto armado de 6 cm de espessura. A parte inferior desta laje será vedada com placas cimentícias de 6 mm, formando uma camada de ar de 140 mm entre estas placas a camada de concreto.

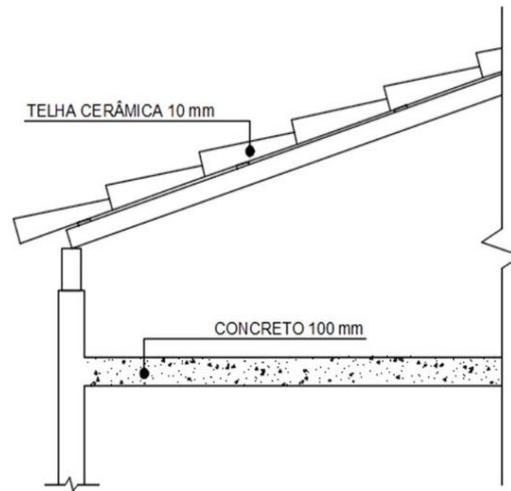
Figura 42 - Cobertura padrão com laje de forro estilo *steeldeck*



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 43 mostra o conjunto de elementos da cobertura para o modelo de HIS construído em alvenaria cerâmica e paredes de concreto. Nestes sistemas, a laje de forro sobre a qual a cobertura padrão está apoiada, é confeccionada em concreto armado com 10 cm de espessura.

Figura 43 - Cobertura padrão com laje de forro em concreto



Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 8 mostra a combinação das variáveis de controle adotadas nesta pesquisa. O objetivo foi avaliar a influência dos 6 tipos de envoltórias, considerando seus valores distintos de transmitância térmica, duas variáveis de sombreamento, dois regimes de abertura de janelas e a altura da unidade habitacional (2º pavimento e cobertura), o que perfaz um total de 48 simulações provenientes da combinação 6-2-2-2. As características termo físicas dos materiais das envoltórias e da cobertura são mostradas na tabela 9.

Tabela 8 - Variáveis de controle da simulação

Tipo de envoltória	Regime de abertura de janelas	Condições sombreamento
Fechamentos		%
LSFs	A (18h-12h)	0
LSFlv		
LSFe		100
LSFlve	B (06h-00h)	
Conc		
lve		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Características dos materiais

Material (Camada)	Densidade (p)	Espessura (e)	Calor Específico (C)	Cap. Térmica (Ct)	Cond. Térmica (Δ)	Resistência R
Chapa de aço	7800	0,0005	0,46	12,558	55	6,364
Concreto	2300	0,06	0,85	117,3	1,6	0,0375
Concreto	2300	0,1	0,85	195,5	1,6	0,0625
EPS	35	0,025	1,42	1,2425	0,04	0,625
Lã de Vidro	100	0,09	0,7	6,3	0,045	2
Madeira	608	0,03	1,4	25,536	0,15	0,2
Placa Cimentícia	2200	0,01	0,84	18,48	0,95	0,0105263
Placa Cimentícia	2200	0,006	0,84	11,088	0,95	0,0063158
Placa Cimentícia	2200	0,008	0,84	14,784	0,95	0,0084211
Telha Cerâmica	1600	0,01	0,92	14,72	1,05	0,0095238
Tijolo	1600	0,01	0,92	14,72	1,05	0,0095238
Tijolo	1600	0,015	0,92	22,08	1,05	0,0142857
Argamassa	1800	0,025	1	45	1,15	0,0217391

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005).

O critério de avaliação de desempenho térmico escolhido (variável de resposta) foi a determinação dos graus horas de resfriamento (GHR). A somatória anual dos GHR aponta o percentual de desconforto que cada opção de fechamento apresenta, considerando o que a condição de sombreamento associado ao regime de abertura de janelas proporciona durante o ano, ou seja, 8.760 horas que o compõe.

A opção pela utilização do método dos GHR seguiu a linha de inúmeros trabalhos realizados para a avaliação de desempenho térmico (SORGATO, 2011; ABREU et al., 2017; FERREIRA et al., 2015; CHAVTAL, 2015). Este método foi adotado em detrimento ao método da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) por apresentar um resultado mais abrangente acerca do desempenho térmico da edificação, não se restringindo a apenas um dia típico de verão ou de inverno.

Para o cálculo dos graus hora de desconforto, o valor de referência de conforto térmico utilizado neste trabalho foi de 26° C, conforme determina o Regulamento para Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), sendo o limite superior de conforto térmico. Neste caso, diante das características do clima de Belém, marcado sempre por altas temperaturas, não foi considerado um limite inferior de conforto, que serviria para apontar os graus horas de aquecimento. Sendo assim, os GHR, foram obtidos através do somatório das horas ao longo do ano onde a temperatura operativa foi maior que a temperatura de referência para resfriamento. Tendo sido realizada subtração entre o valor da temperatura operativa e o valor da temperatura de referência, sempre que a primeira foi maior que a segunda (equação 8). A Temperatura

Operativa (T_o) consiste na média da temperatura radiante da envoltória e a temperatura interna do ambiente (equação 9). A temperatura operativa foi obtida por simulação computacional, utilizando o *EnergyPlus*. O resultado indicou o percentual de graus horas de desconforto térmico que representa o GHR necessário, ao longo do ano, para que esta edificação apresente um desempenho térmico satisfatório, ou seja, dentro da zona de conforto estabelecida.

$$^{\circ}\text{ChR} = \sum(T_o - 26^{\circ}\text{C}) \quad (8)$$

Onde,

$^{\circ}\text{ChR}$ - Indicador de graus-hora de resfriamento;

T_o - Temperatura operativa horária ($^{\circ}\text{C}$)

$$T_{OP} = A \cdot T_r + (1 - A) \cdot T_a \quad (9)$$

Onde,

T_{OP} é a temperatura operativa ($^{\circ}\text{C}$);

A é a fração radiante;

T_a é a temperatura do ar, ($^{\circ}\text{C}$);

T_r é a temperatura radiante média ($^{\circ}\text{C}$)

Vale ressaltar que o critério foi optar por uma única temperatura limite de conforto, seguindo a determinação do RTQ-R, ao invés da utilização do limite variável através da obtenção da temperatura adaptativa. Isto se deve ao fato da pouca variação dos limites de temperatura da cidade de Belém, onde as temperaturas máximas e mínimas se mantêm praticamente as mesmas durante todo o ano, conforme estudo de realizado por Pacheco (2013) (Tabela 10).

Tabela 10 - Temperaturas mensais de conforto adaptativo para a cidade de Belém

Mês	Temperatura de conforto adaptativo - ASHRAE 55 [$^{\circ}\text{C}$]
Janeiro	24,26
Fevereiro	25,40
Março	25,96
Abril	26,05
Mai	26,12
Junho	26,19
Julho	26,20
Agosto	26,26
Setembro	26,30
Outubro	26,34
Novembro	26,34
Dezembro	26,25

Fonte: Pacheco (2013).

Foram calculados 48 indicadores de GHR para cada combinação de variáveis de controle, no caso 6 opções de envoltório, 4 situações relacionadas ao horário da abertura e sombreamentos das janelas para os dois quartos dos dois apartamentos escolhidos para a avaliação. Os resultados destes indicadores de GHR foram comparados aos níveis de eficiência do PROCEL EDIFICA relativo ao arquivo climático TRY referente à Belém, de modo a enquadrar em qual nível de eficiência se encontra cada tipo de envoltório para as situações de sombreamento e de regime de abertura de esquadrias estudadas neste trabalho (Tabela 11).

Tabela 11 - Níveis de eficiência estipulados pelo PROCEL EDIFICA para Belém, segundo o arquivo climático TRY

Cidade: Belém – PA		ZB 8		Tipo do arquivo: TRY		
Eficiência	EqNum	GHR		C_R (kWh/m ² .ano)		C_A (kWh/m ² .ano)
A	5	$GHR \leq$	5828	$C_R \leq$	42,787	$C_A \leq$ -
B	4	5828 < $GHR \leq$	10340	42,787 < $C_R \leq$	68,780	$C_A \leq$ -
C	3	10340 < $GHR \leq$	16107	68,780 < $C_R \leq$	95,513	$C_A \leq$ -
D	2	16107 < $GHR \leq$	20455	95,513 < $C_R \leq$	124,572	$C_A \leq$ -
E	1	20455 < GHR		124,572 < C_R		C_A

Fonte: RTQ-R

De modo a simplificar a análise, tendo em vista a vasta gama de informações obtidas, foram dispostas em gráficos os valores das temperaturas aferidas ao longo do dia 21 de novembro. A escolha deste dia recaiu pelo fato de estar entre os mais quentes do ano, de acordo com o arquivo climático do INMET. Isso permitiu, através da análise dos gráficos da simulação computacional para este dia, visualizar as variações de temperatura de cada envoltório no período de 24 horas, para as 4 situações resultantes da combinação da abertura de janela e sombreamento, identificando em quais períodos do dia estes envoltórios, através de suas características térmicas, influenciaram positivamente ou negativamente no conforto térmico do ambiente.

Para a realização da simulação e análise dos resultados do desempenho de cada fechamento vertical dos ambientes avaliados, foi considerada a inércia térmica dos mesmos, que depende da quantidade de massa existente na construção, que por sua vez representa a capacidade do material de absorver o calor incidente sobre o mesmo e de liberá-lo quando a temperatura externa for menor que a sua própria temperatura. Sendo assim, a inércia térmica de cada painel foi considerada através dos seus índices de atraso térmico e amortecimento térmico. Segundo Papst (2009), tratam-se dos parâmetros mais relevantes ligados a inércia térmica. Outro ponto importante para a consideração da inércia térmica, é destacado por Gomes (2011), onde afirma o fato de que, em cidades com variação de temperatura (período

de 24 horas) entre 7°C e 10°C, como é a média de variação da cidade de Belém, a utilização da massa térmica pode superaquecer o interior das construções. Por isso também a importância da consideração da variação de ventilação e sombreamento dos ambientes avaliados, através das 4 situações a que foram submetidos.

O cálculo do atraso térmico de cada fechamento foi obtido através da equação determinada pela NBR 15220 (ABNT, 2005), onde foram considerados os parâmetros que intervêm no processo de transmissão de calor por condução em regime variável, ou seja, a condutividade térmica (λ), o calor específico (c), a densidade absoluta (d), e a espessura (l). No caso de um componente formado por diferentes materiais superpostos em “n” camadas paralelas às faces (perpendiculares ao fluxo de calor), o atraso térmico varia conforme a ordem das camadas. O coeficiente de amortecimento (μ) foi obtido pela relação entre a amplitude da temperatura superficial interna de um fechamento (ω_s) pela amplitude da temperatura do ambiente externo (θ_s) (Equação 10):

$$\mu = \frac{\omega_s}{\theta_s} \quad (10)$$

A tabela 12 resume os valores de capacidade térmica, transmitância térmica, atraso, amortecimento e resistência térmica dos 6 tipos de envoltória e 02 tipos de cobertura empregados na simulação.

Tabela 12 - Variáveis de desempenho térmico

Fechamento	Capacidade Térmica (KJ/m².K)	Transmitância Térmica (W/m².K)	Atraso Térmico (h)	Amortecimento (%)
Alvenaria	179,68	1,85	4,65	70,21
Concreto	220,00	4,84	2,58	48,99
LSF Simples	36,96	2,95	1,23	27,51
LSF Lã de Vidro	43,26	0,46	4,65	70,24
LSF EPS	56,68	1,03	3,69	61,80
LSF EPS+Lã de Vidro	62,98	0,36	6,62	82,19
Cobertura Alvenaria/Concreto	236,56	2,42	5,30	74,86
Cobertura LSF	184,98	1,65	7,27	84,98

Fonte: Elaborado pelo autor.

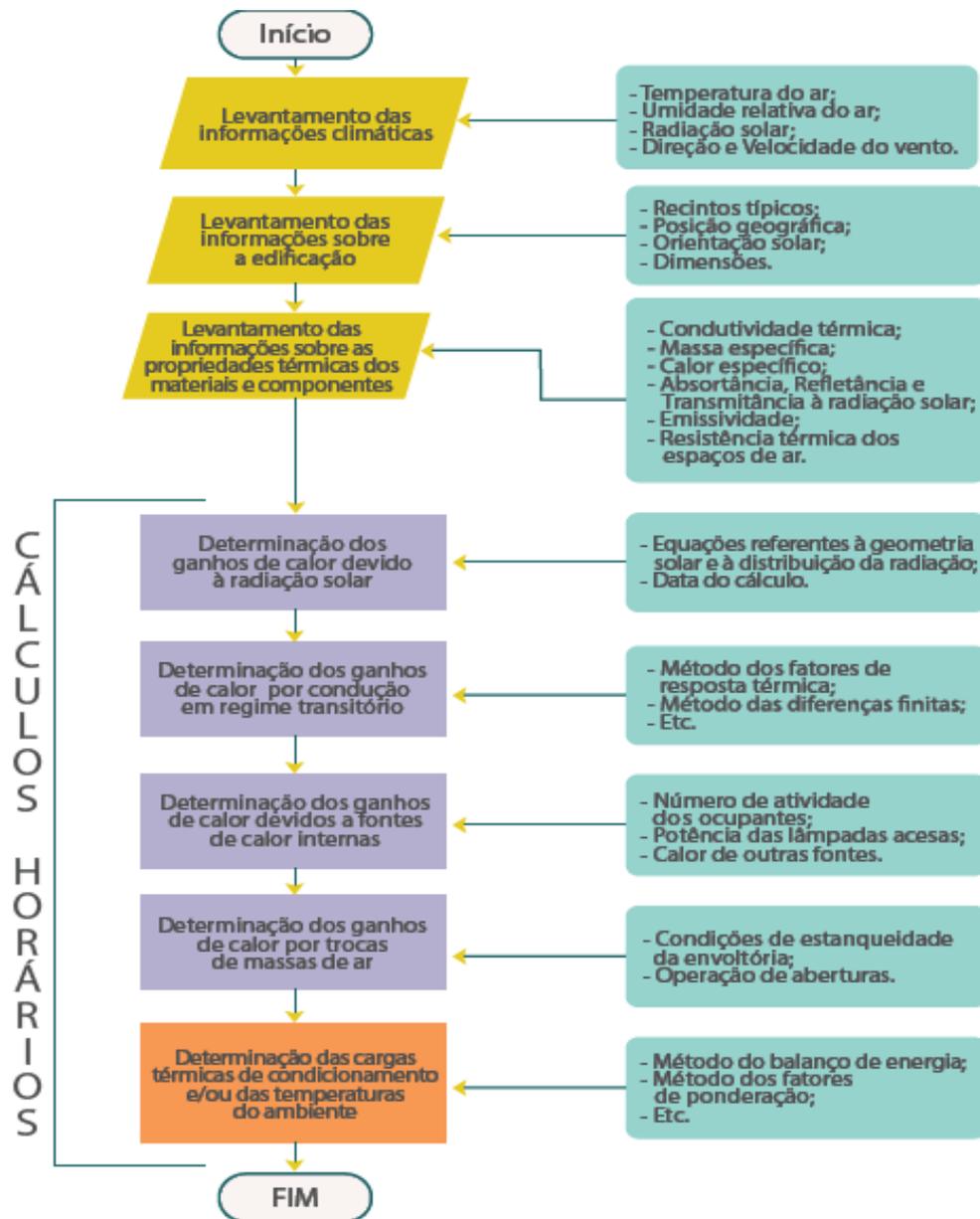
3.5.5.2 Método de simulação da NBR 15575

Além, de obter os resultados acerca do comportamento dos painéis, e conseqüentemente a opção de painel de LSF mais adequada ao clima de Belém, comparando com as paredes de alvenaria e de concreto, foram realizadas outras 16 simulações para verificar o desempenho térmico dos 4 painéis de LSF, através do método estabelecido pela

norma ABNT NBR 15.575. Esta nova simulação, que utilizou os métodos da norma de desempenho, visou verificar se a respectiva HIS, utilizando um dos 4 fechamentos em LSF atenderia aos índices de desempenho térmico estabelecidos pela referida norma, frente ao clima equatorial amazônico da cidade de Belém. Para isso, foi considerada sua tipologia de projeto real, sem inclusão de elementos adicionais de sombreamento, apenas considerando o seu sistema construtivo como em LSF. Neste caso, para atender aos procedimentos determinados pela NBR 15575-1, foi considerando o dia típico de verão, assim como não foram consideradas, na simulação, as cargas térmicas dos ambientes internos, no tocante ao número de usuário, iluminação artificial, utilização de aparelhos que emanam calor e rotinas de aberturas de janela. Já com relação a posição da unidade habitacional considerando a situação mais crítica, a unidade escolhida foi o quarto B do apartamento do último andar, que, além de possuir a abertura da janela voltada para oeste, como exigido pela norma para o caso do verão, recebe também influências térmicas da cobertura.

