

**INFLUÊNCIA DA COBERTURA NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA
TIPOLOGIA HABITACIONAL EM FOZ DO IGUAÇU-PR**

LETÍCIA DA SILVA ALVES

Foz do Iguaçu
2022

**INFLUÊNCIA DA COBERTURA NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA
TIPOLOGIA HABITACIONAL EM FOZ DO IGUAÇU-PR**

LETÍCIA DA SILVA ALVES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Tecnologia, Infraestrutura e Território,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Helenice Maria Sacht.

Foz do Iguaçu
2022

LETÍCIA DA SILVA ALVES

**INFLUÊNCIA DA COBERTURA NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA
TIPOLOGIA HABITACIONAL EM FOZ DO IGUAÇU-PR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Tecnologia, Infraestrutura e Território,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Helenice Maria Sacht
UNILA

Prof. Dr. Cesar Winter de Mello
UNILA

Prof. Dr. Egon Vettorazzi
UNILA

Foz do Iguaçu, 14 de dezembro de 2022.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Letícia da Silva Alves

Curso: Engenharia Civil de Infraestrutura

Tipo de Documento	
(x) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	(x) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: Influência da cobertura no desempenho térmico de uma tipologia habitacional em Foz do Iguaçu-PR.

Nome do orientador(a): Prof. Dr. Helenice Maria Sacht

Data da Defesa: 14/12/2022

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* **Licença 3.0 Unported**.

Foz do Iguaçu, .

Assinatura do Responsável

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre presente.

Ao meu pai, minha mãe e irmã, pelo amor e suporte por todos esses anos.

Aos meus tios Josias e Clara, que sem querer me direcionaram à engenharia.

A todos da família River, pelo amor, amizade e encorajamento.

Agradeço a todos os meus professores, por abrirem portas à novos mundos, desde a professora Marinês, aos professores do IFPR e da UNILA, e agradeço especialmente à professora Helenice, por toda orientação, compreensão e dedicação.

Aos colegas de curso, em especial Amanda e Gladys, e todos que participaram dessa jornada.

RESUMO

O conforto térmico afeta diretamente a qualidade de vida e produtividade dos usuários de uma edificação, uma vez que um ambiente desconfortável pode causar fadiga, sensação de desconforto e até problemas de saúde. Boa parte das tipologias habitacionais construídas em Foz do Iguaçu-PR desconsideram as características do clima local, resultando em habitações com baixo conforto térmico e alto consumo de energia para climatização artificial. Nesse aspecto, a cobertura é um dos principais sistemas que influenciam essas condições. Diante disso, foi analisada a influência da cobertura no conforto e desempenho térmico de uma tipologia habitacional localizada em Foz do Iguaçu-PR, por meio de simulação computacional. A metodologia compreendeu o levantamento de informações sobre a transferência de calor em coberturas, conforto térmico, consumo energético e desempenho térmico e regulamentos norteadores. Englobou ainda, uma análise do clima de Foz do Iguaçu; a definição da tipologia habitacional a ser analisada; a definição de parâmetros para simulação computacional, tais como: faixa de conforto térmico, condições de ventilação, ocupação e equipamentos, definição de casos simulados e por fim, o estudo e determinação dos programas computacionais a serem utilizados. Dentre os modelos estudados, a cobertura com telha sanduíche e laje apresentou o melhor desempenho térmico, com valor de carga térmica total significativamente inferior aos outros modelos. A alteração dos materiais das telhas resultou em maior variação no desempenho térmico nos meses de novembro a março, período em que todos os modelos apresentaram percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa inferior a 15%.

Palavras-chave: Conforto térmico; desempenho térmico; simulação computacional; sistema de cobertura.

ABSTRACT

Thermal comfort directly affects the quality of life and productivity of building users, an uncomfortable environment can cause fatigue, a feeling of discomfort and even health problems. Most of the housing types built in Foz do Iguaçu-PR disregard the characteristics of the local climate, resulting in houses with low thermal comfort and high energy consumption for artificial air conditioning. In this respect, the roofing is one of the main systems that influence these conditions. Therefore, the influence of coverage on the comfort and thermal performance of a housing typology located in Foz do Iguaçu-PR will be analyzed through computer simulation. The methodology will comprise the collection of information on the heat transfer in roofs, thermal comfort, energy consumption and thermal performance and guiding regulations. It will also include an analysis of the climate in Foz do Iguaçu; the definition of the housing typology to be analyzed; definition of parameters for computational simulation, such as: thermal comfort range, conditions of ventilation, occupation and equipment, definition of simulated cases and finally, the study and determination of the computational programs to be used. Among the studied models, the covering with thermoacoustic tile and slab presented the best thermal performance, with a value of total thermal load significantly lower than the other models. Altering the tile materials resulted in greater variation in thermal performance from November to March, a period in which all models presented a percentage of occupation hours within an operating temperature range of less than 15%.

Key words: Thermal comfort; thermal performance; computational simulation; roofing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – TROCAS DE CALOR EM UMA COBERTURA.	15
FIGURA 2 – INFLUÊNCIA DA COBERTURA NA QUANTIDADE DE CALOR RECEBIDA.	16
FIGURA 3 – PARTICIPAÇÃO SETORIAL NO CONSUMO DE ELETRICIDADE.	22
FIGURA 4 – PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO.	25
FIGURA 5 – ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO.	37
FIGURA 6 – (A) LOCALIZAÇÃO DE FOZ DO IGUAÇU NO OESTE DO PARANÁ. (B) LOCALIZAÇÃO DE FOZ DO IGUAÇU EM RELAÇÃO AO PARANÁ.	41
FIGURA 7 – PLANTA BAIXA DA EDIFICAÇÃO.	43
FIGURA 8 – CORTE A-A DOS MODELOS SEM PLATIBANDA.	44
FIGURA 9 – CORTE A-A DOS MODELOS COM PLATIBANDA.	44
FIGURA 10 – PLANTA DE COBERTURA DA TIPOLOGIA SEM E COM PLATIBANDA.	45
FIGURA 11 – VISTA TRIDIMENSIONAL DA EDIFICAÇÃO.	45
FIGURA 12 – ZONAS TÉRMICAS DA EDIFICAÇÃO.	46
FIGURA 13 – VISTA DA EDIFICAÇÃO NO <i>SKETCHUP</i>	50
FIGURA 14 – VISTA SUPERIOR DOS MODELOS COM VARIAÇÃO NO AZIMUTE.	61
FIGURA 15 – PHFT _{UH} EM RELAÇÃO À DIREÇÃO DA FACHADA FRONTAL.	62
FIGURA 16 – CGTT _{UH} EM RELAÇÃO À DIREÇÃO DA FACHADA FRONTAL.	63
FIGURA 17 – TEMPERATURA OPERATIVA MÍNIMA MENSAL – PVC.	66
FIGURA 18 – TEMPERATURA OPERATIVA MÍNIMA MENSAL – LAJE.	66
FIGURA 19 – TEMPERATURA OPERATIVA MÁXIMA MENSAL - PVC.	69
FIGURA 20 – TEMPERATURA OPERATIVA MÁXIMA MENSAL - LAJE.	69
FIGURA 21 – VALORES DE PHFT _{UH} AO LONGO DO ANO – PVC.	73
FIGURA 22 – VALORES DE PFT _{UH} AO LONGO DO ANO – LAJE.	74
FIGURA 23 – TEMPERATURAS HORÁRIAS DO DIA 31 DE DEZEMBRO – PVC.	77
FIGURA 24 – TEMPERATURAS HORÁRIAS DO DIA 31 DE DEZEMBRO – LAJE.	78
FIGURA 25 – TEMPERATURAS HORÁRIAS DO DIA 26 DE JUNHO – PVC.	78
FIGURA 26 – TEMPERATURAS HORÁRIAS DO DIA 26 DE JUNHO – LAJE.	79
FIGURA 27 – CARGA TÉRMICA TOTAL MENSAL PARA CADA TIPO DE TELHA – PVC.	81
FIGURA 28 – CARGA TÉRMICA TOTAL MENSAL PARA CADA TIPO DE TELHA - LAJE.	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DEFINIÇÃO DE CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES.	17
TABELA 2 – CRITÉRIOS DE COBERTURAS QUANTO À TRANSMITÂNCIA TÉRMICA.	26
TABELA 3 – PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS PARA O MODELO DE REFERÊNCIA.	29
TABELA 4 – FAIXAS DE TEMPERATURAS OPERATIVAS PARA A DETERMINAÇÃO DO $PHFT_{APP}$	31
TABELA 5 – CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO DA ENVOLTÓRIA QUANTO AO $PHFT_{UH}$	32
TABELA 6 – INCREMENTO MÍNIMO DO $PHFT_{UH, REAL}$	33
TABELA 7 – VALORES DE TEMPERATURA OPERATIVA PARA O CÁLCULO DA CgT_{RAPP} E DA CgT_{AAPP}	35
TABELA 8 – CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO DA ENVOLTÓRIA QUANTO À $CgTT_{UH}$	35
TABELA 9 – REDUÇÃO MÍNIMA DA $CgTT_{UH, REAL}$	36
TABELA 10 – RECOMENDAÇÕES DA NBR 15220 PARA A ZONA BIOCLIMÁTICA 3.	39
TABELA 11 – DETALHAMENTO DAS ESTRATÉGIAS DE CONDICIONAMENTO TÉRMICO PARA A CIDADE DE FOZ DO IGUAÇU.	40
TABELA 12 – ORIENTAÇÕES A SEREM SIMULADAS.	47
TABELA 13 – CASOS SIMULADOS.	47
TABELA 14 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS OPACOS.	53
TABELA 15 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS ELEMENTOS TRANSPARENTES.	54
TABELA 16 – COMPOSIÇÃO EQUIVALENTE DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS.	54
TABELA 17 – TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DE CADA MODELO.	55
TABELA 18 – TAXA METABÓLICA E FRAÇÃO RADIANTE PARA OS USUÁRIOS.	55
TABELA 19 – PADRÕES DE OCUPAÇÃO E ILUMINAÇÃO HORÁRIOS DOS APP.	56
TABELA 20 – DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA VENTILAÇÃO NATURAL DE PORTAS E JANELAS.	57
TABELA 21 – REDIMENSIONAMENTO DAS ÁREAS DE ELEMENTOS TRANSPARENTES.	58
TABELA 22 – VERIFICAÇÃO DA ÁREA EFETIVA DE ABERTURA PARA VENTILAÇÃO.	59
TABELA 23 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE CADA ORIENTAÇÃO.	61
TABELA 24 – TEMPERATURA OPERATIVA MÍNIMA - PVC.	64
TABELA 25 – TEMPERATURA OPERATIVA MÍNIMA MENSAL - LAJE.	65
TABELA 26 – VERIFICAÇÃO DO CRITÉRIO TOMÍN.	67
TABELA 27 – TEMPERATURA OPERATIVA MÁXIMA - PVC.	68
TABELA 28 – TEMPERATURA OPERATIVA MÁXIMA - LAJE.	68
TABELA 29 – VERIFICAÇÃO DO CRITÉRIO TOMÁX.	71
TABELA 30 – VALORES DE PFT_{UH} PARA CADA MÊS – PVC.	72
TABELA 31 – VALORES DE PFT_{UH} PARA CADA MÊS – LAJE.	72
TABELA 32 – VERIFICAÇÃO DO CRITÉRIO $PHFT_{UH}$ - NÍVEL MÍNIMO.	75
TABELA 33 – VERIFICAÇÃO DO CRITÉRIO $PHFT_{UH}$ – NÍVEIS INTERMEDIÁRIO E SUPERIOR.	76
TABELA 34 – VALORES DE $CgTT_{UH}$	80
TABELA 35 – VERIFICAÇÃO DO CRITÉRIO RED_{CgTT} – NÍVEIS INTERMEDIÁRIO E SUPERIOR.	82

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	11
1.2.1 Objetivo Geral.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COBERTURAS	14
2.1 MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	14
2.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS	16
3 CONFORTO TÉRMICO, CONSUMO ENERGÉTICO E INFLUÊNCIA DA COBERTURA.....	19
3.1 CONFORTO TÉRMICO E EXIGÊNCIAS HUMANAS.....	19
3.2 CONSUMO ENERGÉTICO	21
3.3 SISTEMAS DE COBERTURA E O CONFORTO TÉRMICO.....	23
4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS DE ACORDO COM A NORMA NBR 15575	24
4.1 PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO	25
4.2 PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	27
4.2.1 Critérios Para a Utilização de Programas e Dados na Simulação.....	27
4.2.2 Modelo Real e Modelo de Referência	28
4.2.3 Critérios de Avaliação	30
4.2.3.1 Percentual de Horas de Ocupação da UH Dentro da Faixa de Temperatura Operativa ($PHFT_{UH}$)	30
4.2.3.2 Temperatura Operativa	33
4.2.3.3 Carga Térmica.....	34
5 ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS E RECOMENDAÇÕES PARA O CLIMA DE FOZ DO IGUAÇU	37
5.1 ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS	37
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA O CLIMA DE FOZ DO IGUAÇU	39
6 METODOLOGIA.....	41

6.1 ELABORAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO E DEFINIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS.....	42
6.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	48
6.2.1 Software EnergyPlus.....	50
6.2.2 Dados Climáticos	51
6.2.3 Propriedades Térmicas dos Materiais	52
6.2.4 Cargas Internas e Padrões de Ocupação	55
6.2.5 Ventilação Natural	56
6.2.6 Modelos sem Ventilação Natural.....	57
6.2.7 Modelos de Referência	58
7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
7.1 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM VARIAÇÕES DO AZIMUTE	60
7.2 RESULTADOS	64
7.2.1. Temperatura	64
7.2.1.2 <i>Percentual de Horas de Ocupação da UH Dentro da Faixa de Temperatura Operativa</i>	71
7.2.1.3 <i>Carga Térmica</i>	79
7.3 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	83
8 CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Nos últimos anos, o contínuo crescimento populacional e suas subsequentes demandas de edificações e energia, vem sendo objeto de estudo nos meios científicos e acadêmicos. Buscando evitar uma crise de energia e a degradação dos recursos naturais, alguns países elaboraram normas que buscam melhorar a eficiência energética das edificações (LAMBERTS, 2014).

Além do aumento da população, o mundo está cada vez mais globalizado e industrializado, assim, grande parte da população passa a maior parte de suas vidas em ambientes climatizados artificialmente (LAMBERTS, 2014). Estima-se que entre 2005 e 2017 o uso de energia elétrica para condicionamento de ar triplicou no país (EPE, 2018).

No Brasil, dentre outras normas que abordam questões relacionadas ao conforto térmico e consequentemente a economia de energia, se encontra a Norma Brasileira 15220: Parte 3 (ABNT, 2005d), que estabelece o Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Na norma são apresentadas recomendações de diretrizes construtivas e estratégias de condicionamento térmico passivo, essas recomendações buscam otimizar o desempenho térmico das edificações, de acordo com as características climáticas de cada zona.

A cidade de Foz do Iguaçu-PR, local do presente estudo, apresenta temperaturas elevadas na maior parte do ano, principalmente durante a estação quente, que se estende de 12 de novembro a 24 de março, sendo que as temperaturas máximas médias diárias são acima de 30 °C (WEATHERSPARK, 2020). O calor, aliado aos altos níveis de umidade, cria um alto desconforto para os habitantes. De acordo com a NBR 15220: Parte 3, Foz do Iguaçu está localizada na Zona Bioclimática 3 (ABNT, 2005d).

Um dos desafios em relação à aplicação de estratégias bioclimáticas na cidade se dá pela grande amplitude térmica. Os verões são muito quentes, com máximas médias chegando aos 33°C, no inverno ocorrem quedas bruscas de temperatura, que podem cair abaixo de zero com a passagem de massas de ar polar (SACHT, 2020).

Com a globalização e industrialização, surgiu um estilo arquitetônico internacional, com uso intensivo de concreto armado e fachadas envidraçadas, edificações começaram a serem construídas de forma similar em várias partes do mundo, independente das

características do clima local (LAMBERTS, 2014). Assim, muitas edificações inadequadas às condições ambientais são construídas de forma repetida e mecânica, gerando desconforto térmico para os habitantes e maior consumo de energia.

Nesse contexto, boa parte das tipologias habitacionais construídas em Foz do Iguaçu-PR desconsideram as características do clima local, gerando habitações com baixo conforto térmico e alto consumo de energia para climatização artificial. A cobertura é um dos principais sistemas que influenciam nessas condições.

De acordo com Donaisky (2010), o conforto térmico tem efeitos diretos na produção e na satisfação de cada indivíduo, assim, construir ambientes confortáveis termicamente deveria influenciar a tomada de decisões durante a fase de projeto de toda edificação.

Devido à sua grande área de interceptação da radiação, o telhado é um dos elementos que mais transfere calor para o interior das edificações (SAMPAIO, 2011). Portanto, a análise prévia das condições climáticas e escolha adequada das telhas e outras configurações da cobertura são de extrema importância para a obtenção de ambientes confortáveis termicamente e eficiente energeticamente.

Diante desses aspectos, pretende-se avaliar a influência da cobertura no conforto térmico em habitações para o clima de Foz do Iguaçu. Porém, o ideal é combinar a variação de outras características da edificação com a cobertura, tais como paredes internas e externas, esquadrias, orientação solar, posicionamento em relação aos ventos dominantes, tipo de vidros, etc. Este trabalho limita-se ao estudo das coberturas, considerando habitações convencionais em Foz do Iguaçu.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da cobertura no conforto e desempenho térmico de uma tipologia habitacional unifamiliar localizada em Foz do Iguaçu-PR, por meio de simulação computacional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar os valores de temperaturas internas e do consumo energético de uma tipologia habitacional unifamiliar localizada em Foz do Iguaçu-PR, considerando os materiais mais utilizados em coberturas na cidade;
- b) Avaliar os modelos de cobertura de acordo com a NBR 15575-1, em relação ao desempenho térmico.
- c) Verificar quais tipos de cobertura são mais indicadas ao clima de Foz do Iguaçu-PR.

2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COBERTURAS

Os materiais de construção e os elementos que constituem a envoltória dos edifícios são essenciais na análise do seu desempenho térmico, pois os maiores ganhos térmicos das edificações advêm dos ambientes externos, através das paredes e coberturas. Afetando o conforto térmico e a demanda por climatização. Assim, para o projeto de uma edificação eficiente energeticamente, é necessário conhecer o comportamento e as propriedades térmicas dos materiais utilizados (CB3E, 2015).

2.1 MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Sempre que houver uma diferença de temperatura entre dois meios, ou entre regiões diferentes do mesmo meio, a transferência de calor deverá ocorrer. E essa transferência ocorrerá do meio de maior temperatura para o meio de menor temperatura (TIPLER, 2012). A transmissão de calor pode efetuar-se de três formas distintas: condução, convecção e radiação.

O modo de transferência de calor por condução está relacionado ao contato de moléculas com diferentes velocidades de vibração, ocorrendo a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas de menor energia. Porém, não ocorre alteração da posição das moléculas ao se chocarem. A transferência de calor por convecção ocorre quando as moléculas de um fluido entram em contato com um objeto, cuja temperatura é maior do que sua própria temperatura. Ao receber calor as moléculas do fluido se expandem e deslocam-se no fluido, transportando consigo a energia térmica adquirida (SENGER, 2012).

A radiação é a transferência de calor por intermédio de ondas eletromagnéticas, não necessitando de um meio material para ocorrer. Toda matéria, possui a capacidade de emitir e absorver energia na forma de radiação. Essa energia é tanto maior quanto maior for a temperatura da matéria (FROTA, 2001). Um bom exemplo desta forma de transmissão de calor é a radiação solar.

Em edificações, a radiação solar é a mais importante fonte de calor e responsável pelos ganhos térmicos, influenciando diretamente as condições de conforto

térmico. Na **Figura 1**, podem ser observadas as trocas de calor entre o ambiente externo e o interno.

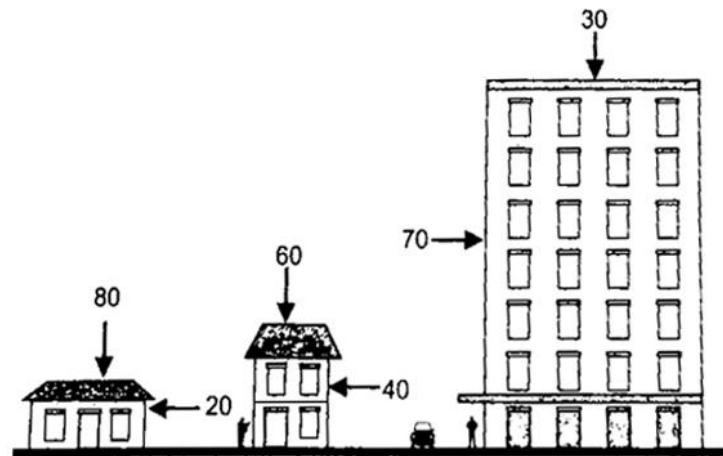
Figura 1 – Trocas de calor em uma cobertura.



Fonte: ARANTES, 2007 apud VITTORINO, 2003.

Dentre os elementos de uma edificação, a cobertura é um dos que mais transfere calor para o interior das edificações, devido à sua posição em relação aos outros elementos e grande área de interceptação da radiação solar (SAMPAIO, 2011). Em função da altura das edificações, a quantidade de calor recebida pela cobertura e pelas fachadas pode variar, de acordo com o que aparece na **Figura 2**. Quando menor a altura da edificação, maior será a influência do calor recebido pela cobertura.

Figura 2 – Influência da cobertura na quantidade de calor recebida.



Fonte: MASCARÓ, 2010.

2.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

A parcela da radiação solar transmitida para o interior é a principal fração dos ganhos térmicos em ambientes e atua diretamente nas condições internas de conforto, por isso, é importante estudar como os materiais se comportam em relação à radiação e ao fluxo de calor (LAMBERTS, 2014).