Para a simulação, foi adotada a taxa de ventilação de 1 ren/h, com a janela sem sombreamento e coeficiente de absorvância de 0,5, por serem as características reais da HIS modelo utilizada neste trabalho. Para as opções de fechamento em LSF não aprovadas, foi feita nova simulação apenas alterando a taxa de ventilação para 5 ren/h. Ficando os demais itens, com relação a absorvância e sombreamento, sem alteração, mantendo as cores e a volumetrias originais da referida HIS. Vale ressaltar que esta nova avaliação pelos critérios da NBR 15575, seguiu o respectivo roteiro estabelecido por esta norma (Figura 44).

Figura 44 - Esquema de atendimento ao procedimento de simulação computacional. NBR 15575



Fonte: IPT

É importante ressaltar que este trabalho buscou, através do método dos GHR para as várias opções de composição de painéis propostas, obter resultados que mostrem a possibilidade de adequação do sistema LSF ao clima equatorial amazônico da cidade de Belém, verificando dentre os 4 painéis de LSF estudados, qual o mais eficaz para proporcionar o melhor desempenho térmico, levando em consideração a relação entre a temperatura radiante destes painéis, relacionada ao nível de transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico, amortecimento térmico e as opções de sombreamento, assim como comparar, os respectivos resultados obtidos em relação ao LSF, com os da parede de concreto

e parede de alvenaria de tijolo cerâmico, por serem os sistemas construtivos comumente utilizados na cidade de Belém, em obras de HIS. Em complemento as informações obtidas, este trabalho verificou o atendimento da referida HIS estudada, aos índices de desempenho térmico da NBR 15575, considerando a utilização dos 4 tipos de fechamento em LSF em substituição ao seu sistema construtivo original, porém mantendo toda a sua tipologia arquitetônica e materiais de acabamentos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CALIBRAÇÃO

A tabela 13 apresenta os resultados dos indicadores estatísticos das quatro variações implementadas no modelo da calibração para o quarto B do apartamento 401 referente à cobertura. No caso base, a geometria da cobertura foi considerada como uma zona térmica, os dados térmicos dos materiais foram os mesmos sugeridos na NBR 15520 (ABNT, 2005) e a transmitância térmica da envoltória de alvenaria cerâmica rebocada foi de 1,814 W//m².k. No caso 01, alterou-se apenas a geometria da cobertura, considerando-a como uma câmara de ar de resistência térmica de 0,21 m².k/w. No caso 02, manteve-se a geometria do caso anterior, alterando-se os valores característicos dos materiais em - 15% o que em relação os valores de referência da norma ABNT NBR 15520 o que repercutiu em uma Transmitância térmica da envoltória de 1,768 W/m².K. No caso 03, manteve-se a geometria do caso 01, alterando-se os valores característicos dos materiais em +15% em relação aos valores da referida norma, resultando em uma transmitância térmica da envoltória de 1,850 W/m².K.

Tabela 13 - Resultados dos indicadores estatísticos para os diversos casos de modelos

Caso	Alterações	Erro Quadrático	Desvio Médio	Amplitude	CV	NMBE
Base		1,23	0,41	3,55	3,92	1,30
01	Caso base + geometria	1,15	0,08	3,91	3,67	-0,24
02	Caso 1 + (-15%) dados dos materiais	1,15	0,15	4,15	3,66	-0,47
03	Caso 1 + (+15%) dados dos materiais	1,16	0,00	3,71	3,69	0,00

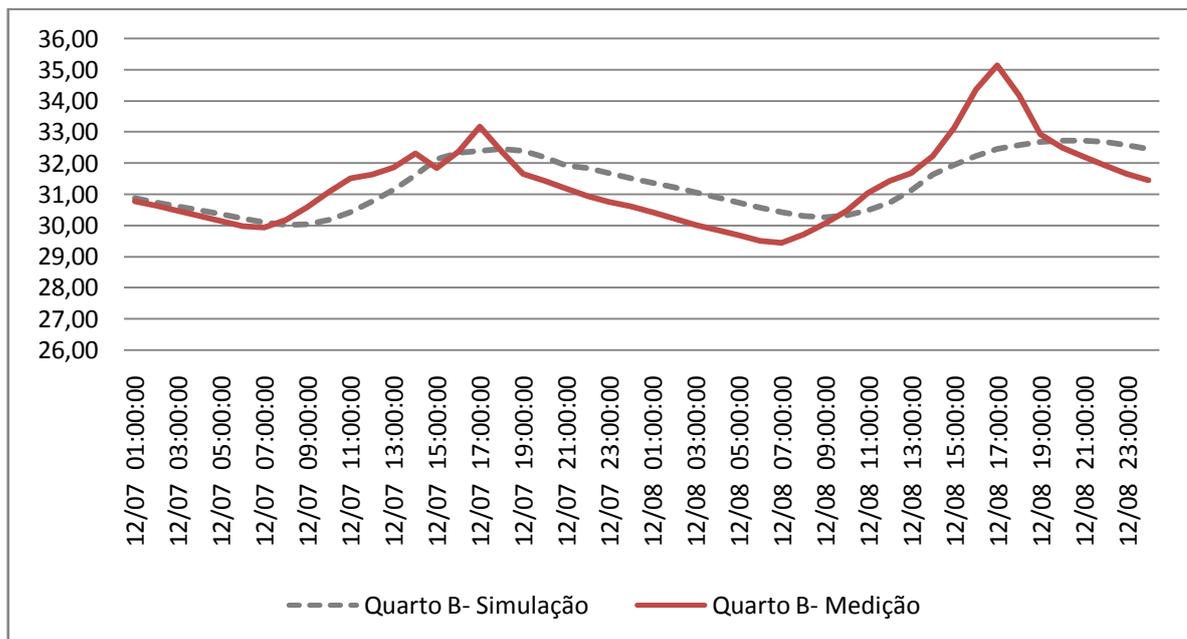
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos quatro casos avaliados, dois foram considerados bastante satisfatórios (caso 01 e 03), pois obtiveram influência positiva no processo de calibração do modelo, com reduções no erro quadrático e no desvio médio e, conseqüentemente na amplitude térmica. Foram estes casos que consideraram a geometria como uma câmara de ar e o aumento em 15% dos valores da resistência térmica da envoltória em relação a referência especificada na norma 15220. O caso 03 contempla estas duas alterações, obtendo os menores valores de erro quadrático e desvio médio e o segundo menor de amplitude. Isto significa que a consideração da cobertura como uma câmara de ar e os valores maiores de resistência térmica da envoltória representam melhor a edificação real. Em relação os parâmetros recomendados pela ASHRAE, todos os casos considerados já admitem o modelo como calibrado. Contudo, o caso 3 novamente foi um dos que apresentou os menores valores de *Coefficient of Variation of the Root Mean*

Squared Error (CVRMSE) e o *Normalized Mean Bias Error* (NMBE). Em suma, foi adotado para simulação o modelo com as características adotadas no caso 3.

A figura 45 ilustra a diferença entre os resultados da medição e da simulação após a alteração efetuada no caso 03 para o quarto B do apartamento 401. Os dados se referem aos dias 7 e 8 de dezembro de 2017. Constata-se que as temperaturas estimadas (linha tracejada) do quarto B apresentam variações semelhantes às medições. De modo geral, a exceção do horário das 17 horas de ambos os dias, o modelo representa muito bem a variação de temperatura ao longo do dia. O pico mais pronunciado no segundo dia (08 de dezembro) se deve ao calor acumulado na edificação pelo fato da mesma está com as esquadrias fechadas e possivelmente a taxa de infiltração de ar estipulada no modelo ter sido menor que a real ocorrida pelas esquadrias da edificação. Contudo, nada significativo como pode ser visto na Tabela 14 que mostra as temperaturas máximas, mínimas e as amplitudes obtidas com o modelo e as medidas na edificação.

Figura 45 - Resultados: simulação x medição do quarto B



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 - Resultado das variáveis estatísticas: CASO 03

Variáveis	Quarto B	
	Medição	Simulação
Temp. Máxima	35,24	33,67
Temp. Mínima	29,39	29,96
Amplitude Térmica	5,85	3,71

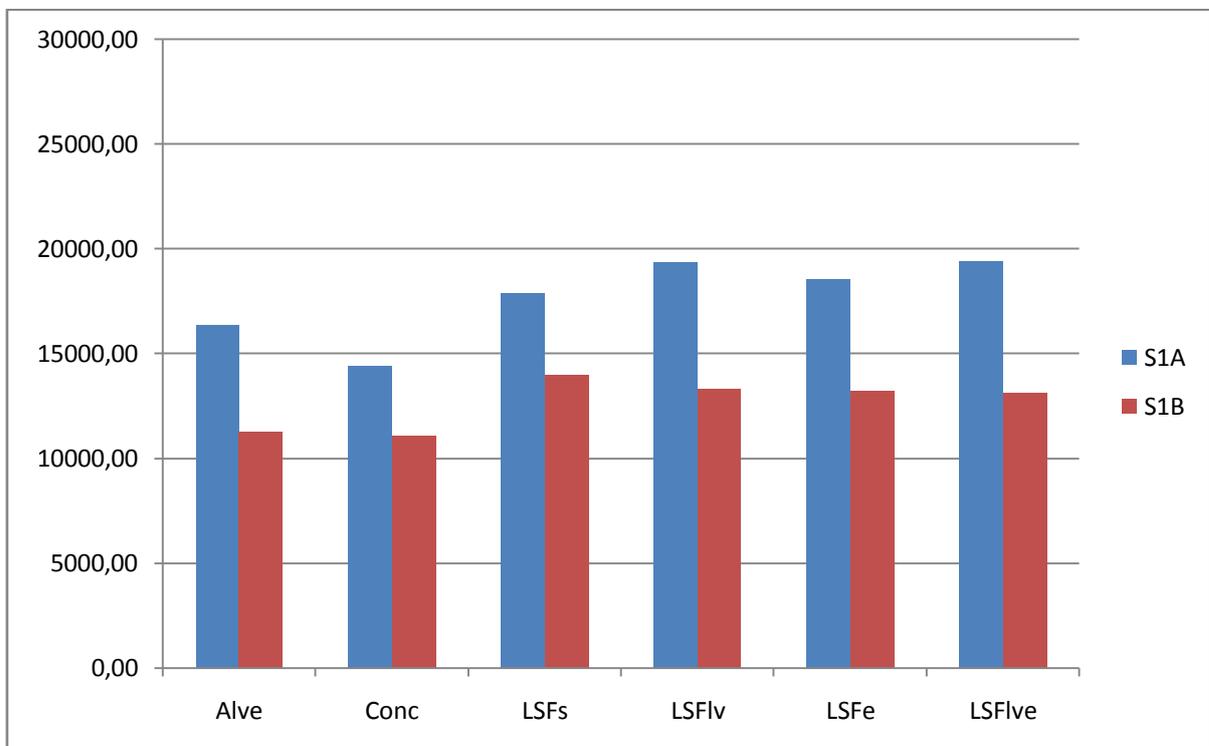
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 DESEMPENHO TÉRMICO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PELO MÉTODO DO GHR

4.2.1 2º pavimento

A Figura 46 mostra os resultados de indicadores de graus-hora de resfriamento do quarto B do 2º Pavimento para as situações 1A e 1B, nas quais a ventilação noturna é privilegiada (a janela permanece fechada durante o período de incidência direta da radiação solar e aberta durante toda a noite e madrugada), sem e com sombreamento da janela, respectivamente (Tabela 15).

Figura 46 - Quantidade de GHR anual do quarto B (2º Pavimento) para situação 1A e 1B, ventilação noturna



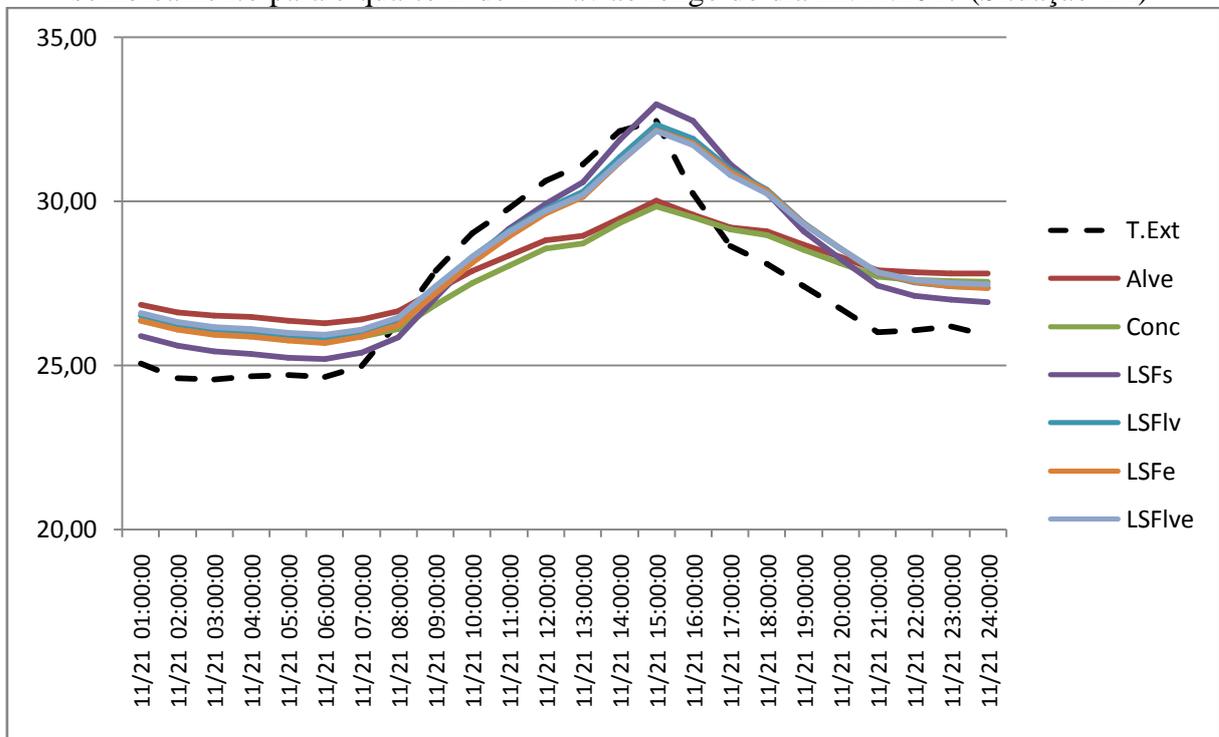
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Indicadores de GHR para a rotina de ventilação noturna, sem e com sombreamento

Melhor desempenho	QUARTO B- 2º PAVIMENTO. - Situação 1A(sem sombreamento)		QUARTO B -2º PAV. - Situação 1B (com sombreamento)	
	Fechamento	GHR	Fechamento	GHR
1º	Concreto (Conc)	14419,09	Concreto (Conc)	11072,11
2º	Alvenaria (Alve)	16345,73	Alvenaria (Alve)	11257,19
3º	LSF Simples (LSFs)	17870,65	LSF lâ+ eps (LSFve)	13133,16
4º	LSF eps (LSFe)	18569,69	LSF eps (LSFe)	13224,06
5º	LSF lâ (LSFlv)	19342,29	LSF lâ (LSFlv)	13277,60
6º	LSF lâ + eps (LSFve)	19371,81	LSF Simples (LSFs)	13957,97

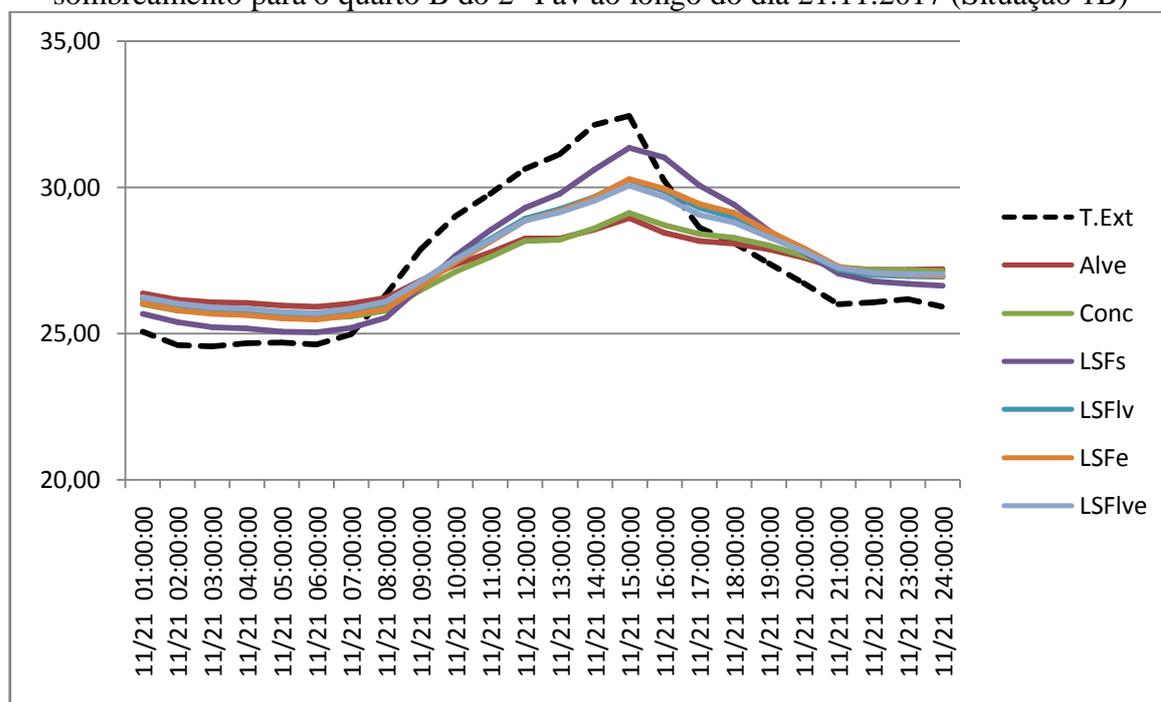
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação noturna, sem sombreamento para o quarto B do 2º Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 1A)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 - Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação noturna, com sombreamento para o quarto B do 2º Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 1B)



Fonte: Elaborado pelo autor.

É notório observar na figura 46 que a estratégia de sombreamento das esquadrias, de modo a evitar o ganho de calor pelos vedos, foi significativa e positiva para o edifício, independentemente do tipo de envoltória adotada. Os resultados demonstram que o sombreamento das esquadrias é uma estratégia imprescindível para o projeto arquitetônico de uma edificação energeticamente eficiente.

A respeito dos sistemas construtivos, os tradicionais, no caso as paredes de concreto e de alvenaria cerâmica, por possuírem conjuntamente o binômio capacidade térmica/transmitância térmica com os maiores valores, apresentaram melhor comportamento em termos de conforto térmico, com os menores indicadores de graus hora para a situação de ventilação noturna, com e sem sombreamento.

Envoltórios com maior capacidade térmica dificultam o ganho de calor por transmissão e irradiação para o lado interno da edificação, sendo necessária uma maior quantidade de energia para elevar a temperatura deste tipo de parede e aquecer interiormente o ambiente. Isto repercute na variação de temperatura durante o dia, onde as temperaturas destes sistemas são mais baixas das 09:00h da manhã até as 18:00h, independentemente se há ou não sombreamento (Figuras 47 e 48). Associado a esse comportamento de ganhar menos calor durante o dia, também perdem mais facilmente este calor para o ambiente externo

durante a noite, fato este que repercute nas temperaturas internas mais baixas em comparação as dos demais sistemas em LSF por conta dos maiores valores de transmitância térmica ou menor resistência térmica.

Os sistemas construtivos em LSF com isolamento térmico em lã de vidro, EPS ou associação destes, apresentaram os maiores desconfortos porque possuem menores valores de capacidade térmica e transmitância térmica que os sistemas tradicionais. Neste caso, o isolamento térmico não é suficiente para aumentar a capacidade térmica da parede, não sendo eficaz na redução do ganho de calor externo durante a manhã e a tarde nem tampouco na remoção do calor interno durante a noite, visto que os elementos isolantes reduziram a transmitância térmica. Em outras palavras, não foram eficientes nem na atenuação do ganho de calor durante a exposição a radiação solar assim como também dificultaram a dissipação deste calor para o meio externo durante a noite. Nas figuras 47 e 48 as temperaturas dos sistemas LSF com isolamento foram superiores as dos tradicionais, seja com ou sem sombreamento para a condição de ventilação noturna.

A hipótese inicial de associar sombreamento dos vedos com transmitâncias térmicas baixas para reduzir ganhos de calor vindos do exterior não foi comprovada. Pelo contrário, o desconforto foi muito maior para os sistemas com a estratégia de aumentar a resistência térmica (reduzir a transmitância térmica). O sombreamento dos vedos não foi suficiente para barrar o calor, pois este foi transmitido a estas edificações pelo envoltório que possui baixa capacidade térmica, de baixa eficácia na dissipação do calor externo. Estes envoltórios aquecem mais facilmente e repassam por irradiação o calor ao ambiente interno.

Este comportamento vai inclusive de encontro a recomendação da NBR 15575 para paredes de edificações na ZB8, no qual especifica valores de transmitância térmica menores ou inferiores a $3,7 \text{ w}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ e $2,5 \text{ w}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ para cores escuras e claras, respectivamente. Os sistemas LSF com isolamento possuíam valores bem menores que estes, entre 0,46 e 1,03 $\text{w}/\text{m}^2\cdot\text{K}$. A explicação para isto se deve ao fato do conforto térmico na zona bioclimática 8 não estar associado apenas à transmitância térmica, mas também muito fortemente à capacidade térmica, pois é esta que impede o ganho de calor durante o período de radiação solar. A transmitância térmica tem a função de facilitar a perda deste ganho de calor a noite, o que é muito importante para esta zona bioclimática. O binômio funciona efetivamente porque a capacidade térmica alta mitiga o ganho de calor pela manhã e tarde e a transmitância térmica elevada dissipa facilmente este ganho à noite.

Um exemplo que ilustra muito bem a associação do conforto térmico na ZB8 a este binômio (capacidade térmica e transmitância térmica) foi o comportamento do sistema LSF

simples, sem isolamento térmico (LSFs). Como este tipo de sistema adota uma envoltória constituída de uma câmara de ar e duas placas cimentícia, sem isolamento, sua capacidade térmica é reduzida, 37 KJ/m².K, a menor dentre todos os sistemas estudados. Contudo, sua transmitância térmica por conta deste arranjo construtivo é a segunda mais elevada, 2,95 KJ/m².K, sendo inferior apenas para a do concreto, na ordem de 5 KJ/m².K. Esta configuração ocasionou um comportamento distinto dentre os demais sistemas construtivos. Em decorrência da sua baixíssima capacidade térmica, ganha muito calor do exterior, o que faz com que apresente as maiores temperaturas internas das 9h00 da manhã até as 21h00 sem sombreamento (Figura 47) e até as 17h00 com sombreamento (Figura 48). No caso sem sombreamento, a temperatura interna supera a externa por volta das 15h00, o que se configura como um aspecto extremamente negativo. Contudo, este ganho de calor adquirido durante a manhã e tarde é perdido ou dissipado rapidamente e em grande proporção por suas paredes de alta transmitância térmica ou baixa resistência térmica durante a noite e madrugada.

Um outro indicativo de que a dissipação da energia interna na edificação é responsabilidade da transmitância térmica foi o fato do sombreamento atenuar de forma diferenciada nos diversos sistemas construtivos, conforme pode ser visto na Tabela 16. Para os sistemas com transmitâncias térmicas entre 0,36 a 1,98 W/m².K (LSF com isolamento térmico e a alvenaria cerâmica), o percentual de redução foi 28 a 32%, ao passo que para o LSFs, sem isolamento, e parede de concreto, com transmitâncias térmicas mais elevadas, 2,95 e 4,84 W/m².K, a redução ficou entre 21 e 23%, respectivamente.

No caso dos sistemas com maior resistência térmica, os LSF com isolamento e a alvenaria, a atenuação depende quase que exclusivamente do sombreamento uma vez que o calor ganho durante o dia fica retido por conta da maior resistência térmica de suas envoltórias. Por esta razão o sombreamento proporciona maior redução em relação às esquadrias não sombreadas. Para as paredes de menor resistência térmica (concreto e o LSF simples sem isolamento), a atenuação não se deve exclusivamente ao sombreamento, mas à dissipação de energia que ocorre pelas suas envoltórias, com maior transmitância térmica.

Os resultados demonstram que o emprego de materiais de menor resistência térmica e alta capacidade térmica são as melhores escolhas para Belém, para a ZB8. Roriz, Chvatal e Cavalcanti (2009) apontam que as melhores alternativas para a maior parte do território brasileiro é baixo isolamento, baixa absorvância, sombreamento, controle de ventilação e, dependendo da situação, inércia térmica. Os autores investigaram vários tipos de concreto, de peso normal e leve, e constataram que os de peso normal, de menor resistência térmica (maior

transmitância) foram os que apresentaram para Belém os menores indicadores GHR, ou seja, menor desconforto.

Tabela 16 - Percentual de redução de GHR com o sombreamento para condição de ventilação noturna no quarto B do 2º pavimento

Sistema construtivo	Redução % GHR (1 – GHR1B/GHR1A)
Concreto	23
LSFs	21
LSFe	28
LSFlv	31
LSFlve	32
Alv.	31

Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, a edificação como foi construída, em alvenaria, seria classificada como nível de eficiência energética D, com GHR de 16.345. É possível observar que com a adoção de uma nova envoltória, no caso de concreto, sombreando as esquadrias e alterando a estratégia de ventilação, reduziu-se o indicador de GHR para 11.072, quase alcançando o nível B, que é de 10.340. Caso fosse contemplado uma melhor orientação da edificação, favorecendo a ventilação preferencial e a radiação solar diurna, além de estratégias de sombreamento dos vedos e das envoltórias, seria possível esta HIS apresentar uma redução dos GHR que talvez alcançasse o nível A. Estes resultados demonstram claramente o quanto é importante que a escolha de um sistema construtivo esteja associado às variáveis do processo de projeto como o uso de materiais, orientação solar, ventilação, sombreamento, entre outros aspectos, de modo a proporcionar qualidade arquitetônica e conforto térmico.

4.2.2 2º pavimento com ventilação diurna

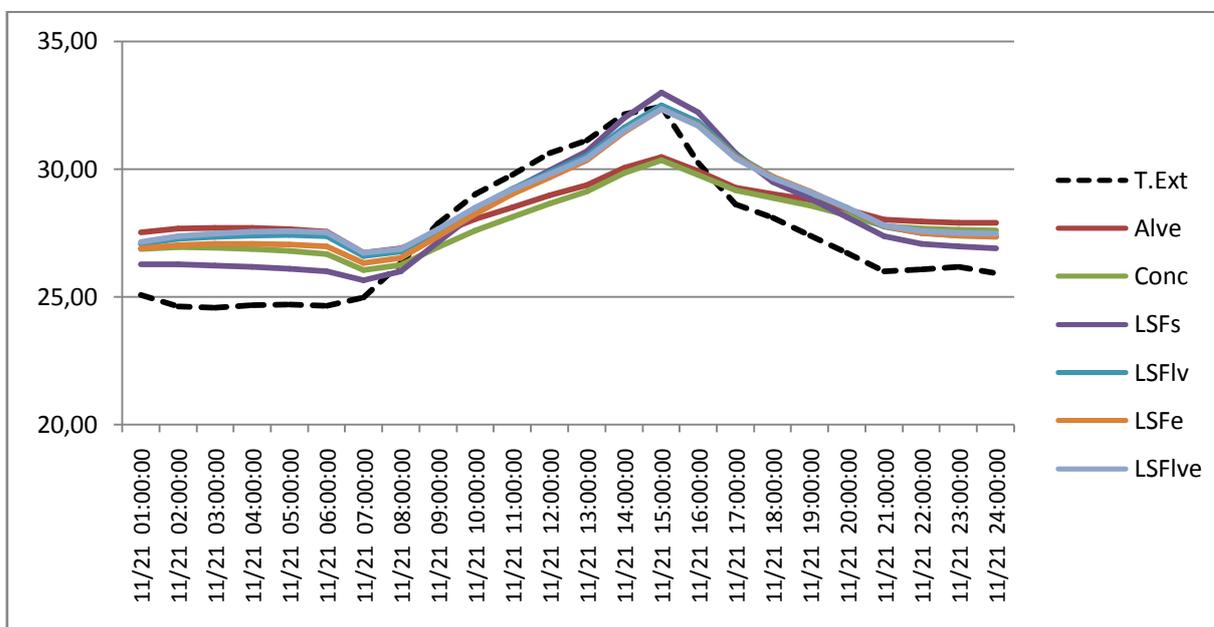
A tabela 17 mostra os resultados de indicadores de graus-hora de resfriamento do quarto B do 2º Pavimento para as situações 2A e 2B, nas quais a ventilação noturna não é privilegiada (a janela permanece aberta durante o período de incidência direta da radiação solar e fechada durante toda a madrugada), mas sim a ventilação diurna, sem e com sombreamento da janela, respectivamente. Na Tabela 17 são mostrados os valores de GHR e nas Figuras 49 e 50 as variações de temperatura ao longo do dia 21 de novembro para ventilação diurna, sem e com sombreamento, respectivamente.