Nas coberturas, a transmissão de calor acontece quando há uma diferença de temperatura entre as superfícies interior e exterior, o calor transferido é definido como a taxa de energia térmica transferida por unidade de tempo devido a uma diferença de temperatura (ABNT, 2005b).

Os materiais da cobertura absorvem calor, tanto do exterior quanto do interior, dependendo de onde o ar tem maior temperatura. A temperatura sobre as coberturas é incrementada principalmente pela radiação solar direta. No hemisfério sul, deve-se tomar cuidado com coberturas orientadas a oeste, pois recebem muita radiação solar no verão nos períodos do dia com temperaturas do ar mais altas, incrementando o fluxo de calor para o interior (LAMBERTS, 2014).

Nas envoltórias das edificações, a transmissão de calor acontece quando há uma diferença de temperatura entre as superfícies interior e exterior. A temperatura está

diretamente relacionada à quantidade de calor num sistema, quando o sistema recebe energia térmica, sua temperatura aumenta (ORDENES, 2008).

O comportamento dos materiais pode ser representado em função de suas propriedades termofísicas (LAMBERTS, 2014). Na **Tabela 1**, serão apresentadas algumas propriedades térmicas descritas na norma NBR 15220: Parte 1 (ABNT, 2005b).

Tabela 1 – Definição de Características e propriedades.

Propriedade	Definição	Determinação	Unidade
Condutividade Térmica	Propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m^2 , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro	NBR 15220-2 Tabela B.3 ou por ensaios normalizados	$\text{W}/(\text{m.K})$
Absortância à radiação solar	Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície	NBR 15220-2 Tabela B.2 ou por ensaios normalizados	-
Resistência Térmica	Quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário	$R = e/\lambda$ e: espessura da camada λ : condutividade térmica	$(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$
Transmitância Térmica	Inverso da resistência térmica total. Transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo, induzida pela diferença de temperatura entre o ambiente interno e o externo.	$T = 1/R_t$ R_t : Resistência térmica total	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$

Fonte: ABNT, 2005b, p. 2-3.

Os materiais denominados isolantes térmicos possuem baixas densidades, ou seja, são muito porosos. Como o ar parado no interior dos poros apresenta baixa condutividade térmica (λ), a transferência de calor ocorre lentamente. Esse mesmo princípio pode ser notado em uma câmara de ar (ático) entre o telhado e o forro, que reduz o fluxo de calor (LAMBERTS, 2014).

Um parâmetro importante a ser considerado no projeto da cobertura é a transmitância térmica, pois seu valor é utilizado como critério para avaliar o desempenho térmico pelo método simplificado, descrito na NBR 15575-5 (ABNT, 2021b).

Preferencialmente, os valores da resistência térmica devem ser obtidos através de ensaios normalizados, porém, também podem ser determinados utilizando a espessura da camada estudada e os valores de condutividade térmica tabelados no Anexo B da NBR 15220-1 (ABNT, 2005b). Recomenda-se utilizar os valores de absorvância obtidos por medições, de acordo com as normas da ASTM E1918-06, ASTM E903-96 e ASHRAE 74-1988, ou valores indicativos presentes na NBR 15220-2 e no Anexo Geral V do RAC (CB3E, 2018).

Outra característica importante no estudo do comportamento térmico de uma edificação é a inércia térmica, que é a capacidade de um material de armazenar e liberar calor. Quando um fluxo de calor atravessa um componente, parte do calor aquece-o internamente, acumulando energia térmica ao longo do tempo e atrasando a onda de calor (FROTA, 2001).

A inércia térmica depende da capacidade térmica do material, que é definida na norma de desempenho como “Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema” (ABNT, 2005b, p. 2).

3 CONFORTO TÉRMICO, CONSUMO ENERGÉTICO E INFLUÊNCIA DA COBERTURA

Ao estudar o conforto térmico de um ambiente, deve-se atentar a três fatores fundamentais: o bem estar do homem, o desempenho humano e a conservação de energia (SENGER, 2012). Este capítulo tem a finalidade de apresentar os conceitos de conforto e desempenho térmico relacionados aos sistemas de cobertura. Na seção 3.1 é abordado a definição de conforto térmico e as necessidades humanas; na seção 3.2 é apresentado o panorama geral do consumo de eletricidade nas edificações brasileiras, e por fim, a seção 3.3 aborda sobre a relação entre a cobertura e o desempenho térmico das edificações.

3.1 CONFORTO TÉRMICO E EXIGÊNCIAS HUMANAS

O planeta Terra não é inteiramente hospitaleiro. Devido ao aumento da população e a busca por recursos, o homem passou a habitar regiões de diversos climas, alguns desses, inóspitos e desafiantes à sobrevivência. Porém, o ser humano sempre buscou se proteger das condições adversas do clima, criando estruturas e objetos que o ajudassem a alcançar um estilo de vida mais confortável (ALMEIDA, 2009).

A norma ABNT NBR 15220 define conforto térmico como: “satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente” (ABNT, 2005b, p. 6). É o resultado de um conjunto de condições ambientais que provocam a sensação de bem estar térmico, sua avaliação é subjetiva, pois, também depende de características fisiológicas e psicológicas variáveis por pessoa (LAMBERTS, 2014).

O corpo humano pode ser comparado com uma máquina térmica que produz calor, dependendo do seu nível de atividade. Os seres humanos são animais homeotérmicos, ou seja, possuem sangue quente. Assim, para sobreviver, precisam manter a temperatura dos órgãos internos do corpo humano em uma temperatura constante de 36°C (SENGER, 2012).

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, o fluxo de calor se dá sempre do objeto de maior temperatura para o de menor temperatura (TIPLER, 2012). Como, geralmente, a temperatura externa é diferente da temperatura interna, o corpo está em contínua transmissão de calor com o ambiente. Se a temperatura do ambiente for muito baixa, o corpo perde energia térmica para o ambiente, no caso contrário, o corpo recebe energia.

Quando o organismo humano está perdendo ou recebendo mais calor que o necessário para a manutenção da homeotermia, ocorrem as sensações de frio ou calor, exigindo um esforço adicional do corpo para manter a temperatura constante. Nesses casos, pode haver redução do rendimento do trabalho, fadiga, estresse, sensação de desconforto e até problemas de saúde (FROTA, 2001).

A temperatura de um ambiente não depende apenas do calor, depende também do vento e da umidade do local. De acordo com Corbella “A sensação de temperatura depende muito mais de quão rapidamente se retira calor ou se entrega calor à pele, mais do que da temperatura do ar indicada por um termômetro” (2003 apud ALMEIDA, 2009, p. 33).

Quando o corpo humano transfere para o ambiente o calor produzido pelo metabolismo compatível com a atividade realizada, sem a necessidade de nenhum mecanismo de termorregulação, a sensação de conforto térmico é alcançada (ALMEIDA, 2009).

Por esses fatores descritos acima, as edificações devem ser projetadas de forma adequada ao clima. Para esse fim, deve-se buscar conhecimentos das variáveis do clima local, como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e ventos. Com base nisso, deve-se adotar estratégias compatíveis, com métodos construtivos e materiais adequados. O calor gerado no próprio ambiente devido à presença de fontes diversas, e devido à radiação solar, podem provocar o desconforto térmico (FROTA, 2001).

De acordo com Senger (2012, p. 19), o ambiente térmico pode ser definido como: “o conjunto das variáveis térmicas de um espaço limitado que influenciam o organismo do homem”, afetando de forma direta e indireta a saúde, realização de tarefas e bem estar dos habitantes. Um ambiente pode ser definido como neutro, quando toda a produção de calor metabólico é equilibrada com o calor do ar à volta do indivíduo. A neutralidade térmica é uma condição necessária, porém não é suficiente para garantir o conforto térmico dos habitantes.

Devido às variações biológicas (peso, sexo, idade, hábitos alimentares, etc.) entre as pessoas é praticamente impossível que todos os ocupantes do ambiente se sintam confortáveis termicamente, por isso, geralmente, o conforto térmico é avaliado em relação à porcentagem de pessoas satisfeitas com as condições térmicas (SENGER, 2012).

Além do desempenho térmico da envoltória e das variações biológicas, a sensação de conforto térmico também é influenciada pelo número de ocupantes, qualidade da mobília, vestimentas dos habitantes e as atividades físicas desempenhadas no ambiente (LAMBERTS, 2014; CBIC, 2013).

3.2 CONSUMO ENERGÉTICO

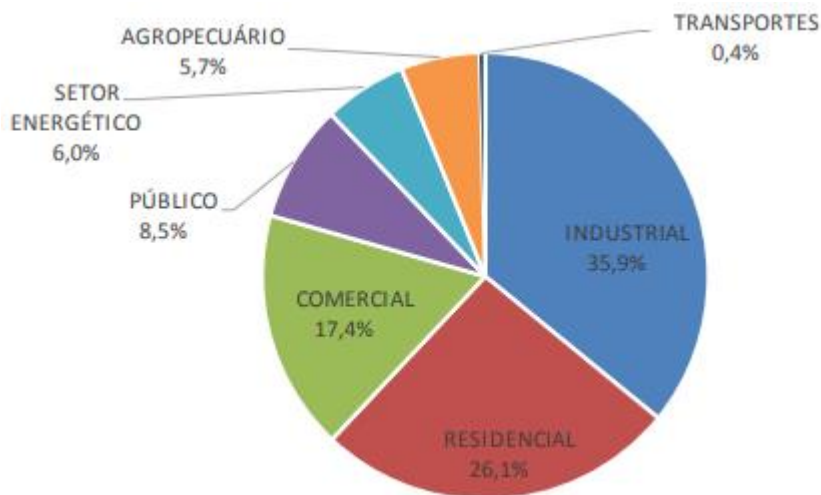
O consumo de eletricidade em edifícios é determinado pelos sistemas de iluminação artificial, de climatização de ar, outros equipamentos, e pelas variáveis que interferem nesses sistemas, como a envoltória da edificação, o clima local, o planejamento urbano e o comportamento dos usuários (EPE, 2018).

Parte considerável do consumo de energia elétrica de uma edificação residencial é utilizada para climatização, seja para aquecimento ou refrigeração. Para a população de classe média e alta, o desconforto térmico geralmente é resolvido com um aumento do consumo energético para climatização artificial, entretanto, para outra parte da população, resulta em insatisfação, redução do bem estar e da produtividade (SACHT, 2008).

A busca por condicionamento térmico natural não se dá apenas pelo conforto térmico, mas também, pela eficiência energética. A redução do consumo energético da edificação traz outros benefícios, como: a redução do custo do investimento, dos custos de operação e manutenção dos equipamentos de climatização, dos ruídos e das descargas de calor dos sistemas de ar condicionado (MMA, 2014).

Os benefícios não afetam apenas os habitantes e proprietários da edificação, mas sim todo o ecossistema da região. A diminuição do consumo de energia elétrica reduz a necessidade de expansão do setor de produção de energia, e os impactos ambientais resultantes de sua produção (MMA, 2014).

Ao analisar o consumo nacional de eletricidade, percebe-se a importância do estudo de eficiência energética em edificações, pois esse setor é o 2º maior consumidor, ficando atrás apenas do setor industrial. De acordo com Balanço Energético Nacional do ano base 2019, as edificações residenciais são responsáveis por cerca de 26,1% do consumo de energia elétrica do país (EPE, 2020). A **Figura 3** apresenta a participação setorial no consumo de eletricidade.

Figura 3 – Participação setorial no consumo de eletricidade.

Fonte: EPE, 2020.

O consumo final de eletricidade no Brasil em 2019 teve crescimento de 1,3% em relação a 2018. O setor que mais contribuiu para esse aumento em valores absolutos foi o residencial, que expandiu o seu consumo em 4,8 TWh (+3,5%) (EPE, 2019). Na Nota Técnica EPE 030/2018 são apresentados os resultados de um estudo da Projeção de Energia do Setor Residencial (MSR). Foram considerados dois cenários em relação à melhoria da eficiência dos aparelhos de ar condicionado. No melhor caso, o consumo de eletricidade devido ao uso de condicionadores de ar do setor residencial passará de 18,7 TWh em 2017 para 36,8 TWh em 2035, um aumento de aproximadamente 97% em relação a 2017 (EPE, 2018).

Para a redução da taxa de crescimento do consumo de energia elétrica no horizonte de análise, devem ser implantadas medidas de eficiência energética, tais como o uso de estratégias bioclimáticas nas edificações e uso da energia solar para climatização, por exemplo (EPE, 2018).

3.3 SISTEMAS DE COBERTURA E O CONFORTO TÉRMICO

A edificação é o elemento que “intermedia as relações entre o meio ambiente externo e o microclima interno criado” (RIBEIRO, 2010 apud MMA, 2014). Sua envoltória pode permitir um ganho excessivo de calor, caso não seja definida e dimensionada considerando a região geográfica e as características do clima local. De forma geral, os elementos de vedação horizontais, nesse caso específico as coberturas, são a primeira barreira ao calor produzido pela radiação solar.

Uma das principais funções das edificações deve ser proporcionar conforto aos seus usuários. De acordo com Lamberts, um bom projeto arquitetônico deve atender as necessidades de conforto dos habitantes e à eficiência energética da edificação (1997 apud ALMEIDA, 2009). Os edifícios devem oferecer condições térmicas satisfatórias para os seres humanos, independente das condições climáticas externas (FROTA, 2001).

De acordo com a NBR 15575-5, os sistemas de cobertura devem “apresentar transmitância térmica e absorvância à radiação solar que proporcionem um desempenho térmico apropriado para cada zona bioclimática” (ABNT, 2021b, p. 26).

Estudos realizados em Porto Alegre por Mascaró (1992, apud ALMEIDA, 2009), em casa térreas e com diversas orientações, verificaram que 72,3% da radiação térmica da edificação é absorvida pela cobertura e 27,7% pelas paredes, sendo que, em média, as coberturas recebem 12 horas diárias de radiação solar, o dobro do tempo de insolação recebida pelas paredes (ALMEIDA, 2009). Porém, o número de pavimentos da edificação também vai influenciar na quantidade de radiação recebida por paredes e cobertura.

Os materiais de construção, especialmente os que constituem a envoltória do edifício, são essenciais na análise do seu desempenho térmico. A envoltória é o elemento de separação entre ambiente interno e externo, e por isso seus componentes são determinantes do clima interno da edificação e afetam a demanda por condicionamento artificial. Para selecionar materiais que possam contribuir com o desempenho térmico e a eficiência energética das edificações é preciso conhecer suas propriedades térmicas (CB3E, 2015).

O conforto térmico de uma edificação pode ser avaliado de forma simplificada, utilizando as propriedades térmicas das coberturas, por simulação ou por medição, estes métodos serão abordados no item 3.2. Já a relação entre o clima, desempenho térmico da cobertura e estratégias bioclimáticas, será discutida no Capítulo 4.

4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS DE ACORDO COM A NORMA NBR 15575

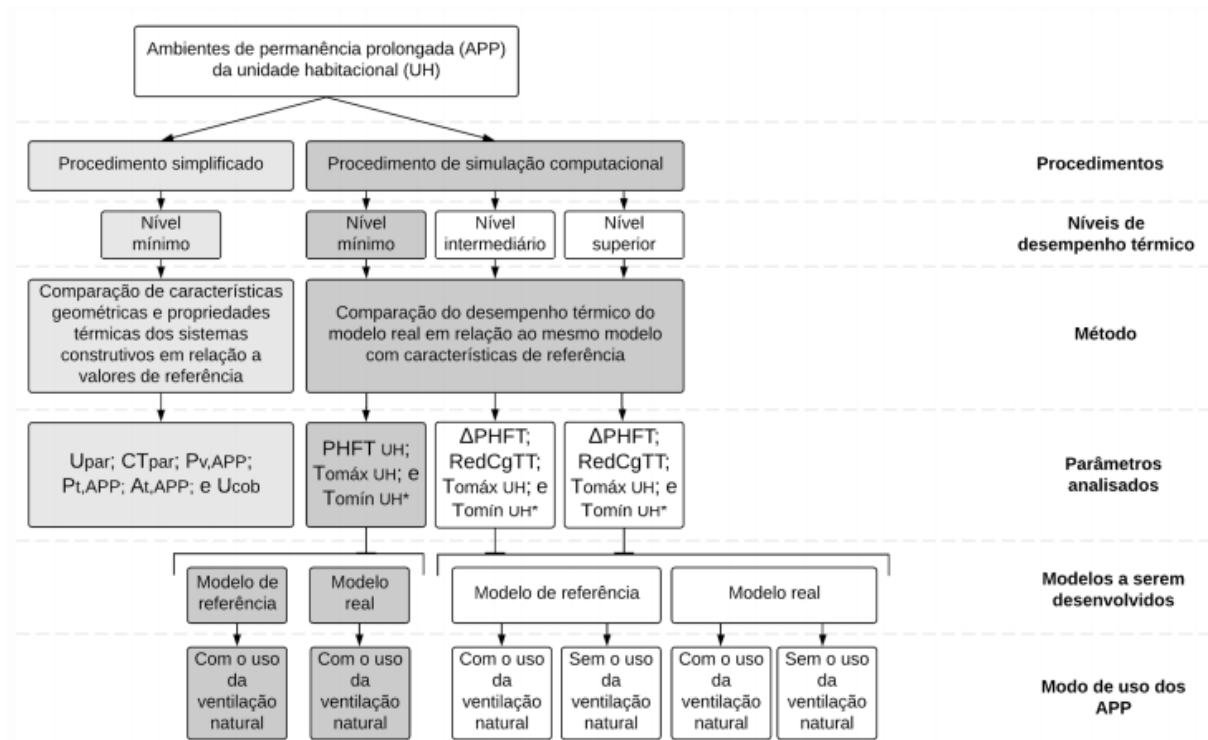
O desempenho de uma edificação diz respeito ao seu comportamento em uso, “pode ser entendido como as condições mínimas de habitabilidade (como conforto térmico e acústico, higiene, segurança, entre outras) necessárias para que um ou mais indivíduos possam utilizar a edificação durante um período de tempo” (POSSAN, 2013, p. 5). No caso do estudo do desempenho térmico, os objetivos principais são: verificar a eficiência energética da edificação e as condições de conforto térmico proporcionadas aos usuários.

Diversos fatores influenciam o desempenho térmico de uma edificação, tais como: as características do clima da região na qual a edificação será implantada, a orientação dos cômodos em relação ao norte, os materiais utilizados, o pé direito, a disposição e dimensão dos cômodos, o número de pavimentos, a topografia do terreno, entre outros fatores (CBIC, 2013).

A ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021) é um conjunto de Normas Brasileiras que especifica requisitos e critérios exigidos de edificações e seus sistemas, com o objetivo de atender as necessidades dos usuários. Essas necessidades podem ser traduzidas como segurança, habitabilidade e sustentabilidade. Trata-se de uma norma de desempenho, ou seja, indica padrões quanto ao comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas são construídos, estabelecendo métodos de avaliação, que permitem a mensuração clara do seu cumprimento.

O conjunto normativo compreende seis partes: Parte 1: Requisitos gerais; Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais; Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos; Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas; Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas; e Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

A NBR 15575-5 (ABNT, 2021b) estabelece dois procedimentos para a avaliação do desempenho térmico das edificações: Procedimento Simplificado e Procedimento de Simulação Computacional. O esquema geral da metodologia pode ser observado na **Figura 4**.

Figura 4 – Procedimentos de avaliação de desempenho térmico.

Fonte: ABNT, 2021b, p. 17.

4.1 PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO

No procedimento simplificado, as características geométricas e propriedades térmicas dos sistemas construtivos são comparadas com valores de referência normalizados. Para os sistemas de cobertura, o critério é a Transmitância térmica de coberturas (U_{cob}) estabelecido na NBR 15575-5 (ABNT, 2021b), considerando a Zona bioclimática em que a edificação está localizada, de acordo com a ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2005d).

A transmitância térmica deve possuir valor igual ou inferior ao valor de referência, apresentado na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Critérios de coberturas quanto à transmitância térmica.

Transmitância térmica de coberturas (Ucob) W/(m².K)				
Zonas bioclimáticas 1 e 2	Zonas bioclimáticas 3 a 6		Zonas bioclimáticas 7 e 8	
Ucob ≤ 2,3	$\alpha_{cob}^* \leq 0,6$	$\alpha_{cob} > 0,6$	$\alpha_{cob} \leq 0,4$	$\alpha_{cob} > 0,4$
	Ucob ≤ 2,3	Ucob ≤ 1,5	Ucob ≤ 2,3.FT	Ucob ≤ 2,31.FT

* α_{cob} é absorptância à radiação solar da superfície externa da cobertura. Recomenda-se a consideração da degradação do desempenho desta superfície, conforme a ABNT NBR 15575-1:2021, 11.2. Os limites de α_{cob} estabelecem a transmitância térmica de referência que deve ser considerada nas coberturas. No caso de coberturas de telhas metálicas de qualquer natureza, com ou sem aplicação de pintura ou outro acabamento, a superfície externa deve apresentar valor de emitância térmica superior a 0,7 para as zonas bioclimáticas 3 a 8. O valor da emitância térmica deve ser comprovado por meio de laudo técnico reconhecido, conforme a ABNT NBR 15575-1:2021, Tabela 1.

Unidades habitacionais com APP que adotarem valores de transmitância térmica de coberturas que ultrapassem os limites desta Tabela devem ser avaliadas por meio do procedimento de simulação computacional, estabelecido na ABNT NBR 15575-1:2021, 11.4.

Fonte: ABNT, 2021b, p. 4.

Quando um ambiente de permanência prolongada (APP), possuir coberturas com transmitâncias térmicas distintas ou telhas de absorptâncias distintas, deve-se ponderar os valores de transmitância térmica pelas áreas das projeções horizontais das superfícies de cada cobertura, e ponderar os valores de absorptância pelas áreas de cada pintura ou telha, obtendo um valor final equivalente para toda a cobertura.