Tabela 17 - Quantidade de GHR anual do quarto B (2º Pavimento)
para situação 2A e 2B, ventilação diurna

Classificação	QUARTO B- 2º PAV. -Situação 2A		QUARTO B- 2º PAV. -Situação 2B	
	Fechamento	GHR	Fechamento	GHR
1º	Concreto (Conc)	17596,59	Concreto (Conc)	13893,69
2º	LSF Simples (LSFs)	18699,89	LSF Simples (LSFs)	14862,76
3º	Alvenaria (Alve)	20761,87	Alvenaria (Alve)	15248,46
4º	LSF eps (LSFe)	21210,96	LSF eps (LSFe)	15787,00
5º	LSF lâ (LSFlv)	22434,65	LSF lâ (LSFlv)	16269,06
6º	LSF lâ+ eps (LSFlve)	22883,43	LSF lâ+ eps (LSFlve)	16576,64

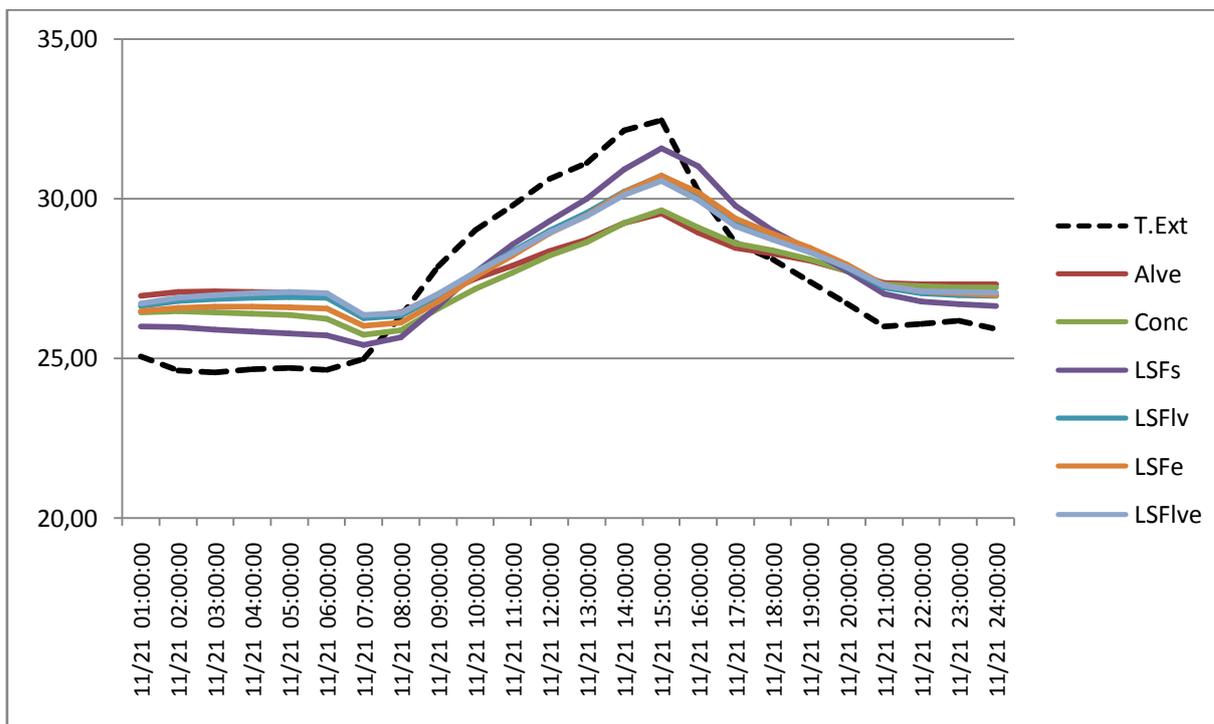
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 - Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação diurna, sem sombreamento para o quarto B do 2º Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 2A)



Fonte:

Figura 50 - Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação noturna, com sombreamento para o quarto B do 2º Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 2B)



Fonte:

Na comparação direta dos indicadores de GHR para a condição de ventilação diurna com os da ventilação noturna, independentemente do tipo de envoltória, com ou sem sombreamento, é possível constatar que houve acréscimos de GHR de desconforto na ordem de 15 a 20%. Neste caso, a ventilação diurna associada ao fechamento das esquadrias durante a noite faz com que o ganho de calor trazido por convecção no período da tarde não seja facilmente dissipado na edificação durante a noite. Em outras palavras, o acúmulo de ganho de calor na edificação é maior quando se abre pela manhã/tarde e não se permite a ventilação noturna.

Nesta situação, observou-se comportamento diferenciado dos sistemas construtivos. O LSFs, sem isolamento térmico, proporcionou menores horas de desconforto do que o sistema tradicional de alvenaria cerâmica, independentemente de sombreado ou não. Apesar da sua capacidade térmica ser bastante inferior a da alvenaria, 37 KJ/m².K em comparação a 179 KJ/m².K, o que repercute em temperaturas bem mais elevadas, inclusive superiores a temperatura externa para o caso sem sombreamento das esquadrias; sua transmitância térmica é superior a da alvenaria, 2,95 W/m².K em comparação a 1,85 W/m².K, o que permitiu uma maior dissipação da energia acumulada dentro da edificação durante o período manhã-tarde, repercutindo em temperaturas inferiores ao da alvenaria a partir das 20h00 (Figuras 49 e 50).

Este segundo efeito para o caso do LSFs foi preponderante sobre o primeiro em comparação ao ocorrido na alvenaria. Em outras palavras, o LSFs superou a alvenaria porque o efeito de dissipação do calor proporcionado pela transmitância térmica foi preponderante sobre o ganho de calor obtido por sua baixa capacidade térmica.

Em termos de indicadores de GHR, o LSFs foi o segundo melhor, com menores quantidades de horas de desconforto, sendo superado apenas pelo melhor desempenho das paredes de concreto em razão das maiores capacidade térmica ($220 \text{ KJ/m}^2\cdot\text{K}$) e transmitância térmica ($5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Conclui-se que o LSFs, simples, sem isolamento, é um envoltório interessante para situações de projeto em que haja ganhos excessivos de calor para a edificação como o exemplo de não privilegiar a ventilação natural noturna, ou em casos de coberturas, cujo ganho de calor ocorre por duas faces, conforme será discutido a seguir, ou por qualquer outra situação de ganho excessivo de calor por conta de um projeto inadequado. Uma vez que possuem o menor dos atrasos térmicos dentre todos as envoltórias estudadas neste trabalho, sendo capazes em virtude da sua alta transmitância térmica dissipar rapidamente o calor ganho externamente da sua alta transmitância térmica dissipar rapidamente o calor ganho externamente durante o dia.

Os demais sistemas construtivos em LSF, com isolamentos térmicos, aumentaram em demasia o desconforto térmico, com indicadores de GHR superiores a 20.000, o que baixa ainda mais o grau de eficiência da HIS, passando do nível D para o E. Estes modelos dificultam ainda mais a dissipação de energia durante a noite e potencializam o efeito negativo da falta de ventilação noturna. Entretanto, quando estas envoltórias tiveram suas esquadrias sombreadas, passaram de 20.000 horas para 16.000 horas de GHR, transitando do nível de eficiência energética E para o D e C.

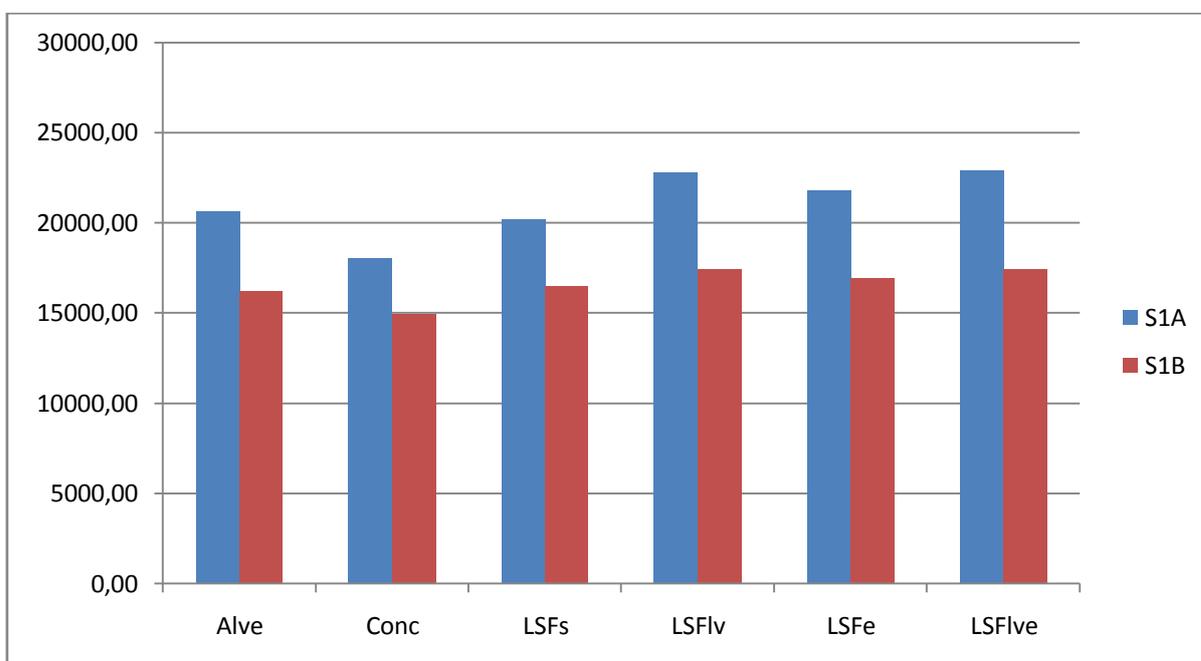
O sombreamento, assim como ocorreu no regime de ventilação noturna, e mais ainda para o caso em que não há ventilação noturna, é muito importante para atenuar o ganho de calor externo pelos vedos.

Os resultados ratificam a importância do sombreamento, do tipo de envoltória e da ventilação noturna para o resfriamento do edifício, demonstrando que a sinergia destes aspectos deve ser considerada no projeto arquitetônico.

4.2.3 4º pavimento (cobertura) com ventilação noturna

A Figura 51 mostra os resultados de indicadores de graus-hora de resfriamento do quarto B do 4º Pavimento (Cobertura) para as situações 1A e 1B, nas quais a ventilação noturna é privilegiada (a janela permanece fechada durante o período de incidência direta da radiação solar e aberta durante toda a madrugada), sem e com sombreamento, respectivamente. No Quadro 4 são mostrados os valores de GHR e nas Figuras 53 e 54 as variações de temperatura ao longo do dia 21 de novembro para ventilação noturna, sem e com sombreamento, respectivamente.

Figura 51 - Quantidade de GHR anual do quarto B (4º Pavimento) para situação 1A e 1B, ventilação noturna



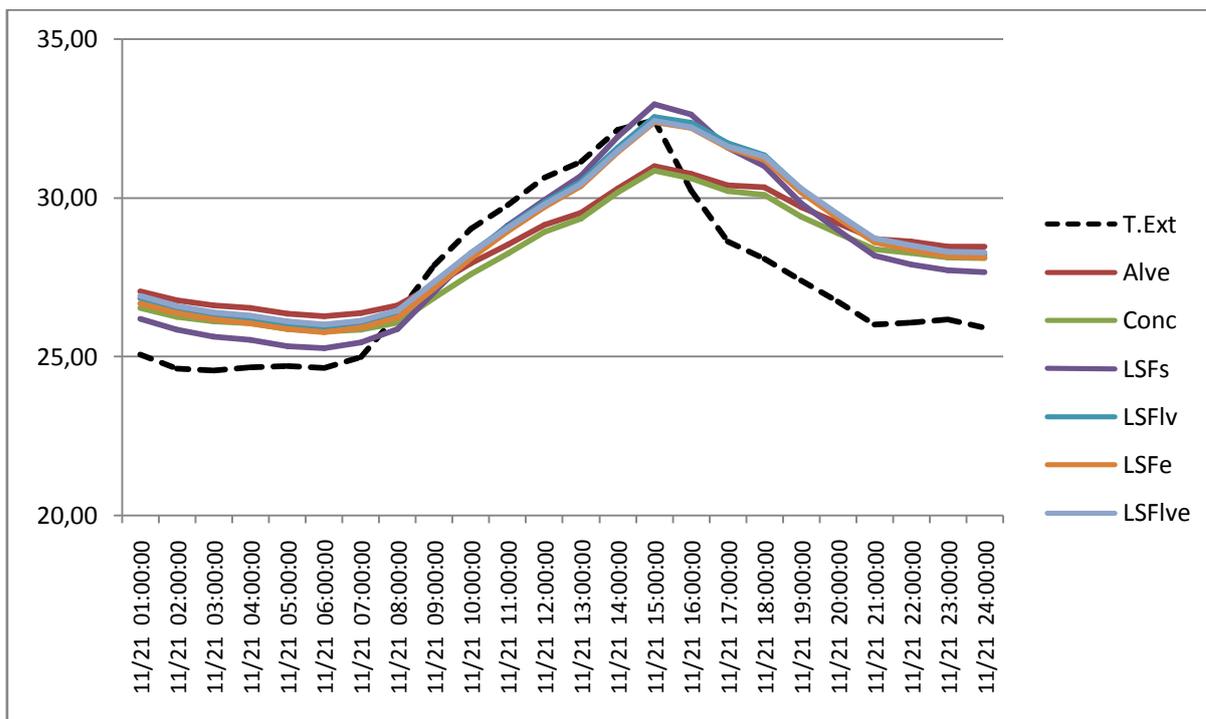
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4 - Indicadores de GHR para a rotina de ventilação noturna, sem e com sombreamento

Classificação	QUARTO B- 4º PAVIMENTO. Situação 1A		QUARTO B- 4º PAVIMENTO. - Situação 1B	
	Fechamento	GHR	Fechamento	GHR
1º	Concreto (Conc)	18063,12	Concreto (Conc)	14915,73
2º	LSF Simples (LSFs)	20198,50	Alvenaria (Alve)	16248,81
3º	Alvenaria (Alve)	20643,58	LSF Simples (LSFs)	16490,97
4º	LSF eps (LSFe)	21784,01	LSF eps (LSFe)	16930,16
5º	LSF lâ (LSFlv)	22810,16	LSF lâ (LSFlv)	17399,15
6º	LSF lâ+ eps (LSFlve)	22944,53	LSF lâ+ eps (LSFlve)	17417,72

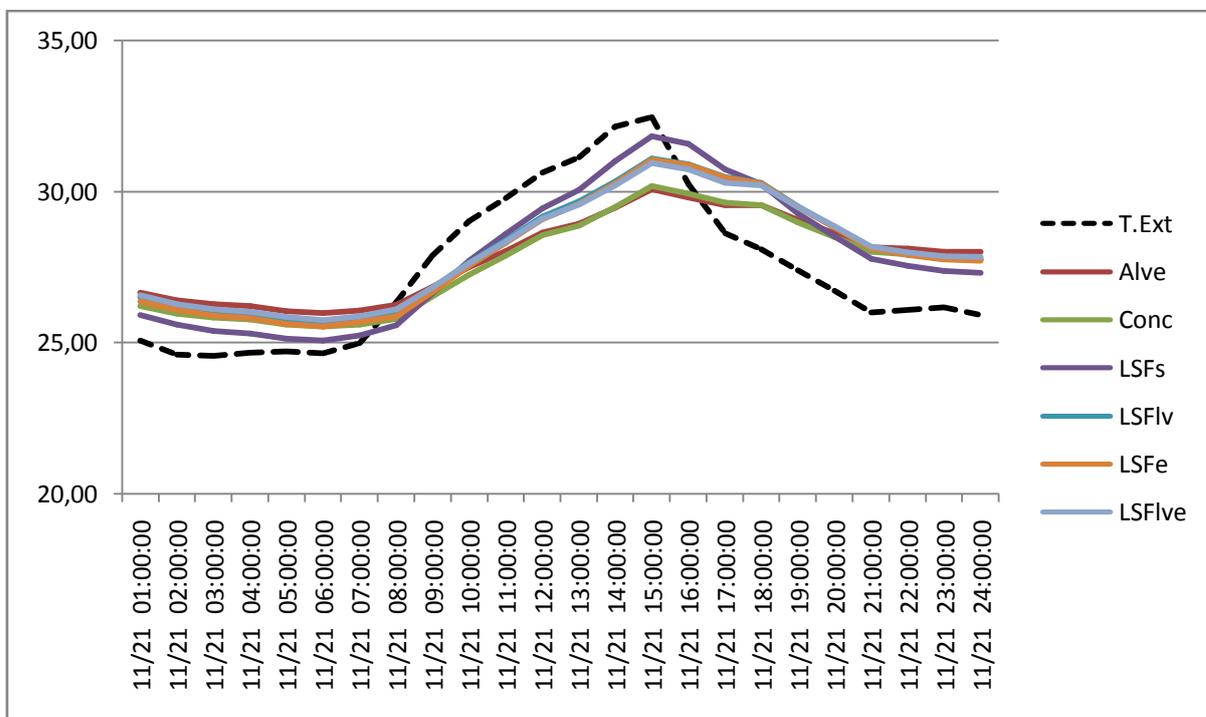
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 - Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação noturna, sem sombreamento para o quarto B do 4º Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 1A)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 53 - Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação noturna, com sombreamento para o quarto B do 4º Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 1B)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na comparação direta dos indicadores de GHR entre os quartos do 2º pavimento e 4º pavimento (cobertura), independentemente do tipo de envoltória, com ou sem sombreamento, é possível constatar que houve na cobertura acréscimos de GHR de desconforto na ordem de 17 a 22% superiores. Os ganhos de calor na cobertura são maiores porque são duas as superfícies de irradiação térmica, as paredes e a cobertura.