Se algum critério do procedimento simplificado não for cumprido por um ou mais APP, a avaliação da unidade habitacional (UH) deverá ser realizada através do procedimento de simulação computacional. Se todos os critérios forem cumpridos, a edificação atende ao nível mínimo de desempenho térmico.

4.2 PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O procedimento de simulação computacional avalia o desempenho térmico, comparando o comportamento de um modelo real da edificação com um modelo com características de referência. Através desse procedimento, o desempenho térmico da edificação pode ser classificado em três níveis: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S). A obtenção do nível mínimo é obrigatória, já a obtenção dos níveis intermediário ou superior é facultativa (ABNT, 2021a).

4.2.1 Critérios para a Utilização de Programas e Dados na Simulação

A avaliação por simulação computacional deve ser executada por um programa que permita a avaliação do comportamento térmico sob as condições dinâmicas do clima e seja validado pela ASHRAE Standard 140.

Com o uso de programas de simulação, a edificação é modelada em três dimensões, atribuindo características térmicas e físicas às faces dos fechamentos, como paredes, pisos, janelas, coberturas, etc. (IPT, 2017). O modelo digital, deve representar a edificação completa, incluindo ambientes de permanência prolongada (APP) e ambientes de permanência transitória (APT), porém, na simulação, é avaliado apenas o desempenho térmico dos APP.

O software de simulação computacional deve estar habilitado a estimar as variações de temperatura e de carga térmica, ao longo de 8760 horas, considerando as variações na ocupação e no uso de equipamento. Além de modelar efeitos de trocas de calor entre as superfícies, de inércia térmica, elementos de sombreamento e de ventilação cruzada.

Os dados das propriedades térmicas dos materiais e/ou componentes construtivos podem ser obtidos por meio de ensaios normalizados, através de comprovação dos fabricantes ou, em alguns casos, utilizando dados disponibilizados na ABNT NBR 15220: Parte 2 (ABNT, 2005c), como referência.

Para a realização das simulações computacionais, deve ser utilizado um arquivo climático da cidade em que se encontra a edificação. Contendo dados climáticos das 8760 horas do ano meteorológico típico, como: umidade relativa, pressão atmosférica, temperatura de bulbo seco, temperatura do ponto de orvalho, radiação normal direta, velocidade

do vento, temperatura média do solo, entre outros. Na falta de dados para a cidade em questão, é recomendada a utilização dos dados de uma cidade próxima, com características climáticas semelhantes e mesma Zona Bioclimática Brasileira, definidas na ABNT NBR 15220 – Parte 3 (ABNT, 2005d).

4.2.2 Modelo Real e Modelo de Referência

Os dois modelos devem ser simulados com a mesma versão do programa de simulação computacional e com o mesmo arquivo climático. Ambos devem preservar as características de volume interno, a condição de contato com o solo, as áreas de superfícies expostas ao ambiente externo, o norte geográfico, a área de piso total dos ambientes da edificação projetada, a divisão de ambientes e o entorno da edificação (considerando a sombra e a reflexão da radiação solar dos elementos do entorno).

O modelo real representa as características geométricas da edificação, mantendo sua volumetria, elementos transparentes, aberturas para ventilação, propriedades térmicas dos materiais e elementos de sombreamento externos fixos na fachada. No modelo de referência, as características geométricas são mantidas, porém, as características térmicas dos sistemas construtivos, percentuais de elementos transparentes e de aberturas para ventilação, são definidos a partir de valores tabelados. Além disso, brises, beirais e outros elementos de sombreamento fixos na fachada externa, não são considerados.

Todos os pisos, paredes internas e paredes externas devem ser considerados como um elemento de vedação com 100 mm de espessura, composto por um material com propriedades térmicas apresentados na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Propriedades e características para o modelo de referência.

Propriedades térmicas de paredes e pisos					
Elemento	Condutividade térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Densidade kg/m3
Paredes externas	1,75	1000	0,58	0,9	2200
Paredes internas	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200
Pisos	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200
Propriedades térmicas da cobertura					
Elemento	Condutividade térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Densidade kg/m3
Telha com 6 mm de espessura	0,65	840	0,65	0,9	1700
Laje com 100 mm de espessura	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2200
Características dos elementos transparentes nas esquadrias					
Elemento	Fator solar (FS)	Transmitância térmica (Ut) W/(m2.K)		Percentual de elementos transparentes (Pt,APP) %	
Elementos transparentes	0,87	5,7		18	
Percentual de abertura para ventilação nas esquadrias					
Elemento	Percentual de abertura para ventilação (Pv,APP) %				
Abertura para ventilação	7,65				
Características dos perfis das esquadrias					
Elemento	Absortância à radiação solar dos perfis	Emissividade de onda longa dos perfis	Condutividade térmica W/(m.K)	Largura dos perfis das esquadrias (mm)	
Perfis das esquadrias	0,58	0,9	56	50	

Fonte: ABNT, 2021a.

4.2.3 Critérios de Avaliação

Para verificar se a edificação atende ao nível mínimo de desempenho térmico, os modelos real e de referência devem ser simulados, considerando o uso da ventilação natural nos APP, para a obtenção dos níveis intermediário e superior, os modelos devem ser simulados com e sem o uso de ventilação natural. O desempenho térmico do modelo real deve atender aos critérios ao ser comparado com o desempenho térmico do modelo de referência.

Na simulação computacional com o uso de ventilação natural, devem ser determinados o percentual de horas de ocupação dos APP dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{APP}$) e a temperatura operativa anual máxima ($TomáX_{APP}$) de cada APP, considerando apenas os períodos de ocupação do APP. Para edificações construídas nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4, também deve ser determinada a temperatura operativa anual mínima ($Tomín_{APP}$) de cada APP.

Na simulação sem o uso da ventilação natural, são determinados os valores de $PHFT_{APP}$, $TomáX_{APP}$, $Tomín_{APP}$, o somatório anual dos valores horários da carga térmica de refrigeração ($CgTR_{APP}$) e, para edificações em climas com média anual da temperatura externa de bulbo seco inferior a 25 °C, o somatório anual dos valores horários da carga térmica de aquecimento ($CgTA_{APP}$).

4.2.3.1 Percentual de Horas de Ocupação da UH Dentro da Faixa de Temperatura Operativa ($PHFT_{UH}$)

Este critério quantifica o percentual de horas em que a temperatura operativa nos ambientes internos da unidade habitacional encontra-se dentro de uma faixa de temperatura ($PHFT_{UH}$), e é determinado a partir do percentual de cada ambiente de permanência prolongada, de acordo com seus respectivos períodos de ocupação.

A faixa de temperatura operativa a ser considerada é determinada a partir da média anual da temperatura externa de bulbo seco ($TBSm$), obtida através do arquivo climático utilizado, os intervalos podem ser observados na **Tabela 4**.

Tabela 4 – Faixas de temperaturas operativas para a determinação do $PHFT_{APP}$.

Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm)	Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da CgTRAPP	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da CgTAAPP
$TBSm < 25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Intervalo 1	$ToAPP^{*} \geq 26,0^{\circ}\text{C}$	$ToAPP \leq 18,0^{\circ}\text{C}$
$25,0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq TBSm < 27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Intervalo 2	$ToAPP \geq 28,0^{\circ}\text{C}$	Não considera
$TBSm \geq 27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Intervalo 3	$ToAPP \geq 30,0^{\circ}\text{C}$	Não considera

* $ToAPP$ é a temperatura operativa do APP considerada para o cálculo da CgTRAPP e da CgTAAPP.

Fonte: ABNT, 2021a, p. 22.

Para a determinação do $PHFT_{APP}$, são solicitados, como dados de saída da simulação, os valores horários da temperatura operativa de cada APP da edificação. Então, o $PHFT_{APP}$, é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$PHFT_{APP} = \frac{Nh_{FT}}{Nh_{Ocup}} * 100$$

Onde:

$PHFT_{APP}$: percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%);

Nh_{FT} : número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa estabelecida na Tabela 4, ao longo do ano;

Nh_{Ocup} : número de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano, equivalente a 2 920 h para salas e 3 650 h para dormitórios.

A partir dos valores de $PHFT_{APP}$ de todos os ambientes de permanência prolongada, é calculado o $PHFT_{UH}$, pela equação:

$$PHFT_{UH} = \frac{\sum_{i=1}^n PHFT_{APP,i}}{n}$$

Onde

$PHFT_{UH}$: percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%);

$PHFT_{APP,i}$: percentual de horas de ocupação do APP i dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%);

n: número de ambientes de permanência prolongada da UH.

A **Tabela 5** apresenta os critérios para a classificação do desempenho térmico em relação ao $PHFT_{UH}$.

Tabela 5 – Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao $PHFT_{UH}$.

Nível de Desempenho	Critério
Mínimo (M)	$PHFT_{UH,real} > 0,9.PHFT_{UH,ref}$
Intermediário (I)	$\Delta PHFT^* \geq \Delta PHFT_{mín}^{**}$
Superior (S)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{mín}$

* $\Delta PHFT$ é o incremento do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$.
 ** $\Delta PHFT_{mín}$ é o incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$, com valor obtido pela Tabela 20, para o nível intermediário, e pela Tabela 21, para o nível superior

Fonte: ABNT, 2021a, p. 22.

Como pode ser observado na **Tabela 5**, a avaliação para a obtenção dos níveis intermediário e superior utiliza a capacidade de incremento do $PHFT_{UH, real}$ ($\Delta PHFT$), determinado pela expressão:

$$\Delta PHFT = PHFT_{UH, real} - PHFT_{UH, ref}$$

Onde:

$\Delta PHFT$: incremento do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH, ref}$, expresso em porcentagem (%);

$PHFT_{UH, real}$: percentual de horas de ocupação da UH no modelo real dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%);

$PHFT_{UH, ref}$: percentual de horas de ocupação da UH no modelo de referência dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%).

Os valores de $\Delta PHFT_{mín}$ dependem do $PHFT_{UH, ref}$, do $PHFT_{UH, real}$, da carga térmica total da unidade habitacional (critério abordado no tópico 4.2.3.3) e da área total de

piso da UH (A_{pUH}), a **Tabela 6** apresenta os valores de $\Delta PHFT_{\min}$ para cada caso. Para os critérios de avaliação, a ABNT NBR 15575-1 classifica casas geminadas situadas no mesmo lote como edificação multifamiliar (ABNT, 2021a).

Tabela 6 – Incremento mínimo do $PHFT_{UH, \text{real}}$.

Critério		Tipologia Multifamiliar – pavimento térreo	
		Nível Intermediário	Nível Superior
$PHFT_{UH, \text{ref}} \%$	$C_{gTTUH, \text{ref}} / A_{pUH}$ kWh / (ano.m ²)	$\Delta PHFT_{\min}$	
$PHFT_{UH, \text{ref}} < 70 \%$	Todos os valores	$22 - 0,21 * PHFT_{UH, \text{real}}$	$22 - 0,21 * PHFT_{UH, \text{real}}$
$PHFT_{UH, \text{ref}} \geq 70 \%$	Todos os valores	0	0

Fonte: ABNT, 2021a, p. 40.

4.2.3.2 Temperatura Operativa

Temperatura operativa é o valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média do ambiente, através do programa utilizado para simulação computacional são determinados 8760 valores de temperatura operativa, cada valor relacionado à 1 hora do ano meteorológico típico.

A temperatura operativa anual máxima ($Tomáx_{UH}$), é adotada como a maior temperatura operativa dentro dos períodos de ocupação dos APP da UH, ao longo do ano. Para edificações localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4, também é necessário obter a temperatura operativa anual mínima ($Tomín_{UH}$), determinada como a menor temperatura operativa dentro dos períodos de ocupação de todos os APP da UH.

Independentemente do nível de desempenho, a temperatura operativa anual máxima do modelo real deve ser menor ou igual à soma da temperatura do modelo de referência com um valor de tolerância ($\Delta Tomáx$), de acordo com a equação:

$$Tomáx_{UH, real} \leq Tomáx_{UH, ref} + \Delta Tomáx$$

Onde:

$Tomáx_{UH, real}$: temperatura operativa anual máxima da UH no modelo real, expressa em graus Celsius (°C);

$Tomáx_{UH, ref}$: temperatura operativa anual máxima da UH no modelo de referência, expressa em graus Celsius (°C);

$\Delta Tomáx$: valor de tolerância da temperatura operativa anual máxima, expressa em graus Celsius (°C), $\Delta Tomáx = 2$ °C para UH unifamiliares.

Para unidades habitacionais localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4, a temperatura operativa anual mínima também deve ser analisada, seu valor deve ser maior ou igual à temperatura do modelo de referência, após esta ser reduzida por um valor de tolerância ($\Delta Tomín$), de acordo com a equação:

$$Tomín_{UH, real} \geq Tomín_{UH, ref} - \Delta Tomín$$

Onde:

$Tomín_{UH, real}$: temperatura operativa anual mínima da UH no modelo real, expressa em graus Celsius (°C);

$Tomín_{UH, ref}$: temperatura operativa anual mínima da UH no modelo de referência, expressa em graus Celsius (°C);

$\Delta Tomín$: valor de tolerância da temperatura operativa anual mínima, expresso em graus Celsius (°C), $\Delta Tomín = 1$ C°.

4.2.3.3 Carga Térmica

A carga térmica é a quantidade de calor a ser fornecida ou retirada do ar, para manter as condições desejadas em um ambiente (LAMBERTS, 2014). Os valores da carga térmica de cada ambiente são obtidos através dos dados de saída do software de simulação, e expressam, em quilowatts-hora por ano (kWh/ano), a quantidade de energia utilizada para refrigeração e para aquecimento. A carga térmica de refrigeração ($CgTR_{UH}$) é obtida através da somatória da carga térmica de refrigeração de todos os APP. Para edificações em climas com média anual da temperatura externa de bulbo seco inferior a 25 °C, também é considerada a carga térmica de aquecimento ($CgTA_{UH}$), obtida através da somatória da carga térmica de aquecimento de todos

os APP. A carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$) é a soma das cargas térmicas de aquecimento e refrigeração.

A utilização de condicionamento de ar é considerada nos horários em que os APP estiverem ocupados e com temperaturas operativas dentro dos limites determinados na **Tabela 7**.

Tabela 7 – Valores de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$.

Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm)	Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $CgTA_{APP}$
$TBSm < 25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Intervalo 1	$ToAPP^* \geq 26,0^{\circ}\text{C}$	$ToAPP \leq 18,0^{\circ}\text{C}$
$25,0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq TBSm < 27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Intervalo 2	$ToAPP \geq 28,0^{\circ}\text{C}$	Não considera
$TBSm \geq 27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Intervalo 3	$ToAPP \geq 30,0^{\circ}\text{C}$	Não considera

* $ToAPP$ é a temperatura operativa do APP considerada para o cálculo da $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$.

Fonte: ABNT, 2021a, p. 22.

É importante destacar que o critério da $CgTT_{UH}$ é considerado apenas nos níveis de desempenho intermediário e superior, e é avaliado em relação à redução da carga térmica total ($RedCgTT$) do modelo real, quando comparada com o modelo de referência, conforme a **Tabela 8**.

Tabela 8 – Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto à $CgTT_{UH}$.

Nível de Desempenho	Critério
Mínimo (M)	Não considera
Intermediário (I)	$RedCgTT^* \geq RedCgTT_{mín}^{**}$
Superior (S)	$RedCgTT \geq RedCgTT_{mín}$

* $RedCgTT$ é a redução da carga térmica total do modelo real ($CgTT_{UH,real}$) em relação à referência ($CgTT_{UH,ref}$).

** $RedCgTT_{mín}$ é a redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ em relação à referência ($CgTT_{UH,ref}$), com valor obtido por meio da Tabela 20, para o nível intermediário, e da Tabela 21, para o nível superior.

Fonte: ABNT, 2021a, p. 24.

Os valores de $RedCgTT$ dependem do $PHFT_{UH,ref}$, da carga térmica total da unidade habitacional e da área total de piso da UH (Ap_{UH}). A **Tabela 9** apresenta os valores de $RedCgTT$ para cada caso.

Tabela 9 – Redução mínima da $CgTT_{UH,real}$.

Critério		Tipologia Multifamiliar – pavimento térreo	
		Nível Intermediário	Nível Superior
PHFT _{UH,ref} %	$CgTT_{UH, ref} / A_{p,UH} kWh / (ano.m^2)$	Red $CgTT_{mín}$ %	
PHFT _{UH,ref} < 70 %	$CgTT_{UH, ref} / A_{p,UH} kWh / < 100$	0	30
	$CgTT A \geq 100$	0	40
PHFT _{UH,ref} ≥ 70 %	$CgTT_{UH, ref} / A_{p,UH} kWh < 100$	15	30
	$CgTT A \geq 100$	20	40

Fonte: ABNT, 2021a, p. 40.

Se algum dos APP não possuir sistema de condicionamento de ar, este pode ser analisado apenas quanto aos critérios PHFT_{APP}, Tomáx_{APP} e Tomín_{APP}. Quando ao longo de todo o ano não houver necessidade de condicionamento de ar na UH, o desempenho pode atingir o nível superior se PHFT_{UH} do modelo real for igual ou superior a 95 %.

5 ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS E RECOMENDAÇÕES PARA O CLIMA DE FOZ DO IGUAÇU

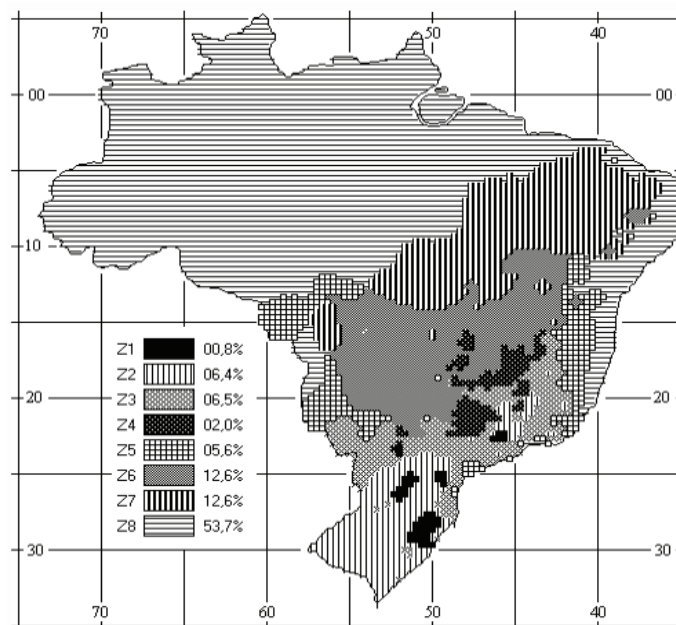
5.1 ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS

Atualmente, o zoneamento bioclimático brasileiro é definido por meio da NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (CB3E, 2017).

A Norma Brasileira NBR 15220 foi criada com o objetivo de melhorar o desempenho térmico das habitações populares no país, para tal, apresenta recomendações quanto às estratégias que podem ser adotadas para melhora do desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2005d).

Na terceira parte da norma, o território brasileiro foi subdividido em oito Zonas Bioclimáticas, para a formação das zonas, foram agrupadas as regiões com características relativamente homogêneas quanto ao clima (ABNT, 2005d). As áreas em que cada zona está localizada podem ser observadas na **Figura 5**.

Figura 5 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro.



Fonte: ABNT, 2005d.

A norma em questão define as características principais e indica diretrizes construtivas para cada uma das oito zonas bioclimáticas em relação ao tamanho das aberturas para ventilação, ao sombreamento necessário, ao tipo ideal de paredes externas e coberturas e também as estratégias bioclimáticas recomendadas para o local (LAMBERTS, 2014).

No zoneamento da NBR 15220, foram utilizadas Normas Climatológicas de pouco mais de 300 municípios, para o restante do território nacional os dados foram obtidos por interpolação, o que resultou em imprecisões no mapa final. Além disso, devido às dimensões continentais do Brasil, a quantidade de zonas estabelecidas foi insuficiente para representar de forma satisfatória as variações climáticas. As estratégias descritas na Norma foram destinadas, originalmente, a habitações unifamiliares de interesse social, porém, por apresentar o único zoneamento dentre as normas brasileiras, as recomendações têm sido utilizadas para qualquer tipo de edificação. Devido aos fatores citados, desde a publicação da norma, foram apresentadas diversas críticas quanto à sua imprecisão (RORIZ, 2012).

Percebendo a necessidade da revisão do Zoneamento, foram desenvolvidas algumas propostas de revisão do Zoneamento. Em janeiro de 2012, Maurício Roriz apresentou “Uma Proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro” (RORIZ, 2012). Nessa proposta, a análise foi realizada com base em dados climáticos de 610 municípios e foram definidas 20 zonas bioclimáticas. Desde então, houveram outros estudos e pesquisas com o objetivo de melhorar o zoneamento. A proposta mais recente foi a “Classificação de Climas do Brasil - Versão 3.0”, de 2014, na qual o território nacional foi dividido em 24 Grupos Climáticos, onde o Grupo 1 representa a zona climática mais fria e o Grupo 24 a zona climática mais quente. No entanto, este documento não trouxe recomendações quanto às estratégias construtivas para cada grupo (RORIZ, 2014).

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA O CLIMA DE FOZ DO IGUAÇU

De acordo com a classificação bioclimática da NBR 15220, Foz do Iguaçu está inserida na Zona Bioclimática 3. As diretrizes construtivas recomendadas para essa Zona podem ser observadas na **Tabela 10**.

Tabela 10 – recomendações da NBR 15220 para a Zona Bioclimática 3.

Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas	
Aberturas para ventilação:	Médias
Sombreamento das aberturas:	Permitir sol durante o inverno
Tipos de vedações externas para a Zona Bioclimática	
Parede: Leve refletora	Cobertura: Leve isolada
Estratégias de condicionamento térmico passivo	
Verão	Ventilação cruzada
Inverno	Aquecimento solar da edificação
	Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Fonte: ABNT, 2005d, p. 32.

Para as cidades cujos climas foram analisados para a realização do zoneamento, a norma apresenta as estratégias bioclimáticas recomendadas detalhadamente no Anexo A (ABNT, 2005d). Como Foz do Iguaçu foi uma dessas cidades, as estratégias detalhadas podem ser vistas na **Tabela 11**.

Tabela 11 – Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico para a cidade de Foz do Iguaçu.

Estratégia	Detalhamento
B	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar.
C	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
F	As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.
H e I	Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.
I e J	A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos.

Fonte: ABNT, 2005d, p. 9.

6 METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo do desempenho térmico da cobertura de uma tipologia habitacional unifamiliar para o clima de Foz do Iguaçu-PR, utilizando critérios de temperatura operativa mínima e máxima, carga térmica e percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa. Foz do Iguaçu é uma cidade localizada no oeste do Paraná, com coordenadas geográficas 25° 32' 49" Sul e 54° 35' 11", e altitude média de 179 m acima do nível do mar (IBGE, 2018) (**Figura 6**).

Figura 6 – (A) Localização de Foz do Iguaçu no oeste do Paraná. (B) Localização de Foz do Iguaçu em relação ao Paraná.



Fonte: VIAJE PARANÁ, 2022; BRASIL PLANET, 2022.

A metodologia empregada para tal foi a simulação computacional através do software *EnergyPlus* e auxílio da interface gráfica do *Sketchup* com o plugin *Euclid*. Os dados obtidos nas simulações foram processados e organizados no software *Microsoft Excel*. Neste capítulo estão descritos as considerações e procedimentos utilizados nas simulações.

6.1 ELABORAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO E DEFINIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS

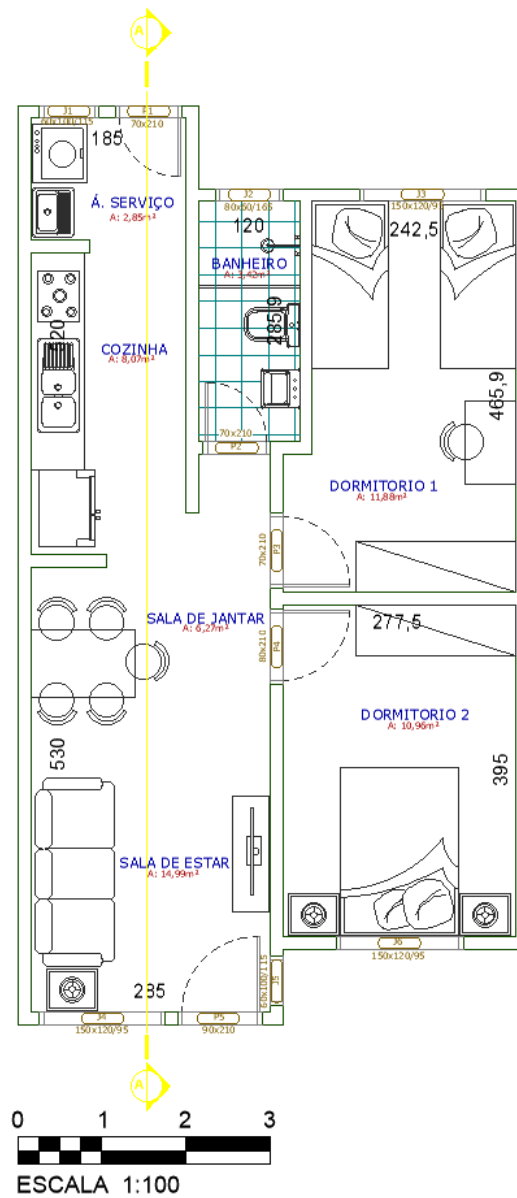
Considerando a grande variação de área construída e materiais utilizados nas residências, o primeiro fator definido foi o padrão da edificação a ser estudada. A tipologia foi modelada com base na Residência Padrão Baixo, categoria definida pela NBR 12721 (ABNT, 2005a) que é representado por residências compostas por dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área para tanque e com área real de aproximadamente 58,64 m².

Foi realizada uma consulta a cinco profissionais da área de construção civil atuantes na cidade de Foz do Iguaçu-PR (2 arquitetos e 3 engenheiros), de forma a obter informações das tipologias habitacionais que tem predominado atualmente. Essas informações juntamente com as informações sobre o mesmo assunto do trabalho desenvolvido por Martins (2022) foram a base para a determinação da tipologia geminada, analisada no presente trabalho.

Observou-se que a maioria das residências do padrão considerado são construídas de alvenaria de blocos cerâmicos com pé-direito de 2,6 m. As telhas mais utilizadas são a telha cerâmica do tipo romana, a telha de fibrocimento de 6 mm com platibanda, a telha de concreto e telha sanduiche (também conhecida como telha termoacústica). As edificações, em geral, possuem beirais de 80 centímetros e lajes de concreto armado, tendo a face inferior rebocada e pintada; ou fechamento com forro de PVC sem laje. Grande parte das edificações construídas na cidade nos últimos anos são geminadas, este fator resulta em uma redução nas opções de configurações dos ambientes e influencia diretamente na ventilação natural.

Com essas considerações, foi elaborada uma planta baixa no software *AutoCAD*, que pode ser observada na **Figura 7** (dimensões em centímetros).

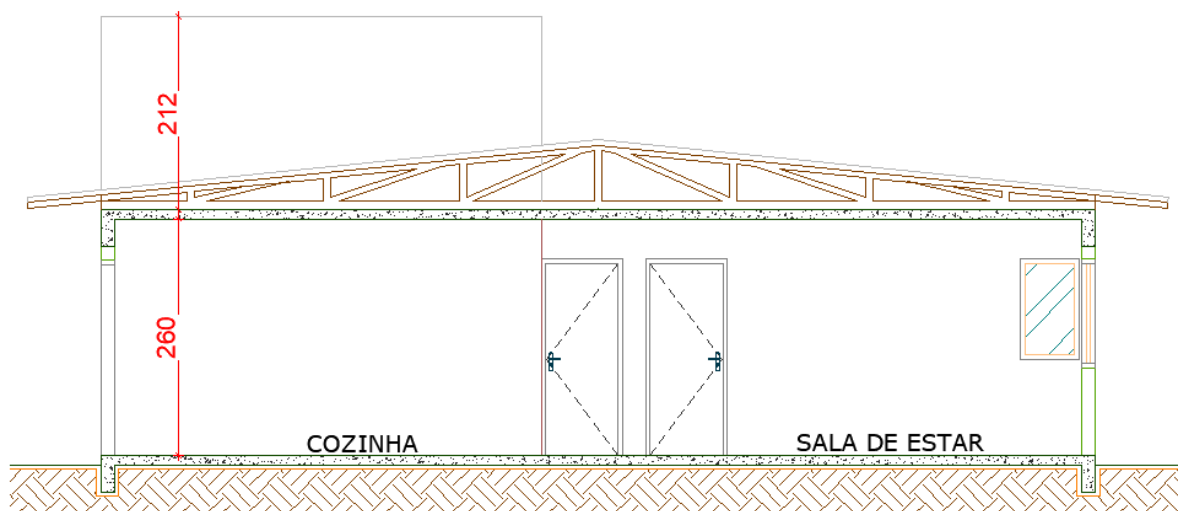
Figura 7 – Planta baixa da edificação.



Fonte: A autora, 2022.

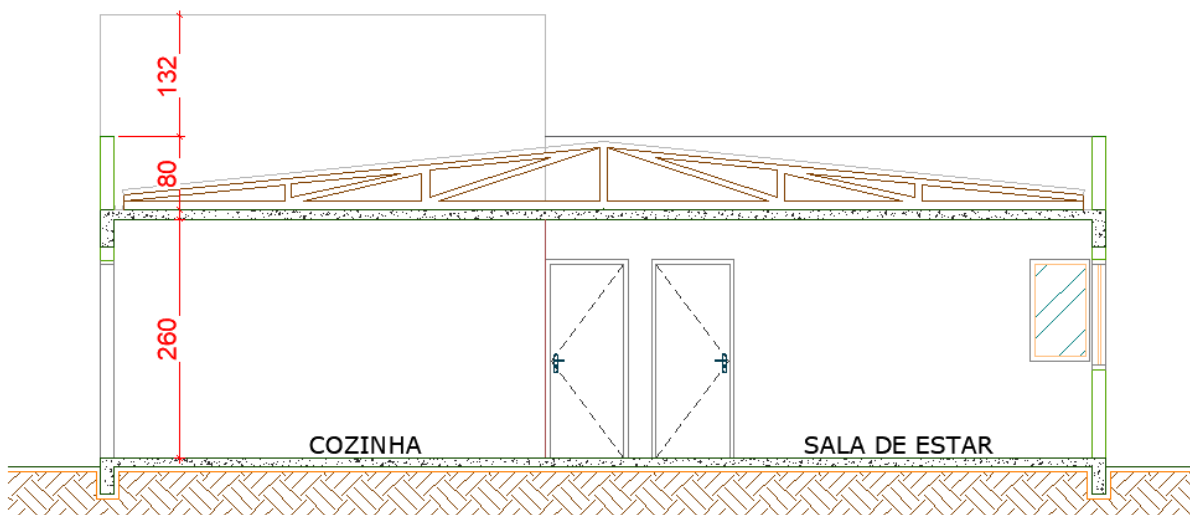
As **Figuras 8 a 11** apresentam, respectivamente, o corte A-A dos modelos sem platibanda, o corte A-A dos modelos com platibanda, as variações de cobertura e uma vista tridimensional da tipologia estudada (cortes com cotas em centímetros).

Figura 8 – Corte A-A dos modelos sem platibanda.



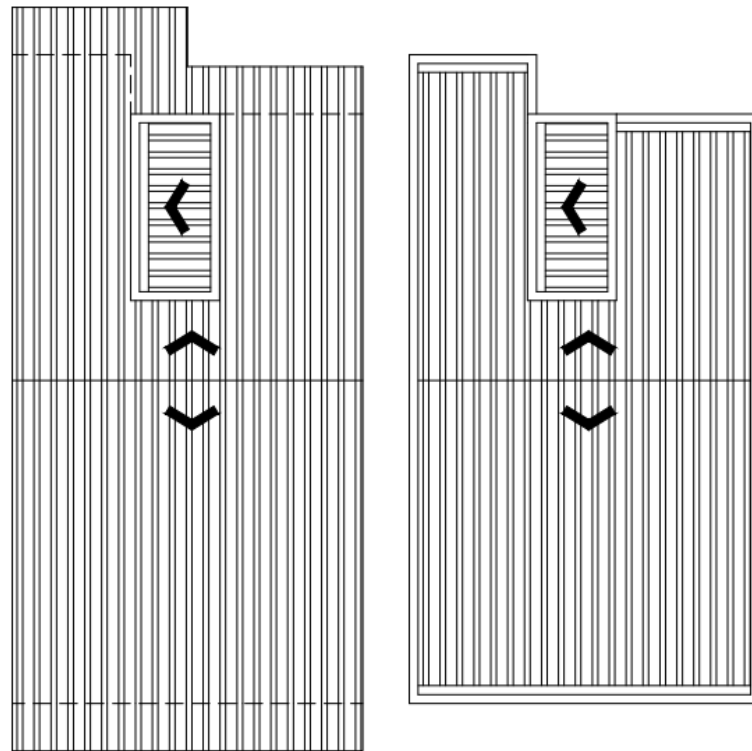
Fonte: A autora, 2022.

Figura 9 – Corte A-A dos modelos com platibanda.



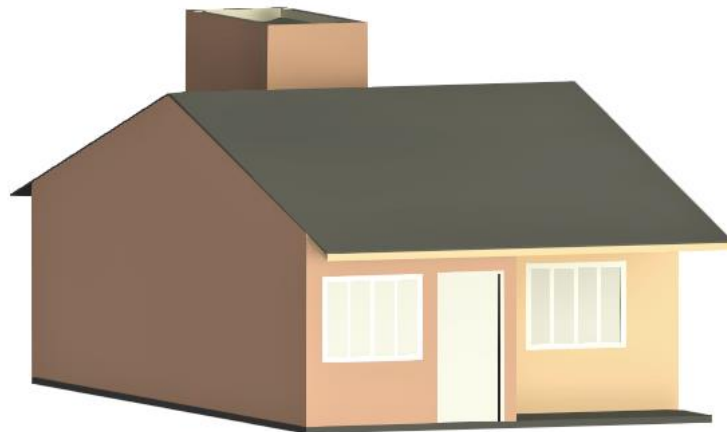
Fonte: A autora, 2022.

Figura 10 – Planta de cobertura da tipologia sem e com platibanda.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 11 – Vista tridimensional da edificação.



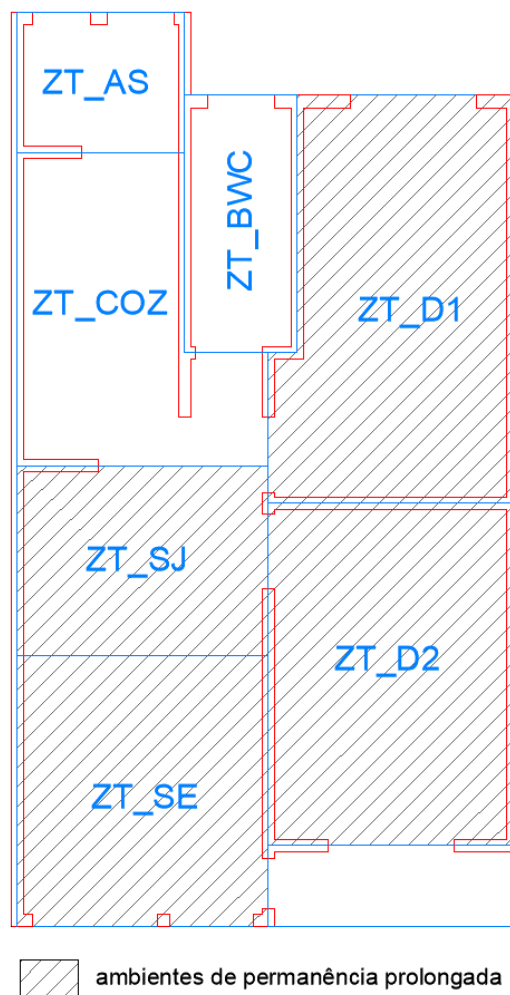
Fonte: A autora, 2022.

A edificação foi separada em diferentes zonas térmicas, sendo cada ambiente da edificação correspondente a uma delas, assim, pode-se analisar os dados de cada área. As

zonas foram criadas considerando que se a parede que delimita o cômodo seja interna, sendo que o limite da zona é o centro geométrico da parede, porém, se for externa, o limite da zona é a face exterior da parede. Foi considerado que há outras unidades residenciais anexas à ambos os lados da edificação, portanto, as duas paredes laterais externas foram modeladas como elementos adiabáticos (não realizam trocas de calor com o ambiente externo).

Nessa edificação, temos como ambientes de permanência transitória: área de serviço, cozinha e banheiro, e ambientes de permanência prolongada: dois dormitórios, sala de estar e sala de jantar. O resultado da delimitação das zonas pode ser observado na **Figura 12**.

Figura 12 – Zonas térmicas da edificação.



Fonte: A autora, 2022.

O posicionamento da edificação em relação a orientação solar afeta diretamente a quantidade de horas em que a envoltória da edificação é exposta aos raios solares,

consequentemente, influencia o conforto térmico dos ambientes. Para a análise desse fator, foram realizadas oito simulações, utilizando um modelo de referência.

Na residência estudada, a fachada com maior área de elementos translúcidos é a que contém a entrada principal, essa fachada foi denominada como fachada frontal. Em cada uma das oito simulações realizadas, a fachada frontal foi modelada direcionada a um dos pontos cardeais, como pode ser observado na **Tabela 12**.

Tabela 12 – Orientações a serem simuladas.

Orientação	Azimute
Norte	0°
Nordeste	45°
Oeste	90°
Sudeste	135°
Sul	180°
Sudoeste	225°
Leste	270°
Noroeste	315°

Fonte: A autora, 2022.

Com o resultado dessas simulações, foi obtido o azimuth que fornece o maior $PHFT_{UH}$, utilizando-o nas simulações com variação do sistema da cobertura, os modelos simulados estão representados na **Tabela 13**.

Tabela 13 – Casos simulados.

Cobertura	Forro	Sigla do modelo
Telha cerâmica com 30% de inclinação	PVC	CePVC
	Laje	CeLa
Telha de concreto com 30% de inclinação	PVC	CoPVC
	Laje	CoLa
Telha sanduíche com 15% de inclinação	PVC	SanPVC
	Laje	SanLa
Telha fibrocimento com 9% de inclinação	PVC	FibPVC
	Laje	FibLa
Telha fibrocimento com 9% de inclinação e com platibanda	PVC	PlaPVC
	Laje	PlaLa

Fonte: A autora, 2022.

6.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Com o projeto do modelo definido (planta baixa, cortes, cobertura, etc.) da edificação a ser simulada e com as zonas térmicas definidas, foi desenvolvido o modelo tridimensional e, em seguida, a inserção de dados e configurações para a simulação no software *EnergyPlus*. Os processos e considerações para a realização da modelagem e simulação estão descritos nos tópicos deste capítulo.

Para a avaliação de cada um dos casos descritos na **Tabela 13** de acordo com a norma NBR15575-1 (ABNT, 2021a), foi necessário simular quatro modelos:

- a) **Modelo real com ventilação natural:** esse modelo apresenta os materiais e dimensões reais do projeto da edificação. É utilizado para a determinação do percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$) e das temperaturas operativas anuais máxima ($Tomáx_{UH}$) e mínima ($Tomín_{UH}$) da edificação real;
- b) **Modelo real sem ventilação natural:** esse modelo apresenta os materiais e dimensões reais do projeto da edificação, é modelado com sistema de condicionamento de ar. É utilizado para a determinação da Carga térmica de aquecimento ($CgTA_{UH}$) e a Carga Térmica de refrigeração ($CgTR_{UH}$) da edificação real;
- c) **Modelo de referência com ventilação natural:** esse modelo apresenta a mesma geometria do projeto real, porém, possui algumas alterações nos materiais, nas dimensões das janelas e nas espessuras de alguns elementos, todos esses valores são fornecidos pela norma e estão apresentados detalhadamente adiante. É utilizado para a determinação do percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa (PHF_{UH}) e das temperaturas operativas anuais máxima ($Tomáx_{UH}$) e mínima ($Tomín_{UH}$) da edificação de referência.

- d) **Modelo de referência sem ventilação natural:** assim como no modelo descrito no ponto c), este apresenta a mesma geometria do projeto real com algumas alterações nos materiais, nas dimensões das janelas e nas espessuras de alguns elementos. É modelado com sistema de condicionamento de ar e é utilizado para a determinação da Carga térmica de aquecimento ($CgTA_{UH}$) e a Carga Térmica de refrigeração ($CgTR_{UH}$) da edificação de referência.

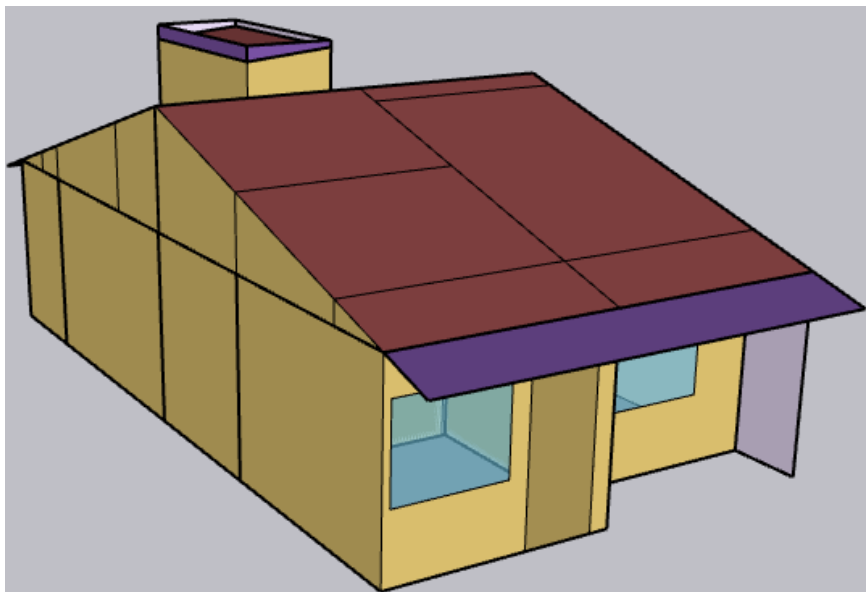
6.2.1 Software EnergyPlus

O *EnergyPlus* (versão 9.4) é um software gratuito de código aberto, testado de acordo com a metodologia da ASHRAE 140 (ASHRAE, 2020), é utilizado para simulação da carga térmica e análise da eficiência energética de edificações e seus sistemas, podendo auxiliar na tomada de decisões em relação às opções de eficiência energética na fase de projeto ou alterações em edifícios já construídos (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020).

Das diversas interfaces gráficas disponíveis para o *EnergyPlus*, foi utilizado o *Euclid* (versão 0.9.4.3), uma extensão gratuita para *Sketchup*, que auxilia na criação e alteração da geometria da edificação e possibilita a visualização tridimensional do modelo (BIG LADDER SOFTWARE, 2021).

A **Figura 13** apresenta a vista frontal da edificação modelada utilizando o *Euclid*, os elementos transparentes são representados na cor azul, portas opacas em marrom, paredes em amarelo, pisos em cinza, coberturas em vermelho e elementos de sombreamento são representados com uma face roxa e a outra face branca.

Figura 13 – Vista da edificação no *SketchUp*.



Fonte: A autora, 2022.

A **Figura 13** exibe o modelo com telha cerâmica, os modelos foram construídos com a inclinação correspondente ao tipo da telha, conforme os valores da **Tabela 13**.

Após a modelagem da volumetria no *Euclid*, são inseridos no *EnergyPlus* dados climáticos e a localização da edificação, características de equipamentos elétricos e sistemas de iluminação, propriedades térmicas e dimensões dos materiais utilizados nos sistemas construtivos, padrões de ocupação e cargas internas dos ocupantes, condições para a ativação de sistemas de condicionamento de ar e abertura de portas e janelas.

O software gera um modelo matemático que provê uma representação aproximada do edifício, sendo capaz de modelar efeitos de inércia térmica, trocas de calor entre a edificação e o solo, calcular cargas térmicas latente e sensível, simular o sombreamento proveniente de elementos externos e simula os efeitos da ventilação cruzada (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020).

Após o término da modelagem, o *EnergyPlus* fornece dados de saída, respectivos às 8760 horas do ano, das variações da temperatura operativa, das cargas térmicas de refrigeração e de aquecimento do edifício, dentre outras informações.

6.2.2 Dados Climáticos

Para a simulação pelo software *EnergyPlus*, é necessário a inserção de um arquivo EPW, um formato de arquivo que contém dados climáticos, específicos para cada localização, que fornecem dados horários ao longo do ano, ao total, 8760 valores para cada propriedade, como temperatura de bulbo seco, umidade relativa, pressão atmosférica, entre outros. Estes valores foram coletados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), através de uma estação climatológica localizada em Foz do Iguaçu, entre os anos de 2000 e 2010 (CLIMATE ONE BUILDING, 2021).

6.2.3 Propriedades Térmicas dos Materiais

Para a realização das simulações no *EnergyPlus*, é necessário realizar a inserção dos dados dos materiais utilizados no modelo, como espessura, absorvância solar, absorvância em ondas longas, condutividade e densidade. A NBR 15575-1 (ABNT, 2021a) detalha os valores das propriedades térmicas para a telha de fibrocimento, que deve ser utilizada nos modelos de referência, esses dados foram adotados para os modelos reais também. Os dados das outras telhas foram determinados através da NBR 15520 (ABNT, 2005c), que apresenta a condutividade térmica, calor específico, densidade de massa aparente e absorvância para alguns materiais de construção.

Os valores de absorvância das telhas de concreto e telha cerâmica, valores não definidos pelas normas citadas acima, foram obtidos de uma base de dados de absorvância solar (DORNELLES, 2021). As propriedades térmicas dos materiais transparentes foram obtidas da base de dados do próprio *EnergyPlus*.

Alguns elementos construtivos possuem seções transversais complexas, como lajes e paredes, por exemplo, por isso esses elementos foram inseridos no *EnergyPlus* através de modelos equivalentes desenvolvidos por Weber (WEBER, 2018). Para a composição das paredes foi considerada uma câmara de ar correspondente ao bloco cerâmico utilizado, com resistência térmica igual a $0,175 \text{ m}^2\cdot\text{k}/\text{W}$ (WEBER, 2018).

Na **Tabela 14** podem ser observados os valores adotados das propriedades dos materiais opacos utilizados na composição dos elementos construtivos.

Tabela 14 – Propriedades físicas dos materiais opacos.

Elemento	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.k)	Densidade (Kg/m³)	Calor específico (J/Kg.K)	Absortância à radiação visível	Absortância à radiação solar
Piso	Piso cerâmico	0,0075	1,05	2000	920	0,7	0,7
	Contrapiso	0,05	1,75	2400	1000	0,7	0,7
Parede	Reboco	0,025	1,15	2000	1000	0,7	0,7
	Tijolo cerâmico 9x14x24cm	0,0134	0,9	1600	920	0,7	0,7
Cobertura 01	Telha cerâmica	0,01	1,05	2000	920	0,62	0,47
Cobertura 02	Telha fibrocimento	0,006	0,65	1900	840	0,65	0,65
Cobertura 03	Telha de concreto plana	0,04	1,75	2200	1000	0,74	0,73
Cobertura 04	Chapa metálica galvanizada	0,0005	176,9	4680	655	0,25	0,25
	EPS	0,03	0,04	25	142	0,7	0,7
Porta interna	Madeira	0,04	0,15	400	2300	0,25	0,25
Porta externa	Madeira	0,04	0,29	900	1340	0,4	0,4
Laje	Concreto	0,04	1,75	2200	1000	0,7	0,7
	Concreto + EPS	0,07	0,223	373	1000	0,7	0,7
	Argamassa	0,02	1,15	2000	1000	0,7	0,7
Forro	Forro PVC	0,01	0,071	273	960	0,7	0,7

Fonte: DORNELES, 2021; NBR 15520, 2005c; WEBER, 2018.

A NBR 15575-1 (ABNT, 2021a) recomenda os valores de transmitância térmica e fator solar para os elementos transparentes, porém, o programa *EnergyPlus* solicita a inserção de outras propriedades, como refletância, emissividade, condutividade, entre outros. Estes valores foram obtidos através dos modelos de arquivo IDF disponibilizados pelo LabEEE (Erro! Fonte de referência não encontrada.).

Tabela 15 – Propriedades físicas dos elementos transparentes.

Material	Propriedades
Transmitância térmica (W/m ² K)	5,70
Fator solar	0,87
Espessura (mm)	3,00
Transmitância à radiação solar (incidência normal)	0,84
Refletância à radiação solar (incidência normal)	0,08
Transmitância à radiação solar no espectro visível	0,90
Refletância à radiação visível (incidência normal)	0,08
Emissividade em ondas longas	0,84
Condutividade térmica (W/mK)	0,90

Fonte: LABEEE, 2022, ABNT, 2021a.

A composição dos elementos que possuem dois ou mais materiais pode ser observada na **Tabela 16**.

Tabela 16 – Composição equivalente dos elementos construtivos.

Elemento	Composição de materiais
Piso	Piso cerâmico + Contrapiso
Parede	Reboco + Tijolo cerâmico 9x14x24cm + Câmara de ar + Tijolo cerâmico 9x14x24cm + Reboco
Laje	Concreto + (Concreto + EPS) + Argamassa
Chapa metálica galvanizada	Chapa metálica galvanizada + EPS + Chapa metálica galvanizada

Fonte: Weber, 2018.

De acordo com o método de cálculo descrito na norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005c), foram calculadas as transmitâncias térmicas (U) de cada modelo, os resultados estão apresentados na **Tabela 17**.

Tabela 17 – Transmitância térmica de cada modelo.

Sigla do modelo	Transmitância térmica (W/m ² .K)
CePVC	2,70
CeLa	1,74
CoPVC	2,68
CoLa	1,73
FibPVC	2,78
FibLa	1,77
PlaPVC	2,78
PlaLa	1,77
SanPVC	0,91
SanLa	0,77

Fonte: A autora, 2022.

6.2.4 Cargas Internas e Padrões de Ocupação

A norma especifica horários de ocupação e cargas internas das salas e dormitórios (ambientes de permanência prolongada – APP). Para todos os dias do ano é considerada a ocupação de salas e dormitórios apresentada na **Tabela 19**, onde 100% da ocupação de cada dormitório é composta por dois ocupantes, e 100% da ocupação das salas é a soma da ocupação de todos os dormitórios. Com calor dissipado por cada ocupante e fração radiante descritos na **Tabela 18**.

Tabela 18 – Taxa metabólica e fração radiante para os usuários.

Ambiente	Período de uso	Atividade realizada	Calor produzido por área de superfície corporal (W/m ²)	Calor produzido por uma pessoa com 1,8m ² de área de superfície corporal (W)	Fração radiante
Dormitório	00:00 - 07:59 e 22:00 - 23:59	Dormindo ou descansando	45	81	0,3
Sala	14:00 - 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,3

Fonte: ABNT, 2021a, p. 30.

A norma prescreve a utilização do sistema de iluminação em todos os dias do ano, em todos ambientes de permanência prolongada, com densidade de potência de instalação de iluminação (DPI) de 5 W/m², fração radiante igual a 0,32 e fração visível igual a 0,23. O período de utilização pode ser observado na **Tabela 19** (ABNT, 2021a).

Tabela 19 – Padrões de ocupação e iluminação horários dos APP.

Horário	Ocupação			Iluminação		
	Dormitório (%)	Sala (%)	Uso misto (%)	Dormitório (%)	Sala (%)	Uso misto (%)
0:00 - 5:59	100	0	100	0	0	0
06:00 - 07:59	100	0	100	100	0	100
08:00 - 13:59	0	0	0	0	0	0
14:00 - 15:59	0	50	50	0	0	0
16:00 - 17:59	0	50	50	0	100	100
18:00 - 21:59	0	100	100	0	100	100
22:00 - 23:59	100	0	0	100	0	100

NOTA 1 Considerar a quantidade de dois ocupantes (100 % da ocupação) por dormitório existente na edificação, excluindo-se as dependências de empregados.

NOTA 2 O valor total (100 %) de ocupantes da sala é determinado em função do número de dormitórios. Para cada dormitório, considerar dois ocupantes na sala, respeitando o limite máximo de quatro ocupantes.

Na ocorrência de maior número de ocupantes, estes são desconsiderados no período de ocupação da sala, respeitando-se o limite de quatro ocupantes.

NOTA 3 Na condição de uso misto, o valor de ocupação igual a 100 % é equivalente a dois ocupantes no APP.

Fonte: ABNT, 2021a, pag. 31-33.

Considera-se que os equipamentos elétricos são utilizados em todos os dias do ano, incluindo finais de semana, apenas em salas e ambientes de uso misto. Com horário de uso das 14:00 às 21:59 horas, potência de 120W e fração radiante igual a 0,30 (ABNT, 2021a).

6.2.5 Ventilação Natural

A norma NBR 15575-1 (ABNT, 2021a) determina que, na simulação, as janelas devem ser consideradas abertas quando o APP estiver ocupado e quando a temperatura de bulbo seco interna for superior a 19°C e inferior à temperatura de bulbo seco externa. As

janelas dos APT devem manter-se fechadas o ano inteiro, com exceção de janelas de banheiros, as quais deve-se considerar constantemente abertas.

Mesmo fechadas, ocorre fluxo de ar em janelas e portas, através de infiltração por frestas, portanto, adota-se os coeficientes da **Tabela 20**, se estes coeficientes forem disponibilizados pelo fabricante das esquadrias, os dados fornecidos pelo fabricante são utilizados nos modelos reais e os dados fornecidos pela norma são utilizados nos modelos de referência (ABNT, 2021a).

Tabela 20 – Descrição dos parâmetros para ventilação natural de portas e janelas.

Parâmetros	Portas	Janelas
Coeficiente de fluxo de ar por frestas, quando a abertura está fechada ($\text{Kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$)	0,0024	0,00063
Expoente de fluxo de ar por frestas quando a abertura está fechada	0,59	0,63
Coeficiente de descarga da abertura	0,6	0,6

Fonte: ABNT, 2021a, p. 34.

As portas internas entre ambientes de permanência prolongada e ambientes de permanência transitória devem ser consideradas abertas, com exceção das portas de banheiros, que, assim como portas externas, devem ser consideradas constantemente fechadas (ABNT, 2021a).

6.2.6 Modelos sem Ventilação Natural

Nos modelos sem ventilação natural, com exceção de janelas de banheiros, que permanecem abertas, todas as portas e janelas devem ser consideradas fechadas, durante todos os dias do ano. Nesses modelos também deve-se considerar a infiltração por frestas e os coeficientes apresentados na **Tabela 20**, apresentada anteriormente

Adota-se que o sistema de refrigeração é acionado nos períodos em que o APP estiver ocupado (**Tabela 19**), com temperatura de *setpoint* de refrigeração igual a 23 °C. Se as temperaturas externas da edificação forem compreendidas no Intervalo 1 da **Tabela 4**, ou seja, se média anual da temperatura externa de bulbo seco for inferior a 25 °C, considera-se

também um sistema de aquecimento, com temperatura de setpoint de aquecimento de 21 °C e acionamento durante os períodos ocupação do APP (ABNT, 2021a).

A média anual da temperatura externa de bulbo seco obtida através do arquivo EPW de Foz do Iguaçu é igual a 21,54°C, portanto, a faixa de temperatura operativa deve ser de 18°C a 26°C e o modelo estudado deve contar com sistema de refrigeração e aquecimento.

6.2.7 Modelos de Referência

Como foi abordado no tópico 4.2.2 (Modelo Real e Modelo de Referência) deste trabalho, a norma fornece os valores das propriedades dos materiais que devem ser utilizados nos modelos de referência, como a espessura das paredes, a condutividade térmica das telhas, entre outros. As coberturas, paredes, pisos e portas foram modelados com a mesma geometria dos modelos reais, com alterações nas propriedades físicas e espessuras dos elementos, utilizando os valores descritos na NBR 15575-1 e apresentados na **Tabela 3** (ABNT, 2021a).

Seguindo as orientações da norma NBR 15575-1 (ABNT, 2021a), nos modelos de referência, os elementos transparentes dos ambientes de permanência prolongada devem ser redimensionados, de forma que a área de superfície dos elementos seja igual a 17% da área do piso do APP, e a área efetiva de abertura para ventilação igual a 6,65% da área do piso do APP. Buscando atender ao primeiro critério, para cada elemento transparente dos APP, foram calculadas novas alturas (**Tabela 21**).

Tabela 21 – Redimensionamento das áreas de elementos transparentes.

Percentual de elementos transparentes do APP (Pt,app)						
APP	Área APP (m²)	Elemento	Valores iniciais		Valores redimensionados	
			Dimensão do elemento (m)	Pt,app (%)	Dimensão do elemento (m)	Pt,app (%)
Dormitório 1	12,14	Janela 1	1,5x1,2	14,83	1,5x1,376	17,00%
Dormitório 2	11,10	Janela 2	1,5x1,2	16,22	1,5x1,258	17,00%
Sala de estar e sala de jantar	16,40	Janela 3	1,5x1,2	14,63	1,5x2,091	17,00%
		Janela 4	0,6x1,0		0,6x1,162	

Fonte: A autora, 2022.

Em seguida, utilizando as dimensões calculadas acima, foram realizadas as verificações do percentual de abertura para ventilação (**Tabela 22**).

Tabela 22 – Verificação da área efetiva de abertura para ventilação.

Percentual de abertura para ventilação do APP ($P_{v,app}$)					
APP	$A_{p,app}$ (m ²)	Área dos elementos transparentes (m ²)	Área dos elementos opacos (m ²)	Área efetiva de ventilação (m ²)	$P_{v,app}$ (%)
Dormitório 1	12,140	2,064	-	0,929	7,65%
Dormitório 2	11,100	1,887	-	0,849	7,65%
Sala de estar e sala de jantar	16,400	2,091	1,890	2,105	12,84%
		0,697			

Fonte: A autora, 2022.

Como a área redimensionada dos elementos atenderam aos dois critérios, as dimensões foram atualizadas nos modelos de referência, porém, o centro geométrico de cada abertura foi mantido. As portas constituídas exclusivamente por elementos opacos e os elementos transparentes dos ambientes de permanência transitória, foram modelados com a mesma geometria e propriedades térmicas dos elementos do modelo real.

7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

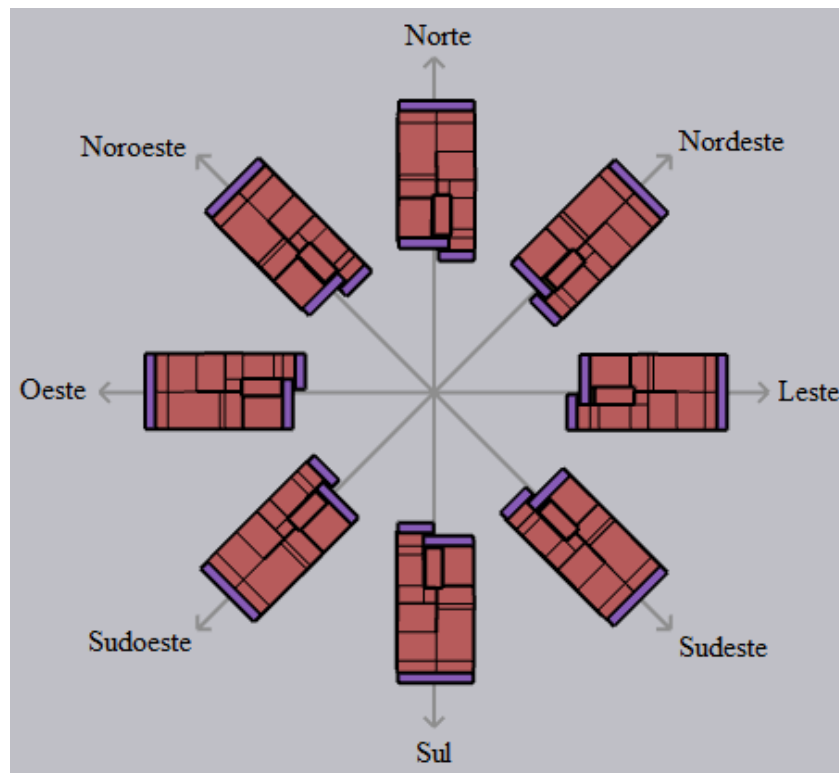
Este capítulo é composto pela apresentação e análise dos resultados das simulações computacionais e a avaliação de cada caso, de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2021a).

Seguindo o procedimento descrito no **Tópico 6**, foram executadas as simulações no software *EnergyPlus*. No tópico 7.1 são apresentados os resultados da simulação de um modelo considerando oito orientações da fachada da edificação (8 azimutes diferentes), sendo norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste. Essa primeira etapa da simulação foi realizada para determinar o azimuth a ser considerado nas simulações seguintes.

Nas análises realizadas, reconhece-se por melhor desempenho térmico, o caso que resultou em maior percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa, apresentou as maiores temperaturas nos meses mais frios e as menores nos meses mais quentes e ainda, consumiu a menor carga térmica no período analisado.

7.1 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM VARIAÇÕES DO AZIMUTE

Definiu-se que, com o azimuth igual a zero, a fachada frontal (fachada que contém a porta da sala de estar) está orientada para o norte, em seguida, foram escolhidos outros 7 azimutes, cada um com acréscimo de 45°. Nessas simulações utilizou-se a tipologia com telha fibrocimento com forro PVC, os oito modelos utilizados podem ser observados na **Figura 14**.

Figura 14 – Vista superior dos modelos com variação no azimuth.

Fonte: A autora, 2022.

Na **Tabela 23** são apresentados os valores do percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa, das temperaturas operativas anuais máxima e mínima e da carga térmica total da UH, obtidos para cada uma das oito simulações realizadas.

Tabela 23 – Resultados da simulação de cada orientação.

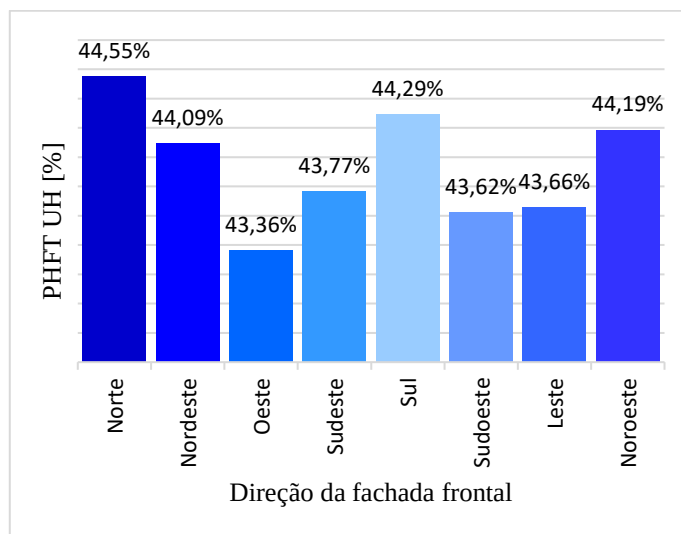
Orientação	Norte	Nordeste	Oeste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Leste	Noroeste
Azimuth	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
PHFT UH	44,55%	44,03%	43,26%	43,63%	44,23%	43,53%	43,57%	44,10%
CgTR UH [kWh]	5025,54	5135,89	5172,73	5077,19	5022,29	5089,79	5130,82	5035,25
CgTA UH [kWh]	270,17	285,52	301,05	294,82	282,24	290,61	297,59	284,46
Tomáx,UH [°C]	36,46	36,72	37,10	36,85	36,61	36,83	36,99	36,76
Tomin,UH [°C]	14,58	14,55	14,49	14,55	14,55	14,55	14,56	14,54
CgTT UH [kWh]	5295,71	5421,41	5473,78	5372,01	5304,54	5380,40	5428,41	5319,71
Desvio padrão PHFT UH	0,0022	0,0005	0,0020	0,0006	0,0012	0,0011	0,0010	0,0009
Desvio padrão CgTT UH [kWh]	21,7980	16,0305	34,0170	2,1807	24,9771	0,8973	18,7433	20,7323

Fonte: A autora, 2022.

Observando o desvio padrão, nota-se que a variação do azimute não gerou diferença significativa no desempenho térmico da edificação, supõe-se que esse fenômeno ocorra devido à configuração da planta baixa. Como a tipologia estudada é uma edificação geminada, as duas fachadas com maior área não estão expostas ao ambiente externo, sendo consideradas adiabáticas na simulação, além disso, as outras duas fachadas possuem, aproximadamente, a mesma proporção de área de elementos transparentes e aberturas.