Assim como ocorreu na situação anterior, do 2º pavimento sem ventilação noturna, o LSFs, sem isolamento térmico, proporcionou menores horas de desconforto do que o sistema tradicional de alvenaria cerâmica não sombreado. Mesmo tendo capacidade térmica bastante inferior a da alvenaria, o que repercute em temperaturas bem mais elevadas, inclusive superiores a temperatura externa para o caso sem sombreamento das esquadrias; a transmitância térmica é superior a da alvenaria, o que permitiu uma maior dissipação da energia acumulada dentro da edificação durante o período manha-tarde, repercutindo em temperaturas inferiores ao da alvenaria a partir das 17h00 (Figuras 52 e 53). Este segundo efeito para o caso do LSFs foi preponderante sobre o primeiro em comparação ao ocorrido na alvenaria. Em outras palavras, o LSFs superou a alvenaria porque o efeito de dissipação do calor proporcionado pela transmitância térmica foi preponderante sobre o ganho de calor obtido por sua baixa capacidade térmica.

Em termos de indicadores de GHR, o LSFs foi o segundo melhor, com menores quantidades de horas de desconforto, para a situação 1A, sendo superado apenas pelo melhor desempenho das paredes de concreto em razão das maiores capacidade térmica ($220 \text{ KJ/m}^2.\text{K}$) e transmitância térmica ($5 \text{ W/m}^2.\text{K}$).

O LSFs, simples, sem isolamento, é um envoltório interessante para situações de cobertura ou de projeto deficitários em termos de sombreamento, ventilação e orientação, em que haverá ganhos excessivos de calor para a edificação. Por possuir o menor atraso térmico dentre todos as envoltórias estudadas neste trabalho, são capazes de dissipar rapidamente o calor ganho externamente durante o dia em virtude da sua alta transmitância térmica.

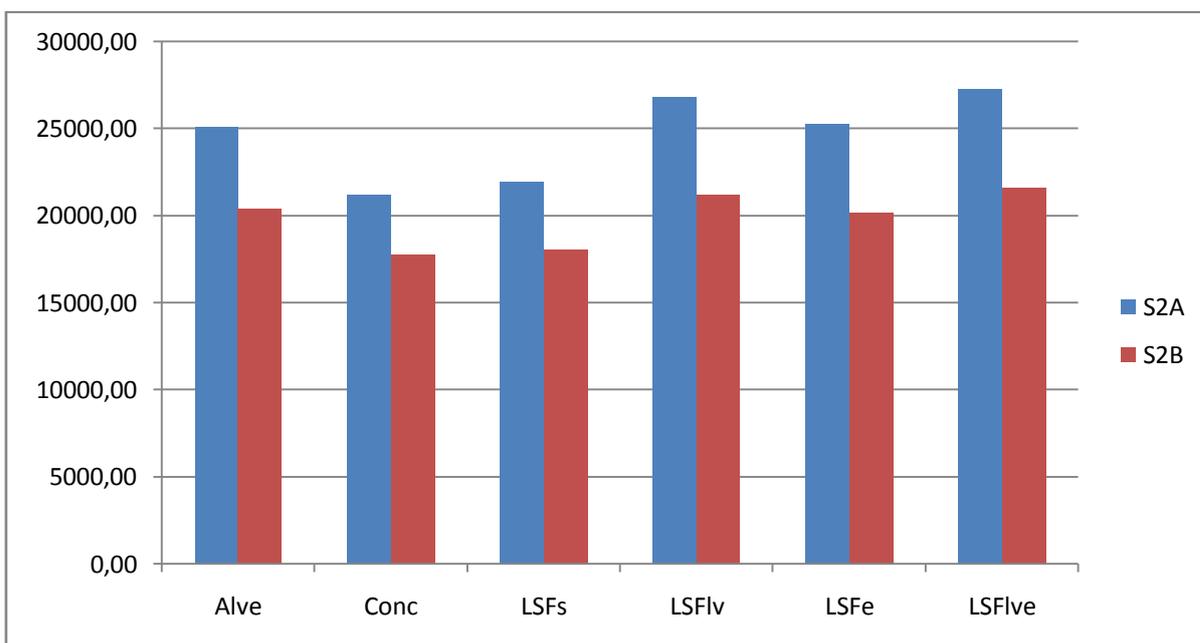
Os demais sistemas construtivos em LSF, com isolamentos térmicos, aumentaram em demasia o desconforto térmico, com indicadores de GHR superiores a 20.000, o que baixa ainda mais o grau de eficiência da HIS, passando do nível D para o E. Estes modelos dificultam ainda mais a dissipação de energia durante a noite e potencializam o efeito negativo do ganho de calor pela cobertura. Entretanto, quando estas envoltórias tiveram suas esquadrias sombreadas, passaram de 21.000 horas para 16.000 horas de GHR, transitando do nível de eficiência energética E para o D. Em suma, o sombreamento é muito importante para atenuar o ganho de calor externo em situações extremas como no caso da cobertura.

Os resultados novamente ratificam a importância do sombreamento, do tipo envoltório e da ventilação noturna para o resfriamento do edifício, demonstrando que a sinergia destes aspectos deve ser considerada no projeto arquitetônico.

4.2.4. 4º pavimento (cobertura) com ventilação diurna

A figura 54 mostra os resultados de indicadores de graus-hora de resfriamento do quarto B do 4º Pavimento (Cobertura) para as situações 2A e 2B, nas quais a ventilação noturna não foi privilegiada (a janela permanece aberta durante o período de incidência direta da radiação solar e fechada durante toda a madrugada), sem e com sombreamento, respectivamente. Na Tabela 18 são mostrados os valores de GHr e nas figuras 55 e 56 as variações de temperatura ao longo do dia 21 de novembro para ventilação diurna, sem e com sombreamento, respectivamente.

Figura 54 - Quantidade de GHR anual do quarto B (4º Pavimento) para situação 2A e 2B, ventilação diurna



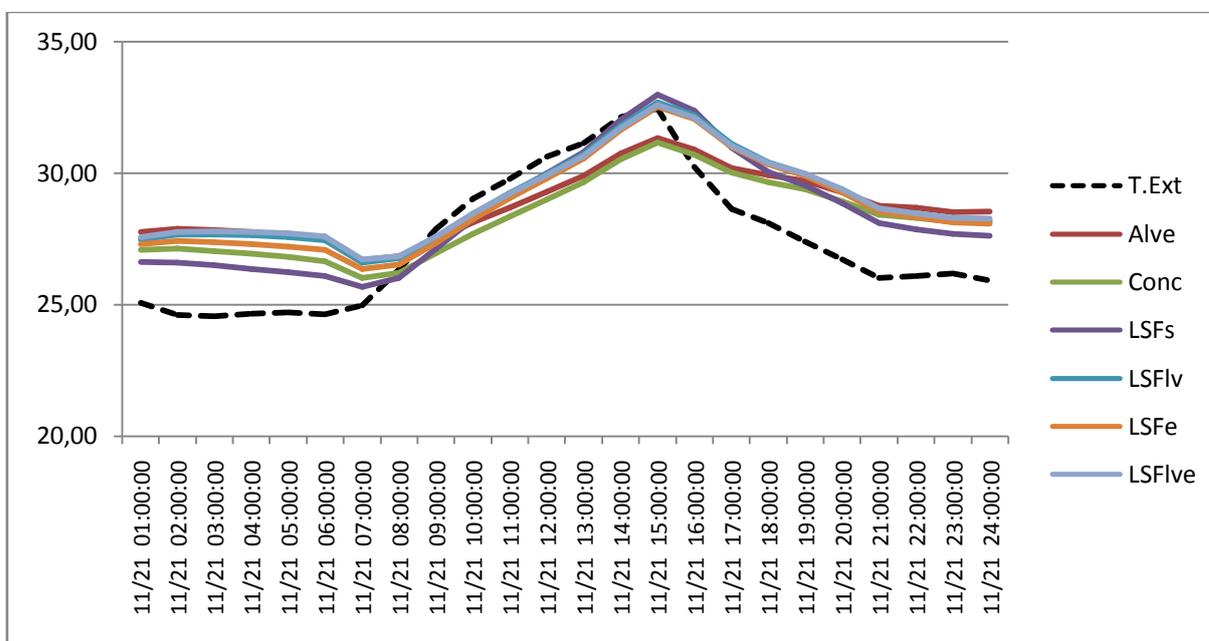
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 - Indicadores de GHR para a rotina de ventilação diurna, sem e com sombreamento

Classificação	QUARTO B- 4º PAV. -Situação 2A		QUARTO B- 4º PAV. -Situação 2B	
	Fechamento	GHR	Fechamento	GHR
1º	Concreto (Conc)	21226,59	Concreto (Conc)	17765,26
2º	LSF Simples (LSFs)	21959,79	LSF Simples (LSFs)	18065,17
3º	Alvenaria (Alve)	25106,69	LSF eps (LSFeps)	20197,50
4º	LSF eps (LSFeps)	25260,90	Alvenaria (Alve)	20414,33
5º	LSF lâ (LSFv)	26804,46	LSF lâ (LSFv)	21189,22
6º	LSF lâ+ eps (LSFve)	27267,71	LSF lâ+ eps (LSFve)	21560,89

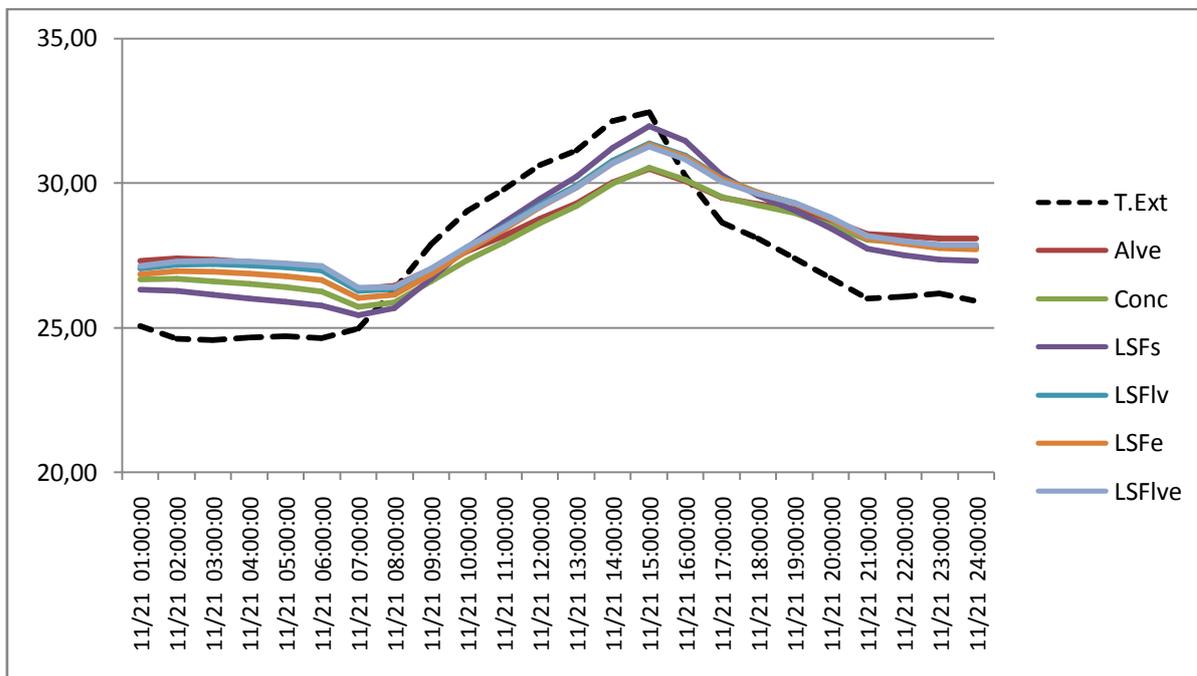
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 - Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação diurna, sem sombreamento para o quarto B do 4º Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 2A)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 56 - Variações de temperatura das envoltórias para a rotina ventilação diurna, com sombreamento para o quarto B do 4º Pav ao longo do dia 21.11.2017 (Situação 2B)



Fonte: Elaborado pelo autor .

Esta foi a situação mais desfavorável em termos de desconforto térmico, ou seja, com os maiores indicadores de GHR de desconforto, todos superiores a 21000 sem sombreamento e superiores a 17000 com sombreamento, classificando a edificação com a mais baixa eficiência energética do PROCEL EDIFICA, nível E. Isto se deve a superposição de dois efeitos que ocasionam ganhos excessivos de calor, a cobertura e falta de ventilação noturna.

Assim como ocorreu nas situações anteriores, o LSFs, sem isolamento térmico, se mostrou mais eficiente pelo fato de dissipar mais rapidamente o calor ganho pela cobertura e pela falta de ventilação noturna. O LSFs superou a alvenaria porque o efeito de dissipação do calor proporcionado pela transmitância térmica foi preponderante sobre o ganho de calor obtido por sua baixa capacidade térmica. Em termos de indicadores de GHR, o LSFs foi o segundo melhor, com menores quantidades de horas de desconforto, sendo superado apenas pelo melhor desempenho das paredes de concreto em razão das maiores capacidade térmica (220 KJ/m².K) e transmitância térmica (5 W/m².K).