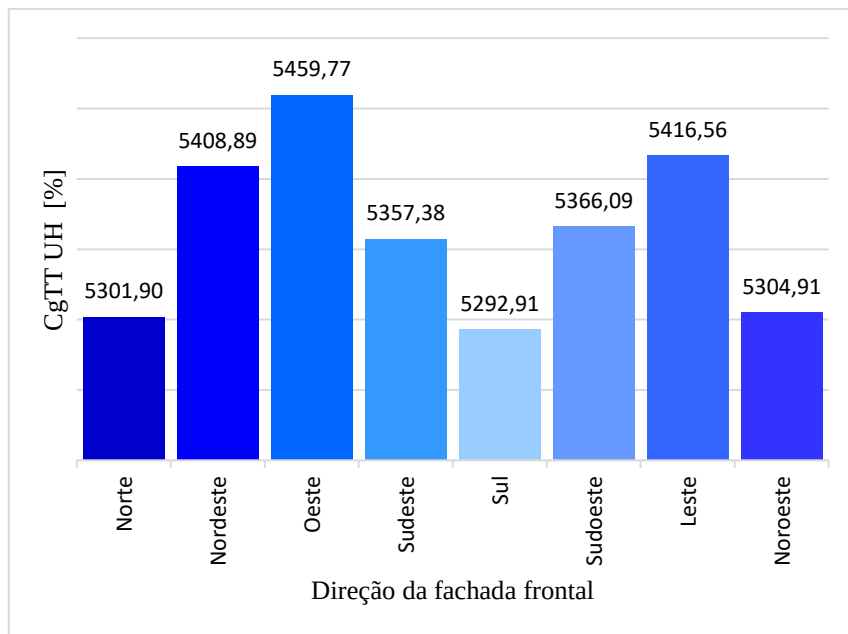
A **Figura 15** apresenta o PHFT UH (percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa da unidade habitacional) de cada caso simulado e a **Figura 16** apresenta os valores de carga térmica total.

Figura 15 – PHFT UH em relação à direção da fachada frontal.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 16 – $CgTT_{UH}$ em relação à direção da fachada frontal.



Fonte: A autora, 2022.

Por ser o caso que apresenta o maior PHFT UH, maior temperatura mínima e menor temperatura máxima, decidiu-se considerar que a fachada frontal está orientada para o norte, ou seja, azimuth igual a zero, nas simulações seguintes.

7.2 RESULTADOS

7.2.1. Temperatura

Após as simulações no *EnergyPlus*, dentre as 8760 temperaturas obtidas para cada ambiente de permanência prolongada da tipologia, através do programa *Excel*, foram determinadas as temperaturas mínimas e máximas de cada caso.

Na **Tabela 24** apresentam-se os valores de temperatura mínima para cada mês para os modelos com forro de PVC, e na **Tabela 25** os valores para os modelos com laje.

Tabela 24 – Temperatura operativa mínima - PVC.

Temperatura operativa mínima - Tomín _{UH} [°C]						
Mês	Telha sanduíche	Telha Cerâmica	Telha Concreto	Telha fibrocimento	Telha fibrocimento com platibanda	Desvio padrão
Janeiro	25,27	25,49	26,03	25,43	25,58	0,253
Fevereiro	24,76	24,72	25,11	24,73	24,96	0,156
Março	24,71	24,94	25,61	24,90	25,32	0,324
Abril	21,69	21,25	21,61	21,24	21,51	0,185
Maio	17,83	17,08	17,54	16,97	17,22	0,315
Junho	14,95	13,85	14,25	13,84	14,02	0,414
Julho	14,79	13,84	14,30	13,70	13,93	0,394
Agosto	15,62	14,74	15,08	14,65	14,82	0,349
Setembro	17,93	17,37	17,71	17,28	17,51	0,235
Outubro	17,93	17,39	17,77	17,34	17,55	0,226
Novembro	23,59	23,59	23,97	23,56	23,77	0,155
Dezembro	23,94	24,29	24,98	24,24	24,44	0,344

Fonte: A autora, 2022.

Tabela 25 – Temperatura operativa mínima mensal - Laje.

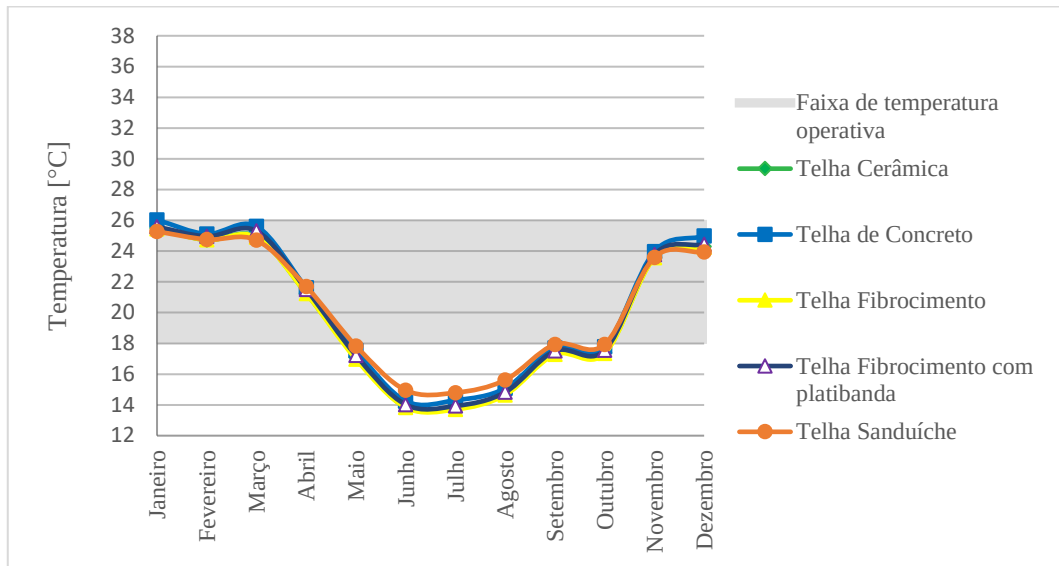
Temperatura operativa mínima - $T_{mínUH}$ [°C]						
Mês	Telha sanduíche	Telha Cerâmica	Telha Concreto	Telha fibrocimento	Telha fibrocimento com platibanda	Desvio padrão
Janeiro	25,77	26,26	26,69	26,30	26,46	0,303
Fevereiro	25,16	25,32	25,73	25,35	25,60	0,206
Março	25,22	25,91	26,36	25,97	26,32	0,412
Abril	22,21	22,03	22,36	22,03	22,32	0,142
Maio	18,53	18,11	18,49	18,09	18,30	0,184
Junho	15,69	15,08	15,42	15,03	15,22	0,243
Julho	15,46	15,01	15,41	14,94	15,15	0,211
Agosto	16,23	15,75	16,13	15,71	15,90	0,206
Setembro	18,27	18,10	18,31	18,09	18,23	0,091
Outubro	18,27	18,08	18,34	18,07	18,23	0,106
Novembro	23,97	24,12	24,48	24,18	24,36	0,177
Dezembro	24,50	25,27	25,80	25,30	25,48	0,427

Fonte: A autora, 2022.

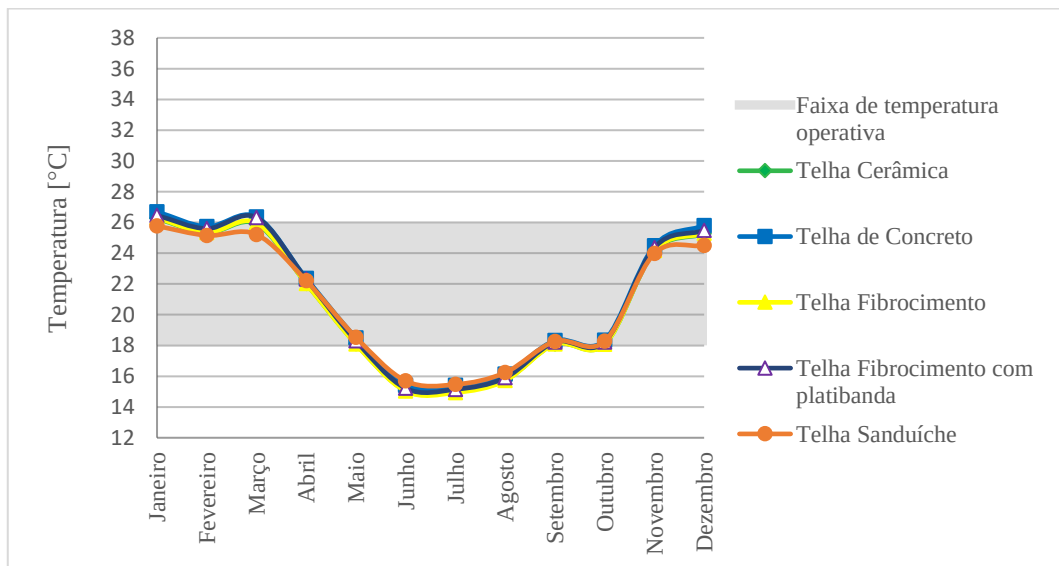
Pode-se notar que no verão (dezembro a março), para os dois tipos de forro, a telha de concreto apresenta as maiores temperaturas mínimas, interpreta-se que esse resultado se dá devido à alta absorção térmica dessa telha.

No inverno (junho a agosto) a telha que apresenta as menores temperaturas mínimas é a telha fibrocimento, como essa telha possui alta transmitância térmica, expressa maior sensibilidade às mudanças externas de temperatura.

Para melhor visualização, foram elaborados dois gráficos, a **Figura 17** apresenta os resultados dos modelos com PVC e a **Figura 18** os casos com laje.

Figura 17 – Temperatura operativa mínima mensal – PVC.

Fonte: A autora, 2022.

Figura 18 – Temperatura operativa mínima mensal – Laje.

Fonte: A autora, 2022.

Observando os gráficos, nota-se que os valores das temperaturas mínimas ao longo do ano são similares entre os diversos modelos, a maior disparidade pode ser vista nos modelos com telha sanduíche (com e sem laje), que nos meses com as maiores temperaturas mínimas (verão), apresentam os menores valores, e nos meses mais frios (inverno), apresentam os maiores valores.

Nos modelos com laje e com forro PVC, as maiores temperaturas mínimas são apresentadas em janeiro, nas coberturas com telha de concreto e de fibrocimento com platibanda. Em junho ocorrem as menores temperaturas mínimas, tanto nos modelos com laje como nos modelos com PVC, nas coberturas com telha cerâmica e telha de fibrocimento.

Para todos os níveis de desempenho (mínimo, intermediário ou superior), na avaliação da $T_{\min}$ é observado se a temperatura mínima do modelo real é maior ou igual à temperatura mínima do modelo de referência após a subtração de 1°C (ABNT, 2021a), essa verificação foi apresentada na **Tabela 26**.

Tabela 26 – Verificação do critério $T_{\min}$.

Critério $T_{\min}$					
Telha		$T_{\min_{UH,real}}$ [°C]	$T_{\min_{UH,ref}}$ [°C]	$\Delta T_{\min}$ [°C]	Níveis: mínimo, intermediário e superior
					$T_{\min_{UH,real}} \geq T_{\min_{UH,ref}} - \Delta T_{\min}$
PVC	Cerâmica	14,74	15,02	1	Atende
	Concreto	15,22	15,02	1	Atende
	Fibrocimento	14,59	14,96	1	Atende
	Fibrocimento com platibanda	14,86	15,05	1	Atende
	Sanduiche	15,81	14,96	1	Atende
Laje	Cerâmica	16,10	15,02	1	Atende
	Concreto	16,54	15,02	1	Atende
	Fibrocimento	16,06	14,96	1	Atende
	Fibrocimento com platibanda	16,27	15,05	1	Atende
	Sanduiche	16,51	14,929	1	Atende

Fonte: A autora, 2022.

Como o critério de avaliação da temperatura operativa mínima descrita pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021a) é o mesmo para todos os níveis de desempenho, assim, todos os modelos foram aprovados no nível superior.

Da mesma forma, foi realizada a verificação das temperaturas máximas. Os valores obtidos após o processamento dos resultados podem ser vistos na **Tabela 27** e na **Tabela 28**, para os modelos com PVC e laje, respectivamente.

Tabela 27 – Temperatura operativa máxima - PVC.

Temperatura operativa máxima - Tomáx _{UH} [°C]						
Mês	Telha sanduíche	Telha Cerâmica	Telha Concreto	Telha fibrocimento	Telha fibrocimento com platibanda	Desvio padrão
Janeiro	31,21	34,35	34,97	35,00	35,26	1,504
Fevereiro	32,56	35,75	36,50	36,42	36,70	1,548
Março	30,55	33,32	33,97	34,02	34,69	1,445
Abril	29,81	32,26	32,82	32,85	33,56	1,292
Maio	25,89	27,06	27,47	27,47	28,12	0,737
Junho	22,03	22,22	22,59	22,22	22,42	0,190
Julho	22,83	23,28	23,62	23,39	23,60	0,287
Agosto	25,44	27,04	27,47	27,45	27,88	0,853
Setembro	26,46	28,35	28,80	28,65	29,05	0,928
Outubro	29,02	32,46	33,22	33,09	33,44	1,644
Novembro	31,15	34,18	34,99	34,72	35,06	1,468
Dezembro	30,68	34,10	34,75	34,86	35,12	1,648

Fonte: A autora, 2022.

Tabela 28 – Temperatura operativa máxima - Laje.

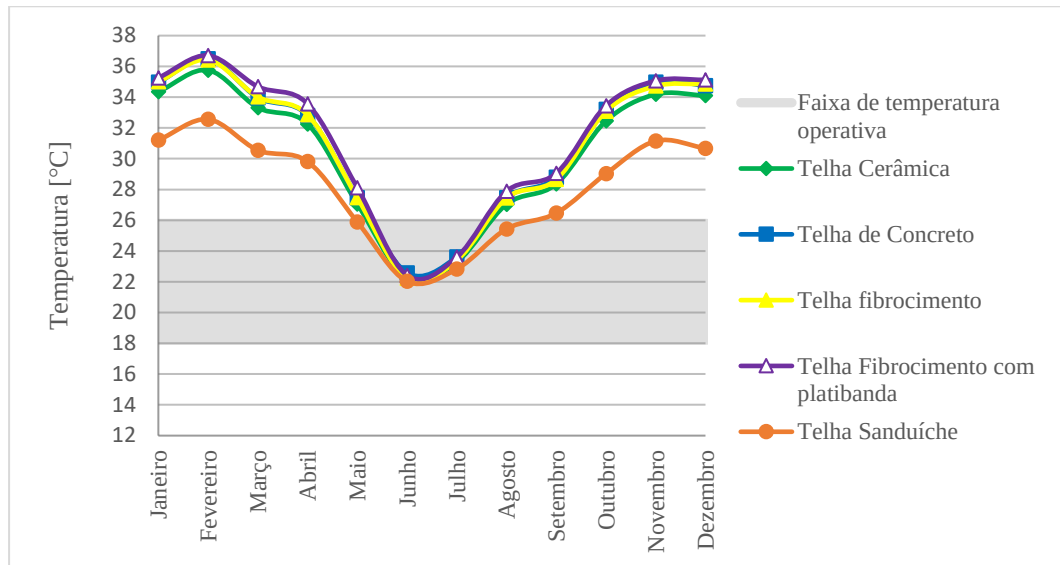
Temperatura operativa máxima - Tomáx _{UH} [°C]						
Mês	Telha sanduíche	Telha Cerâmica	Telha Concreto	Telha fibrocimento	Telha fibrocimento com platibanda	Desvio padrão
Janeiro	30,79	32,77	33,13	33,18	33,47	0,964
Fevereiro	32,12	34,22	34,58	34,62	34,93	1,014
Março	30,17	31,99	32,28	32,35	32,77	0,904
Abril	29,42	31,11	31,37	31,40	31,90	0,850
Maio	25,60	26,42	26,82	26,66	27,11	0,512
Junho	21,90	22,22	22,35	22,31	22,45	0,189
Julho	22,52	23,05	23,22	23,18	23,35	0,290
Agosto	25,08	26,33	26,57	26,60	26,98	0,650
Setembro	26,10	27,37	27,61	27,60	27,98	0,649
Outubro	28,56	30,82	31,27	31,24	31,60	1,099
Novembro	30,71	32,87	33,32	33,24	33,58	1,041
Dezembro	30,30	32,51	32,92	32,95	33,20	1,060

Fonte: A autora, 2022.

Diferentemente das temperaturas mínimas, a variação das temperaturas máximas dos diversos modelos pode ser claramente notada através dos valores de desvio padrão, principalmente nos meses com as maiores temperaturas máximas. O comportamento

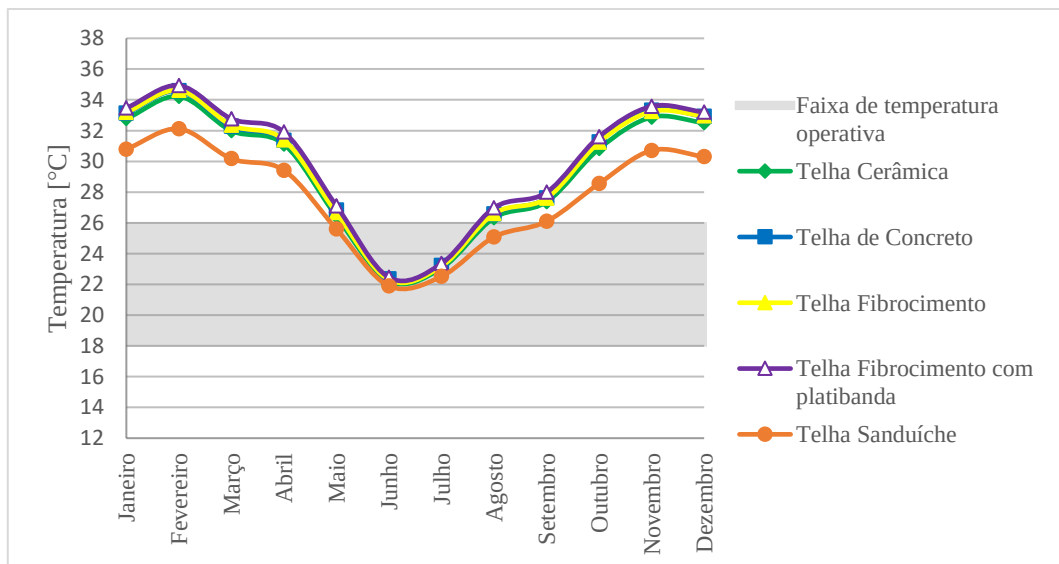
das temperaturas máximas ao longo dos meses pode ser observado na **Figura 19** e na **Figura 20**.

Figura 19 – Temperatura operativa máxima mensal - PVC.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 20 – Temperatura operativa máxima mensal - Laje.



Fonte: A autora, 2022.

Analisando os gráficos e desvios padrões pode-se constatar que a divergência entre as temperaturas é superior nos meses mais quentes.

As temperaturas máximas variam entre 22,03°C (telha sanduíche em junho) e 36,70°C (telha fibrocimento com platibanda em fevereiro) nos modelos com forro de PVC, enquanto que nos casos com laje o valor mínimo obtido é 21,90°C (telha sanduíche em junho) e o máximo é 34,93°C (telha fibrocimento com platibanda em fevereiro). Observando ambos os gráficos, pode-se perceber como a variação dos tipos de telhas apresenta maior influência na temperatura interna nas tipologias sem laje.

O sistema de cobertura com laje é composto por vários elementos e possui espessura, calor específico e densidade maiores do que o sistema com forro de PVC, resultando em uma maior capacidade térmica, ou seja, a cobertura com laje requer maior quantidade de calor para apresentar variação na temperatura do sistema. Devido a esse fenômeno, as temperaturas internas, as variações de temperaturas ao longo do dia e a diferença de temperatura entre dois tipos diferentes de telha são inferiores se comparados aos valores dos modelos sem laje.

Para as temperaturas operativas máximas, deve-se verificar se a temperatura máxima do modelo real é superior à temperatura máxima do modelo de referência com acréscimo do delta de temperatura máxima ($\Delta T_{om\acute{a}x}$). Como para os critérios de avaliação, a ABNT NBR 15575-1 classifica casas geminadas situadas no mesmo lote como edificação multifamiliar (ABNT, 2021a), deve-se adotar $\Delta T_{om\acute{a}x}$ igual a 1 °C.

Esse é o único critério para avaliação das temperaturas máximas, assim, se cumpri-lo, a tipologia atende ao nível superior (ABNT, 2021a). A **Tabela 29** apresenta a verificação desse critério.

Tabela 29 – Verificação do critério Tomáx.

Critério Tomáx					
Telha		Tomáx _{UH,real} [°C]	Tomáx _{UH,ref} [°C]	Δtomáx [°C]	Tomáx _{UH,real} ≤ Tomáx _{UH,ref} + Δtomáx
PVC	Cerâmica	35,75	35,35	1	Atende
	Concreto	36,50	35,35	1	Não atende
	Fibrocimento	36,42	35,53	1	Atende
	Fibrocimento com platibanda	36,70	35,38	1	Não atende
	Sanduiche	32,56	35,50	1	Atende
Laje	Cerâmica	34,22	35,35	1	Atende
	Concreto	34,58	35,35	1	Atende
	Fibrocimento	34,62	35,53	1	Atende
	Fibrocimento com platibanda	34,93	35,38	1	Atende
	Sanduiche	32,12	35,50	1	Atende

Fonte: A autora, 2022.

Portanto, com exceção dos casos com telha de concreto e telha de fibrocimento com platibanda e forro PVC, os modelos atingiram o nível superior no critério de temperatura máxima.

7.2.1.2 Percentual de Horas de Ocupação da UH Dentro da Faixa de Temperatura Operativa

Neste critério são avaliados a quantidade de horas em que os ambiente de permanência prolongada estão em uso e apresentam temperaturas dentro da faixa de temperatura operativa. Como a média anual da temperatura externa de bulbo de Foz do Iguaçu é igual a 21,54°C, a faixa de temperatura operativa deve ser de 18°C a 26°C (ABNT, 2021a).

A **Tabela 30** mostra os valores obtidos de PHTH para cada telha ao longo do ano para os modelos com forro de PVC e a **Tabela 31** apresenta os valores para os modelos com laje.

Tabela 30 – Valores de PFT_{UH} para cada mês – PVC.

PHFT,UH [%]						
Mês	Telha					Desvio padrão
	Cerâmica	Concreto	Fibrocimento	Fibrocimento com platibanda	Sanduiche	
Janeiro	0,81	0,00	1,05	0,40	2,90	0,010
Fevereiro	2,41	1,52	2,41	2,14	3,21	0,005
Março	4,92	0,32	5,48	1,05	10,73	0,037
Abril	36,02	29,69	36,67	32,60	53,25	0,082
Maio	96,77	94,66	96,19	94,76	100,00	0,019
Junho	65,98	73,81	66,63	70,06	77,44	0,043
Julho	65,87	73,00	65,26	70,02	73,43	0,034
Agosto	89,09	89,72	87,88	87,68	94,86	0,026
Setembro	91,46	88,44	90,50	88,65	98,23	0,036
Outubro	67,62	58,97	65,87	61,17	87,80	0,102
Novembro	10,42	6,79	10,25	8,63	18,40	0,040
Dezembro	3,15	1,45	3,23	2,82	8,95	0,026
Média anual	44,82	43,47	44,55	43,60	52,73	0,035

Fonte: A autora, 2022.

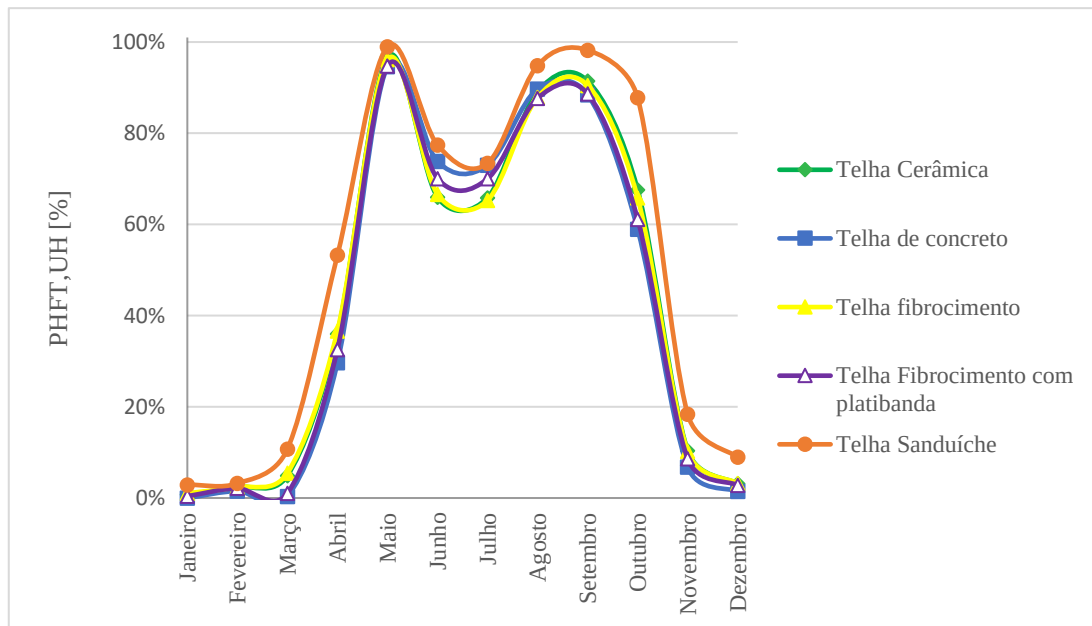
Tabela 31 – Valores de PFT_{UH} para cada mês – Laje.

PHFT,UH [%]						
Mês	Telha					Desvio padrão
	Cerâmica	Concreto	Fibrocimento	Fibrocimento com platibanda	Sanduiche	
Janeiro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,002
Fevereiro	1,25	0,18	1,16	0,27	2,23	0,008
Março	0,08	0,00	0,08	0,00	4,35	0,017
Abril	33,92	27,83	31,60	25,77	53,15	0,098
Maio	97,88	96,98	97,18	95,67	100,00	0,014
Junho	78,21	84,77	79,88	84,19	83,98	0,026
Julho	75,24	80,97	76,29	80,52	79,38	0,023
Agosto	95,08	96,67	94,64	95,28	96,63	0,008
Setembro	94,96	93,29	93,63	90,67	99,69	0,030
Outubro	74,40	68,73	70,67	63,93	90,81	0,092
Novembro	6,65	4,10	6,21	5,13	13,73	0,034
Dezembro	0,89	0,24	0,56	0,48	5,08	0,018
Média anual	46,84	46,46	46,28	45,46	52,77	2,64

Fonte: A autora, 2022.

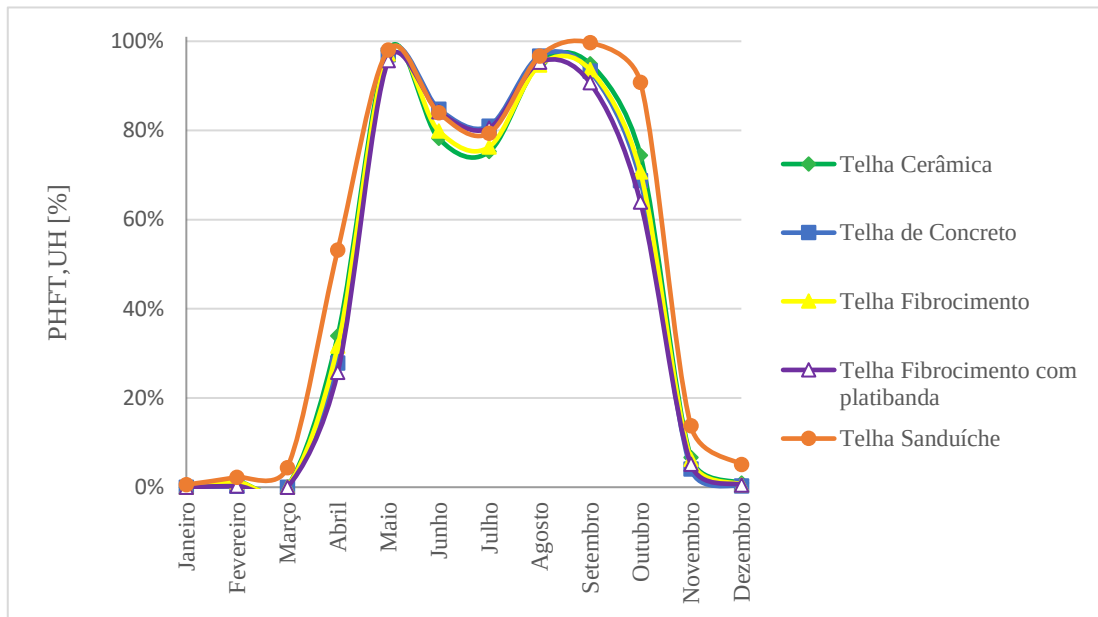
Os resultados obtidos apresentados de forma gráfica mostram como o PHFT (percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa) apresenta grande variação ao longo do ano (**Figuras 21 e 22**). Como pode-se observar, os modelos apresentam bom comportamento térmico no inverno. Em julho, o mês com menores temperaturas mínimas, a média do PHFT para os modelos com PVC é de 69,51% e 78,48% para os modelos com laje. Enquanto isso, em fevereiro, mês com as maiores temperaturas máximas, a média do PHFT para os modelos com PVC é de 2,34% e 1,018% para as tipologias com laje (**Figuras 21 e 22**).

Figura 21 – Valores de $PHFT_{UH}$ ao longo do ano – PVC.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 22 – Valores de $PFTH_{UH}$ ao longo do ano – Laje.



Fonte: A autora, 2022.

Nos meses com as maiores temperaturas, novembro a abril, os modelos com PVC apresentam maior $PFHT$, do que os modelos com laje. Analisando o comportamento horário das temperaturas nesse período, nota-se que durante a noite os modelos sem laje apresentam temperaturas menores, que os modelos com laje. Isso ocorre porque devido à maior resistência e capacidade térmica dos elementos que compõe a laje, a perda de calor do ambiente interno para o externo é inferior, se comparado com a perda do sistema com forro PVC.

Ao fazer a verificação do critério $PFTH_{UH}$, observa-se que para todos os casos foi atendido o nível mínimo de desempenho térmico (**Tabela 32**).

Tabela 32 – Verificação do critério $PHFT_{UH}$ - nível mínimo.

Critério PHFT - nível mínimo				
Cobertura		$PHFT_{UH,real} [\%]$	$PHFT_{UH,ref} [\%]$	$PHFT_{UH,real} > 0,9 * PHFT_{UH,ref}$
PVC	Cerâmica	44,82%	41,78%	Atende
	Concreto	43,47%	41,78%	Atende
	Fibrocimento	44,55%	41,76%	Atende
	Fibrocimento com platibanda	43,60%	42,23%	Atende
	Sanduiche	52,73%	41,71%	Atende
Laje	Cerâmica	46,84%	41,78%	Atende
	Concreto	46,46%	41,78%	Atende
	Fibrocimento	46,28%	41,76%	Atende
	Fibrocimento com platibanda	45,46%	42,23%	Atende
	Sanduiche	52,77%	41,71%	Atende

Fonte: A autora, 2022.

Nota-se que a telha com melhor comportamento foi a telha sanduíche, com 7,91% (casos com PVC) e 5,93% (casos com laje) de diferença entre ela e a telha cerâmica, telha com o segundo melhor PHFT (percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa), as demais telhas não apresentam variações tão significativas entre si.

Observando as tipologias, sabemos que a única diferença entre os modelos de referência com telha fibrocimento sem platibanda e fibrocimento com platibanda é a presença da platibanda, entre os dois modelos a tipologia com platibanda apresenta o melhor PHFT, esse resultado se dá ao fato de que a platibanda produz sombreamento em certa área da cobertura, assim parte da radiação será absorvida pela platibanda e transmitida por condução ao interior da edificação, porém, em menor velocidade que a radiação que incide diretamente sobre as telhas. Porém, no modelo real, outra diferença entre esses modelos é a presença de beirais no modelo sem platibanda, sendo este, o modelo com o melhor PHFT entre os dois. Pode-se concluir então, que na tipologia estudada, os beirais apresentam maior influência positiva no desempenho térmico da edificação, quando comparado à influência da platibanda.

Na **Tabela 33** observa-se que nenhuma das tipologias atingiu o requisito para os níveis intermediário e superior de desempenho, porém, o modelo com telha sanduíche apresentou o melhor resultado, com valores significativamente maiores que os modelos com outras telhas.

É importante notar que o percentual de horas de ocupação dentro de uma Faixa de Temperatura (PHFT) não quantifica perfeitamente o conforto térmico dos ocupantes, a diferença da sensação de conforto entre dois modelos com diferentes telhas pode ser mais significativa do que a diferença entre os PHFT destes mesmos modelos.

Tabela 33 – Verificação do critério $PHFT_{UH}$ – níveis intermediário e superior.

Critério PHFT - níveis intermediário e superior				
Cobertura		$\Delta PHFT$	$\Delta PHFT_{\min}$	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{\min}$
PVC	Cerâmica	3,036	13,226	Não atende
	Concreto	1,687	13,226	Não atende
	Fibrocimento	2,791	13,230	Não atende
	Fibrocimento com platibanda	1,363	13,131	Não atende
	Sanduíche	11,026	13,241	Não atende
Laje	Cerâmica	5,060	13,226	Não atende
	Concreto	4,673	13,226	Não atende
	Fibrocimento	4,521	13,230	Não atende
	Fibrocimento com platibanda	3,224	13,131	Não atende
	Sanduíche	11,058	13,241	Não atende

Fonte: A autora, 2022.

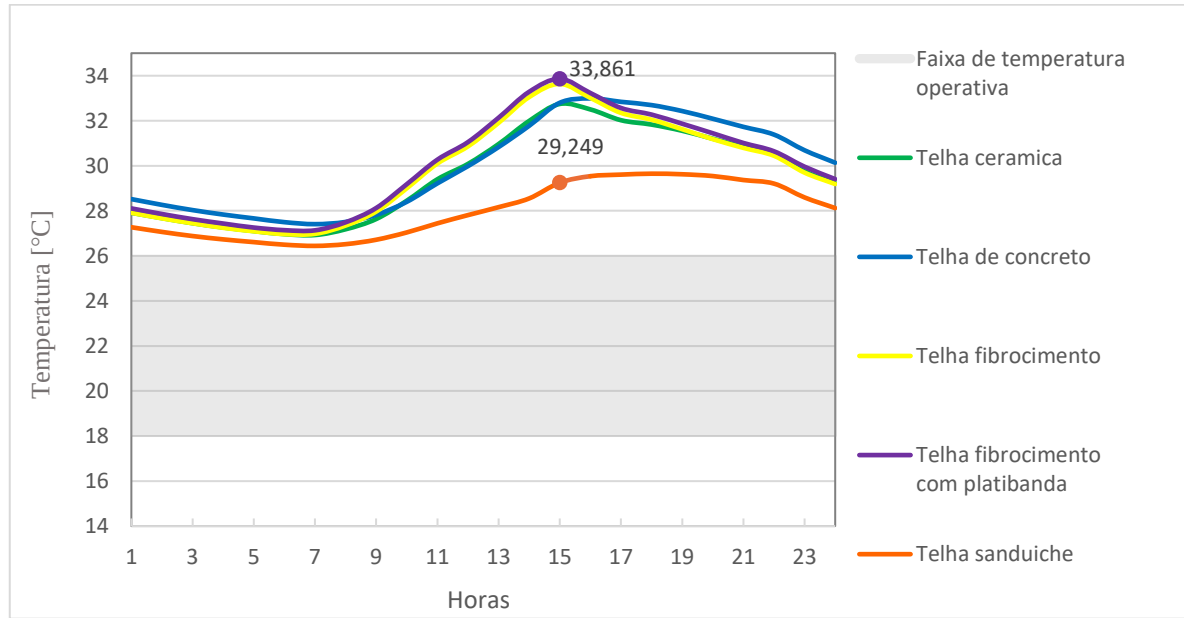
Observando o comportamento da edificação em dias críticos, primeiramente, foram determinadas as temperaturas internas médias diárias para cada um dos dez casos, em seguida, foi calculada a média entre os valores de cada ambiente de permanência prolongada e, logo após, a média entre os 24 valores diários. Foi observado que o dia 31 de dezembro apresenta a maior temperatura média para a tipologia simulada, e o dia 26 de junho a menor temperatura média (resultados unânimes entre todos os casos analisados, independentemente do tipo de cobertura e a presença de laje ou forro de PVC).

A **Figura 23** apresenta o comportamento das temperaturas internas no 31 de dezembro, para as telhas com forro PVC.

Observa-se que a telha cerâmica e a telha de concreto possuem comportamento similar, assim com a telha fibrocimento com e sem platibanda. Todas as temperaturas são superiores a 26°C (limite superior da faixa de temperatura operativa), portanto, de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2021a) essas temperaturas resultam em desconforto térmico para os ocupantes. Entretanto, a telha sanduíche apresenta temperaturas menores que as outras telhas durante todo o dia, às 14:00h, por exemplo, a temperatura obtida é 4,74°C

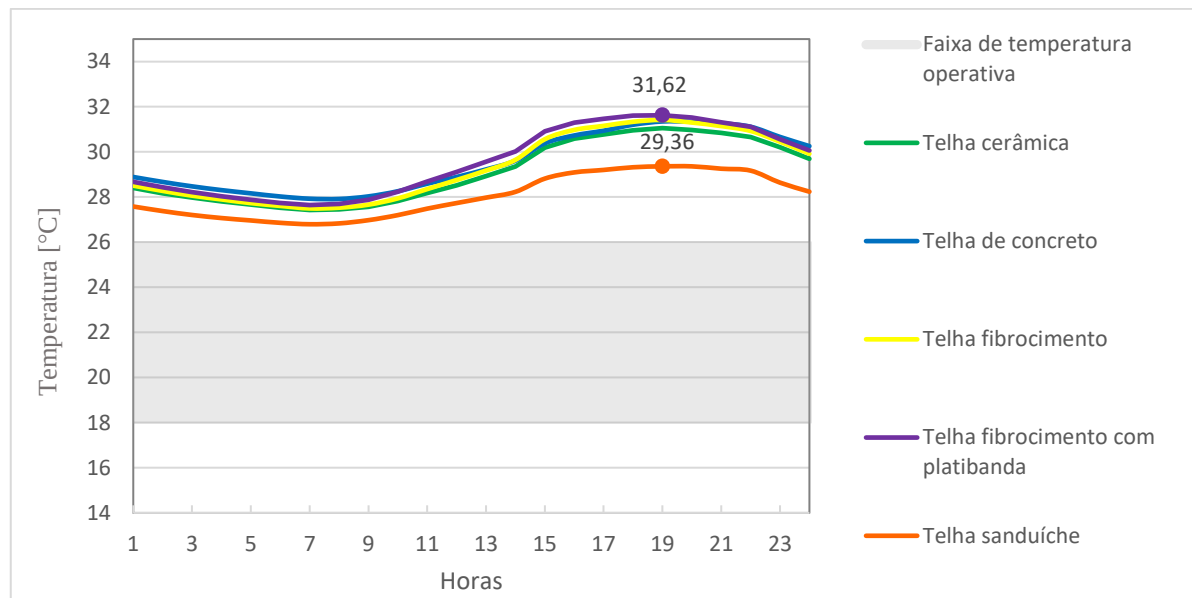
inferior à temperatura da telha fibrocimento com platibanda. Assim, mesmo ambas apresentando valores fora da faixa de temperatura operativa, a sensação de conforto térmico do ocupante será superior na tipologia com telha sanduíche.

Figura 23 – Temperaturas horárias do dia 31 de dezembro – PVC.



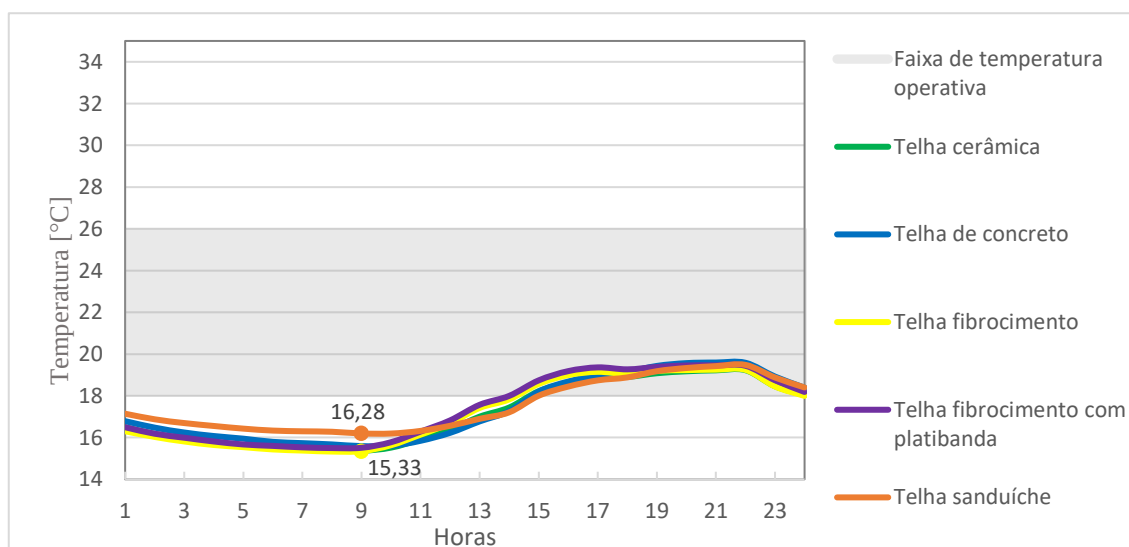
Fonte: A autora, 2022.

A **Figura 24** apresenta as temperaturas horárias do dia 31 de dezembro para as telhas com laje. Nota-se que a variação de temperatura ao longo do dia e entre as telhas é menor que nos casos com forro PVC, sendo que a maior diferença de temperatura entre telhas é de 2,3°C, às 18:00h, horário que apresenta as maiores temperaturas.

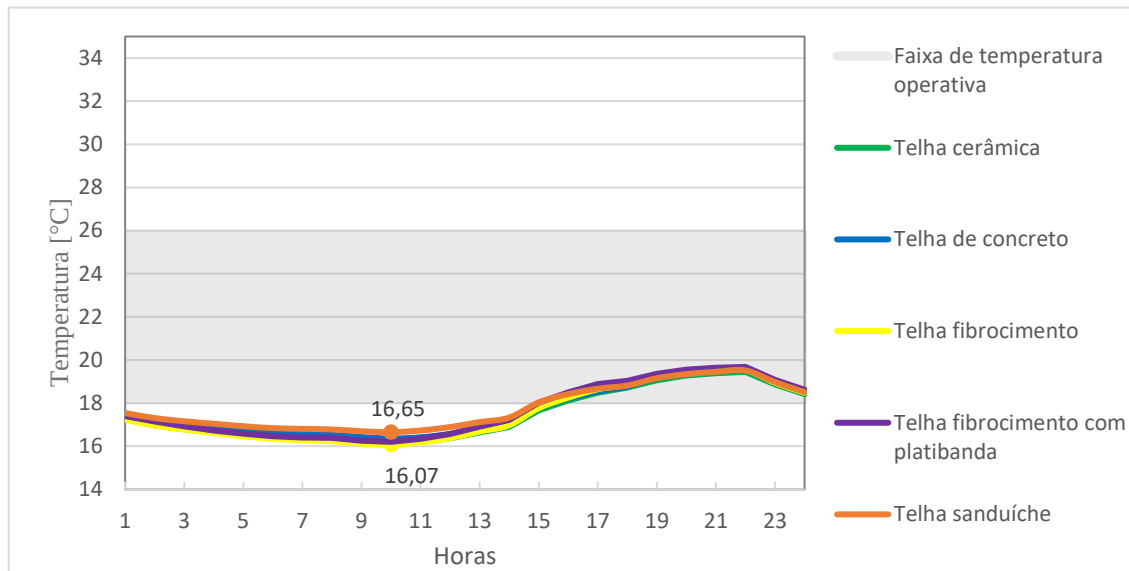
Figura 24 – Temperaturas horárias do dia 31 de dezembro – Laje.