Esta situação desfavorável concebida neste projeto de pesquisa representa muito bem o que ocorre corriqueiramente nos projetos de HIS, onde não há estratégias construtivas para sombreamento dos vedos e/ou das paredes, não há preocupação com a orientação e muito menos com o envoltório mais adequado em termos de capacitância térmica ou transmitância térmica. Portanto, o LSFs configura com uma solução para amenizar a carência que há no

processo de elaboração do projeto deste empreendimento. É uma solução interessante para o último pavimento, para edifícios com orientação inadequada e sem previsão de sombreamento.

O LSFs, simples, sem isolamento, possui o menor atraso térmico dentre todos as envoltórias estudadas neste trabalho, o que faz com sejam capazes de dissipar rapidamente o calor ganho externamente durante o dia em virtude da sua alta transmitância térmica. Ao passo que os demais sistemas construtivos em LSF, com isolamentos térmicos, aumentaram em demasia o desconforto térmico porque dificultam ainda mais a dissipação de energia durante a noite e potencializam o efeito negativo do ganho de calor pela cobertura.

Os resultados novamente ratificam a importância do sombreamento, do tipo envoltório e da ventilação noturna para o resfriamento do edifício, demonstrando que a sinergia destes aspectos deve ser considerada no projeto arquitetônico.

4.3 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO PELA NBR 15575

4.3.1 Avaliação de desempenho pela Método Simplificado da NBR 15575

Na avaliação de desempenho térmico pelo método simplificado da NBR 15575 (ABNT, 2013), os quatro modelos de painel em *Light Steel Framing* apresentaram os resultados mostrados na Tabela 19, através dos métodos de cálculos da NBR 15220:

Tabela 19 - Valor de Transmitância térmica obtido pelo método simplificado NBR 15575

Painel	Transmitância Térmica U – W/(m ² .K)
LSFs -Painel em LSF sem isolamento	3,03
LSFlv -Painel em LSF + Lã de vidro	0,78
LSFe - Painel LSF + eps	1,01
LSFlve – Painel LSF Lã de vidro + eps	0,42
Alve- Parede em alvenaria	2,28
Conc - Parede de concreto	4,40

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os índices mínimos de Transmitância Térmica estabelecidos pela NBR 15575 para a zona bioclimática 8, onde Belém está localizada (Tabela 20), com exceção da parede em concreto (Conc), todos os fechamentos foram aprovados para uma superfície externa com absorvância menor que 0,6, que corresponde à uma cor clara. Para o caso de uma superfície externa utilizando uma cor escura, correspondente a um valor de absorvância maior que 0,6, os fechamentos Alve, Conc e LSFs não foram aprovados.

Tabela 20 - Índices mínimos para U de acordo com a NBR 15575

ZONA Bi climática 8	Absorbância	
	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$
Transmitância Térmica	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$

4.3.2 Avaliação de desempenho pelo método de simulação computacional NBR 15575

O resultado da simulação computacional realizado através do programa *EnergyPlus* para avaliar o desempenho térmico dos ambientes da HIS modelo para cada um dos 4 tipos de fechamento em LSF, de acordo com a metodologia e índices mínimos de aprovação da NBR 15 575 (Tabela 21), são apresentados na tabela 22.

Tabela 21 - Nível mínimo de desempenho- NBR 15575

NÍVEL DE DESEMPENHO	CRITÉRIO	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,min} \leq T_{e,min}$
<p>$T_{i,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius $T_{e,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius $T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius $T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius Nota: Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.</p>		
Fonte: NBR 15575-3		

Tabela 22 - Resultados de desempenho térmico dos fechamentos pelos critérios da NBR 15575

Ambiente	Fechamento	Temp. Máxima C°	Resultado
Área Externa	n.a.	33,20	Referencial
Quarto B	Parede de Alvenaria (Alve)	33,04	Aprovado
Quarto B	Parede de Concreto (Conc)	33,07	Aprovado
Quarto B	LSF simples (LSFs)	34,87	Reprovado
Quarto B	LSF + lâ de vidro (LSFlv)	34,42	Reprovado
Quarto B	LSF eps (LSFeps)	34,29	Reprovado
Quarto B	LSF lâ de vidro + eps (LSFvlve)	34,26	Reprovado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da avaliação de desempenho térmico através de simulação computacional seguindo os parâmetros estabelecidos pela NBR 15575, para os 6 painéis de fechamento, considerando o ambiente mais crítico termicamente entre os avaliados neste trabalho, apontaram a aprovação dos fechamentos em parede de alvenaria (Alve) e parede de concreto (Conc) para a zona bioclimática 8, onde a cidade de Belém está inserida, porém reprovaram todos os fechamentos em LSF, uma vez que nenhum destes conseguiu proporcionar ao ambiente interno uma temperatura máxima menor que a temperatura máxima

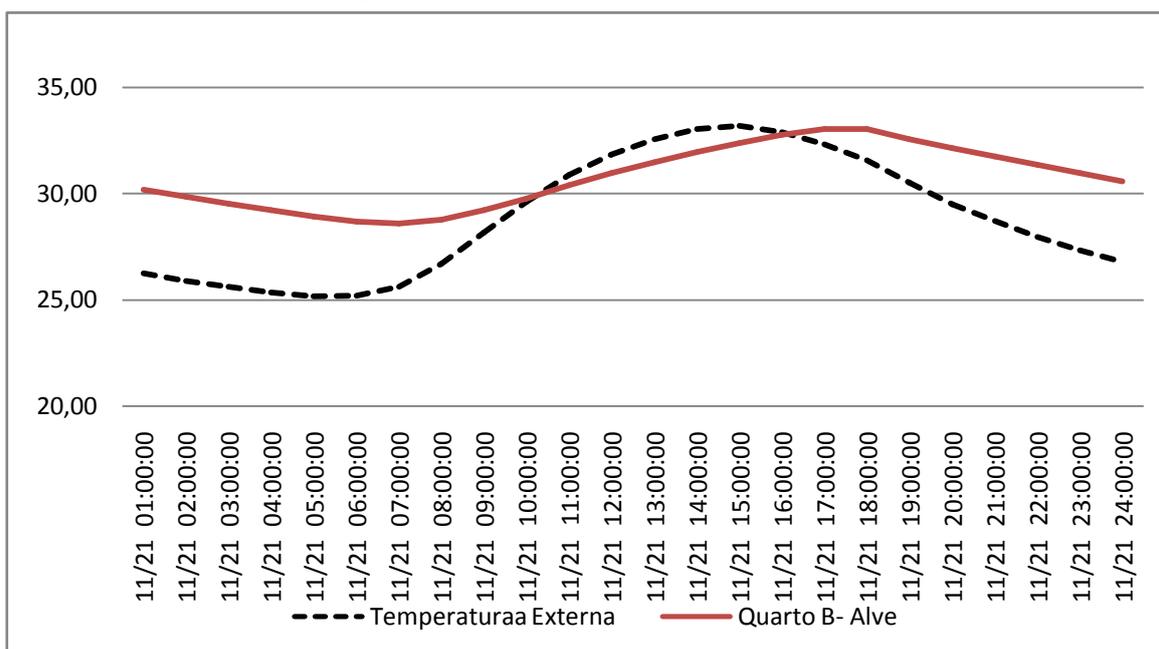
externa, índice mínimo de aprovação, apesar da realização de duas simulações, onde na segunda foi considerado o índice de 5ren /h e sombreamento parcial da janela, conforme determina a NBR 15575 (ABNT, 2013).

Este resultado se contrapõe ao resultado da avaliação contida na DATEc 14 para o sistema LSF. Com relação a este fato, é importante comentar algumas diferenças entre as variáveis e os modelos avaliados: Nos testes de avaliação da DATEc 14, para o sistema LSF, os painéis contemplavam fechamento interno com placas de gesso acartonado, enquanto neste trabalho o fechamento interno das paredes internas é em placa cimentícia. As paredes internas são fechadas com placas de gesso acartonado. O modelo avaliado pela DATEc 14 é uma edificação térrea, enquanto a HIS modelo deste trabalho é um prédio de 4 pavimentos. Esta diferença merece também destaque, uma vez que, conforme Gomes (2011), a inércia térmica do solo tem papel importante no resfriamento da edificação.

Outro aspecto importante a ser ressaltado é divergência dos resultados da norma com o adotado neste trabalho. A avaliação pelo método prescrito pela norma de desempenho leva em consideração o dia típico, fato que não considera a variação do clima, além de não contemplar as cargas internas (ocupação e iluminação) e estratégias de ventilação natural. Todos esses aspectos foram levados em conta na análise proposta neste trabalho. Por esta razão a diferença muito latente entre os resultados. Pela simulação, o LSF simples, sem isolamento, seria reprovado, mas neste trabalho, considerados inúmeros aspectos do processo de projeto, se mostrou mais eficiente do que a alvenaria. Estes resultados demonstram a assertividade desta metodologia e confirmam as críticas de Sorgato (2012) para o método de simulação da NBR 15575-1 que não avalia a influência da variação anual da temperatura no desempenho térmico da edificação assim como a sua variação ao longo do dia.

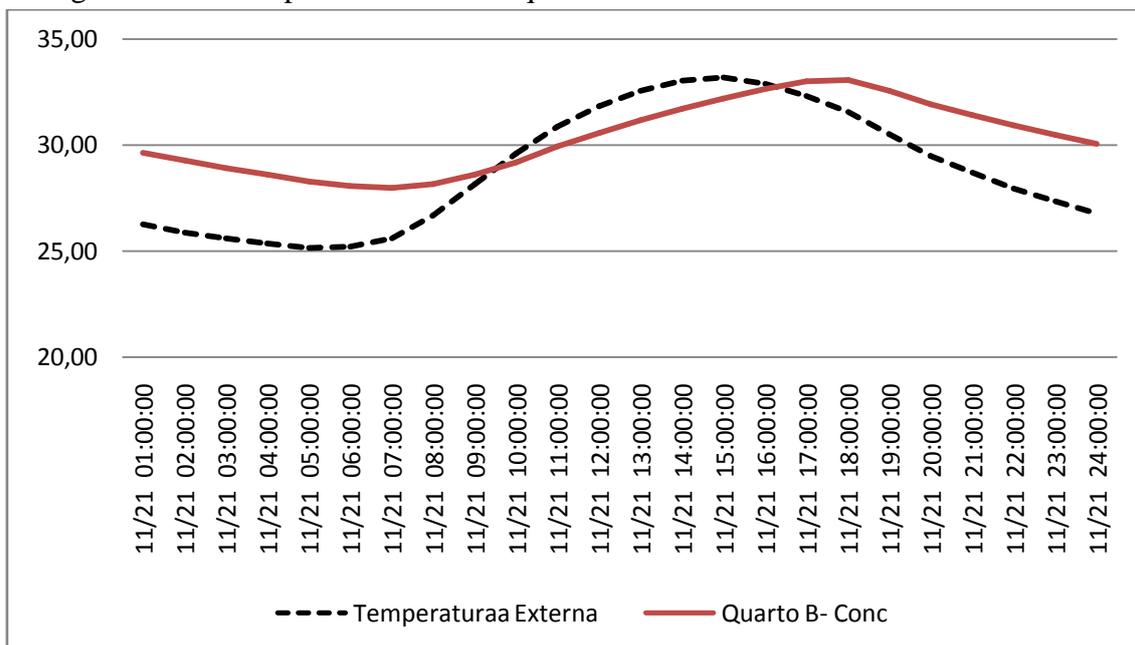
As Figuras 57, 58, 59, 60, 61 e 62 apresentam o desempenho térmico do quarto B do 4º pavimento, por ser o ambiente mais crítico termicamente segundo critérios da NBR 15575, para o dia típico de verão segundo o arquivo climático TRY, para a cidade de Belém, considerando os 6 tipos de fechamento.

Figura 57 - Desempenho térmico do quarto B com fechamento em Alvenaria



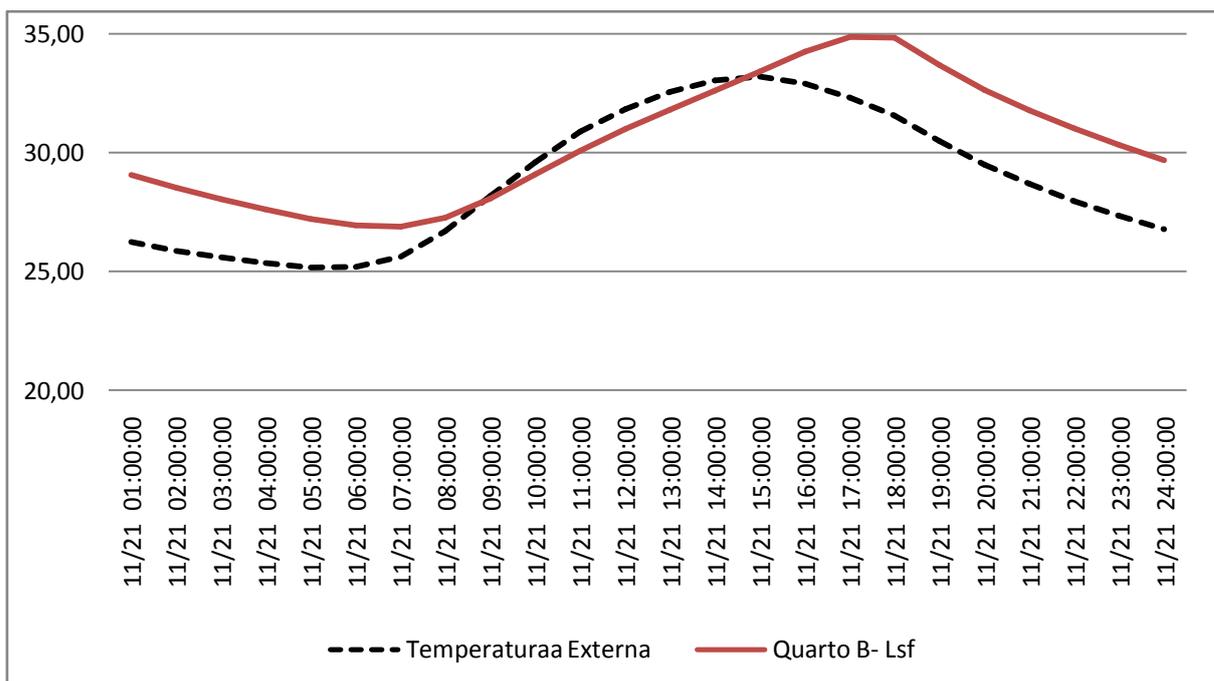
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 58 - Desempenho térmico do quarto B com fechamento em Parede de Concreto



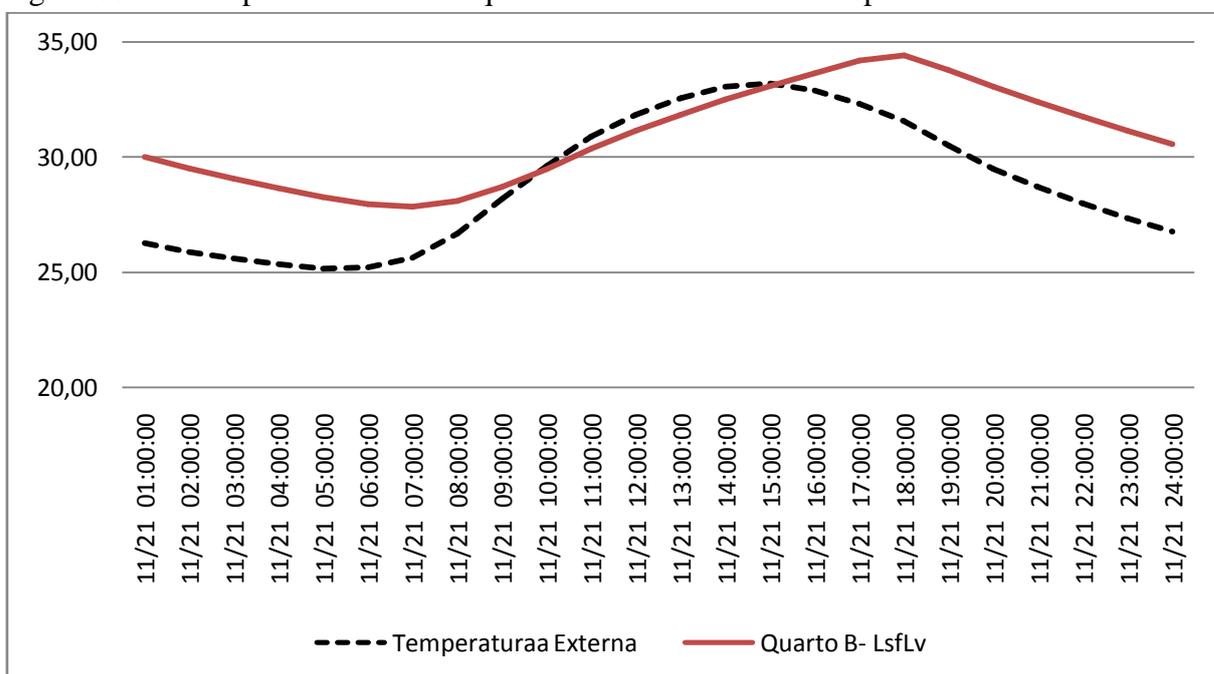
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 59 - Desempenho térmico do quarto B com fechamento em painel de LSF simples



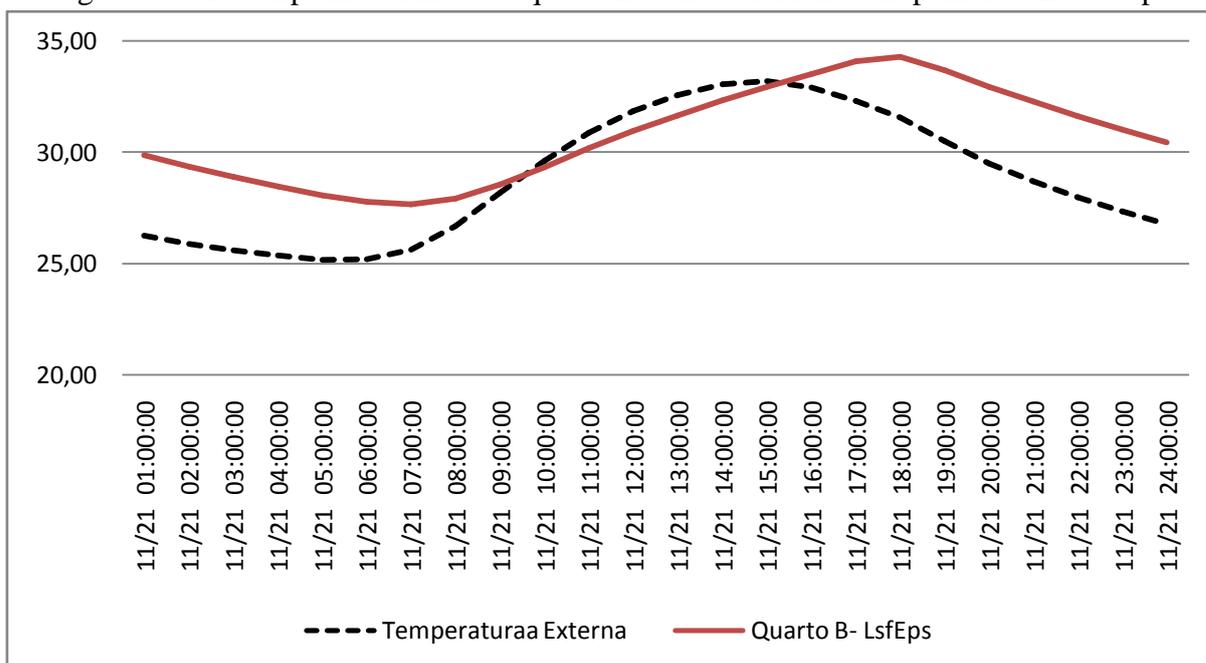
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 60 - Desempenho térmico do quarto B com fechamento em painel de LSF + lã de vidro



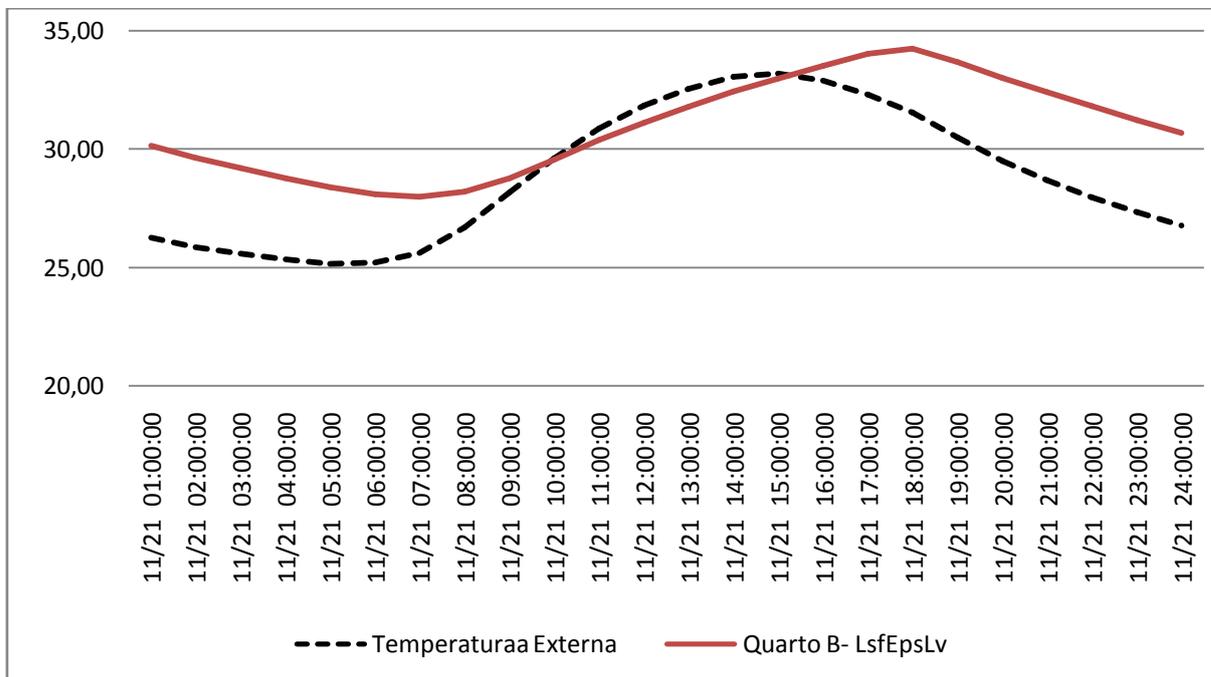
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61 - Desempenho térmico do quarto B com fechamento em painel de LSF + eps



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62 - Desempenho térmico do quarto B com fechamento em painel de LSF (lã de vidro+eps)



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

A comparação entre os resultados de desempenho térmico, frente ao clima equatorial amazônico da cidade de Belém, entre os sistemas construtivos através dos seus respectivos fechamentos verticais, mostrou que todos apresentaram poder de amortecimento da onda de calor exterior para os horários mais críticos termicamente. Entretanto os fechamentos com maior capacidade térmica, como a parede de alvenaria (Alve), a parede de concreto (Conc) e LSF1ve, se mostraram mais eficiente neste período, devido sua maior massa térmica, em comparação com fechamentos de maior transmitância térmica, impedindo, com mais eficiência, a entrada do calor excessivo para o ambiente interno, evitando a oscilação e os picos de energia. Por outro lado, os fechamentos com menor transmitância térmica, e grande atraso e amortecimento térmico, além do calor liberado tardiamente no período noturno, se apresentaram menos eficientes para troca de calor com o meio externo, quando a temperatura externa é menor que a interna, mesmo com a janela aberta.

Neste contexto, os fechamentos com maior transmitância térmica, se apresentaram mais eficientes no período noturno e da madrugada. Sendo, pela sua baixa inércia térmica, mais eficazes na troca de calor com o ambiente externo.

Sendo assim, associação de valores elevados de capacidade térmica e transmitância térmica possibilita para a ZB8 melhores condições de conforto com temperaturas mais amenas ao longo do dia e esta estratégia deve ser considerada nos projetos habitacionais. As paredes de concreto, por atenderem bem esse requisito, se mostraram as mais eficientes do ponto de vista energético;

O LSF, simples, sem qualquer tipo de isolamento, se mostrou tão quanto ou mais eficiente que o sistema tradicional em alvenaria cerâmica por conta do maior valor de transmitância térmica, porém obteve o melhor resultado entre os painéis de LSF avaliados, evidenciando que um painel em LSF com isolamentos, como o LSF1ve, é eficiente para a amortização da onda de calor em um momento específico. Porém, seu desempenho térmico fica abaixo do desempenho do fechamento em LSF sem isolamento, no resultado geral, devido a sua menor capacidade de trocar calor com o ambiente externo, quando a temperatura externa é menor. Em outras palavras, a baixa capacidade térmica do LSF simples ocasionou maiores ganhos de calor, contudo, sua maior transmitância térmica também dissipou o calor ganho durante o dia, o que faz com apresente temperaturas mais baixas durante a noite. Ou

seja, a baixa capacidade térmica do LSF simples ocasionou maiores ganhos de calor no período mais crítico termicamente, contudo, a maior transmitância térmica do LSFs também dissipou o calor ganho durante o dia, o que faz com apresente temperaturas mais baixas durante a noite. Estes resultados demonstram que a escolha por envoltórias de menor resistência térmica, ou seja, maior transmitância térmica, é a melhor solução para as condições climáticas de Belém, o que diverge do sugerido pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

Sendo assim, é possível concluir que a melhor opção para uma edificação em LSF frente ao clima equatorial amazônico da cidade de Belém, seria a utilização de painéis com capacidade térmica e alta transmitância térmica uma vez que, em climas quentes, o uso de isolantes em painéis de fechamento mais atrapalha do que ajuda, pois restringe as perdas de calor, confirmando o que aponta vários estudos realizados na Europa, como Chavtal (2007) que indica que para situações de verão, o isolamento térmico aumenta o nível de desconforto térmico do ambiente.

Com relação à proteção direta da radiação solar, é importante ressaltar, que o sombreamento se mostrou eficaz para a diminuição do desconforto térmico, havendo, em todos as situações, a diminuição dos GHR com a utilização do sombreamento, ou seja, a amortização o desconforto, tanto nos períodos mais críticos do dia, quanto ao longo do ano, confirmando que o sombreamento das esquadrias é uma estratégia essencial para melhorar a eficiência energética do edifício, além da escolha pela ventilação noturna ao invés da diurna também se mostrou uma estratégia fundamental para melhorar a eficiência energética do edifício.

A avaliação dos ambientes estudados, pelos critérios e índices da NBR 15575, onde somente as paredes de Alvenaria (Alve) e a parede de concreto (Conc) foram aprovadas, ficando todos os fechamentos em LSF reprovados, indo de encontro aos resultados obtidos através do método dos GHR, neste trabalho, onde o LSFs apresentou, em vários casos, desempenho térmico superior ao da parede de alvenaria (Alve), confirmou o que apontou Sorgato (2014), de que a norma dispõe de uma avaliação limitada, pois considera um dia apenas para esta avaliação, ou seja, o dia típico de verão, desconsiderando o comportamento térmico de determinado ambiente durante um período maior, como um ano. Desta maneira, correndo o risco de subestimar ou superestimar um resultado de desempenho térmico.

No caso da avaliação do DATEc 14, realizados pelos critérios da NBR 15557 (ABNT, 2013), a divergência entre os seus resultados e os resultados da avaliação feita, neste trabalho, para a HIS modelo, pelos critérios da referida norma técnica, se deve a algumas diferenças

com relação materiais utilizados no fechamento, a tipologia da edificação, contradições acerca dos parâmetros climáticos para a composição da zona bioclimática 8, na qual Vitória-ES e Belém-PA são consideradas como de climas semelhantes. Mesmo assim, os resultados ficaram próximos, haja vista que o sistema LSF deixou de atender as condições mínimas da NBR 15575 por 1,6°C (LSFlve) e por 1,67°C (LSFs).

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a opção de utilização mista de painéis em LSF para fechamento vertical. Com painéis de alta Capacidade Térmica para a parede do ambiente voltada para a radiação solar direta e paredes com alta transmitância térmica para paredes laterais para que a troca de calor durante a noite e a madrugada possa ocorrer de forma mais eficiente garantindo também o conforto térmico desses ambientes nestes períodos.
- Avaliar a utilização de materiais para preenchimento do espaço entre as placas que apresentem características de Capacidade Térmica aliada a alta Transmitância Térmica para que, a exemplo da parede de concreto, o LSF possa também oferecer o melhor desempenho térmico, independente do sombreamento e da ventilação, sempre tão precários em HIS.
- Realizar calibração em uma edificação originalmente feita em LSF frente ao clima equatorial úmido da cidade de Belém através da comparação dos resultados da medição *in loco* com os da simulação computacional.

REFERENCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos. Rio de Janeiro, 2013.

ABREU, A.L.P.; SILVA, C.F; BAUMANN, V.A.R, VERSAGE, R.S. Análise comparativa dos procedimentos de desempenho térmico da NBR 15 575 em edificação multifamiliar. ENCAC - ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Anais... Camboriú-SC, 2017.

AMPARO, Lucas R.; GOMES, Adriano Pinto; SOUZA, Henor Arthur. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em Light Steel Framing. **Ambient. Constr.** v.11, n.4, p.113-128, 2011.

ANGELIS, Enrico; SERRA, Ermano. Light steel-frame walls: thermal insulation performances and thermal bridges. **Energy Procedia.** v. 45, p. 362-371, 2014.

ASHRAE 55 Standart – American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. ASHRAE Handbook – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta, p. 21-22, 2003.

BARBOSA, K.H; GHISI, E. Proposta de calibração de um modelo computacional de uma tipologia de residência unifamiliar em Goiânia. XIV ENCAC - ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Anais. Camboriú-SC, 2017.

BATISTA, Juliana Oliveira; LAMBERTS Roberto; WESTPHAL, Fernando Simon. Avaliação de desempenho térmico de componentes construtivos utilizando o *EnergyPlus*. Artigo. In: V ENCONTRO NACIONAL E I ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Maceió, 2005. ENCAC-ELACAC, 2005.

BRASIL. **Decreto nº 4.059**, de 19 de dezembro de 2001a. Regulamenta a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/D4059.htm>. Acesso em: 21 jul. 2017.

_____. **Lei nº 10.295**, de 17 de outubro de 2001b. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/LEIS_2001/L10295.htm>. Acesso em: 21 jul. 2017.

_____. **Instrução Normativa nº 2**, de 04 de junho de 2014. Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit. Disponível em: <<https://www.comprasgovernamentais.gov.br/index.php/legislacao/instrucoes-normativas/304-instrucao-normativa-n-2-de-04-de-junho-de-2014>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

BRASILIT. BrasiPlac Plus. **Placa cimentícia impermeabilizada**: catálogo. São Paulo, 2010.