Fonte: A autora, 2022.

Pode-se observar na **Figura 25** e na **Figura 26**, o comportamento das telhas no dia com a menor média de temperaturas internas. A menor temperatura observada foi de 15,33°C, às 10:00h, no modelo com telha fibrocimento, nesse mesmo horário, também ocorre a maior variação de temperatura entre duas telhas do dia, de 0,948°C. A maior variação de temperatura para os modelos com laje é de 0,58°C. Além de apresentarem menores variações ao longo do dia, pode-se notar que as diferenças entre temperaturas de diferentes telhas nesse período são inferiores às observadas no verão.

Figura 25 – Temperaturas horárias do dia 26 de junho – PVC.

Fonte: A autora, 2022.

Figura 26 – Temperaturas horárias do dia 26 de junho – Laje.

Fonte: A autora, 2022.

7.2.1.3 Carga Térmica

Os modelos simulados apresentam carga térmica de aquecimento apenas em junho, julho e agosto, nos outros meses a temperatura nos ambientes e horários analisados não apresentam valores inferiores à 21°C (temperatura de *setpoint* para ativação do sistema de aquecimento) (ABNT, 2021a).

Examinando os resultados da carga térmica, novamente percebe-se a grande diferença do comportamento da cobertura entre o inverno e o verão, a média da carga térmica total obtida nas simulações para o mês de julho é de 98,27kWh para os modelos sem laje e de 67,02kWh para os modelos com laje. Já para fevereiro, as médias são de 816,32kWh e 820,75kWh para os modelos com PVC e com laje, respectivamente. Os valores de carga térmica encontrados estão apresentados na **Tabela 34**.

Tabela 34 – Valores de $C_{gTT_{UH}}$.

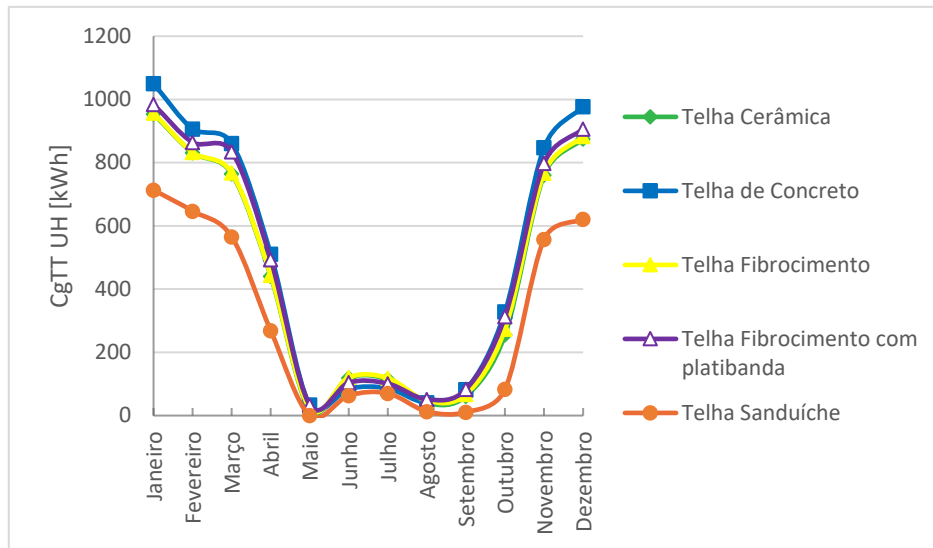
Carga térmica [kWh]				
Cobertura		Carga térmica de aquecimento	Carga térmica de refrigeração	Carga térmica total
PVC	Cerâmica	261,48	4977,04	5238,52
	Concreto	189,71	5621,85	5811,56
	Fibrocimento	269,49	5032,41	5301,90
	Fibrocimento com platibanda	230,16	5338,11	5568,26
	Sanduíche	146,64	3468,05	3614,70
	Desvio padrão	45,980	746,481	773,486
Laje	Cerâmica	160,40	4902,25	5062,65
	Concreto	123,99	5490,79	5614,77
	Fibrocimento	179,08	4967,24	5146,31
	Fibrocimento com platibanda	115,06	5354,85	5469,91
	Sanduíche	103,29	3454,64	3557,93
	Desvio padrão	28,647	724,941	734,744

Fonte: A autora, 2022.

As **Figuras 27 e 28** mostram os gráficos desenhados a partir dos resultados da carga térmica total (carga de refrigeração e de aquecimento) dos modelos com forro PVC e com laje, respectivamente.

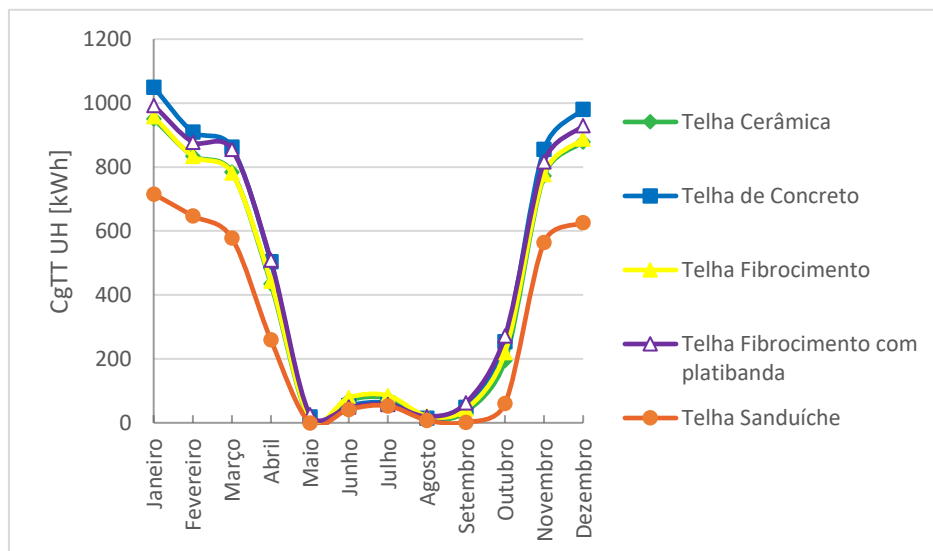
Nota-se que a diferença entre o comportamento da telha sanduíche e das demais telhas é mais expressiva ao compararmos a carga térmica, ao invés do PHFT. Por exemplo, supondo que dois modelos, em determinado horário, apresentem temperatura média de 34°C e 31°C, esses valores contribuiriam com o mesmo peso no cálculo do PHFT, porém, com pesos diferentes na carga térmica, já que o sistema de refrigeração do modelo com 34°C necessitaria de maior quantidade de energia para atingir a temperatura do *setpoint*.

Figura 27 – Carga térmica total mensal para cada tipo de telha – PVC.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 28 – Carga térmica total mensal para cada tipo de telha - Laje.



Fonte: A autora, 2022.

Observando as **Figuras 27 e 28** percebe-se que a diferença na carga térmica entre os modelos é maior nos meses quentes.

Nos modelos com PVC, a carga total da telha sanduíche (3614,70 kWh) equivale a 69% da carga térmica da telha com a segunda menor carga térmica, telha cerâmica (5238,52 kWh), e 62% da carga da telha com a maior carga térmica, telha de concreto (5811,56 kWh). Nos modelos com laje, as porcentagens citadas são de 70% e 63%, respectivamente.

A avaliação da carga térmica é realizada através da redução da carga térmica total da UH no modelo real em relação ao modelo de referência (RedCgTT). Como o PHFTUH,ref de todos os modelos é inferior a 70%, qualquer redução na carga térmica classifica a tipologia no nível intermediário. Para a classificação no nível superior a redução deve ser maior que 40%, os resultados estão dispostos na **Tabela 35**. Apenas a cobertura com telha sanduíche, com forro e com PVC, atingiu o nível superior (ABNT, 2021a).

Tabela 35 – Verificação do critério RedCgTT – níveis intermediário e superior.

Critério RedCgTT					
Cobertura		RedCgTT (%)	RedCgTTmín (%) Nível intermediário	RedCgTTmín (%) Nível superior	Nível
PVC	Cerâmica	14,18	0	40	Intermediário
	Concreto	4,79	0	40	Intermediário
	Fibrocimento	13,63	0	40	Intermediário
	Fibrocimento com platibanda	7,76	0	40	Intermediário
	Sanduíche	41,25	0	40	Superior
Laje	Cerâmica	17,06	0	40	Intermediário
	Concreto	8,01	0	40	Intermediário
	Fibrocimento	16,16	0	40	Intermediário
	Fibrocimento com platibanda	9,39	0	40	Intermediário
	Sanduíche	42,17	0	40	Superior

Fonte: A autora, 2022.

Analisando todas as verificações nota-se que, com exceção das coberturas com telha de concreto e telha de fibrocimento com platibanda (ambas no caso com forro de PVC) que não atingem o nível mínimo para o critério de temperatura operativa máxima, todos os modelos são classificados no nível mínimo.

7.3 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Dentre os modelos analisados, a cobertura com telha fibrocimento e platibanda apresentou os maiores valores de temperaturas operativas no verão, sendo a cobertura utilizada na maioria das edificações residenciais geminadas em Foz do Iguaçu. Em contrapartida, a telha sanduíche, que possui inclinações de instalação próximas à da telha fibrocimento, apresentou as menores temperaturas no verão e maiores temperaturas no inverno, além de menor carga térmica anual e maior PHFT (percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa).

A telha cerâmica, prevalente em coberturas sem platibanda, resultou em cargas térmicas anuais 45% e 43% maiores que as cargas térmicas dos modelos com telha sanduíche com forro PVC e com laje, respectivamente. Analisando os valores do PHFT (percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa), a telha cerâmica apresenta o segundo maior valor, atrás apenas da telha sanduíche. A telha de concreto, dentre os modelos com laje e com forro PVC, exibiu os maiores valores de carga térmica anual.

Ao comparar os resultados do modelo com beiral, com os valores do modelo sem beiral e com platibanda, percebe-se que a presença do beiral resulta em influência positiva no desempenho térmico da edificação. Por esse motivo, principalmente em residências sem beirais, recomenda-se a adoção de elementos de sombreamento nas fachadas da edificação.

Considerando o conforto térmico dos usuários e os resultados das simulações computacionais realizadas para o clima de Foz do Iguaçu, pode ser mais vantajoso investir financeiramente em uma cobertura com telhas sanduíche sem laje, em oposição à um sistema com laje e telha cerâmica, telha de concreto ou fibrocimento.

8 CONCLUSÕES

O presente trabalho foi elaborado com o objetivo de estudar, através de simulação computacional, a influência do sistema de cobertura no desempenho térmico de uma edificação residencial térrea em Foz do Iguaçu-PR, tendo-se em vista os materiais mais utilizados na região. Na construção dos modelos para a simulações e na avaliação dos resultados foram considerados as diretrizes da norma de desempenho ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021a).

Através dos resultados, nota-se que nos meses com as temperaturas mais elevadas, novembro a março, o desempenho térmico da edificação é crítico. Nesse período, nenhum dos modelos simulados apresenta $PHFT_{UH}$ maior que 15%. No inverno todos os modelos obtiveram $PHFT_{UH}$ superior a 60%, com carga térmica anual de aquecimento representando, em média, apenas 4,3% da carga térmica total.

Nenhuma das tipologias atingiu os requisitos para os níveis intermediário e superior de desempenho, porém, os modelos com telha sanduíche apresentaram os melhores resultados, com os menores valores de carga térmica total e maior quantidade de horas dentro da faixa de temperaturas operativas. Na avaliação do PHFT, para os dois modelos com telha sanduíche, o valor de $\Delta PHFT$ encontrado foi de 11%, sendo que com um $\Delta PHFT$ de 13,24% a edificação seria classificada no nível superior. Observa-se que no estudo realizado por Patrícia Teixeira sobre a eficiência termoenergética dos sistemas de coberturas para edificações residenciais em Foz do Iguaçu, os melhores resultados também foram alcançados em uma tipologia com telha sanduíche (denominada também como telha termoacústica) (TEIXEIRA, 2022), o que enfatiza o bom desempenho térmico obtido com o emprego desse tipo de telha.

Nos fatores avaliados, a telha sanduíche indicou melhores resultados em termos de desempenho térmico dentre as coberturas estudada neste trabalho. Nota-se a importância da transmitância térmica da cobertura. Enquanto os modelos com telha sanduíche apresentam a menor transmitância dentre os casos estudados, os modelos com telha de concreto e telha fibrocimento com platibanda (ambos com forro PVC) apresentam valores elevados, 2,68 e 2,78, respectivamente, e não atenderam ao nível mínimo de desempenho térmico. Estes resultados confirmam as recomendações da NBR 15220 (ABNT, 2005d) para a Zona Bioclimática 3, que indica cobertura leve e isolada com transmitância térmica inferior a 2,00 W/m².K.

Dentre os modelos com forro e os modelos com laje, os últimos atingiram melhores resultados, especialmente durante o inverno. Porém, nos meses quentes, por apresentar maior capacidade térmica, a cobertura com laje perde menor quantidade de calor no período noturno do que a cobertura sem laje, resultando em temperaturas mais altas.

Um ponto notado durante a pesquisa foi a falta da disponibilidade de informações das propriedades térmicas dos materiais pelos fabricantes, como absorvância, espessura, densidade e calor específico, por exemplo, características que influenciam diretamente no desempenho térmico dos sistemas construtivos e na correta especificação dos materiais.

Com base nos resultados, conclui-se que, para uma edificação residencial unifamiliar construída em Foz do Iguaçu – PR, a telha sanduiche com laje de concreto apresentou um desempenho térmico favorável, com influência positiva na redução das cargas térmicas.

Por fim, percebe-se a importância de priorizar soluções construtivas voltadas à melhoria do desempenho térmico da edificação no verão. Por esse motivo, uma sugestão para trabalhos futuros é o estudo da influência de elementos de sombreamento na edificação e de isolantes térmicos combinados com a telha sanduíche. Outro interessante ponto de estudo, seria a análise do impacto econômico das soluções para o conforto térmico, considerando o custo de implantação e o tempo de retorno do investimento (*payback*), através da economia nos sistemas de refrigeração e aquecimento.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. M. **Conforto térmico e eficiência energéticas em edifício multifamiliar na cidade de Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmica do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas, 2009. Disponível em: <https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-97692/conforto-termico-e-eficiencia-energetica-em-edificio-multifamiliar-na-cidade-de-maceio>. Acesso em: 24 nov. 2022.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE 140-2020 – method of test for evaluating building performance simulation software**. USA, Atlanta. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **ABNT NBR 12721: Avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios**. Rio de Janeiro: 2005a.

(ABNT). **ABNT NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro: 2005b.

(ABNT). **ABNT NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e de componentes de edificações**. Rio de Janeiro: 2005c.

(ABNT). **ABNT NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro: 2005d.

(ABNT). **ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: 2021a.

(ABNT). **ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 5: Requisitos para sistemas de cobertura**. Rio de Janeiro: 2021b.

BRASIL PLANET. Foz do Iguaçu. Disponível em: https://www.brasilplanet.com.br/turismobrasil/Foz_do_Igua%C3%A7%C3%BA/Foz_do_Igua%C3%A7%C3%BA_39.asp. Acesso em: 24 nov. 2022.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de Edificações Habitacionais: guia orientada para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. Brasília: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (CB3E). **Classificação de Climas Brasileiros Empregada na Atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações**. Florianópolis, 2017. Disponível em: http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Relatorio_GruposClimaticos.pdf. Acesso em: 24 nov. 2022.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (CB3E). **Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Florianópolis, 2018. Disponível em: http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Novo%20m%C3%A9todo%20avalia%C3%A7%C3%A3o%20da%20efici%C3%Aancia%20energ%C3%A9tica%20de%20edifica%C3%A7%C3%B5es%20residenciais_0.pdf. Acesso em: 24 nov. 2022.

CLIMATE ONE BUILDING. **WMO Region 3 South_America**. 2021. Disponível em: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html. Acesso em: 24 nov. 2022.

CHVATAL, K. M. S. Avaliação do Procedimento Simplificado da NBR 15575 para Determinação do Nível de Desempenho Térmico de Habitações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 119-134, out./dez. 2014. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/45677/32697>. Acesso em: 24 nov. 2022.

CORBELLA, O. **Em Busca de Uma Arquitetura Sustentável para os Trópicos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Revan, 2009.

ELETROBRAS. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos na Classe Residencial**. 2016. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-66/Cap2_Texto.pdf. Acesso em: 24 nov. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional**, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020ab%202019Final.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2022.

(EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**, 2018. 43 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2022.

(EPE). **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2018. 43 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf. Acesso em: 24 nov. 2022.

DONAIISKY, E.; OLIVEIRA, G. H. C.; MENDES, N. Algoritmos pmv-mbpc para conforto térmico em edificações e aplicação em uma célula-teste. **Controle e Automação**, v. 21, n. 1, p. 1–13, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-17592010000100001>.

FOZ DO IGUAÇU. **Complementar nº 3 data 16 de julho de 1991: dispõe sobre código de obras e edificações do município de Foz do Iguaçu, revoga a lei nº 200/58, e dá outras providências.** Foz do Iguaçu: 1991. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/codigo-de-obras-foz-do-iguacu-pr>. Acesso em: 3 maio 2022.

FROTA, A. B; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico.** 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001. v.1, n.5, ago., 2017.

IBGE. **Relatório de estação geodésica.** Foz do Iguaçu: 2018. Disponível em: <http://www.bdg.ibge.gov.br/bdg/pdf/relatorio.asp?L1=1715N>. Acesso em: 24 nov. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Tecnologia e Inovação,** São Paulo, v.1, n.6, dezembro, 2017.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 3. ed. Rio de Janeiro: PROCEL, 2014.

LABEEE. **Arquivos IDF.** UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, 2020. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/idfs-modelo.rar>. Acesso em: 24 nov. 2022.

MARTINS, K. H. **Análise do desempenho térmico e energético de painéis CLT nacionais para o clima de Foz do Iguaçu-PR.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA). Foz do Iguaçu, 2022. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/6861>. Acesso em: 16 dez. 2022.

MASCARÓ, J. L. **O custo das decisões arquitetônicas.** Porto Alegre, Sagra-Luzzatto, 2010.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. . Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista Técnico Científica do CREA-PR**, v. V1, p. 1-18, 2013. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/14/10>. Acesso em: 24 nov. 2022.

RORIZ, M. **Classificação de Climas no Brasil - Versão 3.0.** São Carlos: 2014. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf. Acesso em: 24 nov. 2022.

RORIZ, M. **Uma Proposta do Zoneamento Bioclimático Brasileiro.** São Carlos: 2012. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Proposta_Revisao_Zoneamento_Bioclimatico.pdf. Acesso em: 24 nov. 2022.

ROSSI, F. A; KRUGER, E. L.; BRODE, P. Definição de faixas de conforto e desconforto térmico para espaços abertos em Curitiba, PR, com o índice UTCI. *Ambient. constr.*, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 41-59, Mar. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212012000100004>.

SACHT, H. M. et al. (2020). Análise de conforto urbano do marco das Três Fronteiras em Foz do Iguaçu-PR. *ACE: Architecture, City and Environment*, 15(43), 8295. DOI: <http://dx.doi.org/10.5821/ace.15.43.8295>.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldados *in loco*: avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, 2008. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-17102008-114925/publico/HeleniceSacht.pdf> . Acesso em: 24 nov. 2022.

SAMPAIO, C. A. de P.; CARDOSO, C. O.; SOUZA, G. P. **Temperaturas superficiais de telhas e sua relação com o ambiente térmico**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.31, n.2, p.230-236, mar./abr. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000200003>.

SANTOS, T. L.; PORTO, F. H. F.S.; SILVA, A. S. Análise da correlação entre conforto e desempenho térmico em habitações de interesse social por simulação computacional. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 211-229, jun. 2020. DOI: <http://doi.org/10.1590/s1678-86212020000200396>.

SENGER, S. C. T. **Determinação das propriedades térmicas de materiais de construção**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/1268/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20Sandra.Senger.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 24 nov. 2022.

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. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/45644>. Acesso em: 24 nov. 2022.

TABARELLI, G. **Influência do sistema de cobertura no comportamento térmico de edificações multifamiliares na Zona Bioclimática Brasileira 2**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/14727/DIS_PPGEC_2017_TABARELLI_GIC_ELI.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 24 nov. 2022.

TEIXEIRA, P. S. **Análise da eficiência termoenergética dos sistemas de coberturas para edificações residenciais em Foz do Iguaçu, Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil.) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, 2022. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/6902>. Acesso em: 24 nov. 2022.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**. 6 ed, Vol. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

VIAJE PARANÁ. **Foz do Iguaçu**. Disponível em <http://www.viajeparana.com/Foz-do-Iguacu>. Acesso em: 24 nov. 2022.

WEATHERSPARK. **Condições meteorológicas médias de Foz do Iguaçu**. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/29508/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Foz-do-Igua%C3%A7u-Brasil-durante-o-ano> . Acesso em: 24 nov. 2022.