BUORO, Anarrita Bueno. **Conforto térmico e eficiência energética em hotéis econômicos**. 2008. 240 fl. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). FAU, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

_____ et al. Análise comparativa na simulação de modelo habitacional nos softwares *EnergyPlus* e *Tas*. In: ENTAC 2006, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ENTAC 2006, p. 113-112.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Sistema construtivo utilizando perfis estruturais formados a frio de aços (steel framing)**: requisitos e condições mínimas para financiamento pela Caixa, 2003.

CARDENAL, Maria Esther Corrales. **Metodologia para avaliação do desempenho térmico em edificações**: estudo de caso aplicado a Edifício Habitacional na cidade de Belém do Pará. 113f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

CASTAÑO, Héctor Fabián Marín. **Impacto de dispositivos de sombreamento externo e muro na ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea**. Dissertação de mestrado. 178 f. (Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2017.

CBCA. Centro Brasileiro da Construção em Aço. **Manual de construção em aço: Steel Framing**. Arquitetura. Rio de Janeiro, 2010.

CBIC. Camara Brasileira da Indústria da construção. **Guia orientativo para atendimento a norma ABNT NBR 15 575/2013- Desempenho de edificações Habitacionais**. Brasília 2013.

CHVATAL, K. M. S. **Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15 575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações**. CONTECC 2015. Anais. Fortaleza-CE 2015.

_____. Relação entre o nível de isolamento térmico da envolvente dos edifícios e o potencial de sobreaquecimento no verão. Tese (Doutorado). Universidade do Porto, Portugal, 2007.

CORBELLA, O; YANNAS S. **Em busca de uma Arquitetura Sustentável para os trópicos**. Conforto Ambiental. Editora Revan: 2009.

CORONATO, T.; GASTON, A.; NAVONE, H. D.; ABALONE, R. **Comparacion entre Energyplus y Comsol Multiphysics en la simulacion energética de una vivienda simple**. Fac. de Cs. Exactas Ingeniería y Agrimensura (UNR). IFIR (CONICET/UNR). 2 Consejo de Investigaciones de la UNR. Argentina, 2017.

COSTA, Sammea Ribeiro Granja Damasceno. **Desempenho térmico e habitação: Uma avaliação comparativa no contexto climático da zona bioclimática 8**. 2011. 144f. Dissertação (Mestrado em arquitetura e urbanismo) Universidade Federal de Alagoas: Maceió, 2011.

COSTA, Solange Maria Gayoso da; PERDIGÃO, Ana Kláudia de Almeida Viana; CAVALCANTE, Lilia Iêda Chaves. **Política habitacional em Belém (PA): estudo sobre adaptação habitacional em tipologias multifamiliares.** Artigo, Argumentum, Vitória (ES), v. 7, n. 2, p. 302-317, jul./dez. 2012.

CRASTO, Renata Cristina Moraes de. **Arquitetura e tecnologia de sistemas construtivos industrializados: light steel framing.** 2005, 231 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto 2005.

ENERGYPLUS. EnergyPlus Engineering Reference. The Reference to EnergyPlus Calculations. EnergyPlus, set., 2016.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2010: Ano base 2009 – Rio de Janeiro: EPE, 2012.

FERNANDES, Leandro C.; KRÜGER, Eduardo L. Análise do erro de estimativas de temperaturas internas em habitações de interesse social. In: V ENCONTRO NACIONAL E I ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Maceio, 2005, Anais...Maceió. ENCAC-ELACAC 2005.

FERNANDES, L.O; LABAKI,C.L. **Calibração de Edifício Institucional na Cidade de Campinas- SP.** ENCAC 2015. Anais. Campinas-SP 2015.

FERREIRA, Camila Carvalho; SOUZA, Henor Artur; ASSIS, Eleonora Sad de. Comparação de desempenho de envoltórias recomendadas por normas de desempenho e mahoney. XIII Encontro Nacional e IX ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. ECAC-ELACAC, 2015.

FERREIRA, Domingos Dias. **Habitação de interesse social-aspectos históricos, legais e construtivos.** Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. **Eficiência energética da envoltória de edifícios de escritórios de Florianópolis:** Discussões sobre a aplicação do método prescritivo do RTQ-C. Ambiente Construído. Porto Alegre, 2010.

FROTA, Anésia Barros. **Geometria da Insolação.** São Paulo: Geros, 2004.

_____; SCHIFFER, S.R. **Manual de conforto térmico.** São Paulo: Nobel, 2001.

GALVARRO, S.F.S; CARLO, J.C; GUIMARÃES, I.B.B; TIBIRIÇA, A.C.G. Calibração de simulação térmica de uma unidade habitacional em edifício multifamiliar. ENCAC 2013. Anais. Brasília 2013.

GOMES, Adriano Pinto. **Avaliação do Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares em Light Steel Framing.** 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2007.

GOMES, Adriano Pinto. **Método de avaliação do desempenho térmico de edifícios comerciais e residenciais em Light Steel Framing.** 2012. 147f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto-MG, 2012.

_____; SOUZA Artur Henor; TRIBESS, Arlindo. **Impact of thermal bridging on the performance of buildings using light steel framing in Brazil**. Elsevier, 2011.

GOULART, S. et al. **Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico**. Florianópolis: UFSC, 1994. Relatório interno 02/94 – NPC.

GOULART, S.V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Edição Núcleo de Pesquisa em Construção Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.

GRIGOLETTI, G. C; FLORES, M.G.; SANTOS. Tratamento de dados climáticos de Santa Maria, RS, para análise de desempenho térmico de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 123-141, jan./mar. 2016.

GRIGOLETTI, Giane; ROTTA, Renata; MULLER, Sânila. Avaliação de desempenho térmico de edificação de interesse social unifamiliar em Santa Maria-RS. Artigo. X ENCONTRO NACIONAL E VI ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Natal, 2009, Anais...Natal. ENCAC-ELACAC 2009, p. 642-650.

GURGEL, Mirian. **Design Passivo-Baixo consumo energético**. São Paulo: SENAC, 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Déficit habitacional brasileiro**. 2017. Disponível em: <<https://www.valor.com.br/brasil/5498629/deficit-de-moradias-no-pais-jacha-ga-77-milhoes>>. Acesso em: 21 jul. 2018.

JAUDY, Fernando Rachid; DURANTE, Luciene C.; CALLEJAS, Ivan J.A. et al. Desempenho Térmico e Conservação de Energia de Habitação de interesse social em Cuiabá-MT. Artigo. In: XIII ENCONTRO NACIONAL E IX ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2015.

KOSNY, J.; DESJARLAIS, A.O. **Impacts of Architectural Details on the Whole Wall Thermal Performance in Residential Buildings**. Oak Ridge National Laboratory, 2010.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW Editores, 1997.

LAMBERTS, R.; WESTPHAL, F.S. Simulação térmica e energética de edificações a partir de dados climáticos simplificados: validação através do método BESTEST. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 37-49, jul./set. 2004.

LAMBERTS, Roberto; DUARTE, Vanessa C.P. **Desempenho térmico das edificações**. Apostila. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LBEEE. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

LEÃO, Érika Fernanda Toledo Borges. 2007. 147f. **Carta Bioclimática de Cuiabá-MT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2007.

LUCAS, Francisco; SALABERRY, Jeferson; TERRES, Marcelo; PÖTER, Marisa; CUNHA, Eduardo; SILVA, Antônio C.B. Avaliação do desempenho térmico de habitação de interesse social em Pelotas-RS: Simulação computacional de diferentes sistemas de fechamentos verticais. Artigo. In: XI ENCONTRO NACIONAL E VII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Búzios, 2011, ENCAC-ELACAC 2011.

MACIEL, Alessandra Albuquerque. **Projeto bioclimático em Brasília: Estudo de caso em Edifícios de Escritório**. 2002. 138 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MAZZAFERRO L.; SILVA, A.; S.; GHISI, E. Influência de elementos construtivos do envelope no desempenho térmico de edificações unifamiliares. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS, 2014, Guimarães. Anais... Guimarães: Universidade de Minho, v. 3, p. 241-251, 2014.

MENDONÇA, B.C; MOUÇO, D.L. **Análise Termica de edificações construídas em Light Steel Framing**. Univap. V. 40. São José dos Campos-SP, 2016.

MEO, L; SOUZA, K; VELLA, J.; RICE, J. Investigation of the Thermal Performance of Steel and Wood Framed Houses Using Infrared Thermography. In: **Sustainable Steel Conference**, Orlando, 1998. Anais, 1998.

MEUSEL, Von Marina; WESTPHAL, Fernando. Barreiras para a Introdução de Simulação Computacional à Prática de Projeto Arquitetônico: O caso de um edifício institucional em Curitiba-PR. Artigo. In: XIV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E X ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. ENCAC- ELACAC 2017.

MONTENEGRO, Gildo A. **Ventilação e cobertas-arquitetura tropical na prática**. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

MORENO, Ana Cecília R.; SOUZA, Roberta Vieira G. Análise de Desempenho Térmico em Habitação de Interesse Social em Montes Claros-MG. Artigo. In: XI ENCONTRO NACIONAL E VII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Búzios, 2011, ENCAC-ELACAC 2011.

MOTEZUKI, F.K.; CHENG, L; PIPINEL, E.A.R. Análise computacional da influência das aberturas na ventilação cruzada. ENCAC-ELACAC, 2005. Maceió, Alagoas Brasil- 5 a 7 de outubro de 2005.

NASCIMENTO, B.A.R.; ARAUJO, V.S. **Análise do desempenho térmico de edificações de steel framing e alvenaria estrutural na cidade de Manaus**. CONTECC, 2015. Anais... Fortaleza, 2015.

NASCIMENTO, Cicerino Cabral do. **Clima e morfologia urbana em Belém**. 1993.157fl. Dissertação (Mestrado em Desenho Urbano) - Curso de Pós-Graduação, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 1993.

NEVES, L.O. **Arquitetura bioclimática e a obra de Severiano Porto: Estratégias de ventilação natural**. 2006. 200f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

OLGYAY, V., OLGAY, A., **Design with Climate, Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism**. Princeton University Press. New Jersey, 1973. Cap. General Introduction.

ONSET COMPUTER CORPORATION. **Manual HOBO Datalogger RH-Temp**. ONSET, [S.I.], 1999.

PACHECO, Miguel Teixeira Gomes. **Ventilação natural e climatização artificial: Crítica ao modelo superisolado para residência de energia zero em Belém e Curitiba**. 2013. 320f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2013.

PAPST, Ana Lígia. **Uso de Inércia térmica no clima subtropical**. Estudo de caso em Florianópolis – SC. Florianópolis, 1999. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

PENNA, Fernando Cesar F. **Análise da viabilidade econômica do Sistema Light Steel Framing na execução de habitações de interesse social: uma abordagem pragmática**. 2009, 92f. Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte, 2009.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. Calibração de um modelo computacional de uma residência unifamiliar localizada em Florianópolis. ENCONTRO NACIONAL E ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Campinas, 2015.

PROGRAMA BRASILEIRO DA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DO HABITAT-PBQP-H. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de produtos inovadores SINAT. **Diretrizes para avaliação técnicas de produtos**. DIRETRIZ SINAT. Brasília, 2010.

PURDY, J.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I. The Significant Factors in Modelling Residential Buildings. In: Building Simulation. 2001. Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION. Brazil, 2001. p. 207-214.

RIVERO, Roberto. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. 2. ed. Porto Alegre: D.C. Luzzatto, 1986.

RORIZ, Maurício; CHVATAL, Karin M.S.; CAVALCANTI, Fernando Sá. Sistemas construtivos de baixa resistência térmica podem proporcionar mais conforto. Artigo. In: X ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Natal, 2009, Anais... Natal. ENCAC 2009, p 700-707.

RUBIN, Graziela Rossato; BOLFE, Ana Sandra. O desenvolvimento da habitação social no Brasil. Artigo Original. **Revista do Centro de Ciências e Naturais e Exatas**, Santa Maria, v. 36 n. 2 mai./ago. 2014, p. 201-213.

SANTOS, Paulo; MARTINS, Claudio; SILVA, Luis Simões; BRAGANÇA, Luis. Thermal performance of lightweight steel framed wall: The importance of flanking thermal losses. **Journal of Building Physics**, 2014. v. 38(1) 81-98.

SCHELLER, Camila; MELO, Ana Paula; SORGATO, Márcio; LAMBERTS, Roberto. **Análise de arquivos climáticos para a simulação de desempenho energético de edificações**. Relatório. Laboratório de Eficiência Energica em Edificações - LBEEE. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 213-230, jan./mar. 2014.

SILVA, Patricia Manuela Almeida. **Aplicação do Programa Energy Plus como ferramenta do projecto de comportamento térmico de edifícios e habitação**. 2010. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto. Porto-Portugal, 2010.

SINAT 003. **Sistemas construtivos em perfis leves de aço conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo Light Steel Framing)**. MINISTÉRIO DAS CIDADES - Secretaria Nacional de Habitação-SNH. Programa Brasileiro de Qualidade e produtividade no Habitat- PBQP-H. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de Produtos Inovadores - SINAT. Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos - Diretrizes SINAT. Brasília, 2010.

SIQUEIRA, Thaís Almeida; ARAÚJO, Ronaldo de Souza. Programas de habitação social no Brasil. Artigo. **Persp. On line**: hum & sociais aplicadas, Campos de Goytacazes 10(4),45-54, 2014.

SOARES, N.; SANTOS, P.; GERVASIO, H; COSTA, J.J.; SILVA, L.S. Energy efficiency and thermal performance of light weight steel framed. Review bleand sustainable. **Energy Reviewus**. Elsevier, 2017.

SORGATO, M. J.; MELO, A.P.; LAMBERTS, R. **Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Brasília 2013. Anais... Brasília. ENCAC/ELACAC, p. 13-21.

SORGATO, M.J.; MELO, A.P.; MARINOSKI, D.L.; LAMBERTS, R. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 Para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 83-101, out./dez. 2014.

SORGATO, Márcio José. **Desempenho Térmico de edificações residenciais unifamiliáres ventiladas naturalmente**. 2009, 216f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SORGATO, Márcio José. **Relatório Técnico da Base de Simulações para o RTQ-R**. Relatório Técnico: RT_LABEEEE-2001/02. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. LBEEE. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2011.

SOUZA, Marcos Ferreira. **Estudo numérico do Isolamento Térmico de Painéis do sistema Light Steel Framing em Situação de Incêndio**. 2010. 173f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - PPGCC, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SZOKOLAY, S.V. Cooling problems and responses in predominantly overheated humid regions. In: **Passive Cooling**. Ed. Bowen et al, 1981, p. 651-659.

THERMACHANNEL. **Catálogo**. Disponível em: <<http://www.thermachannel.com/>>. Acesso em: 28 nov. 2017.

VELJKOVIC, Milan; JOHANSSON. **Light Steel Framing for residential buildings**. Artigo-Luleå University of Technology – Science Direct- Elsevier. Sweden, 2006.

VINAGRE, Natália Daniele de Lima. **Avaliação através de desempenho térmico de edificação verticalizada em Belém do Pará**. 2013. 92f. Dissertação (Mestrado em arquitetura) - Universidade Federal do Pará, Belem do Pará, 2013.

WESTPHAL, Fernando Simon; LAMBERTS, Roberto. Simulação Energética de Edificações no programa EnergyPlus utilizando dados das normais climatológicas. V ENCONTRO NACIONAL e I ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Maceió, 2005, Anais...Maceió. ENCAC-ELACAC 2005, p.2183-2192.